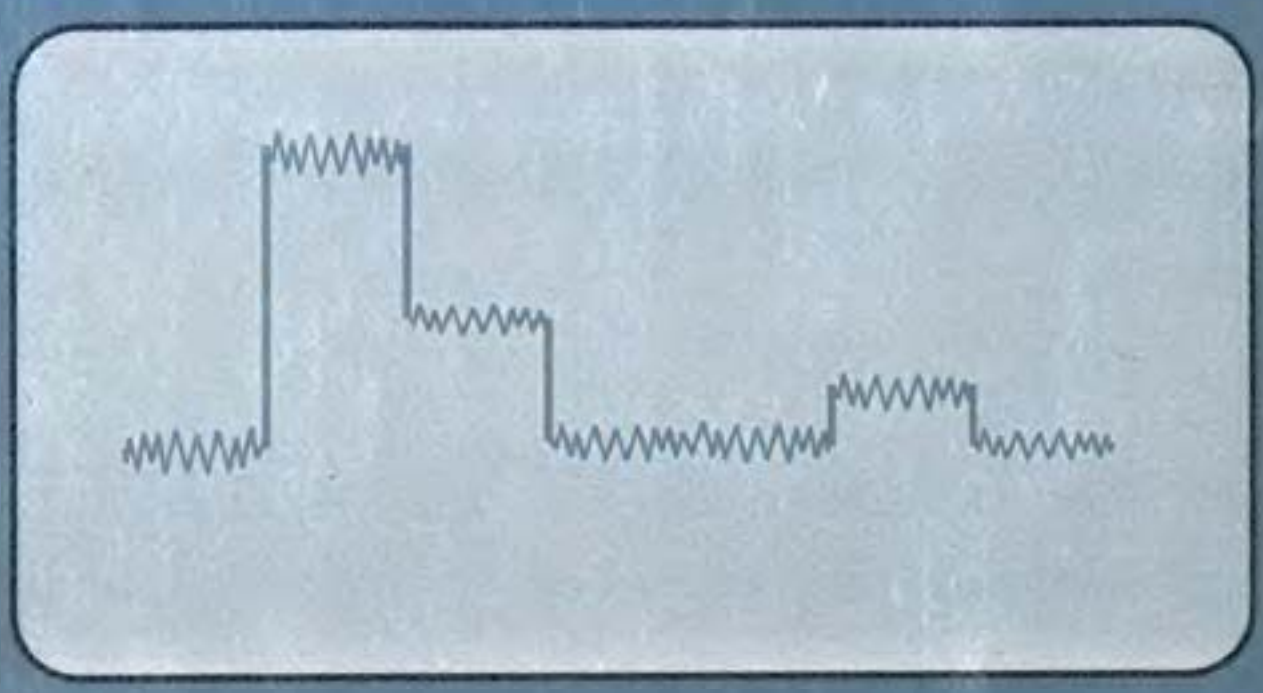
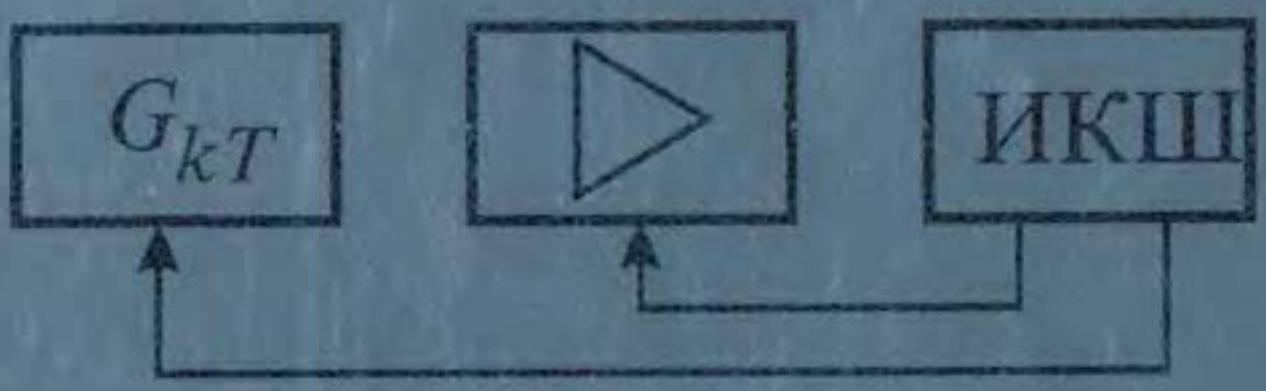
К.И. Алмазов-Долженко

КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА И ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ НА СВЧ





К.И. Алмазов-Долженко

КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА И ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ НА СВЧ

Под редакцией академика Н.Д.Девяткова

МОСКВА
Научный мир
2000

УДК 621.396.669
А - 51
ББК – 32.841
ISBN 5–89176–084–3

Алмазов-Долженко К.И.
Коэффициент шума и его измерение на СВЧ
– М.: Научный мир, 2000. – с.240

Обобщены и систематически изложены основные вопросы, связанные с практической оценкой чувствительности усилительных и приемных устройств СВЧ диапазона.

Рассматривается нормирование условий при измерении "коэффициента шума" ($K_ш$), "шумовой температуры" ($T_у$") и системы шумовых параметров усилителя в рассогласованном тракте. Сведения о шумовых параметрах приводятся в объеме, необходимом для понимания вопросов, связанных с измерениями.

Указываются особенности измерения шумовых сигналов и используемые методы.

Рассматриваются и анализируются основные методы измерения $K_ш$ и $T_у$ усилительных и приемных устройств. Рассматривается измерение коэффициента усиления ($K_у$) методом "двух генераторов шума".

Приводится описание аппаратуры, используемой для измерения шумовых параметров СВЧ усилительных и приемных устройств. Рассматривается "обобщенная структурная схема" измерителя $K_ш$ (ИКШ) и ее расчет, формулируются требования к отдельным узлам ИКШ. Описываются типовые модели отечественных и зарубежных ИКШ.

Даются справочные данные о генераторах шума (ГШ) и СВЧ узлах, разработанных в ГНПП "Исток", которые могут быть использованы при конструировании ИКШ в любом участке СВЧ диапазона.

Библиография содержит около 200 источников.

Книга предназначается для разработчиков и конструкторов электронных приборов и измерительной аппаратуры диапазона СВЧ, она может быть полезной для студентов ВУЗов соответствующих специальностей.

Под редакцией академика Н.Д.Девяткова

Публикуется при финансовой поддержке ГНПП "Исток"

© К И Алмазов-Долженко 2000
© Научный мир,2000

ISBN 5–89176–084–3

ОТ РЕДАКТОРА

Монография К.И.Алмазова-Долженко “Коэффициент шума и его измерение на СВЧ” посвящена теоретическим и практическим вопросам оценки чувствительности усилительных и приемных устройств в СВЧ диапазоне. Она является обобщением результатов собственной многолетней работы автора и его коллектива в ГНПП “Исток”, а также работ других исследователей по рассматриваемому вопросу.

В книге проводится классификация и уточнение шумовых параметров, используемых для оценки чувствительности СВЧ усилительных приборов, в том числе в СВЧ тракте с рассогласованием. Даются рекомендации по использованию тех или иных шумовых параметров в зависимости от свойств и условий применения исследуемого прибора.

Описываются и анализируются основные методы измерения коэффициента шума и шумовой температуры усилительных устройств. Указываются возможные источники погрешности измерений и пути уменьшения ошибок.

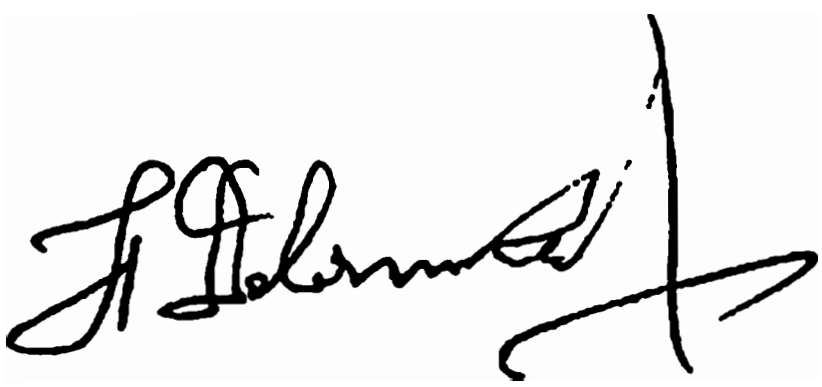
Рассматривается аппаратура для измерения шумов. Вводится понятие “обобщенной структурной схемы измерителя коэффициента шума (ИКШ)”. Формулируются требования к ее составным частям, предлагается методика расчета обобщенной схемы. Рассматриваются варианты более детального построения измерительных схем, назначение отдельных элементов и требования к ним. Кратко рассматриваются генераторы шума различного типа. Описываются некоторые характерные отечественные и зарубежные ИКШ. Рассмотрены методы поверки измерительной аппаратуры.

Даются рекомендации о направлениях дальнейшего развития работ по проблеме оценки чувствительности приемных СВЧ устройств.

Приводится библиография, содержащая около 200 источников и позволяющая при необходимости более подробно ознакомиться с затронутыми вопросами.

В Приложении приводятся сведения о комплекте генераторов шума и СВЧ микрополосковых узлах, разработанных в ГНПП "Исток" [87], которые, могут быть использованы при разработке ИКШ в любом участке СВЧ диапазона.

Работ по шумовым измерениям, в частности, в бурно развивающемся диапозоне СВЧ, выпущено в течение последних лет чрезвычайно мало. Поэтому книга, написанная известным специалистом в этой области, в которой систематически изложены вопросы, актуальные для важного научно-технического направления, будет полезной разработчикам электронных приборов и СВЧ систем, метрологам в соответствующей области, аспирантам и студентам.

Академик  Н.Д.Девятков

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из основных параметров СВЧ усилительных и приемных устройств является их чувствительность. Понятие "чувствительность" в литературе толкуется неоднозначно. В одних случаях его связывают с усилением приемника, необходимым для получения на выходе сигнала с заданным уровнем, в других – с пределом различимости сигнала, определяемым собственным шумом приемного устройства ("пороговая чувствительность"). В дальнейшем будем придерживаться второго подхода к этому понятию, имея в виду, что при разработке приемных устройств более принципиальным является предел чувствительности, устанавливаемый шумовыми свойствами входных электронных приборов.

Теория и техника измерения чувствительности в течение последних десятилетий развивались параллельно с разработкой самих усилительных электронных приборов. Большое количество работ посвящено выяснению критериев и выработке состава параметров, характеризующих чувствительность. Так, например, параметр "коэффициент шума" ($K_ш$), предложенный еще в 40-х годах, неоднократно уточнялся, причем однозначного его определения не существует и по сегодняшний день. При описании поведения усилителя в рассогласованном тракте одного понятия "коэффициент шума" уже недостаточно. Необходима система, состоящая их четырех параметров, в состав которой входит также и коэффициент шума. Для усилителей с предельно малыми шумами более рационально использовать не коэффициент шума, а "шумовую температуру усилителя" ($T_у$).

Наряду с разработкой параметров для характеристики чувствительности, предлагались и совершенствовались методы их измерения. Современные измерители коэффициента шума (ИКШ) представляют собой довольно сложные и совершенные измерительные системы с использованием модуляцион-

ного метода измерений, цифровой обработки шумовых сигналов и достижений микрополосковой техники СВЧ. Они позволяют непосредственно отсчитывать коэффициент шума, следить за его изменениями в процессе настройки усилителя, в некоторых случаях автоматически управлять процессом настройки. Существуют панорамные ИКШ с индикацией частотной зависимости коэффициента шума.

Разработка ИКШ привела к созданию шумовых генераторов СВЧ диапазона и методов их градуировки по спектральной плотности мощности шума (СПМШ). Предложена и получила развитие в Государственном комитете стандартов система поверки генераторов шума (ГШ), имеющая в своем составе температурные эталоны шумового радиоизлучения для всего диапазона СВЧ. Разработан ряд нормалей и ГОСТов по методам измерений коэффициента шума и поверке ИКШ.

По большинству упомянутых выше вопросов существуют многочисленные отечественные и зарубежные публикации, ссылки на многие из них приведены в списке литературы. Вопросы шумовых измерений часто рассматриваются в связи с конкретными разработками тех или иных приборов. В других случаях обсуждаются отдельные специализированные темы. Разбросанность материала затрудняет его восприятие, особенно на начальной стадии изучения.

В настоящей работе на базе имеющихся публикаций и результатов собственных многолетних исследований автора сделана попытка обобщения и систематического изложения вопросов, относящихся к измерению параметров чувствительности, в первую очередь – коэффициента шума СВЧ усилительных и приемных устройств.

Работа состоит из трех разделов.

В первом – обсуждаются основные понятия и параметры, относящиеся к вопросу измерения чувствительности. Уточняются условия введения параметров с целью достижения однозначности при измерениях.

Во втором разделе рассматриваются и анализируются различные методы измерения коэффициента шума, шумовой температуры, коэффициента усиления (передачи) методом двух ГШ.

В третьем разделе приводится краткое описание устройства, работы и параметров некоторых характерных моделей отечественных и зарубежных ИКШ. Рассматриваются погрешности и методы поверки типичного ИКШ.

В Приложении приведен справочный материал по номенклатуре и параметрам разработанных в ГНПП “Исток” [87] (141120, Московская область, г.Фрязино) генераторов шума, СВЧ узлов и трактов, которые могут быть использованы при проектировании ИКШ в любом участке диапазона СВЧ.

В книге нашли отражение результаты работ, проведенных автором и его коллективом, начиная с 60-х годов, в лаборатории метрики шумов ГНПП

"Исток", возглавляемой до 1985 г. ее основателем, кандидатом технических наук Борисом Николаевичем Швецовым, которого автор всегда вспоминает как своего первого учителя.

Всем сотрудникам лаборатории, принявшим участие в этих работах, фамилии которых здесь просто невозможно перечислить, – большая благодарность за оказанную помощь.

Автор признателен А.С.Баженову, Ю.А.Будзинскому, Н.Ф.Кузнецовой, С.В.Пантыкину, В.А.Пузанову, Р.А.Силину, И.С.Фельдблюму, В.В.Чернову, помогавшим в подборе материала, либо высказавшим полезные критические замечания при чтении рукописи, С.И.Веденеевой, Б.И.Олейнеру и В.Д.Семеновичу – охотно предоставившим сведения о проведенных ими работах по созданию панорамных ИКШ, К.В.Юрьеву и Р.И.Фасеевой, любезно предоставившим материалы по микрополосковым элементам, А.И.Мельникову – за консультации о полупроводниковых ГШ.

Автор благодарен начальнику отдела Г.А.Горшкову за постоянное внимание и активную поддержку при работе над книгой.

Особую признательность выражает автор редактору книги академику Н.Д.Девяткову за благожелательность, советы и помощь.

Издание книги стало бы невозможным без понимания и решающей материальной поддержки со стороны Генерального директора ГНПП "Исток" А.Н.Королева.

1. ПАРАМЕТРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ШУМОВЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СВЧ УСИЛИТЕЛЬНЫХ И ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

1.1. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ И ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛОВ

1.1.1. Эквивалентные источники ЭДС и тока

Источник электрического сигнала (генератор), в том числе и шумового, в соответствии с общей теорией эквивалентных схем [100], может быть представлен либо в виде *эквивалентного источника* ЭДС E (рис. 1.1*а*) и внутреннего сопротивления

$$Z_г = R_г + jX_г, \tag{1.1}$$

либо в виде *эквивалентного источника тока* I (рис. 1.1*б*) с бесконечно большим внутренним сопротивлением и параллельно включенной проводимостью, равной выходной проводимости реального источника сигнала

$$Y_г = g_г + jb_г. \tag{1.2}$$

1.1.2. Номинальная мощность. Коэффициент несогласованности

Источник сигнала характеризуется *номинальной* (или "располагаемой") мощностью $P_н$ и полным внутренним сопротивлением $Z_г$.

Номинальной мощностью называется максимальная активная мощность, которую способен отдать источник в согласованную с ним нагрузку (рис. 1.2*а*).

Условием передачи максимальной мощности [146] является комплексно-сопряженное согласование полного внутреннего сопротивления источника сигнала

$$Z_г = R_г + jX_г \tag{1.3}$$

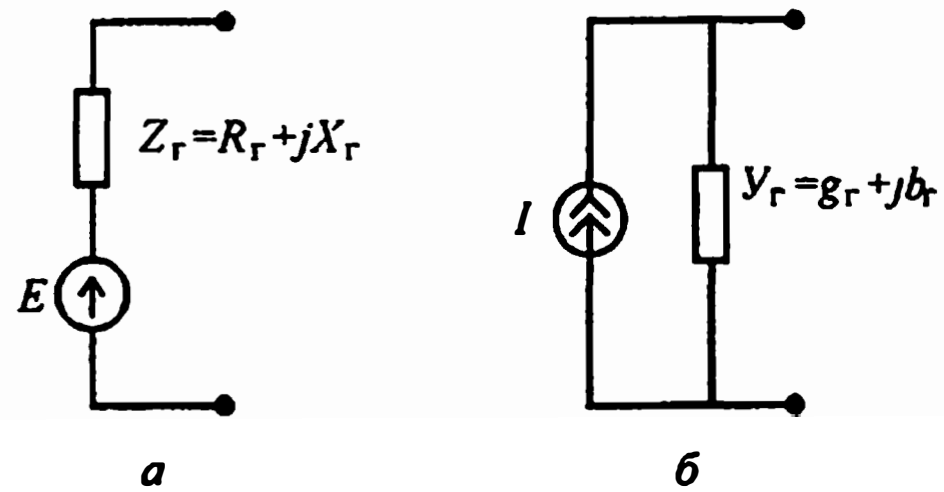


Рис. 1.1. Эквивалентное представление источников сигнала
а – эквивалентный источник ЭДС, *б* – эквивалентный источник тока

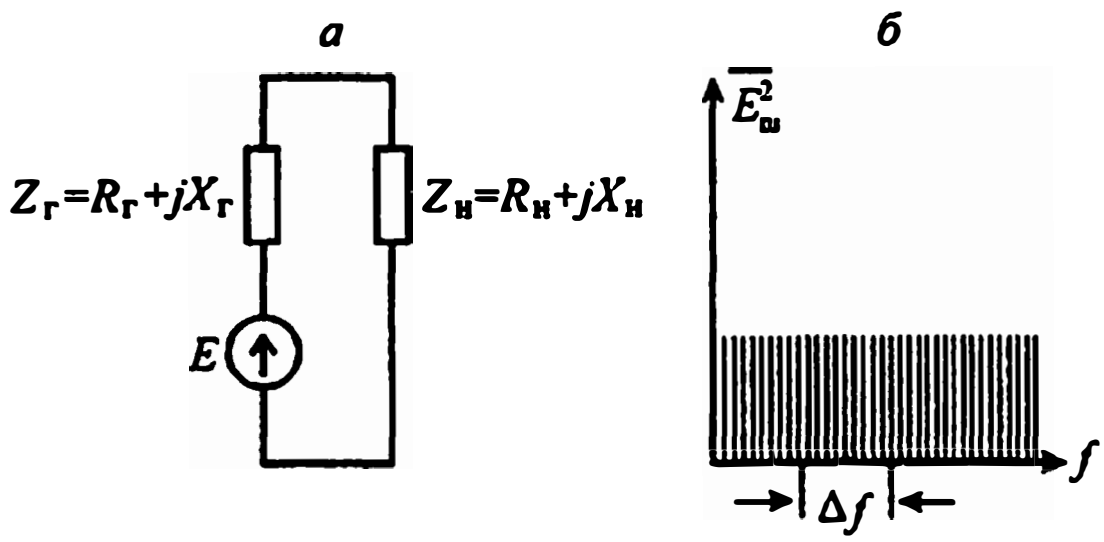


Рис. 1.2. К расчету мощности в нагрузке
а – источник сигнала с нагрузкой, *б* – средний квадрат напряжения шумового сигнала в зависимости от частоты в диапазоне СВЧ

с полным сопротивлением нагрузки

$$Z_н = R_н + jX_н : \tag{1.4}$$

$$Z_г = Z_н^* \tag{1.5}$$

т.е. при

$$R_г = R_н \tag{1.6}$$

$$X_г = -X_н . \tag{1.7}$$

При представлении эквивалентных схем с использованием проводимостей генератора

$$Y_г = g_г + jb_г \tag{1.8}$$

и нагрузки

$$Y_н = g_н + jb_н \tag{1.9}$$

условие комплексно-сопряженного согласования:

$$Y_г = Y_н^* \tag{1.10}$$

или
$$g_г = g_н \tag{1.11}$$
$$b_г = -b_н \tag{1.12}$$

Выражение для номинальной мощности может быть получено из общей формулы, описывающей передачу мощности из генератора в нагрузку [146, с.214]:
$$P = \frac{I^2 g_н}{(g_г + g_н)^2 + (b_г + b_н)^2}. \tag{1.13}$$

При выполнении условий (1.11) и (1.12) из (1.13) номинальная мощность (по схеме рис. 1.1*б*) равна:
$$P_н = I^2 \Big/ 4g_г . \tag{1.14}$$

Если использовать эквивалентную схему (рис. 1.1а), то
$$P_н = E^2 \Big/ 4R_г . \tag{1.15}$$

С учетом (1.14) мощность, передаваемая из генератора в нагрузку при произвольном рассогласовании:
$$P = P_н A , \tag{1.16}$$
где
$$A = \frac{4g_г g_н}{(g_г + g_н)^2 + (b_г + b_н)^2} \tag{1.17}$$
– *коэффициент несогласованности* генератора и нагрузки.

В диапазоне СВЧ более удобно оперировать не с сопротивлениями и проводимостями, а с коэффициентами отражения от источника сигнала и нагрузки. Кроме того, необходимо учитывать влияние отрезка линии передачи, соединяющей генератор с нагрузкой (рис. 1.3). В работе [7] методом суммирования волн в линии передачи при многократных отражениях от нагрузки и выхода генератора получено следующее выражение для коэффициента несогласованности при наличии отражений и малых потерь в линии:

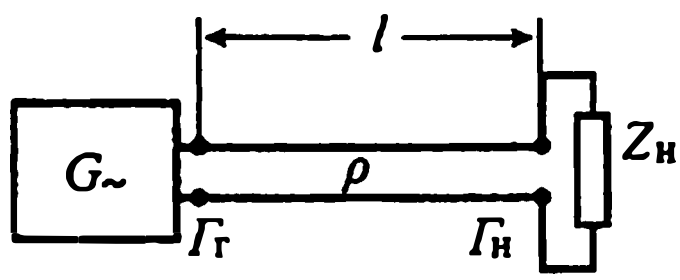


Рис. 1.3. Генератор и нагрузка, связанные линией длинной *l*
$\Gamma_г$, $\Gamma_и$ – коэффициенты отражения, ρ – волновое сопротивление линии

$$A = \frac{(1-|\Gamma_г|^2)(1-|\Gamma_н|^2)e^{-2\alpha l}}{1+|\Gamma_г|^2|\Gamma_н|^2 e^{-4\alpha l} - 2|\Gamma_г||\Gamma_н| cos(\psi_г + \psi_н + 2\beta l)e^{-\alpha l}}, \quad (1.18)$$

где $\Gamma_г = |\Gamma_г| e^{j\psi_г}$ и $\Gamma_н = |\Gamma_н| e^{j\psi_н}$ – коэффициенты отражения по напряжению от генератора и нагрузки,

$|\Gamma_г|$ и $|\Gamma_н|$ – модули коэффициентов отражения,

$\psi_г$ и $\psi_н$ – фазовые углы коэффициентов отражения,

l – длина соединительной линии передачи,

$\beta = 2\pi/\lambda$ – фазовая постоянная,

λ – длина волны распространяющегося сигнала,

α – коэффициент потерь.

При отсутствии потерь ($\alpha = 0$) коэффициент несогласованности

$$A = \frac{(1-|\Gamma_г|^2)(1-|\Gamma_н|^2)}{1+|\Gamma_г|^2|\Gamma_н|^2 - 2|\Gamma_г||\Gamma_н| cos(\psi_г + \psi_н + 2\beta l)}. \quad (1.19)$$

Зависимость коэффициента A от модуля $|\Gamma_г|$ показан на рис. 1.4. Параметром кривых являются значения $|\Gamma_н|$.

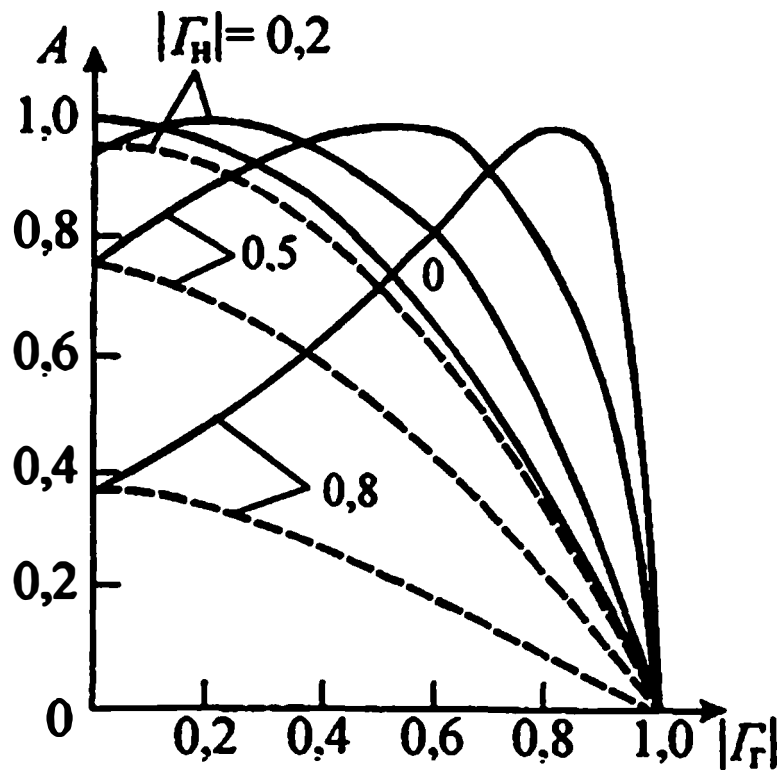


Рис. 1.4. Коэффициент несогласованности A в зависимости от модуля коэффициента отражения $|\Gamma_г|$ при различных $|\Gamma_н|$

Фазовые длины βl выбраны такими, когда при каждом значении модуля $|\Gamma_г|$ получается в одном случае максимальная (сплошные кривые), а в другом – минимальная (пунктирные кривые) передача мощности в нагрузку. Эти условия выражаются следующим образом:

$$\psi_{\text{г}} + \psi_{\text{н}} + 2\beta l = 2\pi n\,, \tag{1.20}$$

где $n = 0,1$, ... – для максимальных значений, и

$$\psi_{\text{г}} + \psi_{\text{н}} + 2\beta l = \pi(2n+1) \tag{1.21}$$

– для минимальных значений.

При любом $|\Gamma_{\text{н}}|$ кривая, соответствующая условию (1.20), достигает своего максимального значения, равного единице, при

$$|\Gamma_{\text{н}}| = |\Gamma_{\text{г}}| = |\Gamma|\,. \tag{1.22}$$

Вместе взятые формулы (1.20) и (1.22) определяют условия комплексно-сопряженного согласования генератора и нагрузки, связанных передающей линией длиною l. Как уже выше сказано, при этом условии из генератора в нагрузку передается максимальная мощность. Доля мощности, передаваемая при любых других условиях согласования, может быть рассчитана по формуле (1.19) или оценена по графикам (рис. 1.4).

Формула (1.16) может быть использована при решении разнообразных задач СВЧ техники.

Таким образом, в *диапазоне СВЧ номинальная мощность* эквивалентного источника сигнала представляет собой наибольшую мощность, которую генератор может отдать в нагрузку при соответствующей настройке системы "генератор–линия передачи–приемник" согласующими устройствами. Она реализуется при условиях:

$$\boxed{\begin{array}{c} |\Gamma_{\text{н}}| = |\Gamma_{\text{г}}|, \\ \psi_{\text{г}} + \psi_{\text{н}} + 2\beta l = 2\pi n \quad (n = 0, 1, 2, ...)\,. \end{array}} \tag{1.23}$$

К достоинствам параметра "номинальная мощность" как характеристики генератора в диапазоне СВЧ можно отнести сравнительную простоту, а главное, однозначность его определения на различных измерительных установках, т.к. критерием настройки согласующим трансформатором всегда является получение максимальных показаний индикатора.

1.2. ФОРМУЛА НАЙКВИСТА ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ШУМОВ

Как известно [100, 166 и др], в электронных приборах имеется большое разнообразие источников шумовых сигналов. Существуют шумы тепловые, дробовые, токораспределения, генерационно-рекомбинационные, шумы газового разряда и др.

Для единообразия подхода часто выделяют наиболее распространенные – тепловые шумы, рассматриваются и описываются их свойства, все остальные виды шумов эквивалентно сводят к тепловым.

Тепловой шум в проводниках возникает благодаря хаотическому движению заряженных частиц, которое не зависит от величины протекающего постоянного тока и приложенной ЭДС.

Найквист [197] в 1928 году на основе термодинамического анализа показал, что дифференциальное значение среднего квадрата действующей величины шумовой ЭДС в полосе частот df на сопротивлении R, находящемся при температуре T, равно:

$$\overline{dE_{ш}^2} = 4kTRp(f)df\,, \tag{1.24}$$

где $k = 1{,}38\cdot10^{-23}$ Вт/Гц·град – постоянная Больцмана,
$R = R(f)$ – активная составляющая сопротивления в Омах,
f – частота,

$$p(f) = \frac{hf}{kT}(e^{hf/kT} - 1)^{-1} \text{ – фактор Планка,} \tag{1.25}$$

$h = 6{,}62\cdot10^{-34}$ дж·сек – постоянная Планка.

Дифференциальное значение среднего квадрата шумового тока выражается через проводимость $g(f)$ по формуле:

$$\overline{dI_{ш}^2} = 4kTg(f)p(f)df\,. \tag{1.26}$$

Выражение для шумовой ЭДС (1.24) может быть использовано при представлении шумового источника по схеме (рис. 1.1*а*), выражение для тока (1.26) – при представлении по схеме (рис. 1.1*б*).

При стандартной комнатной температуре $T_0 = 293$ К [65] в диапазоне СВЧ отношение

$$hf / kT << 1\,, \tag{1.27}$$

множитель $p(f)$ отличается от 1 не более, чем на 0,03% [50], и формулы Найквиста (1.24) и (1.26) принимают вид:

$$\overline{dE_{ш}^2} = 4kTR(f)df\,, \tag{1.28}$$

$$\overline{dI_{ш}^2} = 4kTg(f)df\,. \tag{1.29}$$

В работе [162, с.90] показано, что соотношения (1.28) и (1.29) справедливы не только при общепринятом условии (1.27), но при гораздо более мягком условии:

$$\frac{1}{12}\left(\frac{hf}{kT}\right)^2 << 1. \qquad (1.30)$$

Это соотношение выполняется в сантиметровом диапазоне не только при комнатных температурах, но также и при криогенных. Так, при температуре жидкого гелия (4,2 К) фактор Планка отличается от единицы не более, чем на 1%.

Если активная составляющая сопротивления $R(f)$ или проводимости $g(f)$ в интервале Δf может быть принята постоянной, то средние квадраты ЭДС и тока в полосе Δf определяются равенствами:

$$\boxed{\overline{E_{ш}^2} = 4kTR\Delta f\,,} \qquad (1.31)$$

$$\boxed{\overline{I_{ш}^2} = 4kTg\Delta f\,.} \qquad (1.32)$$

Форма записи (1.31) и (1.32) наиболее распространена.

Из формул (1.31), (1.32) следует, что в указанном приближении (1.30) уровень шумовых токов и ЭДС для теплового шума не зависит от частоты, т.е. тепловой шум имеет равномерный частотный спектр (рис. 1.2*б*). Это так называемый "белый шум".

Шумовой ток и ЭДС обусловлены лишь активной частью проводимости g или активным сопротивлением R импеданса источника. Таким образом, идеальные реактивные элементы радиотехнических схем (емкости, индуктивности, отрезки линий передачи без потерь) не могут служить источниками шумов [37, с.7].

Формулы Найквиста позволяют рассчитать номинальную мощность источника тепловых шумов. Если источник шума нагружен некоторым сопротивлением $R_н$ (рис. 1.2*а*), согласованным с его внутренним сопротивлением $R_г$($R_н = R_г = R$, $X_н = -X_г$), то мощность, передаваемая в нагрузку [50], равна:

$$P_{ш} = \overline{E_{ш}^2}\Big/4R = kT\Delta f\,. \qquad (1.33)$$

Формула (1.33) является фундаментальной, она имеет общий характер и определяет закон передачи шумовой мощности в нагрузку при условии согласования. Соотношение (1.33) носит название *теоремы Найквиста*.

Формула (1.33) может быть выведена и иным путем: на основе использования теоремы Планка [142, с.229] для спектральной плотности излучения тела, находящегося при температуре T, известной из оптики:

$$\varepsilon_f = \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1} + \frac{1}{2}hf \,. \qquad (1.34)$$

В предположении низких частот ($hf/kT << 1$) из (1.34) легко может быть получено уже известное выражение (1.33). В литературе выражение (1.33) встречается также под названием "формула Рэлея-Джинса" [162, с.192].

Формула (1.33) показывает, что номинальная шумовая мощность теплового источника:
– не зависит от величины внутреннего сопротивления (проводимости) генератора,
– не зависит от величины протекающего постоянного тока,
– не зависит от конкретного устройства и материала резистора,
– определяется лишь абсолютной температурой T и рассматриваемой полосой частот Δf.

Напомним, что формула справедлива лишь для источников с равномерным в пределах полосы Δf частотным спектром и при постоянных сопротивлениях источника сигнала и нагрузки в той же полосе.

1.3 СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ МОЩНОСТИ ШУМА И ШУМОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА ИСТОЧНИКА

Пользуясь формулой Найквиста, можно ввести понятие о спектральной плотности мощности шума (СПМШ) и о шумовой температуре. Напомним, что мощность шума в заданной полосе

$$\boxed{P_ш = kT\Delta f \,, \text{(Вт)}.} \qquad (1.35)$$

Спектральная плотность мощности шума представляет собой мощность, приходящуюся на единицу полосы частот при равномерном спектральном распределении шума в этой полосе:

$$\boxed{p_ш = P_ш/\Delta f = kT \,, \text{(Вт/Гц)}.} \qquad (1.36)$$

Используется также безразмерная величина, которая называется *относительной СПМШ* и представляет собой СПМШ, выраженную в единицах kT_0, где T_0 стандартная температура:

$$\boxed{p'_ш = p_ш/kT_0 \,, \text{(отн.ед.)}.} \qquad (1.37)$$

На практике часто используется не весь сигнал шумового генератора, а лишь его часть, превышающая по СПМШ уровень kT_0, Эта величина называется *избыточной СПМШ* и выражается формулой:

$$G = \frac{p_{ш} - p_{шо}}{kT_0}, \text{ (отн.ед.).} \qquad (1.38)$$

где $p_{шо} = kT_0$,

или в децибелах: $G = 10lg\,G$, (дБ). (1.39)

Как видно, СПМШ теплового излучателя является величиной, зависящей только от температуры. Имея это в виду, можно говорить не только о мощности шума и СПМШ, но также о шумовой температуре любых источников шума, описываемых формулами (1.35) и (1.36). При этом под шумовой температурой следует понимать либо реальную (физическую) температуру тепловых шумовых источников, либо эквивалентную температуру для источников шума другого происхождения.

Эквивалентная шумовая температура $T_ш$ источника шума на определенной частоте – это температура равномерно нагретого резистора, СПМШ которого равна СПМШ рассматриваемого источника.

Относительная шумовая температура (t) равна отношению шумовой температуры рассматриваемого источника к шумовой температуре теплового источника, находящегося при стандартной температуре T_0 в той же полосе частот:

$$t = \frac{T_ш}{T_0}. \qquad (1.40)$$

Используется также понятие "*избыточная относительная шумовая температура*":

$$t' = \frac{T_ш - T_0}{T_0} = t - 1, \qquad (1.41)$$

описывающее шум источника над уровнем шума, соответствующим стандартной температуре, т.е. шум, возникающий при включении.

Относительная СПМШ и относительная избыточная СПМШ численно соответственно равны относительной шумовой температуре и относительной избыточной шумовой температуре.

Величины t, t', $p'_ш$ могут быть выражены в дБ:

$$t_{,дБ} = p_{ш,\,дБ} = 10lg\,t = 10lg\,T_ш/T_0\ , \qquad (1.42)$$

$$t'_{,дБ} = 10lg\,t' = 10lg\left(T_ш/T_0 - 1\right). \qquad (1.43)$$

Параметры СПМШ и шумовая температура, также как и мощность шума, могут рассматриваться при различных условиях согласования. При выполне-

нии условий полной передачи мощности в нагрузку (1.5, 1.10) СПМШ и шумовая температура носят название *номинальных*.

1.4 ШУМОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Формула Найквиста (1.24) используется также при введение параметра "шумовое сопротивление", характеризующего шумовые свойства активных элементов схемы (ламп, транзисторов и т.д.). При этом шумы, возникающие в активном элементе по различным причинам, представляются в виде тепловых шумов, возникающих на некотором резисторе, находящемся при стандартной температуре T_0. Величина этого резистора, который называют "*шумовым сопротивлением*", определяется соотношением:

$$R_{ш} = \overline{E_{ш}^2} / 4kT_0\Delta f , \qquad (1.44)$$

где $\overline{E_{ш}^2}$ – средний квадрат эффективного значения шумовой ЭДС, действующей в реальной схеме.

Значение $R_{ш}$ является расчетным и, конечно, соответствующий резистор включается в состав схемы символически (рис. 1.5), т.е. не учитывается при расчете сигнальных токов, протекающих в реальных цепях, потерь и т.д.

Аналогичным образом вводится понятие "*шумовая проводимость*" причем ее величина рассчитывается как

$$g_{ш} = \overline{I_{ш}^2} / 4kT_0\Delta f , \qquad (1.45)$$

где $\overline{I_{ш}^2}$ – средний квадрат эффективного значения шумового тока в реальной цепи.

Следует заметить, что параметры $R_{ш}$ и $g_{ш}$ отражают шумовые свойства устройств лишь на некоторой фиксированной частоте, которая обычно указывается. Это связано с тем, что фактически описываются источники, шумы которых могут существенно изменяться в зависимости от частоты.

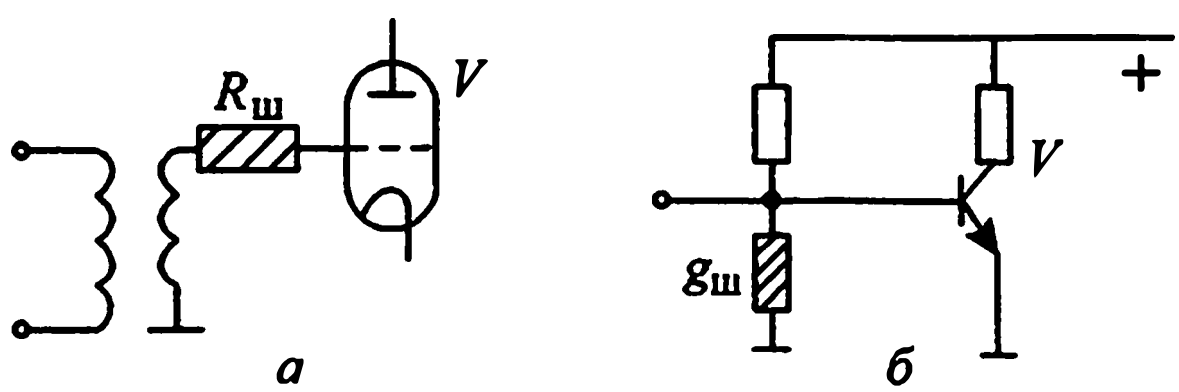


Рис. 1.5. Схемы включения шумового сопротивления (*а*) и шумовой проводимости (б)

Отметим также, что $R_ш$ и $g_ш$ характеризуют ЭДС в цепи, поэтому при низкоомных нагрузках шумовое напряжение должно рассчитываться с учетом сопротивления нагрузки.

На рис. 1.5 *а* и *б* показаны схемы с электронной лампой и транзистором, где шумы каскадов эквивалентно представлены с помощью $R_ш$ или $g_ш$ (эквивалентные элементы заштрихованы). При этом считается, что все остальные элементы схем не шумят.

В эквивалентной схеме, представляющей более сложный активный элемент цепи, может быть несколько источников шума, и замещение их одним шумовым сопротивлением возможно лишь в том случае, когда эти источники корреляционно не связаны друг с другом и не входят в цепи обратной связи [153, с.78]. В противном случае в эквивалентной схеме следует использовать несколько независимых шумовых сопротивлений.

1.5 ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ, КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА, ШУМОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

1.5.1 Отношение сигнал/шум

Источник сигнала (генератор), подключаемый к входу малошумящих устройств при измерении их шумов (рис. 1.6) можно охарактеризовать следующими параметрами:

– ЭДС сигнала E_c,

– ЭДС внутреннего шума $\sqrt{\overline{E_ш^2}}$,

– внутренним сопротивлением $Z_г$.

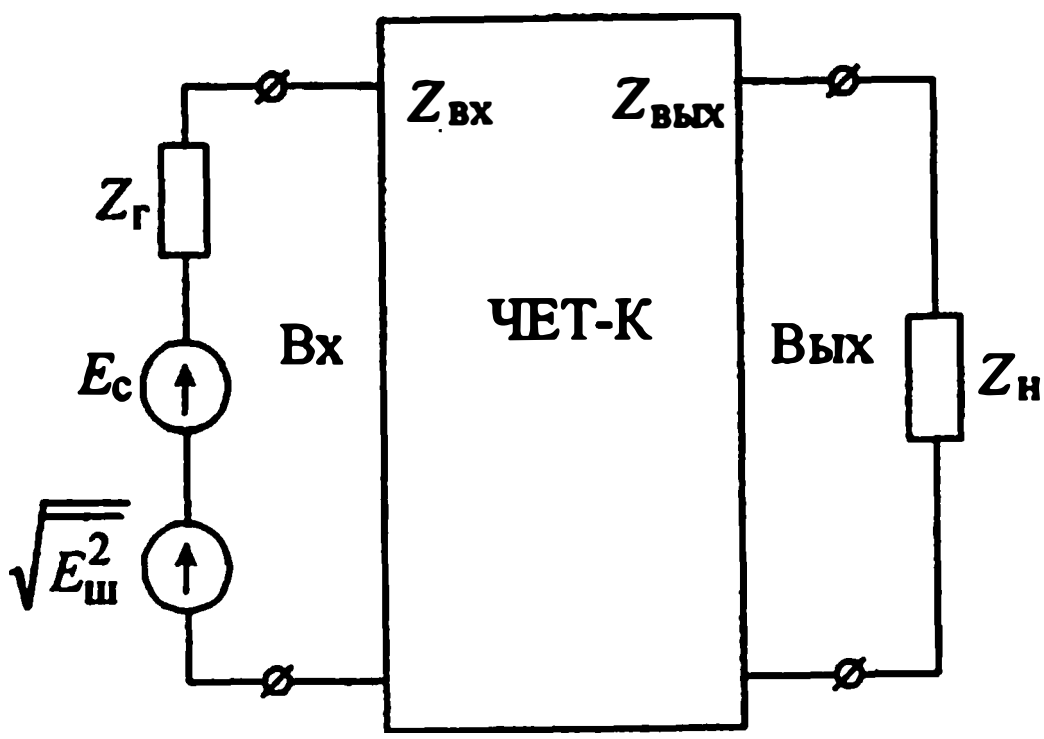


Рис. 1.6. Схема подключения источника сигнала и нагрузки к четырехполюснику

Тот же источник может быть охарактеризован и иначе – с помощью мощностей:

– номинальной мощности сигнала

$$P_{\text{с}} = E_{\text{с}}^2 / 4R_{\text{г}}\,, \tag{1.46}$$

– номинальной мощности шума

$$P_{\text{ш}} = p_{\text{ш}}\Delta f\,, \tag{1.47}$$

а также внутреннего сопротивления генератора

$$Z_{\text{г}} = R_{\text{г}} + jX_{\text{г}}\,, \tag{1.48}$$

где $R_{\text{г}}$ и $X_{\text{г}}$ – активная и реактивная части внутреннего сопротивления.

Последний способ оценки является более удобным для диапазона СВЧ, где обычно измеряются мощности, а не напряжения.

Практическим параметром, часто интересующим потребителя, является отношение мощностей сигнала и шума (С/Ш), передаваемых в нагрузку:

$$\boxed{\text{С/Ш} = P_{\text{с}}/P_{\text{ш}} = \frac{E_{\text{с}}^2}{4R_{\text{г}}} \Big/ p_{\text{ш}}\Delta f\,.} \tag{1.49}$$

После присоединения источника сигнала к входу шумящего четырехполюсника (рис. 1.6) образуется система, которую в совокупности можно рассматривать как новый источник сигнала с выходным сопротивлением $Z_{\text{вых}}$ и сопротивлением нагрузки $Z_{\text{н}}$. Для него могут быть рассчитаны выходные мощности сигнала и шума, а также новое их отношение:

$$(\text{С/Ш})_{\text{вых}} = P_{\text{с вых}} / P_{\text{ш вых}}\,, \tag{1.50}$$

где $P_{\text{с вых}}$, $P_{\text{ш вых}}$ – соответственно номинальные мощности сигнала и шума на выходе.

Это отношение будет меньшим, чем на входе четырехполюсника, т.к. к $P_{\text{ш вх}}$ неизбежно добавляются собственные шумы четырехполюсника.

1.5.2 Определение коэффициента шума. Нормальные условия

Для характеристики шумовых свойств четырехполюсника вводится параметр, называемый "коэффициент шума" [36, 93, 161, 178, 196].

Коэффициент шума ($K_{\text{ш}}$) – это число, показывающее, во сколько раз изменяется (уменьшается) отношение С/Ш на выходе четырехполюсника по сравнению с отношением С/Ш на его входе.

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{с вх}}}{P_{\text{ш вх}}} \Big/ \frac{P_{\text{с вых}}}{P_{\text{ш вых}}}\,. \tag{1.51}$$

Чем больше собственных шумов вносит четырехполюсник, тем больше его коэффициент шума.

Для "идеального" четырехполюсника, т.е. воображаемого четырехполюсника, не имеющего собственных шумов, коэффициент шума принимает минимальное возможное значение, равное единице.

Коэффициент шума может быть выражен также в дБ:

$$\boxed{K_{ш,\,дБ} = 10\,lg\,K_{ш}\,.} \qquad (1.52)$$

При этом его минимальное значение равно нулю.

Понятие "коэффициент шума" введено в работах Норта [196] и Фрииса [178] и в последующем уточнялось в течение ряда лет [36, 37, 93, 161, и др.].

Параметр "коэффициент шума" полезен как при теоретическом анализе шумовых свойств приемных приборов и устройств, так и в практике шумовых измерений.

Для однозначного определения $K_ш$ по формуле (1.51), а также в процессе измерения должны быть уточнены определения входящих в формулу величин и условия измерений. Среди величин, которые нужно регламентировать, в первую очередь, следует выделить:

– полосу частот (Δf),в которой рассматривается коэффициент шума,

– физическую температуру T нагрузки, подключенной к входу четырехполюсника,

– степень согласования четырехполюсника с входной и выходной нагрузками,

– коэффициент передачи четырехполюсника $K_п$.

Характер влияния этих факторов будет обсуждаться подробнее в последующем. Пока с целью возможности дальнейшего однозначного анализа формулы (1.51) примем следующие, так называемые, *нормальные условия при измерении* $K_ш$:

$$\left.\begin{array}{ll} T = T_0 = 293\ \text{K}, & (1) \\ \Delta f \to 0 & (2) \\ Z_г = Z_{вх} = \rho & (3) \\ Z_н = Z_{вых} = \rho & (4) \\ K_п = K_у \to \infty & (5) \end{array}\right\}. \qquad (1.53)$$

Здесь $Z_{вх}$ и $Z_{вых}$ – входное и выходное сопротивления четырехполюсника, ρ – волновое сопротивление линий передачи на входе и выходе четырехполюсника, $K_у$ – коэффициент усиления.

Будем считать, что эти условия всегда выполняются, если иное специально не оговорено.

Практически указанные условия означают, что рассматривается усилитель с большим коэффициентом усиления, имеющий хорошее согласование с входной и выходной линиями передачи, к которым, в свою очередь, подключены согласованные с линией передачи генератор и нагрузка. Коэффициент шума рассматривается в узкой полосе частот Δf, где его значение, а также значения коэффициента усиления, остаются постоянными. Температура входной нагрузки равна комнатной, т.е. близка к T_0.

Проведем преобразования формулы (1.51):

$$K_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{с вх}}}{P_{\text{с вых}}} \cdot \frac{P_{\text{ш вых}}}{P_{\text{ш вх}}} = \frac{1}{K_{\text{у}}} \cdot \frac{P_{\text{ш вых}}}{P_{\text{ш вх}}}, \qquad (1.54)$$

где $K_{\text{у}} = \dfrac{P_{\text{с вых}}}{P_{\text{с вх}}}$ – коэффициент усиления усилителя.

Произведение $P_{\text{ш вх}} \cdot K_{\text{у}}$ представляет собой мощность шума на выходе для случая *идеального усилителя*, т.е. усилителя с теми же параметрами, что и у реального усилителя, но не имеющего собственных внутренних шумов.

На основании этого может быть дано *второе определение* $K_{\text{ш}}$ в следующем виде: коэффициент шума – это число, равное отношению мощности шума на выходе реального усилителя к мощности шума на выходе идеального усилителя при отсутствии сигналов [93].

Как видно, возможно и *третье определение* $K_{\text{ш}}$: коэффициент шума представляет собой отношение суммарной шумовой мощности на выходе усилителя к той ее части, которая обусловлена входной нагрузкой [93].

Что физически представляют собой мощности $P_{\text{ш вх}}$ и $P_{\text{ш вых}}$?

Так как ко входу подключена согласованная нагрузка, находящаяся при температуре T_0, то

$$P_{\text{ш вх}} = kT_0\Delta f\,. \qquad (1.55)$$

Шум на выходе является, во-первых, результатом усиления шума входной нагрузки ($P_{\text{ш вх}}$ $K_{\text{у}}$), во-вторых, результатом действия шумов $P_{\text{шу вых}}$, порождаемых внутри усилителя:

$$P_{\text{ш вых}} = P_{\text{ш вх}} K_{\text{у}} + P_{\text{шу вых}}\,. \qquad (1.56)$$

Мощность внутренних шумов может быть эквивалентно представлена как результат действия некоторого воображаемого источника, подключенного ко входу усилителя, причем, мощность $P_{\text{шу}}$ этого источника определяется из соотношения:

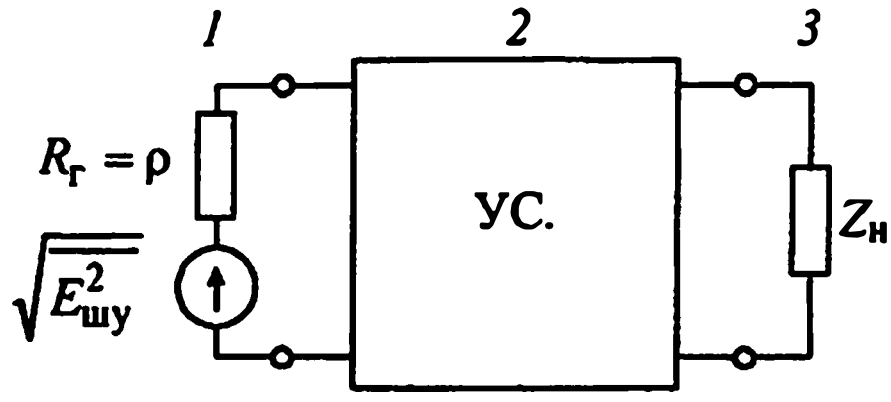


Рис. 1.7. Представление шума усилителя внешним источником
1 – эквивалентный шумовой источник, *2* – бесшумный усилитель, *3* – сопротивление нагрузки

При этом считается, что сам усилитель теперь является полностью бесшумным (рис. 1.7). Внутреннее сопротивление эквивалентного источника $Z_{экв}$ в нашем случае принимается равным волновому

$$Z_{экв} = \rho. \tag{1.58}$$

Теперь выражение (1.54) для $K_ш$ можно преобразовать так:

$$K_ш = \frac{P_{ш\,вх}K_у + P_{шу\,вых}}{P_{ш\,вх}K_у} = 1 + \frac{P_{шу}K_у}{P_{ш\,вх}K_у} = 1 + \frac{P_{шу}}{P_{ш\,вх}}. \tag{1.59}$$

Так как в нашем случае все мощности шума рассматриваются в одинаковой полосе частот, можно перейти к выражению $K_ш$ через эквивалентные шумовые температуры. При этом

$$P_{шу} = kT_у\Delta f, \tag{1.60}$$

где $T_у$ – эквивалентная шумовая температура усилителя, а

$$\boxed{K_ш = 1 + \frac{T_у}{T_0} = \frac{T_0 + T_у}{T_0}.} \tag{1.61}$$

Из (1.61) видно, что коэффициенту шума можно дать *четвертое определение*: $K_ш$ представляет собой выраженную в единицах T_0 суммарную шумовую температуру собственно усилителя ($T_у$) и нагрузки, подключенной к его входу (T_0).

Подчеркнем, что в выражение для $K_ш$, помимо шумов, принадлежащих собственно усилителю, входит составляющая часть, обязанная шуму некоторого внешнего элемента (входной нагрузки), который при реальном включении усилителя может иметь произвольные величину и температуру. Это обстоятельство должно учитываться при расчете и проектировании конкретных малошумящих систем.

1.6 ШУМОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА УСИЛИТЕЛЯ

Как видно из предыдущего, шумовая температура, в отличие от коэффициента шума, характеризует усилитель независимо от шумов внешней нагрузки, подключенной ко входу, которые не всегда известны. В этом смысле она является более первичной и объективной характеристикой усилителя, чем коэффициент шума. Особенно это относится к усилителям с коэффициентами шума, приближающимися к единице. В этом случае параметр "коэффициента шума" начинает терять свою наглядность даже при точно известных шумах входной нагрузки.

Пример.

При изменении $T_у$ от 30 до 60 К, т.е. вдвое, коэффициент шума изменяется лишь на 9 % [26].

Связь между $T_у$ и $K_ш$ определяется формулой:

$$\boxed{T_у = (K_ш - 1)T_0.} \qquad (1.62)$$

Величина

$$t_у = T_у / T_0 = K_ш - 1 \qquad (1.63)$$

называется *относительной шумовой температурой* усилителя.

На рис. 1.8 показана зависимость отношения коэффициента шума к относительной шумовой температуре от величины относительной шумовой температуры. Как видно, при больших $t_у$ это отношение приближается к единице, т.е. оба параметра становятся эквивалентными.

Следует в то же время заметить, что измерение $T_у$ в чистом виде, как будет показано ниже, требует более сложных методов, чем измерение $K_ш$. Поэтому к шумовой температуре обычно обращаются лишь при характеристике усилителей, имеющих $K_ш$ менее 1,5–2 единиц.

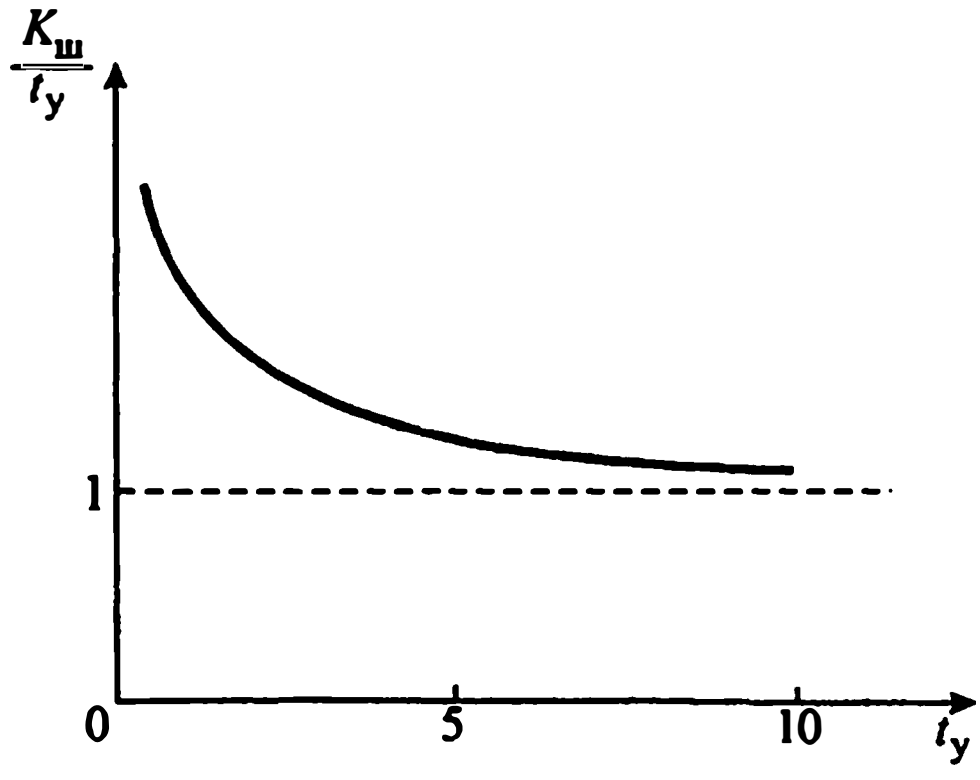


Рис. 1.8. Зависимость отношения $K_ш$ к относительной шумовой температуре от относительной шумовой температуры

1.7 РАЗНОВИДНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА

Нормальные условия (1.53), которые были сформулированы при введении понятия "коэффициент шума", практически выполняются не всегда. В связи с этим рассмотрим разновидности коэффициента шума:
– при различных эквивалентных температурах входной нагрузки,
– при различных полосах частот,
– при различных условиях согласования на входе усилителя.

1.7.1 Коэффициент шума при различных температурах входной нагрузки

Коэффициент шума, измеренный при температуре входной нагрузки $T = T_0$ в литературе называется *стандартным* [65, с.7] и определяется формулой:

$$K_{ш_0} = 1 + \frac{T_у}{T_0}. \qquad (1.64)$$

Рассмотрим $K_ш$ при отклонении условий по температуре от нормальных, т.е. будем считать, что реальная температура $T_р$ входной нагрузки отлична от T_0 :

$$T_р \neq T_0. \qquad (1.65)$$

Это может иметь место в реальных условиях, например, в процессе измерения $K_ш$, когда нагрев нагрузки происходит от генератора шума, подключаемого к входу усилителя. При испытании усилителя, когда к его входу подключена антенна, также вполне возможно отклонение от условия (1.53), т.к. эффективная температура антенны зависит от ее ориентации.

Коэффициент шума, измеренный при реальной температуре входной нагрузки $T_р \neq T_0$, и при условии, что калибровка шкалы ИКШ проводится в единицах T_0, носит название "*реальный* $K_ш$" [153] или "*рабочий* $K_ш$" [90]:

$$K_{ш_р} = \frac{T_р + T_0}{T_0}. \qquad (1.66)$$

Реальный $K_ш$, как видно из его определения, является величиной, зависящей от температуры $T_р$, т.е. неоднозначной. Связь между реальным и стандартным коэффициентами шума определяется очевидной формулой:

$$K_{ш_р} = K_{ш_0} - 1 + t_р, \qquad (1.67)$$

где $t_р = \frac{T_р}{T_0}$ – относительная температура входной нагрузки.

Из (1.67) видно, что при пересчете должна быть известна величина $t_р$.

Реальный $K_{ш}$ есть смысл использовать, например, при расчете предельной чувствительности $P_{мин}$ и определении дальности действия $Д$ радиолокационной системы [145]. Как известно,

$$P_{мин} = K_{ш_р} \cdot kT_0\Delta f \,, \tag{1.68}$$

$$Д \sim \sqrt[4]{1/K_{ш_р}} \,. \tag{1.69}$$

Значение $K_{ш_р}$ при этом может быть измерено или рассчитано по формуле (1.66). Кстати, как видно из формул (1.66) и (1.67), чувствительность определяется не только собственными шумами входного усилителя (или другого входного устройства), но также и шумовым фоном $t_р$ источника сигнала (антенны и др.), который иногда может быть очень большим и даже определяющим.

Таким образом, как основная метрологическая характеристика для сравнения усилителей обычно используется стандартный $K_{ш_0}$, т.к. температурные условия при его измерении практически являются более доступными и стабильными.

Однако, реальный $K_{ш}$ также имеет определенное практическое значение как величина, используемая при расчетах чувствительности приемных систем, а также при измерениях, когда не выполняется условие (1.53).

1.7.2 Коэффициент шума при различной полосе частот

Величины, входящие в формулу, определяющую коэффициент шума:

$$K_{ш} = 1 + \frac{P_{шу\,вых}}{P_{ш\,вх} K_{у}} \,, \tag{1.70}$$

являются в общем случае функциями частоты: $P_{шу\,вых}(f)$, $P_{ш\,вх}(f)$, $K_{у}(f)$.

При нормальных условиях (1.53), т.е., в частности, при бесконечно узкой полосе эта частотная зависимость исключается. В практических случаях полоса частот имеет конечное значение. Однако она может быть выбрана настолько узкой ($\Delta f_{мин}$), чтобы в ее пределах шум и усиление практически были постоянными, т.е. при

$$\Delta f \le \Delta f_{мин} : \tag{1.71}$$

$$P_{ш\,вх}(f) = \text{const} \,, \tag{1.72}$$

$$P_{шу\,вых}(f) = \text{const} \,, \tag{1.73}$$

$$K_{у}(f) = \text{const} \,. \tag{1.74}$$

Коэффициент шума, измеренный при узкой полосе Δf, когда выполняются условия (1.72), (1.73), (1.74), носит название "*дифференциального*" *коэффициента шума* ($K_{ш\ диф}$).

Дифференциальный коэффициент шума позволяет проследить изменение шума усилителя в интересующем более широком диапазоне частот.

Если усилитель используется одновременно в широкой полосе частот, то представляет интерес его суммарный шумовой вклад во всей этой полосе.

Этот вклад характеризуется "*интегральным*" *коэффициентом шума* ($K_{ш\ инт}$), который выражается формулой [149, 183]*:

$$K_{ш\ инт} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} K_ш(f) K_у(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} K_у(f) df}, \qquad (1.75)$$

где f_1 и f_2 – граничные частоты полосы пропускания,
$K_ш(f)$ и $K_у(f)$ – частотные зависимости дифференциальных $K_ш$ и коэффициента усиления.

Проанализируем формулу (1.75).

В числителе выражения (1.75) множители $K_у(f)$ носят характер весовых коэффициентов для значений $K_ш(f)$, измеренных на частотах f.

Рассмотрим два случая.

1. Пусть $K_у(f)$ в полосе $\Delta f = f_1 - f_2$ не меняется:

$$K_у(f) = \text{const}. \qquad (1.76)$$

Из (1.75) видно, что при этом

$$K_{ш\ инт} = \frac{1}{\Delta f} \int_{f_1}^{f_2} K_ш(f) df. \qquad (1.77)$$

Таким образом, $K_{ш\ инт}$ при $K_у = \text{const}$ определяется как среднее арифметическое дифференциальных значений $K_ш$ в полосе Δf. Если условие (1.76) не имеет места, то обязательно пользоваться формулой (1.75) в общем виде.

2. Пусть дифференциальный $K_ш$ в полосе Δf остается неизменным. Естественно, при этом

$$K_{ш\ инт} = K_ш \qquad (1.78)$$

независимо от вида функции $K_у(f)$, что также видно из (1.75).

---

* Аналогично может быть введено также понятие "интегральной" шумовой температуры $T_{у\ инт}$.

Рассматривая интегральный коэффициент шума, следует уточнить его теоретическое определение.

Будем считать, что *интегральный коэффициент шума* – это величина, численно равная ОСПМШ G генератора шума, подключенного к входу приемного устройства, при которой на выходе имеет место двойное превышение сигнала над собственным шумом. При этом предполагается, что нормальная ОСПМШ генератора шума равномерно распределена в диапазоне принимаемых частот ($f_1 - f_2$), а выходное сопротивление генератора $Z_{гш}$ равно волновому сопротивлению ρ линии передачи [24]. Таким образом,

$$\boxed{K_{ш\ инт} = G} \qquad (1.79)$$

при условии получения двойного превышения на выходе и если в диапазоне частот $f_1 - f_2$:

$$G(f) = \text{const}, \qquad (1.80)$$

а

$$Z_{гш}(f) = \rho. \qquad (1.81)$$

Выходное сопротивление ГШ должно сохраняться как во включенном, так и в выключенном его состояниях.

В литературе [148, 149] также встречается несколько иной подход к нормировке выходного сопротивления генератора. Указывается, что зависимость выходного сопротивления генератора от частоты должна быть точно такой же, как и у входной нагрузка, с которой будет работать приемное устройство.

Действительно, при испытании конкретной единичной пары "генератор – приемное устройство" результат измерений будет в этом случае наиболее объективным. Однако при массовых испытаниях приемных устройств в диапазоне СВЧ, а также при неизвестном заранее выходном сопротивлении источника сигналов в рабочих условиях представляется более универсальным и удобным принять за исходное выходное сопротивление источника сигнала сопротивление, равное волновому сопротивлению линии передачи (условие 1.81).

1.7.3 Коэффициент шума при различных условиях согласования в СВЧ тракте

В общем случае усилитель работает в условиях некоторого рассогласования с СВЧ трактами, подключенными к его входу и выходу, т.е. нормальные условия (1.53-3) и (1.53-4) не выполняются.

В зависимости от степени рассогласования коэффициент шума изменяется [7, 44, 70, 183], особенно в связи с изменением согласования на входе.

Вопрос о причинах этих явлений будет более подробно рассмотрен в последующем. Пока отметим, что на изменение коэффициента шума влияют, по крайней мере, два следующих процесса:
– изменение мощности сигнала, передаваемой из источника в усилитель, в связи с отражениями от входа;
– изменение интерференции собственных шумов усилителя, излучаемых с его входа в сторону источника сигнала, в зависимости от коэффициента отражения от источника.

В зависимости от значения комплексного выходного сопротивления $Z_г$ генератора, подключенного к входу усилителя, можно различать следующие основные разновидности коэффициента шума [7, 65, 69, 148, 183].

1. Коэффициент шума $K_{шz}$ *при заданном* комплексном сопротивлении источника сигнала $Z_{зад}$ [69, с.3; 148, с.1284], т.е. имеет место при

$$\boxed{Z_г = Z_{зад}\,.} \qquad (1.82)$$

Заметим, что сопротивление $Z_г$ в диапазоне СВЧ должно рассчитываться с учетом трансформирующего влияния отрезка линии передачи, соединяющего генератор с усилителем, т.е. должно представлять сопротивление источника сигнала, приведенное к входному сечению усилителя.

2. Коэффициент шума $K_{шρ}$ при подключении к входу сопротивления, равного волновому сопротивлению линии передачи ρ [24, с.45–48, 65, с.3], т.е. $K_{шρ}$ реализуется при

$$\boxed{Z_г = \rho\,.} \qquad (1.83)$$

Иногда [65] его называют также "*характеристическим коэффициентом шума*".

3. "*Нормальный коэффициент шума*" $K_{ш*}$ [7, 69] (или "номинальный" [65]) при сопротивлении генератора $Z_г$, равном комплексно-сопряженному значению входного сопротивления усилителя $Z_{вх}$, т.е. $K_{ш*}$ имеет место при условиях:

$$\boxed{R_г = R_{вх},} \qquad (1.84)$$

$$\boxed{X_г = -X_{вх},} \qquad (1.85)$$

где R и X активная и реактивная составляющие комплексных сопротивлений:

$$Z_г = R_г + jX_г, \qquad (1.86)$$

$$Z_{вх} = R_{вх} + jX_{вх}\,. \qquad (1.87)$$

4. "*Минимальный* ("*оптимальный*" [116, с.50]) *коэффициент шума*" $K_{ш\,мин}$ [65, с.3, 69, с.25, 116, с.50, 183] т.е. наименьший коэффициент шума, который

может быть получен при согласовании генератора сигнала с усилителем с помощь СВЧ согласующих устройств.

После такого согласования к входу усилителя оказывается подключенным некоторое комплексное сопротивление

$$\boxed{Z_{\text{г}} = Z_{\text{г опт}},} \tag{1.88}$$

которое называют *оптимальным*.

5. *Предельный коэффициент шума* $K_{\text{ш г}}$ – это коэффициент шума при максимально допустимом техническими условиями модуле коэффициента отражения от генератора $|\Gamma_{\text{пред}}|$ (или заданном $\text{КСВН}_{\text{пред}}$) и наиболее неблагоприятной его фазе $\varphi_{\text{макс}}$, при которой $K_{\text{ш}}$ становится максимально возможным ($K_{\text{ш·г}}$) [65], т.е. это $K_{\text{ш}}$ при

$$\boxed{|\Gamma_{\text{г}}| = |\Gamma_{\text{пред}}|} \tag{1.89}$$

и

$$\boxed{\varphi = \varphi_{\text{макс}}}\,^{*}. \tag{1.90}$$

Помимо приведенных разновидностей коэффициента шума существуют и другие. Так, например, в [153] дается дополнительная классификация коэффициента шума (характеристический, номинальный, вносимый, рабочий, действующий) в зависимости от показателя передачи, принятого для характеристики четырехполюсника по рекомендациям МККФ [35, 113,].

Каждая их перечисленных разновидностей коэффициента шума имеет свои предпочтительные области использования.

Коэффициент шума $K_{\text{ш}z}$, измеренный при заданном конкретном сопротивлении источника сигнала, дает наиболее объективную характеристику исследуемого объекта, т.к. условия согласования при испытаниях совпадают с рабочими. Трудность при таких измерениях состоит в обеспечении и контроле этих условий согласования, т.к. необходима специальная аппаратура для измерения комплексных сопротивлений, особенно, если идет речь о $K_{\text{ш}}$ в широкой полосе частот.

Коэффициент шума $K_{\text{ш}\rho}$ рационально применять при широкополосном режиме работы усилителя, когда дополнительное согласование на каждой частотной точке невозможно.

Минимальный коэффициент шума $K_{\text{ш мин}}$ характеризует усилитель при наличии наилучших возможностей по СВЧ согласованию. Так как перестраиваемые согласующие устройства обычно работают в сравнительно узкой полосе частот, то и параметр $K_{\text{ш мин}}$ наиболее подходит для характеристики усилителя при его работе в узких частотных полосах.

---

* Аналогичная классификация в зависимости от условий согласования может быть проведена также для шумовой температуры усилителей (T_z, T_ρ, T_*, $T_{\text{мин}}$, $T_{|\Gamma|}$).

Аналогичным образом также и нормальный коэффициент шума $K_{ш*}$ характеризует усилитель при узкополосном режиме его работы. При использовании $K_{ш*}$ полностью реализуется (отдается в усилитель) номинальная мощность генератора. В то же время шум, излучаемый со входа усилителя в направлении генератора, также полностью поглощается во внутреннем сопротивлении этого генератора.

Предельный коэффициент шума $K_{ш|г|}$ может служить практическим критерием оценки "сверху" для усилителя при работе его в условиях рассогласования, хотя и не раскрывает предельных возможностей усилителя по чувствительности.

Для устранения недоразумений и достижения однозначной характеристики одного и того же усилителя, например, у изготовителя и потребителя, следует указывать условия СВЧ согласования, при которых проходили испытания при выпуске, т.е. указывать разновидность измеренного коэффициента шума.

1.8 СИСТЕМЫ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ УСИЛИТЕЛЕЙ

1.8.1 Назначение систем шумовых параметров

Параметр "коэффициент шума" характеризует чувствительность усилителя при конкретных значениях сопротивлений, подключенных к его входу и выходу, т.е. при определенных номиналах выходного сопротивления генератора ($Z_г$) и нагрузки ($Z_н$). В то же время часто один и тот же усилитель используется с различными генераторами и при различных нагрузках. В этом случае единственный параметр "коэффициент шума" становится недостаточным для характеристики усилителя, т.к., как правило, $K_ш$ изменяется при изменении $Z_г$ и $Z_н$. Анализ этой задачи приводит к необходимости введения нескольких параметров (системы параметров), которые позволили бы рассчитывать $K_ш$ усилителя при любых заданных значениях $Z_г$ и $Z_н$.

1.8.2 Эквивалентные схемы шумящих четырехполюсников

В работах [36, 44, 70, 146, 153, 161, 181, 199 и др.] приемно-усилительное устройство представляется в виде шумящего четырехполюсника с эквивалентными источниками шумового тока и напряжения. Для описания шумящего четырехполюсника к элементам его матрицы, описывающей прохождение сигналов, добавляются дополнительные параметры, учитывающие источники шумовых сигналов, пересчитанные к выводам четырехполюсника. Возможно несколько разновидностей включения эквивалентных шумовых источников, которые равнозначно могут быть использованы и применяются в

зависимости от характера решаемой задачи. Вводимые шумовые параметры являются характеристиками самого четырехполюсника и инвариантны по отношению к нагрузкам на входных и выходных выводах.

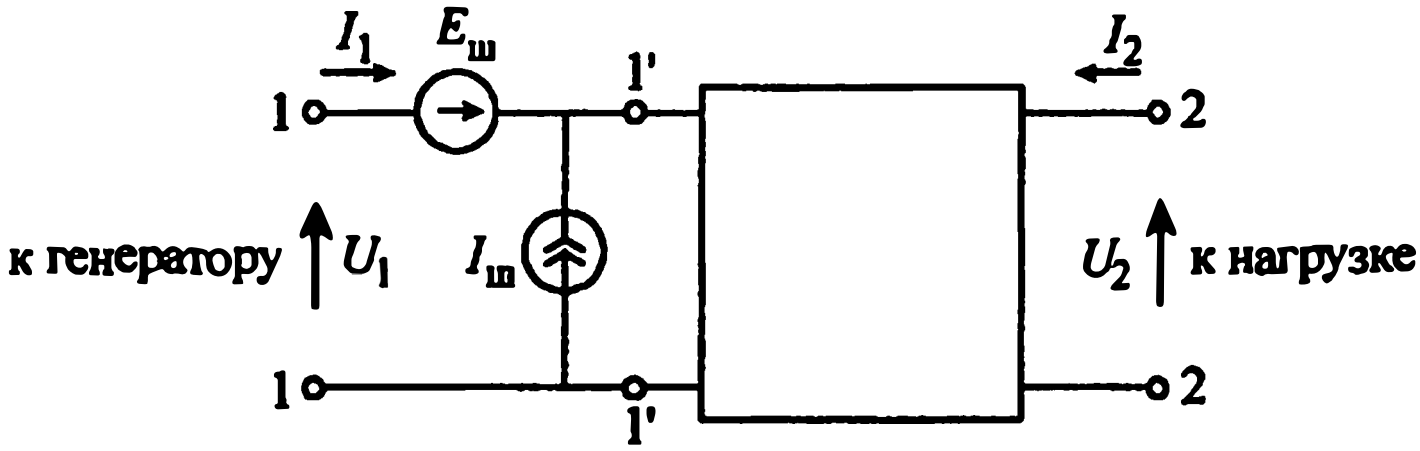


Рис. 1.9. Эквивалентное представление шумящего четырехполюсника

На рис. 1.9 показан один из вариантов [37, с.77] представления шумящего четырехполюсника, где сам четырехполюсник считается нешумящим, а его шумы отражены введением источника шумовой ЭДС $E_ш$ и источника шумового тока $I_ш$. При этом уравнения четырехполюсника записываются в виде:

$$I_1 = A_0 U_2 + B_0 I_2 + I_ш, \tag{1.91}$$

$$U_1 = C_0 U_2 + Д_0 I_2 + E_ш, \tag{1.92}$$

где A_0, B_0, C_0, $Д_0$, – элементы [*АБСД*]–матрицы.

В общем случае между шумовым током и шумовой ЭДС существует коэффициент корреляции, отличный от нуля:

$$\gamma_{IE} = \frac{\overline{I_ш E_ш}}{\sqrt{\overline{I_ш^2} \cdot \overline{E_ш^2}}}. \tag{1.93}$$

Коэффициент шума четырехполюсника может быть выражен через шумовые токи и напряжения:

$$\boxed{K_ш = 1 + \frac{1}{4kT_0 R_г \Delta f}\left[\overline{E_ш^2} + \overline{I_ш^2}\left|Z_г\right|^2 + 2\,Re\left(\overline{I_ш E_ш^*} Z_г\right)\right]}, \tag{1.94}$$

где

$$Z_г = R_г + jX_г, \tag{1.95}$$

$R_г$, $X_г$ – активная и реактивная составляющие выходного сопротивлении генератора.

Авторы [146, с.212, 153, с.312] приходят к выводу, что основное влияние на $K_ш$ оказывает выходное сопротивление генератора, т.е. сопротивление $Z_г$, подключенное к входу четырехполюсника. Коэффициент шума не зависит от

сопротивления нагрузки, если шумами этой нагрузки можно пренебречь или отнести их к следующему каскаду [70, с.159], что в большинстве случаев выполняется.

Выражение (1.94) определяет зависимость $K_ш$ от сопротивления генератора, однако для практических вычислений мало пригодно [44], т.к. включает величины $E_ш$, $I_ш$ и коэффициент корреляции между ними, которые точно определить трудно.

1.8.3. Шумовые параметры четырехполюсников по стандарту IRI

Исследования [37, 149, 180, 181, 183, 185] эквивалентной схемы шумящего четырехполюсника позволили найти выражение для минимального значения коэффициента шума $K_{ш\,мин}$ в зависимости от реактивной и активной составляющих $Z_г$ (и проводимости $У_г$).После этого общее выражение для $K_ш$ четырехполюсника, включенного в рассогласованный тракт, оказалось возможным представить в следующее виде:

$$K_ш = K_{ш\,мин} + \frac{R_ш}{g_г}\left|У_г - У_{г\,опт}\right|^2, \tag{1.96}$$

$$K_ш = K_{ш\,мин} + \frac{g_ш}{R_г}\left|Z_г - Z_{г\,опт}\right|^2, \tag{1.97}$$

где $R_ш$, $g_ш$ – эквивалентные шумовые сопротивление и проводимость, $Z_{г\,опт}$, $У_{г\,опт}$ – оптимальное сопротивление и проводимость генератора, т.е. величины, при которых коэффициент шума приобретает минимальное значение.

Из формул (1.96) и (1.97) видно, что значение коэффициента шума при произвольном рассогласовании источника может быть рассчитано, если известно четыре параметра:

– при представлении по формуле (1.96):

$$K_{ш\,мин}, У_{г\,опт}\left(g_{г\,опт}, b_{г\,опт}\right), R_ш; \tag{1.98}$$

– при представлении по формуле (1.97):

$$K_{ш\,мин}, Z_{г\,опт}\left(R_{г\,опт}, X_{г\,опт}\right), g_ш. \tag{1.99}$$

Как видно из (1.96), при

$$У_г = У_{г\,опт}\ \left(Z_г = Z_{г\,опт}\right), \tag{1.100}$$

коэффициент шума приобретает свое минимальное значение, при отклонении от условия оптимальной настройки (1.100) скорость нарастания $K_ш$ пропорциональна $R_ш(g_ш)$.

Таким образом, формулы (1.96) и (1.97) принципиально решают задачу о вычислении $K_{ш}$ четырехполюсника в рассогласованом тракте.

В [183] указывается, что параметры $K_{ш\,мин}$, $У_{г\,опт}$ и $R_{ш}$ для конкретного вида усилителя должны быть найдены либо из теории его шумов, либо экспериментально. Очевидно, что оба эти способа определения параметров $K_{ш\,мин}$, $У_{г\,опт}$ и $R_{ш}$ сопряжены с рядом трудностей, особенно в диапазоне сверхвысоких частот. Действительно, в то время как значение $K_{ш\,мин}$ может быть сравнительно просто определено с помощью прямоотсчетного ИКШ путем настройки входной цепи усилителя согласующим трансформатором, для нахождения $У_{г\,опт}$ уже необходим дополнительный сложный прибор – измеритель S-параметров. Методика определения $R_{ш}$, рекомендуемая в [183], требует возможности раздельной регулировки активной и реактивной составляющих $У_{г}$, что легко осуществимо лишь на сравнительно низких частотах.

1.8.4. Волновое представление шумящих четырехполюсников

Дальнейшие исследования в области измерения шумовых параметров усилителей в диапазоне СВЧ были направлены к цели использования приемов СВЧ техники и применения характеристик, соответствующих этому диапазону. Кроме того, ставилась задача – для упрощения измерений шумовых параметров основным измерительным прибором сделать ИКШ с соответствующими необходимыми добавлениями.

При волновом анализе шумовых сигналов в СВЧ трактах в ряде работ [7, 37, 44 и др.] используется гармоническое приближение (рис. 1.10), которое является достаточно строгим при выполнении условия:

$$\frac{2l}{c} << \tau_{кор}, \qquad (1.101)$$

где $\tau_{кор} = \dfrac{1}{\Delta f}$ – время корреляции в системе,

Δf – ширина полосы частот приемного устройства,

l – длина линии, соединяющей генератор и приемное устройство.

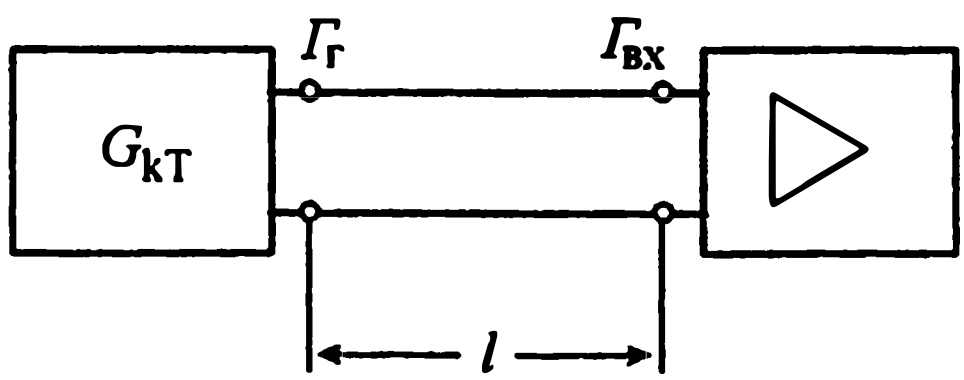


Рис. 1.10. Генератор и усилитель, соединенные линией передачи длинною *l*

Как показано в [156], при этом условии интерференция шумовых сигналов в системе происходит по законам, весьма близким к интерференции синусоидальных сигналов. В [8], например, приводится экспериментальное подтверждение этого положения.

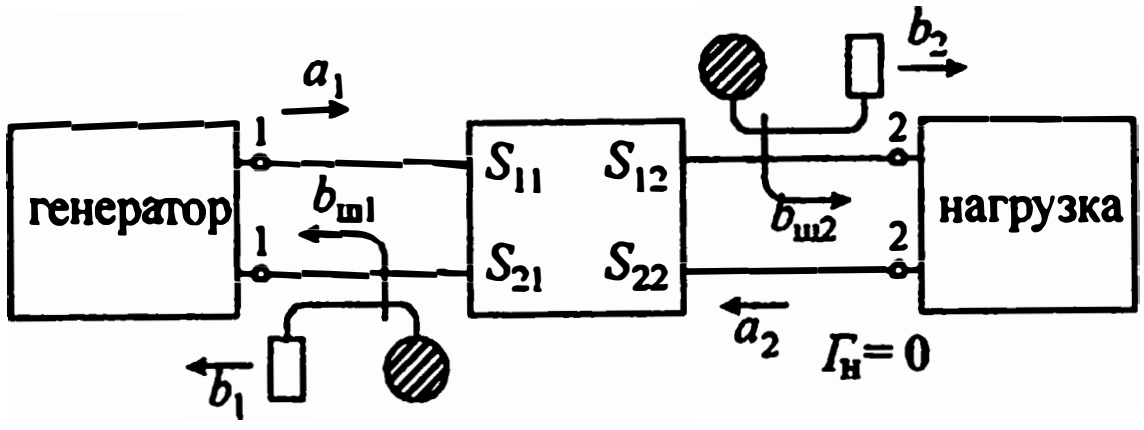
При измерении дифференциального $K_ш$, когда полоса частот приемного устройства составляет несколько мегагерц, для измерительных установок СВЧ диапазона условие (1.101) выполняется достаточно строго, поэтому гармоническое приближение при анализе может быть принято за основу.

В работах [37, 57] шумящий четырехполюсник описывается волновыми параметрами свойственными диапазону СВЧ. При этом коэффициенты отражения и передачи выражаются элементами матрицы рассеяния S (рис. 1.11*а*), а внутренние шумы представляются волнами $b_{ш1}$ и $b_{ш2}$, излучаемыми со входа и выхода четырехполюсника. В общем случае волны $b_{ш1}$ и $b_{ш2}$ взаимнокоррелированны. При наличии сигналов (волны a и b) уравнения четырехполюсника записываются в виде:

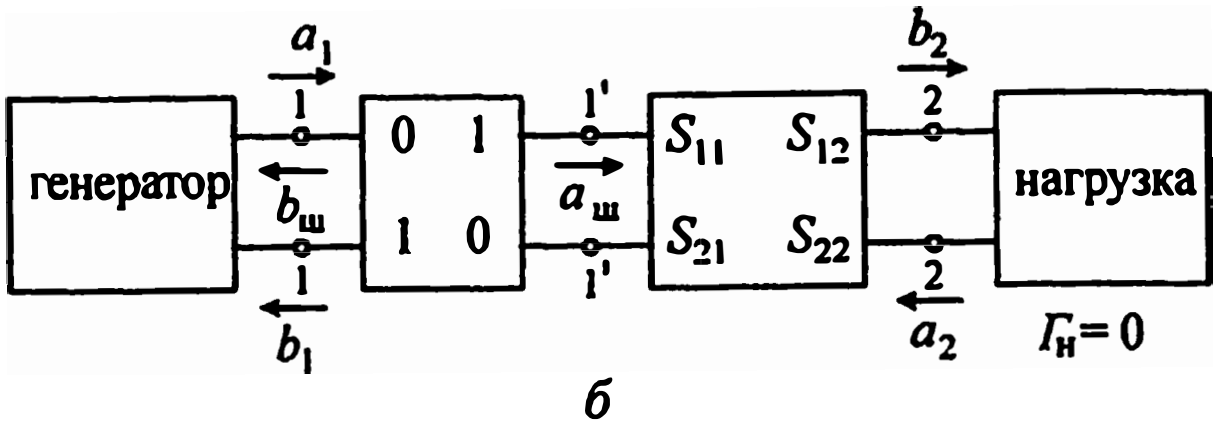
$$b_1 = a_1 S_{11} + a_2 S_{12} + b_{ш1}, \tag{1.102}$$

$$b_2 = a_1 S_{21} + a_2 S_{22} + b_{ш2}. \tag{1.103}$$

Волна $b_{ш2}$ с выхода четырехполюсника может быть пересчитана к его входу, где в результате образуется две волны: $a_ш$ – в направлении к четырехполюснику и $b_ш$ – в направлении к генератору. Это позволяет представить схему в виде, изображенном на рис. 1.11*б*, где источники шума выделены в отдельный четырехполюсник с матрицей:



а



б

Рис. 1.11. Волновое представление шумящего четырехполюсника

● – обозначение шумового источника

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \tag{1.104}$$

а шумовые волны:

$$a_{ш} = b_{ш2}/S_{21}, \tag{1.105}$$

$$b_{ш} = b_{ш1} - a_{ш}S_{11} = b_{ш1} - (S_{11}/S_{21})\,b_{ш2}. \tag{1.106}$$

В соответствием с этим представлением, может быть найдена суммарная шумовая волна, выделяемая в нагрузке, и получено следующее выражение для коэффициента шума:

$$\boxed{K_{ш} = 1 + \frac{1}{kT_0\Delta f\left(1 - |\Gamma_г|^2\right)}\left(|a_{ш}|^2\left|1 + \gamma_{кор}\Gamma_г\right|^2 + |b_{шн}|^2|\Gamma_г|^2\right),} \tag{1.107}$$

где $\gamma_{кор}$ – коэффициент корреляции рассеяния, определяющий связь между волнами $a_{ш}$ и $b_{ш}$,

$b_{шн}$ – некоррелированная с $a_{ш}$ часть волны $b_{ш}$,

Δf – полоса частот, в которой рассматривается коэффициент шума.

Из (1.107) видно, что коэффициент шума определяется четырьмя шумовыми параметрами, характеризующими четырехполюсник:

$$\boxed{\overline{|a_{ш}|^2},\ \overline{|b_{ш}|^2},\ Re\gamma_{кор},\ Im\gamma_{кор}} \tag{1.108}$$

и коэффициентом отражения $\Gamma_г$ от источника сигнала.

Таким образом, как и в случае представления методом эквивалентных схем (формулы 1.96, 1.97), шумящий четырехполюсник характеризуется системой, состоящей из четырех параметров, которые, однако, здесь являются другими, соответствующими волновому методу анализа. В этом отражается закон инвариантности представления четырехполюсника.

При практическом определении параметров основная трудность состоит в нахождении $\overline{|b_{ш}|^2}$, $Re\gamma_{кор}$, $Im\gamma_{кор}$.

Экспериментальные методы для этой цели в [37] не предлагаются.

1.8.5. Система шумовых параметров на основе $K_{ш}$ при комплексно-сопряженном согласовании

В работе [7] предлагается способ построения системы шумовых параметров СВЧ усилителя, также основанный на волновом представлении.

Обсуждается механизм изменения шума усилителя при рассогласовании и даются предложения по практическому определению параметров.

Как основные причины изменения коэффициента шума при рассогласовании указываются:
– изменение коэффициента передачи сигнала из генератора в усилитель,
– интерференция собственных шумов усилителя, излучаемых с его входа в сторону источника сигнала.

В качестве исходного ("истинного", [7]) принимается значение коэффициента шума $K_{ш*}$ при условии комплексно-сопряженного согласования генератора и входа усилителя (рис. 1.10):

$$|\Gamma_г| = |\Gamma_{вх}|, \tag{1.109}$$

$$\psi_г + \psi_{вх} + 2\beta l = 2\pi n (n = 0,1,...). \tag{1.110}$$

Выбор такого исходного значения $K_ш$ обосновывается тем, что при этом условии сигнал из генератора полностью передается в усилитель. В то же время шум, излучаемый со входа усилителя, полностью поглощается в выходном сопротивлении генератора.

Кроме того, условия (1.109, 1.110) при измерении дифференциального шума могут быть сравнительно просто достигнуты путем использования согласующего трансформатора *2* (рис. 1.12) при настройке на максимальный сигнал индикаторного прибора *5*, модуляционного измерительного приемника *4*.

В [7] выводится выражение для коэффициента передачи ("коэффициент несогласованности", формула (1.19), подраздел 1.1.2) в случае произвольного рассогласования генератора и входа усилителя с учетом влияния соединяющей линии передачи.

Шумовая температура усилителя $T_у$ условно разбивается на две составляющие части: одну T' – не изменяющуюся при изменении согласования на входе, другую T'' – изменяющуюся при изменении согласования.

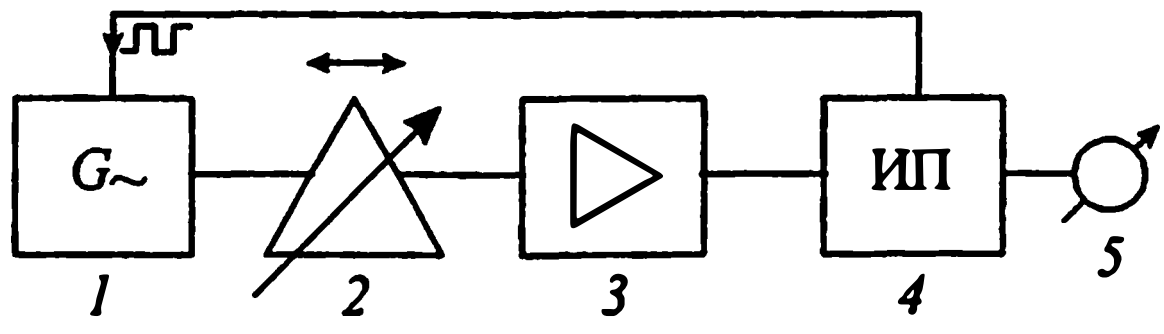


Рис. 1.12. Схема настройки на комплексно-сопряженное согласование генератора и усилителя

1 – генератор сигнала: *2* – согласующий трансформатор; *3* – усилитель; *4* – модуляционный измерительный приемник: *5* – индикатор

Для коэффициента шума получено следующее выражение:

$$\boxed{K_{ш} = \frac{K_{ш*}}{A}(1 + mC),} \qquad (1.111)$$

где A – коэффициент несогласованности,

$$m = T''/T_{у} \qquad (1.112)$$

– коэффициент переменной составляющей шума усилителя,
C – функция, определяющая закон интерференции собственного шума усилителя.

Величины A и C являются функциями параметров рассогласования:

$$A = A(\Gamma_{г}, \Gamma_{вх}, l) \qquad (1.113)$$

$$C = C(\Gamma_{г}, \Gamma_{вх}, l) \qquad (1.114)$$

Из формул (1.111–1.114) видно, что параметрами, характеризующими непосредственно усилитель при расчете его коэффициента шума в рассогласованном тракте, являются:

$$\boxed{K_{ш*}, m, |\Gamma_{вх}|, \psi_{вх}.} \qquad (1.114\text{-а})$$

Предлагается методика измерения $K_{ш*}$ и m непосредственно на ИКШ с использованием согласующего трансформатора и короткозамыкателя. Значения $|\Gamma_{вх}|$ и $\psi_{вх}$ могут быть определены методами СВЧ измерительной техники либо непосредственно, либо путем измерения комплексно-сопряженных с ними величин $|\Gamma_{г}|$ и $\psi_{г}$ ($\psi_{г}$ – с учетом влияния длины линии l) .

Ограничением этого метода является требование устойчивости $K_{у}$ усилителя при перестройках на его входе.

1.8.6. Система шумовых параметров на основе оптимального (минимального) коэффициента шума

В [116] описана система шумовых параметров усилителя, разработанная для использования в СВЧ диапазоне и базирующаяся на измерении оптимального $K_{ш}$. Приводятся некоторые практические результаты применения этой системы. Она является развитием теории, изложенной в [181, 183] с целью обеспечения возможности определения шумовых параметров сравнительно простыми средствами в диапазоне СВЧ.

Формула (1.96) для коэффициента шума усилителя в рассогласованном тракте может быть записана в следующем виде:

$$K_{ш} = K_{ш\,мин}\left[1+\frac{4R_н g_{г\,опт}}{K_{ш\,мин}}\ \frac{\left|Y_г - Y_{г\,опт}\right|^2}{4g_{г\,опт}g_г}\right] =$$

$$= K_{ш\,мин}\left[1+\beta_{кш}\frac{\left|Y_г - Y_{г\,опт}\right|^2}{4g_{г\,опт}g_г}\right], \qquad (1.115)$$

где $K_{ш\,мин}$ – оптимальное значение коэффициента шума, т.е. наименьшее значение, которое может быть получено при перестройке выходной проводимости генератора шума с помощью согласующего трансформатора,
$g_г$ и $g_{г\,опт}$ – активные составляющие соответственно фактической проводимости генератора $Y_г$ и оптимальной проводимости генератора $Y_{г\,опт}$,

$$\beta_{кш} = \frac{4R_н g_{г\,опт}}{K_{ш\,мин}}. \qquad (1.116)$$

Учитывая, что

$$Y = Y_0\frac{1-\Gamma}{1+\Gamma}, \qquad (1.117)$$

где Y_0 – волновая проводимость линии передачи, можно показать, что

$$\frac{\left|Y_г - Y_{г\,опт}\right|^2}{4g_{г\,опт}g_г} = \frac{\left|\Gamma_г - \Gamma_{г\,опт}\right|^2}{\left(1-\left|\Gamma_{г\,опт}\right|^2\right)\left(1-\left|\Gamma_г\right|^2\right)} = X_0. \qquad (1.118)$$

С учетом (1.116) и (1.118) формула (1.115) для $K_ш$ приобретает вид:

$$\boxed{K_ш = K_{ш\,мин}\left[1+\beta_{кш}\frac{\left|\Gamma_г - \Gamma_{г\,опт}\right|^2}{\left(1-\left|\Gamma_г\right|^2\right)\left(1-\left|\Gamma_{г\,опт}\right|^2\right)}\right] = K_{ш\,мин}\left(1+\beta_{кш}X_0\right),} \qquad (1.119)$$

где $\Gamma_г = \left|\Gamma_г\right|e^{j\psi_г}$, $\Gamma_{г\,опт} = \left|\Gamma_{г\,опт}\right|e^{j\psi_{г\,опт}}$ (1.120)
– коэффициенты отражения от генератора при фактической и оптимальной настройках,
$\psi_г$, $\psi_{г\,опт}$ – фазовые углы коэффициентов отражения,
$\beta_{кш}$ – крутизна изменении $K_ш$ (параметр, определяющий скорость относительного изменения $K_ш$ при рассогласовании).

Из (1.119) следует, что при предлагаемом представлении $K_ш$, четырехполюсник характеризуется в рассогласованном тракте следующими четырьмя независимыми шумовыми параметрами:

$$\boxed{K_{\text{ш мин}},\ \beta_{\text{кш}},\ |\Gamma_{\text{г опт}}|,\ \psi_{\text{г опт}}.} \tag{1.121}$$

При условии

$$\beta_{\text{кш}} = 1 \tag{1.122}$$

выражение (1.119) приобретает вид:

$$K_{\text{ш}} = K_{\text{ш мин}} / A, \tag{1.123}$$

где A – коэффициент несогласованности при передаче мощности [7]

$$A = \frac{\left(1 - |\Gamma_{\text{г}}|^2\right)\left(1 - |\Gamma_{\text{г опт}}|^2\right)}{|1 - \Gamma_{\text{г}}\Gamma_{\text{г опт}}|^2}. \tag{1.124}$$

Таким образом, в этом случае увеличение $K_{\text{ш}}$ из-за рассогласования определится единственным механизмом – уменьшением коэффициента передачи сигнала. Следовательно, условие $\beta_{\text{кш}} = 1$ соответствует случаю пассивного исследуемого четырехполюсника, у которого собственный шум не зависит от рассогласования на входе.

Исследуя выражение (1.119), можно показать, что на круговой диаграмме полных сопротивлений (рис. 1.13) кривые постоянного $K_{\text{ш}}$, т.е. соответствующие условию: $\beta_{\text{кш}} X_0 = \text{const} = C_0$, (1.125)

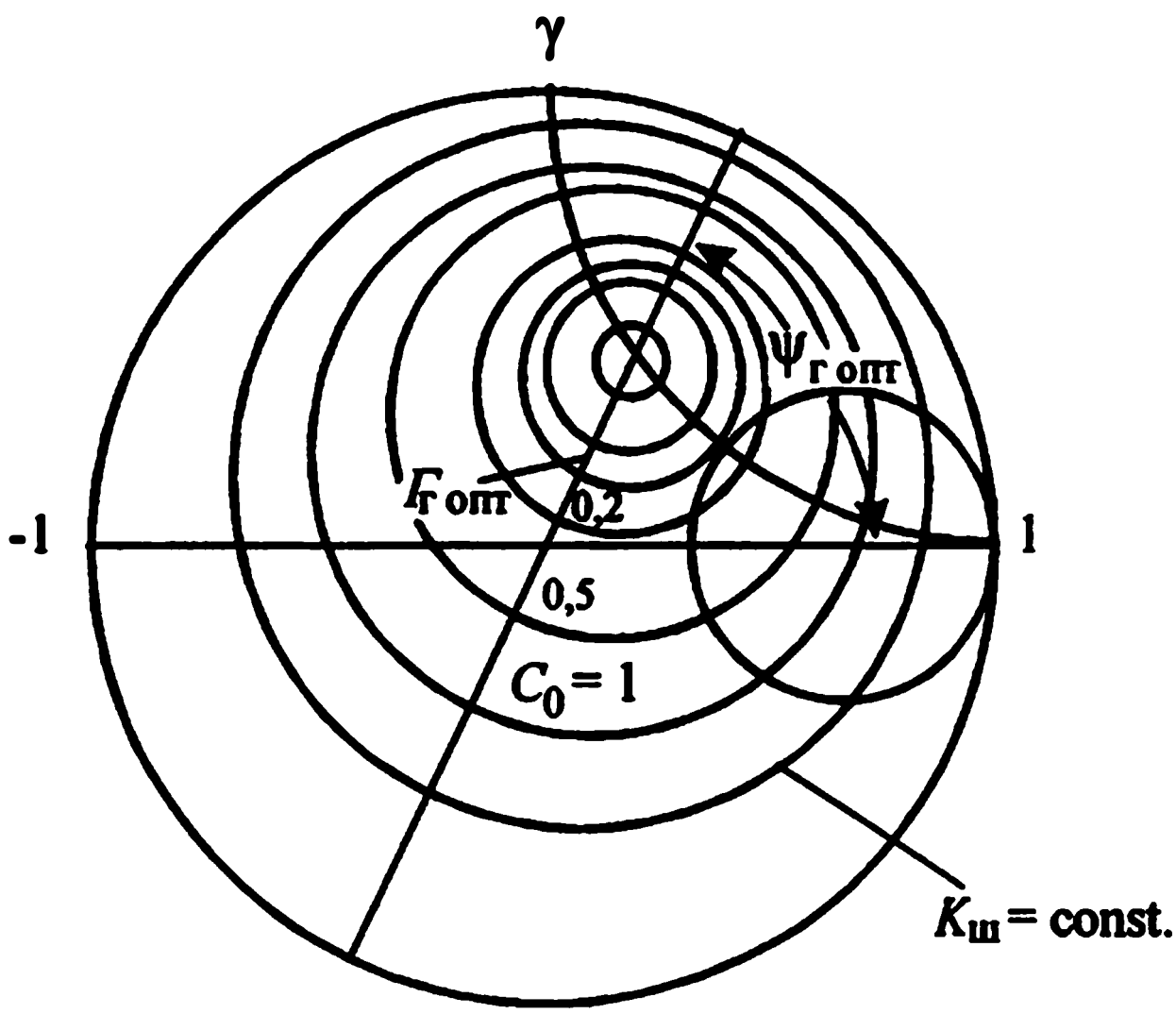


Рис. 1.13. Кривые постоянного $K_{\text{ш}}$ на диаграмме полных сопротивлений

представляют собой окружности с центром в точке $\rho_ц$:

$$|\rho_ц| = \frac{|\Gamma_0|}{1 + \frac{C_0}{\beta_{кш}}\left(1 - |\Gamma_{г\,опт}|^2\right)}. \quad (1.126)$$

Радиус окружностей

$$r = \frac{1 - |\Gamma_{г\,опт}|^2}{1 + \frac{C_0}{\beta_{кш}}\left(1 - |\Gamma_{г\,опт}|^2\right)} \sqrt{\frac{C_0}{\beta_{кш}}\left(1 + \frac{C_0}{\beta_{кш}}\right)}. \quad (1.127)$$

Вид рельефа функции, определяемой выражением (1.119), представлен на рис. 1.14.

Пользуясь выражением (1.119), принципиально можно определить значение $K_ш$ при любом модуле и фазе $\Gamma_г$, однако определение фазы часто является величиной неопределенной. Тогда можно ограничиться сравнительно просто определяемыми экстремальными значениями $K_ш$. Действительно, выражение (1.119) можно представить в виде:

$$K_ш = K_{ш\,мин}\left[1 + \beta_{кш}\frac{|\Gamma_г|^2 + |\Gamma_{г\,опт}|^2 - 2|\Gamma_г||\Gamma_{г\,опт}|\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}l + \psi_г + \psi_{г\,опт}\right)}{\left(1 - |\Gamma_г|^2\right)\left(1 - |\Gamma_{г\,опт}|^2\right)}\right], \quad (1.128)$$

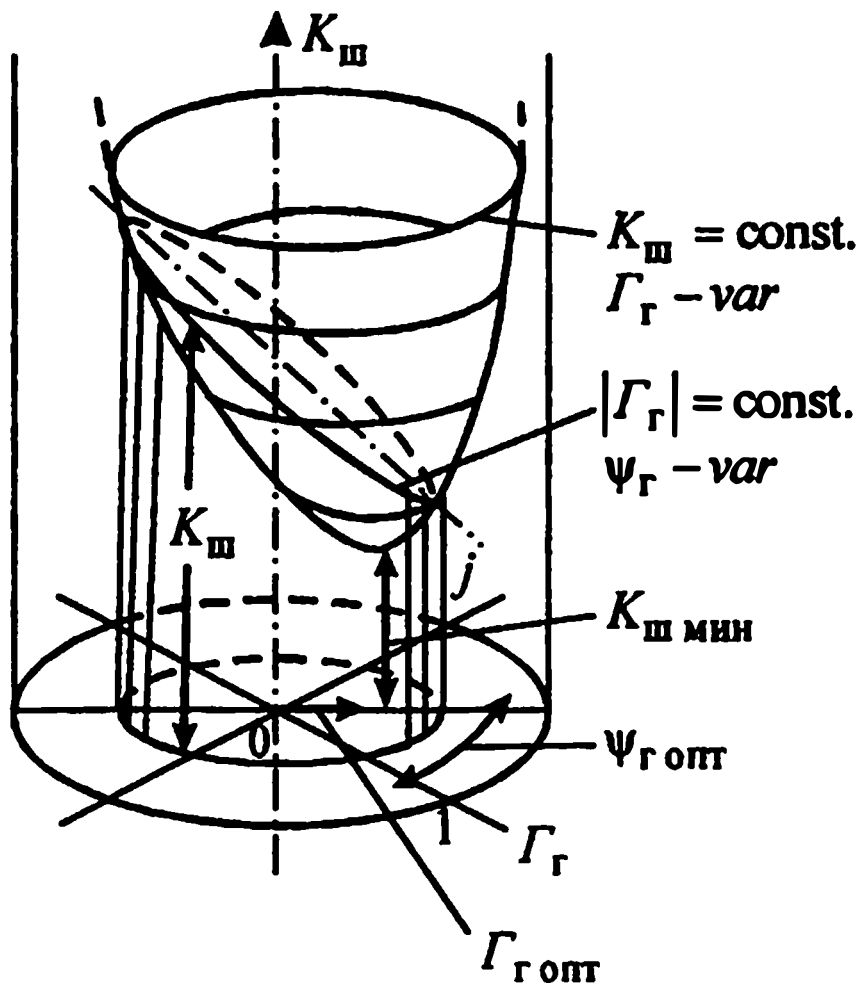


Рис. 1.14. Изображение поверхности, определяющей $K_ш$ при заданных значениях шумовых параметров: $K_{ш\,мин}$, $\beta_{кш}$ и $\Gamma_{г\,опт}$

где λ – длина волны в линии передачи,

l – длина линии между усилителем и генератором.

Из (1.128) видно, что при заданных $|\Gamma_г|$ и $|\Gamma_{г\,опт}|$ $K_ш$ в зависимости от l изменяется по синусоидальному закону и имеет экстремальные значения.

Максимальное и минимальное значения $K_ш$ соответственно имеют вид:

$$K'_{ш\,макс} = K_{ш\,мин}\left[1+\beta_{кш}\frac{\left(|\Gamma_г|+|\Gamma_{г\,опт}|\right)^2}{\left(1-|\Gamma_г|^2\right)\left(1-|\Gamma_{г\,опт}|^2\right)}\right] =$$

$$= K_{ш\,мин}\left[1+\beta_{кш}\frac{\left(\sigma_г\sigma_{г\,опт}-1\right)^2}{4\sigma_г\sigma_{г\,опт}}\right], \qquad (1.129)$$

$$K'_{ш\,мин} = K_{ш\,мин}\left[1+\beta_{кш}\frac{\left(|\Gamma_г|-|\Gamma_{г\,опт}|\right)^2}{\left(1-|\Gamma_г|^2\right)\left(1-|\Gamma_{г\,опт}|^2\right)}\right] =$$

$$= K_{ш\,мин}\left[1+\beta_{кш}\frac{\left(\sigma_г-\sigma_{г\,опт}\right)^2}{4\sigma_г\sigma_{г\,опт}}\right], \qquad (1.130)$$

где $\sigma_г = КСВН_г = \frac{1+|\Gamma_г|}{1-|\Gamma_г|}$, $\sigma_{г\,опт} = КСВН_{г\,опт} = \frac{1+|\Gamma_{г\,опт}|}{1-|\Gamma_{г\,опт}|}$ – коэффициенты стоячей волны, соответствующие $\Gamma_г$ и $\Gamma_{г\,опт}$.

Таким образом, экстремальные значения $K_ш$ могут быть рассчитаны без знания фазы $\psi_{г\,опт}$, т.е. исходя из трех параметров усилителя:

$$K_{ш\,мин},\ \beta_{кш}\ и\ |\Gamma_{г\,опт}|\ (или\ \sigma_{г\,опт}). \qquad (1.131)$$

С другой стороны, с использованием формулы (1.129) может быть определен параметр $\beta_{кш}$:

$$\beta_{кш} = \frac{K'_{ш\,макс}-K'_{ш\,мин}}{K_{ш\,мин}}\cdot\frac{\left(1-|\Gamma_г|^2\right)\left(1-|\Gamma_{г\,опт}|^2\right)}{\left(|\Gamma_г|+|\Gamma_{г\,опт}|\right)^2} \qquad (1.132)$$

или

$$\beta_{кш} = \frac{K'_{ш\,макс}-K'_{ш\,мин}}{K_{ш\,мин}}\cdot\frac{4\sigma_г\sigma_{г\,опт}}{\left(\sigma_г\sigma_{г\,опт}-1\right)^2}. \qquad (1.133)$$

Описанная система шумовых параметров усилителя в настоящее время, на наш взгляд, является наиболее рациональной для практического использования в диапазоне СВЧ.

В подразделе 2.7 приводится методика экспериментального определения шумовых параметров СВЧ усилителя.

1.9 КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА КАСКАДНО СОЕДИНЕННЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ. ШУМОВАЯ МЕРА

При каскадном соединении четырехполюсников (рис. 1.15) вклад в общий коэффициент шума дают все каскады. Долю вклада каждого из четырехполюсников определяет формула, впервые полученная Фрииcом [178], в соответствии с которой *общий* $K_{ш\Sigma}$:

$$K_{ш\Sigma} = K_{ш1} + \frac{K_{ш2} - 1}{K_{y1}} + \ldots + \frac{K_{шn} - 1}{K_{y1} K_{y1} \ldots K_{y(n-1)}}, \qquad (1.134)$$

где $K_{ш i}$ – коэффициент шума i-го каскада ($i = 1, 2 \ldots n$),
$K_{y i}$ – коэффициент усиления i-го каскада.

Как видно из (1.134), шумовой вклад каскада тем меньше, чем дальше он находится от входа. Формула справедлива, если каскады имеют одинаковые полосы пропускания или полоса каждого последующего каскада (Δf_{i+1}) меньше, чем полосы предыдущих (Δf_i)

$$\Delta f_{i+1} \le \Delta f_i . \qquad (1.135)$$

Кроме того, предполагается, что спектры шумов в полосе устройства равномерны.

Формула (1.134) остается также справедливой, если условие (1.135) не выполняется, но для каждого каскада имеет место неравенство:

$$\Delta f_i \ge \Delta f_{ип}, \qquad (1.136)$$

где $\Delta f_{ип}$ – полоса пропускания измерительного приемника.

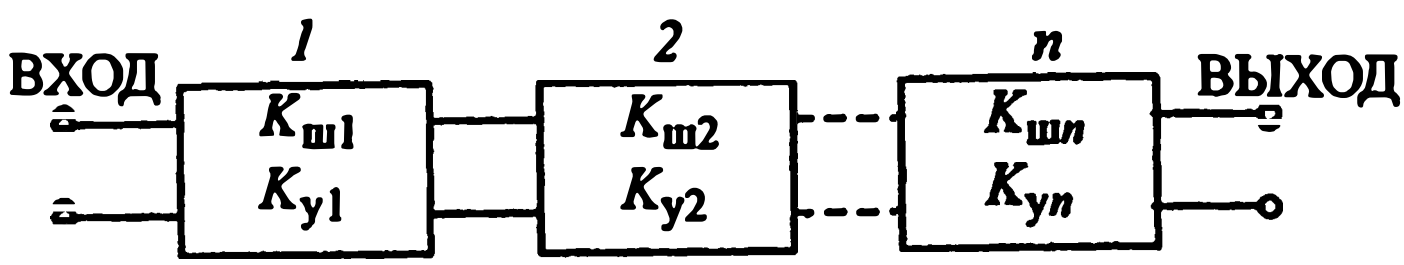


Рис. 1.15. Совокупность каскадно включенных четырехполюсников
1, 2, ... n – номера четырехполюсников, $K_ш$, K_y – коэффициенты шума и усиления отдельных четырехполюсников

Для систем, содержащих преобразователи частоты, имеющих многоканальные АЧХ, положительные и отрицательные проводимости отдельных каскадов и другие особенности, применение формулы (1.134) подробно рассмотрено в [90, 161].

Формула для *шумовой температуры* при каскадном включении и тех же условиях, что и для формулы (1.134), имеет следующий вид:

$$T_{\Sigma} = T_1 + \frac{T_2}{K_{y1}} + \ldots + \frac{T_n}{K_{y1}K_{y2}\ldots K_{y(n-1)}}, \qquad (1.137)$$

где T_i , K_{yi} – соответственно шумовая температура и коэффициент усиления i-го каскада.

При проектировании многокаскадных устройств полезным является параметр "*шумовая мера*" M (или "шумовое число") усилителя [161], вытекающий из анализа (1.134), который выражается следующей формулой:

$$M = \frac{K_{ш} - 1}{1 - 1/K_y}. \qquad (1.138)$$

Шумовая мера является обобщающим параметром, включающим в себя как коэффициент шума, так и коэффициент усиления.

Смысл применения параметра "шумовая мера" состоит в следующем. Для получения наименьшего суммарного коэффициента шума (шумовой температуры) многокаскадного усилителя, каскады, имеющие меньшие значения шумовой меры, должны включаться ближе к входу устройства, чем каскады, имеющие большие значения шумовой меры. При больших коэффициентах усиления шумовая мера стремится к значению относительной шумовой температуры усилителя, т.е.:

$$M \to K_{ш} - 1 \qquad (1.139)$$

при $K_y \to \infty$.

1.10 КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Многие приемные устройства СВЧ работают по принципу супергетеродинного преобразования сигналов и содержат на входе преобразователь частот и усилитель промежуточной частоты (рис. 1.16).

В зависимости от характера принимаемого сигнала преобразователь может работать в узкополосном (одноканальном) режиме приема или в широкополосном (двухканальном) режиме. Двухканальный режим имеет место, если сигнал носит характер шума, равномерно распределенного по частоте. Такой режим имеет место, например, при работе преобразователя в составе радиометра [73].

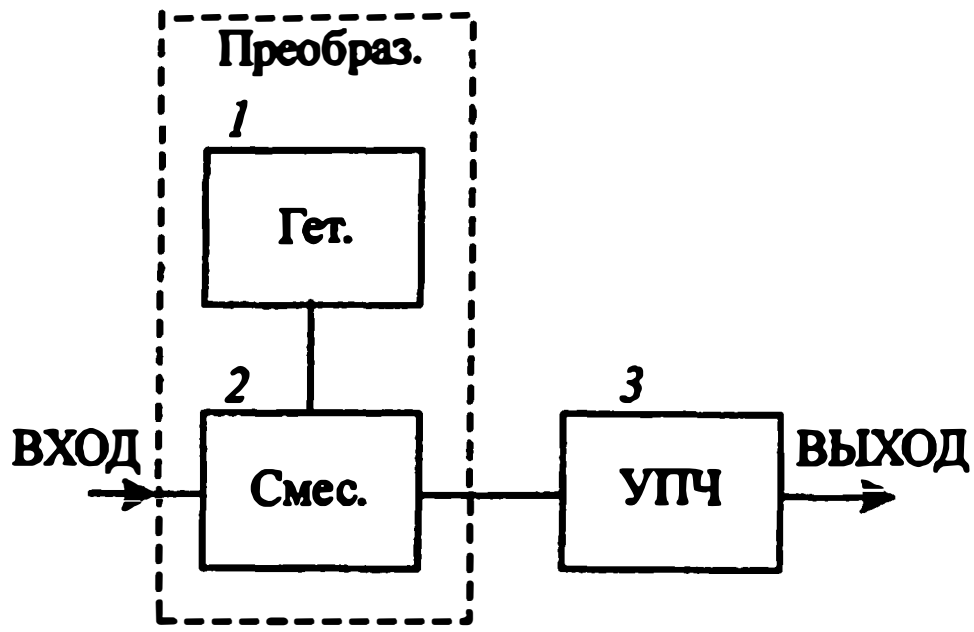


Рис. 1.16. Преобразователь частоты с УПЧ

1 – гетеродин; *2* – смеситель; *3* – усилитель промежуточной частоты

Суммарный коэффициент шума преобразователя и УПЧ, в соответствии с формулой Фрииса, может быть выражен как

$$K_{ш\Sigma} = K_{ш\,пр} + \frac{K_{ш\,упч} - 1}{d}, \qquad (1.140)$$

где $K_{ш\,пр}$, $K_{ш\,упч}$ – соответственно коэффициенты шума преобразователя и УПЧ, $d = 1/L$ – коэффициент передачи преобразователя ($d < 1$),

L – коэффициент потерь преобразования [63] ($L > 1$).

Выражение (1.140) можно записать как

$$\boxed{K_{ш\Sigma} = Lt_{пр} + L\left(K_{ш\,упч} - 1\right),} \qquad (1.141)$$

где $t_{пр}$ – шумовое отношение преобразователя.

Шумовое отношение преобразователя $t_{пр}$ представляет собой относительную спектральную плотность мощности шума на выходе преобразователя на промежуточной частоте при условии подключения ко входу преобразователя согласованной нагрузки при температуре T_0 и выражается как

$$\boxed{t_{пр} = P_{ш\,вых} / kT_0\Delta f\ ,} \qquad (1.142)$$

где $P_{ш\,вых}$ – мощность шума промежуточной частоты на выходе преобразователя в полосе частот Δf преемника на промежуточной частоте.

Если при испытаниях шумовой вклад гетеродинного генератора каким-либо способом исключен, то шумовое отношение преобразователя превращается в шумовое отношение смесителя $t_{см}$ [131]:

$$\boxed{t_{пр} = t_{см}\ .} \qquad (1.143)$$

Первое слагаемое в формуле (1.141)

$$\boxed{K_{ш\,пр} = Lt_{пр} = t_{пр}/d} \qquad (1.144)$$

называется собственным коэффициентом шума преобразователя.

Таким образом, *собственный коэффициент шума* преобразователя численно равен приведенной к его входу относительной спектральной плотности мощности шума, излучаемого с выхода преобразователя при условии, что к входу присоединена нагрузка, имеющая температуру $T_0 = 293$ К.

При работе преобразователя в двухканальном режиме, как показано в [59], формула Фрииса – неприменима, а коэффициент шума системы "двухканальный преобразователь – УПЧ" приобретет вид:

$$K_{\text{ш}\Sigma(2)} = K_{\text{ш пр}(2)} + L\left(K_{\text{ш упч}} - 1\right)/2, \qquad (1.145)$$

при этом собственный коэффициент шума двухканального преобразователя

$$K_{\text{ш пр}(2)} = Lt_{\text{пр}}/2. \qquad (1.146)$$

Общее определение собственного коэффициента шума, приведенное выше, сохраняется и для двухканального режима.

Если характеристики преобразователя и источника сигнала на основной и зеркальной частотах одинаковы, то коэффициенты шума в широкополосном ($K_{\text{ш пр}(2)}$) и узкополосном ($K_{\text{ш пр}(1)}$) режимах связаны соотношением

$$K_{\text{ш пр}(1)} = 2K_{\text{ш пр}(2)}. \qquad (1.147)$$

На коэффициенты шума и передачи преобразователя в значительной степени влияет режим согласования. Поэтому для получения однозначности измерений условия согласования при испытаниях должны быть оговорены. Наиболее последовательным является нормирование этих условий. Если это сделать невозможно, то должно быть указано, при каких условиях измерения проведены.

Вследствие малой внутренней развязки входа и выхода преобразователя и принципа его работы входное сопротивление на частоте сигнала, а также выходное сопротивление на ПЧ зависят от сопротивления источника сигнала на основной и зеркальной частотах [91].

С учетом этого при двухканальном режиме наиболее оптимальным условием согласования преобразователя при испытаниях, по-видимому, является подключение к его входу источника с выходным сопротивлением, равным волновому ρ как на частоте сигнала, так и на частоте зеркального канала:

$$\boxed{Z_{\text{с}} = Z_{\text{з}} = \rho,} \qquad (1.148)$$

где $Z_{\text{с}}$ и $Z_{\text{з}}$ – сопротивления источника сигнала соответственно на сигнальной и зеркальной частотах.

При этом в процессе испытаний:

– согласование и его воспроизводимость обеспечиваются наиболее просто;

– изменение фазовой длины линии, подключаемой ко входу (например, при изменении частоты), не влияет на параметры преобразователя;
– возможно испытание преобразователя в панорамном режиме при быстрой перестройке частоты.

При одноканальном режиме работы преобразователя в зависимости от способа реализации этого режима [98, 110, 131] коэффициент отражения $\Gamma_з$ на зеркальной частоте $f_з$ может оказаться любым, т.е.

$$0 < |\Gamma_з| < 1, \tag{1.149}$$

$$0 < |\varphi_з| < 2\pi, \tag{1.150}$$

где $|\Gamma_з|$ и $\varphi_з$ – модуль и фаза коэффициента отражения.

Поэтому его значение (соответственно и сопротивление $Z_з$) на частоте $f_з$ следует считать заданным условиями работы преобразователя и оговаривать лишь сопротивление на частоте сигнала:

$$Z_с = \rho. \tag{1.151}$$

Ввиду малой внутренней развязки в преобразователе $K_{ш\,пр}$ и d, а также входное сопротивление зависят от сопротивления нагрузки $Z_н$. Эта зависимость уменьшается, если на выходе ПЧ стоит эффективный ФНЧ, практически закорачивающий сигналы СВЧ.

При испытании приемного модуля, имеющего в своем составе ПУПЧ, сопротивление $Z_н$ для смесительной части задается параметрами ПУПЧ.

Для однозначности измерений сопротивление нагрузки преобразователя нормируется; в [63, 91, 131], например, рекомендуется его выбирать равным комплексно-сопряженному значению выходного сопротивления преобразователя $Z^*_{вых}$.

С учетом сказанного номинальные значения коэффициентов шума и передачи при испытаниях могут быть *нормированы* условиями приведенными ниже:

Для двухканального режима:

$$K_{шн} = (K_ш) \text{ при } Z_с = Z_з = \rho, \quad Z_н = Z^*_{вых\,н}. \tag{1.152}$$

$$d_н = (d) \text{ при } Z_с = Z_з = \rho, \quad Z_н = Z^*_{вых\,н}. \tag{1.153}$$

Номинальные величины выходного $Z_{вых}$ и входного $Z_{вх}$ сопротивлений преобразователя определяются при этом условиями:

$$Z_{вых\,н} = (Z_{вых}) \text{ при } Z_с = Z_з = \rho, \tag{1.154}$$

$$Z_{\text{вх н}} = (Z_{\text{вх}}) \text{ при } Z_{\text{н}} = Z^{*}_{\text{вых н}}. \quad (1.155)$$

Для одноканального режима:

$$K_{\text{шн}} = (K_{\text{ш}}) \text{ при } Z_{\text{с}} = \rho, \quad Z_{\text{н}} = Z^{*}_{\text{вых н}}. \quad (1.156)$$

$$d_{\text{н}} = (d) \text{ при } Z_{\text{с}} = \rho, \quad Z_{\text{н}} = Z^{*}_{\text{вых н}}. \quad (1.157)$$

Номинальные величины выходного $Z_{\text{вых}}$ и входного $Z_{\text{вх}}$ сопротивлений определяются здесь условиями:

$$Z_{\text{вых н}} = (Z_{\text{вых}}) \text{ при } Z_{\text{с}} = \rho, \quad (1.158)$$

$$Z_{\text{вх н}} = (Z_{\text{вх}}) \text{ при } Z_{\text{н}} = Z^{*}_{\text{вых н}}. \quad (1.159)$$

1.11 ШУМОВАЯ ПОЛОСА ПРОПУСКАНИЯ

Так как шумовой сигнал является широкополосным, заслуживает внимания вопрос о полосе частот, в которой он принимается.

Мощность на выходе устройства с частотной характеристикой коэффициента усиления по мощности $K_{\text{у}}(f)$ при воздействии на входе шумового источника с равномерной СПМШ-kT (собственным шумом устройства пренебрегаем) может быть выражена как (рис. 1.17)

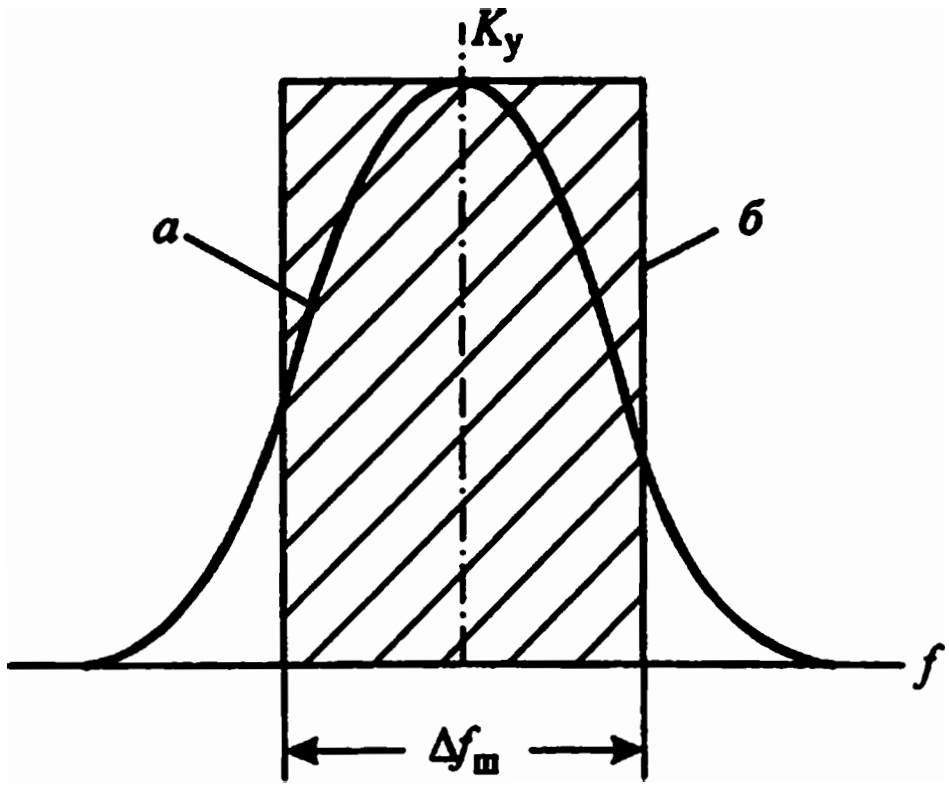


Рис. 1.17. Частотная характеристика $K_{\text{у}}$ устройства
а – реальная характеристика; *б* – эквивалентная характеристика

$$P_{\text{вых}} = \int_0^{\infty} kTK_{\text{у}}(f)df \,. \qquad (1.160)$$

Шумовой полосой $\Delta f_{\text{ш}}$ называется полоса пропускания некоторого эквивалентного усилительного устройства, имеющего постоянный коэффициент усиления в полосе $\Delta f_{\text{ш}}$, равный максимальному коэффициенту усиления реального устройства $K_{\text{у макс}}$, и мощность на выходе, равную шумовой мощности на выходе реального устройства [192, с.13].

Из этого определения следует равенство:

$$\int_0^{\infty} kTK_{\text{у}}(f)df = kTK_{\text{у макс}}\Delta f_{\text{ш}}, \qquad (1.161)$$

откуда получается выражение для шумовой полосы:

$$\boxed{\Delta f_{\text{ш}} = \frac{1}{K_{\text{у макс}}} \int_0^{\infty} K_{\text{у}}(f)df \,.} \qquad (1.162)$$

Оценки показывают [37, с.23], что для многокаскадного УПЧ с одиночными контурами в первом приближении (погрешность 6%)

$$\Delta f_{\text{ш}} \approx \Delta f_{0,5}\,, \qquad (1.163)$$

где $\Delta f_{0,5}$ – полоса, измеренная на уровне 0,5 от максимального усиления по мощности.

При более строгих оценках следует пользоваться формулой (1.162) в общем виде.

1.12 ПАРАМЕТР "ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ" И ЕГО РАЗНОВИДНОСТИ

Параметр "чувствительность" представляет собой меру способности приемного устройства обеспечивать прием слабых радиосигналов [64].

Различают следующие разновидности понятия "чувствительность":
1) чувствительность, ограниченная усилением ($P_{\text{ку}}$),
2) чувствительность, ограниченная шумами ($P_{\text{кш}}$),
3) пороговая чувствительность ($P_{\text{пор}}$).

Две последние разновидности чувствительности ($P_{\text{кш}}$ и $P_{\text{пор}}$) могут быть выражены через коэффициент шума.

Чувствительность, ограниченная усилением, определяется минимальным уровнем радиосигнала ($P_{\text{ку}}$) на входе приемного устройства, необходимым для получения заданного уровня сигнала на выходе этого устройства.

В качестве заданного уровня сигнала на выходе могут быть номинальные выходные мощность или напряжение на сопротивлении нагрузки.

Параметр $P_{ку}$ часто применяется, например, для характеристики свойств радиовещательных приемников. При этом чувствительность обычно указывается в единицах напряжения. При характеристике усилителя СВЧ диапазона чувствительность указывается в единицах мощности.

Как видно из определения, чувствительность $P_{ку}$ связана с коэффициентом усиления приемного устройства и не имеет никакой связи с его шумами.

Чувствительность, ограниченная шумами, определяется минимальным уровнем радиосигнала ($P_{кш}$) на входе приемного устройства, необходимым для получения заданного отношения (n) уровней полезного сигнала и шума на его выходе.

В соответствие с [64], чувствительность $P_{кш}$ определяется при температуре источника сигнала T_0 и отсутствии внешних помех. Отношение n устанавливается конкретно в зависимости от необходимого качества сигнала на выходе приемного устройства. С учетом определений параметров $K_ш$ (1.61) и $P_{кш}$ может быть записано соотношение:

$$\boxed{P_{кш} = nK_ш kT_0\Delta f,} \qquad (1.164)$$

где Δf – полоса частот, в которой рассматриваются параметры $K_ш$ и $P_{кш}$.

Пороговая чувствительность определятся минимальным уровнем радиосигнала ($P_{пор}$) на входе приемного устройства, необходимым для получения равных уровней полезного сигнала и шума на его выходе.

Таким образом, пороговая чувствительность – это частный случай чувствительности, ограниченной шумами, при $n = 1$.

$$\boxed{P_{пор} = K_ш kT_0\Delta f.} \qquad (1.165)$$

Подчеркнем, что в формулах (1.164) и (1.165) имеется в виду стандартный коэффициент шума ($K_ш = K_{ш_0}$), измеренный при температуре T_0.

ВЫВОДЫ

1. Чувствительность малошумящих СВЧ приемных устройств (усилителей, входных преобразователей и др.) характеризуется параметрами “коэффициента шума” ($K_ш$) и “шумовая температура” ($T_у$). Параметр “шумовая температура” рационально использовать для приемных устройств с $K_ш$ менее двух.

2. Для обеспечения однозначности при сопоставлении и анализе значений $K_ш$ ($T_у$) вводится понятие о “нормальных условиях”, регламентирующих температуру входной нагрузки (T_0), полосу частот ($\Delta f \to 0$), коэффициент усиления ($K_ш \to \infty$), сопротивления нагрузок (ρ), подключаемых к входу и выходу исследуемого четырехполюсника.

3. При отклонении от нормальных условий возникают разновидности значений $K_ш$ ($T_у$):

– при отличии температуры входной нагрузки от T_0 коэффициент шума называется "эквивалентным" (или "реальным");

– при широкой полосе частот коэффициент шума носит название "интегральный $K_ш$ " в отличие от "дифференциального $K_ш$ " при малых значениях полосы (аналогично "интегральная $T_у$");

– в зависимости от сопротивления генератора, подключаемого ко входу приемного устройства, различают:

а) $K_ш$ при заданном сопротивлении Z – $K_{шz}(T_{уz})$;

б) $K_ш$ при подключении сопротивления, равного волновому – $K_{шρ}(T_{уρ})$;

в) $K_ш$ при сопротивлении генератора, равном комплексно-сопряженному значению входного сопротивления приемного устройства – $K_{ш*}$ ($T_{у*}$);

г) Минимальный $K_ш$ при подключении к входу оптимального сопротивления – $K_{ш\,мин}(T_{у\,мин})$;

д) Предельный $K_ш$ при заданном предельном рассогласовании по модулю коэффициента отражения или КСВН и неблагоприятной фазе – $K_{ш\,|г|}(T_{у\,|г|})$.

Каждая из перечисленных разновидностей $K_ш$ имеет свои предпочтительные области использования. Наибольшее распространение получил дифференциальный $K_ш$ при температуре входной нагрузки T_0 и величине этой нагрузки, равной волновому сопротивлению линии передачи. Однако правильней выбор разновидности $K_ш$ (и $T_у$) в каждом случае должен соответствовать решаемой задаче.

4. Наиболее полной характеристикой шумовых свойств усилителя является система его четырех шумовых параметров (минимальный $K_ш$, оптимальный комплексный коэффициент отражения от входной нагрузки, крутизна изменения $K_ш$ при рассогласовании). Указанная система параметров позволяет теоретически рассчитать значение $K_ш$ при работе усилителя в СВЧ тракте с любым известным рассогласованием.

Вопрос о необходимости измерения полной системы шумовых параметров решается в зависимости от условий применения усилителя и его свойств.

5. Генераторы шума, используемые при измерении $K_ш$, следует характеризовать номинальной спектральной плотностью мощности шума (СПМШ) или номинальной шумовой температурой ($T_{гш}$), а также выходным коэффициентом отражения. Номинальные значения СПМШ и $T_{гш}$ в диапазоне СВЧ являются однозначными и легко воспроизводимыми при градуировке параметрами, т.к. достигаются путем настройки генератора согласующим трансформатором на максимальную отдачу мощности (условие комплексно-сопряженного согласования).

2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА, КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ И ШУМОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

2.1. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ

Шумовой сигнал представляет собой хаотически изменяющееся во времени напряжение $u_ш(t)$, мгновенные значения которого не могут быть точно предсказаны. Тем не менее, существует ряд статистических характеристик такого сигнала, которые могут быть указаны или измерены с достаточной степенью точности. К ним относятся:

– размах колебаний (амплитуда) шумового напряжения,

– среднее значение напряжения шума $\overline{u_ш(t)}$ (в теории вероятностей носит название “математическое ожидание”),

– средний квадрат шумового напряжения $\overline{u_ш^2(t)}$ (через него может быть найдена мощность шумового процесса),

– спектральная плотность мощности шума (СПМШ), т.е. мощность, приходящаяся на единицу полосы частот,

– закон распределения вероятностей мгновенных значений шумовой функции,

– функция корреляции шумового процесса ,

а также некоторые другие характеристики.

В большинстве случаев измеряются параметры стационарной и эргодической шумовой функции.

Функция называется *стационарной*, если ее статистические характеристики на различных промежутках времени одинаковы.

Если значения статистических параметров функции по времени равны соответствующим значениям, найденным по ансамблю ее реализации, то функция называется *эргодической*.

Свойства стационарности и эргодичности шумовой функции используются при измерении характеристик шумовых сигналов.

Как и при других видах измерений, погрешность при измерении шумовых сигналов состоит из систематической и случайной.

Систематической называется погрешность, значение которой в данном ряде повторных измерений остается постоянным. Она смещает результат в одну сторону от действительной величины.

Случайная погрешность принимает при повторных измерениях одной и той же величины в неизменных условиях как положительные, так и отрицательные значения, не зависящие друг от друга.

а). *Первой характерной особенностью* шумовых измерений является наличие случайной составляющей погрешности измерения параметров шумового процесса даже при условии использования идеальной аппаратуры, т.е. не обладающей собственной погрешностью. Эта составляющая связана с хаотическим характером измеряемого сигнала и определяется заданным временем усреднения сигналов в измерительной аппаратуре. При бесконечном времени усреднения она обращается в нуль. При конечном времени наблюдаются статистические колебания показаний около истинного среднего значения. Характер зависимости этой погрешности от времени усреднения исследовался в работе [138] . В работе [95] приведено наглядное физическое пояснение этой зависимости для случая гауссовского закона распределения шумов, состоящее в следующем.

Величина колебаний выходного напряжения характеризуется среднеквадратичным отклонением – дисперсией. Из теории вероятности известно, что отклонение средней измеренной величины от ее истинного значения обратно пропорционально корню квадратному из числа независимых измерений. Таким образом, относительная случайная ошибка измерения некоторой величины, например, шумовой температуры сигнала $T_ш$:

$$\frac{\Delta T_ш}{T_ш} \sim \frac{1}{\sqrt{n}}, \qquad (2.1)$$

где n – число независимых измерений, $\Delta T_ш$ – абсолютная ошибка.

Длительность независимого шумового импульса $\tau_и$ определяется временем корреляции [106], она обратно пропорциональна полосе пропускания Δf линейной части измерительного устройства:

$$\tau_и \sim \frac{1}{\Delta f}. \qquad (2.2)$$

Следовательно, число независимых импульсов в течение времени измерения τ (времени накопления регистрирующего устройства) составляет:

$$n \sim \tau/\tau_{и} \sim \tau\Delta f \,. \qquad (2.3)$$

Относительная ошибка, таким образом, равна

$$\delta T_{ш} = \frac{\Delta T_{ш}}{T_{ш}} \sim \frac{1}{\sqrt{\Delta f \tau}} \,. \qquad (2.4)$$

Абсолютная случайная ошибка при измерениях, связанная с шумовым характером измеряемого сигнала, определяется:

$$\boxed{\Delta T_{ш} = \frac{K_{иу} T_{ш}}{\sqrt{\Delta f \tau}} \,,} \qquad (2.5)$$

где $K_{иу}$ – коэффициент, близкий к единице, определяемый типом и формой частотной характеристики измерительного устройства (ИУ) и видом усредняющего фильтра [73].

Из формул (2.4, 2.5) видно, что для проведения шумовых измерений с высокой точностью время измерений должно быть выбрано достаточно большим:

$$\tau \geq \frac{K_{иу}^2}{\Delta f} \cdot \frac{1}{(\delta T_{ш})^2} \,. \qquad (2.6)$$

Это обстоятельство, в частности, принципиально ограничивает скорость перестройки панорамных измерителей шумовых сигналов.

Способ уменьшения случайной погрешности за счет увеличения времени измерения носит название *метода накопления*.

б). *Вторая особенность* измерения шумовых сигналов связана с их малой величиной. При измерении чувствительности радиоприемных устройств с полосой несколько мегагерц мощность используемых генераторов шума имеет порядок 10^{-12} –10^{-13} Вт, она соизмерима с мощностью собственных шумов чувствительной радиоаппаратуры. Кроме того, в силу подобия спектра измеряемого сигнала и собственного шума приемника, устройства, предназначенные для измерения сигнала, будут с таким же успехом регистрировать и собственный шум приемника. Таким образом, задача часто сводится к регистрации на выходе измерительного устройства небольшой добавки к постоянно присутствующему напряжению, обусловленному собственным шумом измерительного устройства. При этом собственный шум, также как и сигнал, является флуктуирующей величиной. Это обстоятельство заставляет при измерении малых шумовых сигналов использовать специальные методы выделения малого сигнала на фоне больших собственных шумов изме-

рительной аппаратуры. С этой целью используются компенсационный, модуляционный и корреляционный методы измерений [47, 95, 106, 177].

в). Шумовой сигнал с практически любым законом распределения вероятности амплитуд характерен тем, что отношение его амплитудного значения к действующему велико. Для обеспечения неискаженных измерений среднего и действующего значений такого сигнала необходимо иметь измерительную аппаратуру, обладающую динамическим диапазоном, достаточным для пропускания амплитудных значений измеряемого сигнала, т.е. обеспечивающую практическое отсутствие ограничения выбросов сигнала. Таким образом, необходимость повышенного динамического диапазона измерительной аппаратуры – это *третья особенность* измерения шумовых сигналов.

г). *Четвертая особенность* состоит в том, что в отличие от случая измерения сигналов гармонического характера или других сигналов, обладающих ограниченным спектром частот, при шумовых измерениях приходится иметь дело с сигналами, обычно имеющими равномерный спектр в широкой полосе. Поэтому полоса частот, участвующих в измерениях, практически полностью определяется как по ширине, так и по форме полосой частот, принимаемых измерительным приемником, включая частоты побочных и зеркальных каналов. При последующих преобразованиях на нелинейных элементах спектр может усложняться за счет взаимных биений составляющих широкополосного сигнала в пределах полосы пропускания [47].

Для сужения полосы принимаемых частот и фильтрации ненужных каналов на входе приемника часто используются СВЧ фильтры.

д). В процессе измерения шумового сигнала ко входу измерительного приемного устройства часто бывает необходимо подключать источники сигнала с различным выходным сопротивлением. Это может быть, например, при замене образцового источника шума на градуируемый. Возможно также изменение выходного сопротивления шумового источника сигнала при его включении и выключении и т.д.

Изменение сопротивления, подключаемого ко входу приемника, как правило, несколько изменяет уровень собственного шума этого приемника в результате интерференцированных явлений [82], что приводит к появлению на выходном индикаторе дополнительного неконтролируемого ("паразитного") сигнала. В модуляционных измерителях, например, это явление носит название "паразитной модуляции собственного шума приемника".

Так как измеряемый шумовой сигнал и собственный шум приемника соизмеримы, наличие дополнительного сигнала может привести к большим ошибкам при измерениях. Для устранения этих ошибок предусматривается специальное выравнивание выходных сопротивлений источников или применение развязывающих устройств.

Таким образом, возможность возникновения ошибок за счет изменения собственного шума приемного устройства и необходимость принятия соответствующих мер – это *пятая особенность* методики измерения малых шумовых сигналов.

2.2 МЕТОДЫ ДВОЙНОГО И *n*-КРАТНОГО ПРЕВЫШЕНИЯ

По общепринятой в настоящее время методике измерение коэффициента шума (и шумовой температуры) сводится к сравнению мощности собственного шума устройства с мощностью заранее отградуированного генератора.

При этом используется теоретическое определение $K_ш$ [95], в соответствии с которым,

$$K_ш = \frac{P_{ш\,вых}}{kT_0 \Delta f K_у}, \qquad (2.7)$$

где $P_{ш\,вых}$ – мощность шума на выходе исследуемого устройства в полосе Δf, $K_у$ – коэффициент усиления устройства.

Таким образом, $K_ш$ может быть определен путем измерения СПМШ ($P_{ш\,вых}/\Delta f$) на выходе усилителя, приведенной к его входу и выраженной в масштабе единиц kT_0.

При измерении $K_ш$ *методом двойного превышения* на вход исследуемого устройства, например усилителя (рис. 2.1), подается калиброванный по мощности сигнал такой величины, чтобы результирующая мощность на

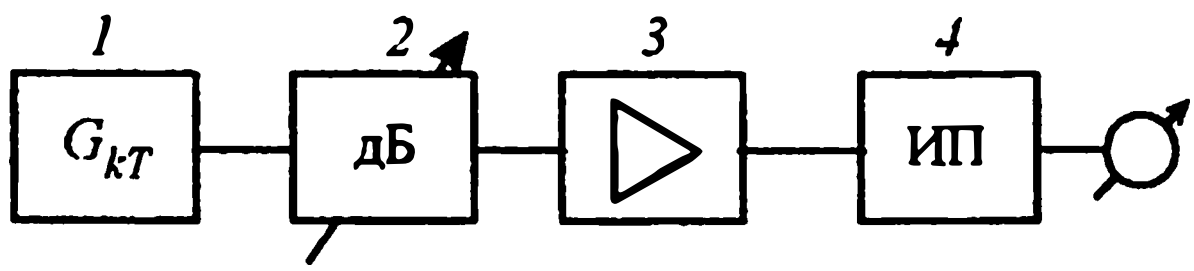


Рис. 2.1. Схема измерителя $K_ш$ методом двойного превышения
1 – генератор, *2* – СВЧ ослабитель, *3* – усилитель, *4* – СВЧ измерительный приемник

выходе измерительного приемника удвоилась по сравнению с первоначальной мощностью, обусловленной только собственным шумом усилителя и измерительного приемника. Подключение калибровочного генератора к входу усилителя дает возможность непосредственно измерять выходную мощность приведенную к входу, без отдельного измерения $K_у$.

Коэффициент шума усилителя, в соответствии с (1.134), вычисляется по формуле [178]:

$$K_{ш} = K_{шΣ} - \frac{K_{ш\,ип} - 1}{K_{у}}, \qquad (2.8)$$

где $K_{шΣ} = \dfrac{P_{с}}{kT_0\ f}$ – измеренное значение, представляющее собой коэффициент шума системы усилитель–приемник,

$P_{с}$ – мощность сигнала генератора, при которой мощность на выходе удваивается,

Δf – эффективная полоса пропускания измерительного приемника,

$K_{ш\,ип}$ – коэффициент шума измерительного приемника.

Второй член в формуле (2.8) отражает вклад в измеренную величину собственного шума измерительного приемника и поэтому для нахождения $K_{ш}$ исследуемого усилителя вычитается из измеренного значения $K_{шΣ}$.

Возможно использование генератора синусоидальных колебаний или шумового генератора.

При синусоидальном сигнале, как видно из формулы (2.8), необходимо точное знание ширины полосы частот Δf измерительного приемника. Ошибка в измерении полосы полностью переносится в погрешность измерения $K_{ш}$. При этом полоса должна быть определена достаточно детально, т.к. необходимо знание ее эффективного значения [160].

В случае использования шумового генератора в пределах полосы Δf СПМШ ($p_{гш}$) знание этой полосы становится ненужным. Действительно, мощность шумового сигнала выражается как

$$P_{с} = p_{гш}\Delta f\ , \text{ и} \qquad (2.9)$$

$$\boxed{K_{ш} = G - \frac{K_{ш\,ип} - 1}{K_{у}},} \qquad (2.10)$$

где $G = \dfrac{p_{гш}}{kT_0}$ – относительная избыточная СПМШ ГШ.

Преимуществом шумового генератора (газоразрядная лампа, шумовой диод, тепловой излучатель) является также соизмеримость уровня шума этого генератора с уровнем шума усилителя. В случае генератора синусоидальных колебаний обычно приходится вводить аттенюатор с большим затуханием, что может привести к повышенным погрешностям в определении мощности $P_{с}$ за счет недостаточного экранирования и, соответственно, к погрешности измерения коэффициента шума.

Второй член в формуле (2.10) носит поправочный характер, тем не менее требует знания двух дополнительных параметров: $K_{ш\,ип}$ и $K_{у}$. Роль этого члена уменьшается, если испытывается усилитель с большим коэффициентом усиления ($K_{у}$ больше 15–20 дБ).

Требования к динамическому диапазону измерительного приемника при методе двойного превышения по смыслу методики измерений невелики (3 дБ). Удобно, если приемник имеет квадратичную амплитудную характеристику, тогда показания на индикаторном приборе приемника должны быть просто удвоены.

Метод двойного превышения предполагает возможность регулировки входного сигнала точно откалиброванным по затуханию СВЧ ослабителем (в случае шумового вакуумного диода регулировка мощности осуществляется анодным током). Градуировка ослабителя должна быть известна на всех рабочих частотах.

Чтобы избежать неудобств, связанных с применением СВЧ ослабителя, часто используется так *называемый "метод n-кратного превышения"* [123, с.35], при котором отсчет отношения мощностей при включенном и выключенном ГШ выполняется с помощью измерительного приемника. Необходимыми условиями возможности использования такого вида измерений являются:

– линейность амплитудной характеристики исследуемого усилителя в пределах используемых изменений сигналов (например, для газоразрядных ГШ – не менее 10–15 дБ);

– квадратичность амплитудной характеристики измерительного приемника в рабочем диапазоне его входных сигналов.

Характеристика приемника может иметь и другой известный вид, однако квадратичная зависимость является наиболее удобной и приводит к меньшим ошибкам.

Генератор шума подключается непосредственно к входу усилителя (рис. 2.2).

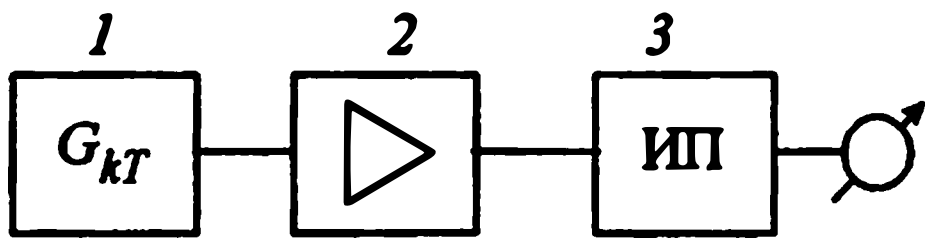


Рис. 2.2. Схема измерителя $K_ш$ методом *n*-кратного превышения
1 – генератор шума, *2* –усилитель, *3* – СВЧ измерительный приемник

При включенном ГШ показание на выходе квадратичного приемника

$$\alpha_1 = \kappa\left(K_{ш\Sigma} + G\right), \qquad (2.11)$$

где $K_{ш\Sigma}$ – суммарной коэффициент шума усилителя и измерительного приемника, G – относительная СПМШ ГШ, κ – коэффициент пропорциональности.

Показание при выключенном ГШ

$$\alpha_2 = \kappa K_{ш\Sigma}. \tag{2.12}$$

Из (2.11) и (2.12) следует:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = n = \frac{K_{ш\Sigma} + G}{K_{ш\Sigma}}, \text{ откуда} \tag{2.13}$$

$$K_{ш\Sigma} = \frac{G}{n-1}. \tag{2.14}$$

Коэффициент шума усилителя

$$\boxed{K_ш = \frac{G}{n-1} - \frac{K_{ш\,ип} - 1}{K_у}}. \tag{2.15}$$

Как видно из формулы измерений (2.15), нахождение $K_ш$ связано с определением разности двух величин в знаменателе формулы (2.15). Для обеспечения хорошей точности отношение n не должно быть слишком близким к единице, т.е. должно выполняться условие

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} >> 1. \tag{2.16}$$

Это означает, что генератор шума должен обладать мощностью, обеспечивающей достаточное превышение над мощностью измеряемого шума.

В [192] указывается, что при наличии погрешности отсчета по выходному индикатору $\delta_{инд}$ оптимальной является такая мощность ГШ, при которой

$$n_{опт} = \frac{1 + \sqrt{2\left(1 - \delta_{инд}^2\right)}}{1 - 2\delta_{инд}^2}. \tag{2.17}$$

При методе n-кратного, также как и двойного превышения требуется введение поправки, связанной с учетом собственных шумов измерительного приемника.

Метод n-кратного превышения используется в ряде автоматизированных ИКШ, где предварительно проводится измерение собственного коэффициента шума приемника, определяется $K_у$ усилителя и автоматически находится и вычитается поправочный член [69, 78, 173].

В литературе метод n-кратного превышения называют также "методом Y-фактора", при этом под Y подразумевают величину n, входящую в формулу (2.15).

2.3 МЕТОД ПОСТОЯННОГО УРОВНЯ

При этом методе [42, 69, 76] после усилителя ставится СВЧ ослабитель (рис. 2.3).

Измерения проводятся следующим образом.

– При выключенном ГШ стрелка выходного прибора измерительного приемника устанавливается на произвольное деление (коэффициент передачи ослабителя d_1).

– Включается ГШ, показания увеличиваются, вводя СВЧ ослабитель, показания прибора приводят к первоначальному значению (коэффициент передачи ослабителя d_2).

– По полученным отсчетам d_1 и d_2 рассчитывается коэффициент шума.

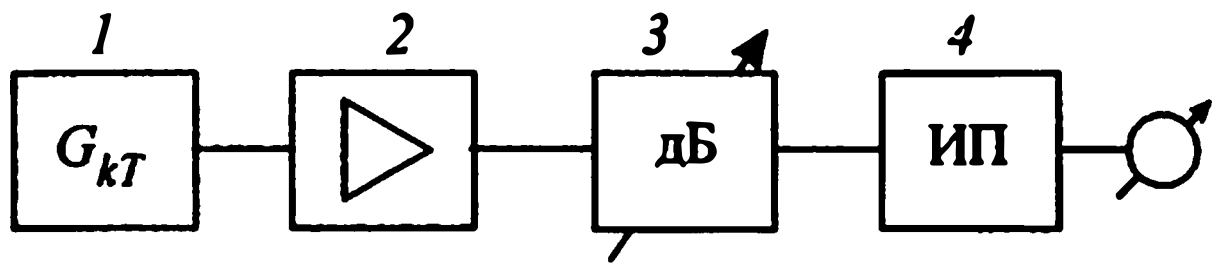


Рис. 2.3. Схема измерителя $K_ш$ методом постоянного уровня с СВЧ ослабителем
1 – генератор шума, *2* – усилитель, *3* – СВЧ ослабитель,
4 – СВЧ измерительный приемник

Найдем рассчетную формулу для коэффициента шума.

Показание при выключенном ГШ и температуре СВЧ ослабителя T_0 может быть выражено как

$$\alpha_0 = \kappa\left[K_ш K_y d_1 T_0 + (1 - d_1) T_0 + (K_{ш\,ип} - 1) T_0\right], \qquad (2.18)$$

где 2-ой член в скобках представляет собой шумовой вклад ослабителя при затухании d_1, 3-ий член – шумовой вклад приемника, κ – коэффициент пропорциональности.

При включении ГШ то же показание реализуется при затухании d_2, т.е.

$$\alpha_0 = \kappa\left[(K_ш + G) K_y d_2 T_0 + (1 - d_2) T_0 + (K_{ш\,ип} - 1) T_0\right]. \qquad (2.19)$$

Приравнивая выражения (2.18) и (2.19), можно получить формулу для измеряемого коэффициента шума усилителя в следующем виде:

$$\boxed{K_ш = \frac{G}{n-1} + \frac{1}{K_y}}, \qquad (2.20)$$

где $n = d_1/d_2 \quad (d_1 > d_2)$. (2.21)

Если затухания ослабителя выражаются в дБ, то формула (2.20) имеет вид:

$$K_{ш} = \frac{G}{10^{0,1(d_{1,дБ} - d_{2,дБ})} - 1} + \frac{1}{K_{у}}. \qquad (2.22)$$

К достоинствам метода постоянного уровня можно отнести следующее:

– измерительный приемник выполняет функцию индикатора постоянного уровня, поэтому к виду его амплитудной характеристики особых требований не предъявляется,

– измеряется $K_{ш}$ усилителя без добавок, связанных с шумом измерительного приемника. Поправочный член $1/K_{у}$ (формула 2.20) при больших коэффициентах усиления имеет малую величину.

В соответствии с [69, с36] , при условии

$$K_{ш} \cdot K_{у} > 50 \qquad (2.23)$$

поправочным членом пренебрегают.

Недостатками метода являются:

– необходимость использования СВЧ ослабителя, который должен иметь точные градуировочные кривые на всех рабочих частотах,

– необходимость строгого сохранения в течение процесса измерений коэффициентов усиления исследуемого усилителя и измерительного приемника.

Разновидностью метода постоянного уровня является вариант, когда используется ослабитель в тракте промежуточной частоты (рис. 2.4) измерительного приемника. При этом исчезает зависимость градуировки ослабителя от частоты измерений и снижается погрешность отсчета отношения n за счет возможности использования точного ослабителя ПЧ. Однако измеренной величиной в этом случае будет коэффициент шума СВЧ усилителя совместно с добавкой, связанной с собственным шумом измерительного приемника, т.е. расчет $K_{ш}$ СВЧ усилителя следует проводить в соответствии с полной формулой (2.10).

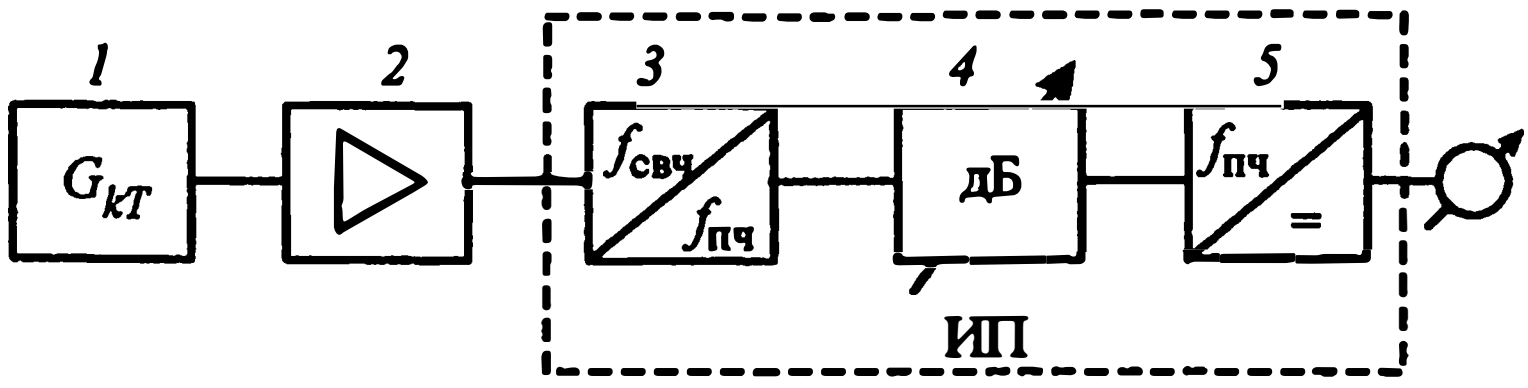


Рис. 2.4. Схема измерителя $K_{ш}$ методом постоянного уровня с ослабителем промежуточной частоты

1 – генератор шума, *2* – усилитель, *3* – входной преобразователь частоты измерительного приемника, *4* – ослабитель на промежуточной частоте, *5* – выходной преобразователь частоты в постоянный ток

2.4 ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДУЛЯЦИОННОГО МЕТОДА

С целью повышения чувствительности ИКШ, улучшения точности измерений, исключения поправки, связанной с собственным шумом измерительной аппаратуры (формула 2.8), обеспечения квадратичной амплитудной характеристики ИП широко используется индикация сигналов на выходе усилителя о помощью модуляционных измерительных приемников [2, 73].

Модуляционные приемники могут использоваться как при измерениях уже упомянутыми методами *n*-кратного превышения и постоянного уровня, так и для создания других рациональных программ измерений $K_ш$.

2.4.1. Метод *n*-кратного превышения при модуляции шума СВЧ модулятором ("метод двух отсчетов")

При этом методе измеряемый шумовой сигнал амплитудно модулируется СВЧ модулятором *3* (рис. 2.5), стоящим после усилителя. Показания приемника *4* пропорциональны переменной составляющей промодулированных сигналов.

В процессе измерений делается два отсчета:

– при включенных ГШ и СВЧ усилителе (α_1),

– при выключенном ГШ и включенном СВЧ усилителе (α_2).

В нормальных условиях, когда модулятор находится при физической температуре T_0, шумовой сигнал на его выходе в запертом состоянии соответствует этой температуре ($p'_ш = T_0/T_0 = 1$).

Поэтому показания модуляционного приемника при выключенном ГШ

$$\alpha_2 = \kappa\left(K_ш K_у - 1\right), \qquad (2.24)$$

где κ – постоянный коэффициент.

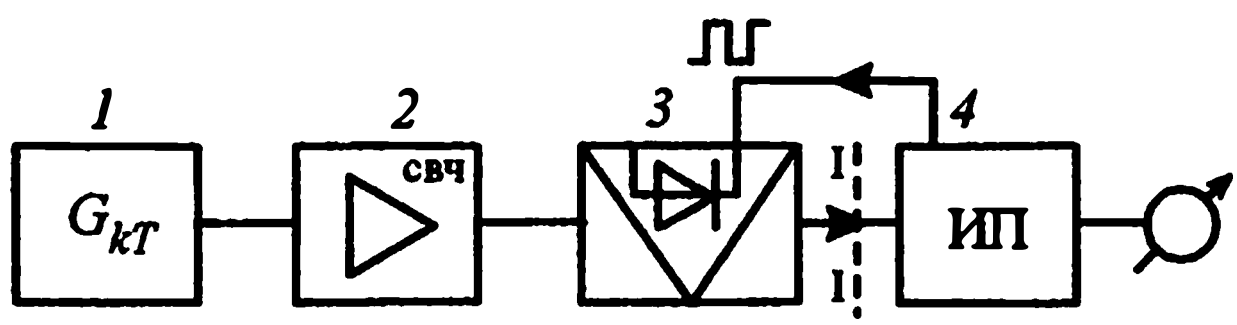


Рис. 2.5. Модуляционный измеритель $K_ш$ методом 2-х отсчетов по шкале выходного прибора

1 – генератор шума, *2* – усилитель, *3* – СВЧ пинмодулятор, *4* – модуляционный СВЧ измерительный приемник

При включенном ГШ

$$\alpha_1 = \kappa\left[(G + K_{ш})K_y - 1\right]. \qquad (2.25)$$

Отношение показаний равно:

$$n = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{(G + K_{ш})K_y - 1}{K_{ш}K_y - 1}, \qquad (2.26)$$

откуда

$$\boxed{K_{ш} = \frac{G}{n-1} + \frac{1}{K_y}}. \qquad (2.27)$$

Как видно из (2.27), при использовании модуляционного метода:
– поправочный члеи ($1/K_y$) по сравнению с (2.10) существенно уменьшается и часто можно им пренебречь (условие 2.23),
– для вычисления поправочного члена, в отличие от формулы (2.10), нет необходимости знать коэффициент шума приемника.

Если в измерительном приемнике имеется система компенсации собственных шумов, то ввести необходимую поправку ($1/K_y$) можно аппаратурным путем, устанавливая начальное показание выходного прибора при запертом модуляторе (или выключенном усилителе) на единицу:

т.е. $$\alpha = 1. \qquad (2.28)$$

При этом предварительно проводится абсолютная калибровка чувствительности приемника по его входу (сеч. I–I, рис. 2.5).

Отметим, что поправку $1/K_y$ теоретически можно полностью исключить, если использовать модулятор, охлажденный до температуры абсолютного нуля. То же можно отнести и к методу постоянного уровня при условии охлаждения до нуля СВЧ ослабителя *3* (рис. 2.3).

2.4.2 Метод *n*-кратного превышения при модуляции в УПЧ ("метод трех отсчетов")

Модуляция шумовых сигналов осуществляется в УПЧ (рис. 2.6). Это, с одной стороны, упрощает СВЧ тракт и делает измеритель более универсальным, с другой, – вызывает необходимость учитывать и исключать вклад в измеряемые сигналы собственных шумов измерительного приемника.

В процессе измерений делается три отсчета:
– при включенных ГШ и СВЧ усилителе (α_1),
– при выключенном ГШ и включенном СВЧ усилите (α_2),
– при выключенных ГШ и СВЧ усилителе (α_3).

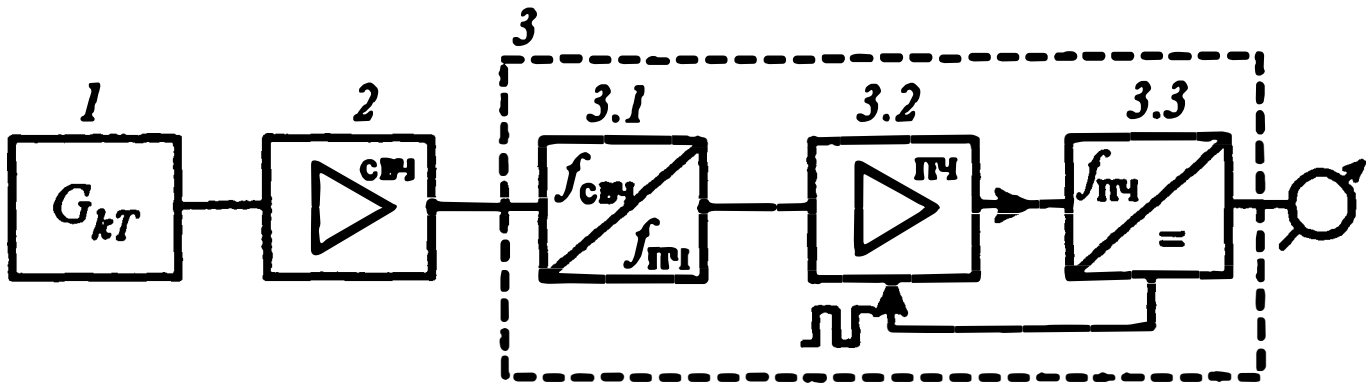


Рис. 2.6. Модуляционный измеритель $K_ш$ методом 3-х отсчетов по шкале выходного прибора

1 – генератор шума, *2* – усилитель СВЧ, *3* – модуляционный СВЧ измерительный приемник, *3.1* – входной преобразователь частоты, *3.2* – усилитель промежуточной частоты, *3.3* – низкочастотная часть измерительного приемника

С учетом шумового вклада приемника показания при первом отсчете могут быть выражены как

$$\alpha_1 = \kappa\left(G + K_ш + \frac{K_{ш\,ип} - 1}{K_у}\right), \qquad (2.29)$$

где G – избыточная относительная СПМШ ГШ,
$K_{ш\,ип}$ – коэффициент шума измерительного приемника,
$K_ш$ и $K_у$ – коэффициенты шума и усиления СВЧ усилителя,
κ – коэффициент пропорциональности.

При втором отсчете (ГШ выключен):

$$\alpha_2 = \kappa\left(K_ш + \frac{K_{ш\,ип} - 1}{K_у}\right). \qquad (2.30)$$

При третьем отсчете (ГШ и СВЧ усилитель выключены):

$$\alpha_3 = \frac{\kappa \cdot K_{ш\,ип}}{K_у}. \qquad (2.31)$$

Из (2.29), (2.30) и (2.31) легко найти вспомогательные выражения:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_3} - 1 = \frac{1}{K_{ш\,ип}}\left(GK_у + K_ш K_у - 1\right), \qquad (2.32)$$

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_3} - 1 = \frac{1}{K_{ш\,ип}}\left(K_ш K_у - 1\right), \qquad (2.33)$$

откуда далее следует, что

$$K_{ш} = \frac{G}{\frac{\alpha_1/\alpha_3 - 1}{\alpha_2/\alpha_3 - 1} - 1} + \frac{1}{K_y}, \qquad (2.34)$$

или
$$K_{ш} = G\frac{\alpha_2 - \alpha_3}{\alpha_1 - \alpha_2} + \frac{1}{K_y} \quad (\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3) \qquad (2.35)$$

Если шумами приемника можно пренебречь, т.е.

$$\alpha_3 << \alpha_2, \qquad (2.36)$$

то
$$K_{ш} = \frac{G}{\alpha_1/\alpha_2 - 1} + \frac{1}{K_y}, \qquad (2.37)$$

что совпадает с (2.27), и метод сводится к двум отсчетам. Поправка $1/K_y$ может не учитываться при упомянутом ранее условии (2.23).

2.4.3 Нулевой модуляционный метод измерения $K_{ш}$ с применением образцового ослабителя промежуточной частоты

Нулевой модуляционный метод используется для повышения точности измерений $K_{ш}$, главным образом, – при поверке ИКШ и проведении контрольных измерений. Точность относительных отсчетов при этом методе обеспечивается образцовым ослабителем промежуточной частоты (ОАПЧ). ОАПЧ на промежуточных частотах порядка единиц и десятков мегагерц обладают малой погрешностью, не превышающей десятых или сотых долей децибела [60, 81].

Модуляция измеряемых шумовых сигналов, также как и в методах с отсчетом по шкале, может проводиться либо в УПЧ приемника, либо в СВЧ тракте.

Рассмотрим соответствующие разновидности нулевого метода.

а) *Метод модуляции в УПЧ* (“*нулевой метод трех отсчетов*”).

В качестве чувствительного нуль-индикатора при этом методе используется модуляционный измерительный приемник [1, 2], показания которого пропорциональны переменной составляющей сигналов, модуляция осуществляется в УПЧ. УПЧ приемника имеет два равноценных входа (Вх 1 и Вх 2, рис. 2.7), на которые соответственно подаются преобразованный по частоте шумовой сигнал из СВЧ тракта (Вх 1) и сигнал от шумового или синусоидального генератора промежуточной частоты *5*, который прошел через образцовый аттенюатор промежуточной частоты (ОАПЧ) предельного типа *4* (Вх 2). Входы УПЧ противофазно открываются управляющим напряжением типа “меандр” с частотой несколько десятков герц.

При использовании синусоидального генератора предварительно должна быть проконтролирована идентичность амплитудной характеристики де-

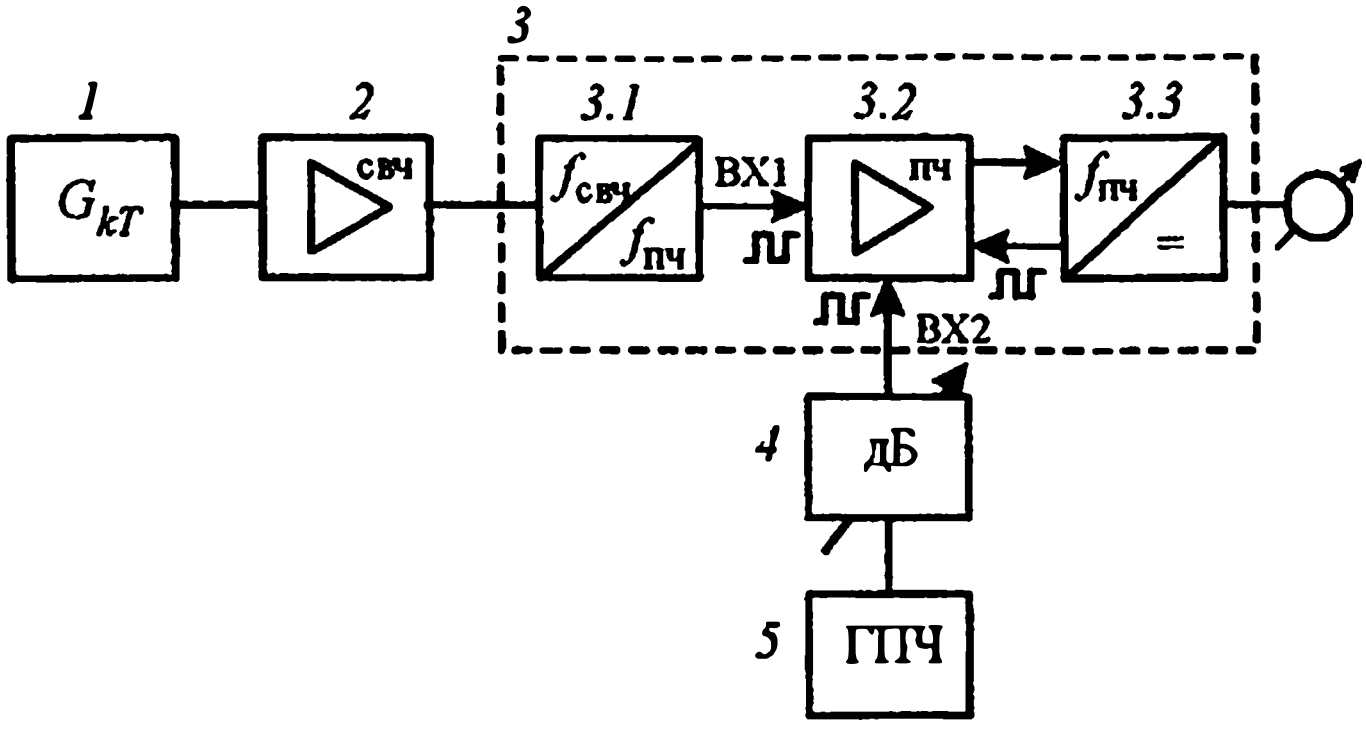


Рис. 2.7. Нулевой модуляционный измеритель $K_ш$ с применением ОАПЧ по методу 3-х отсчетов

1 – генератор шума, *2* – усилитель СВЧ, *3* – модуляционный СВЧ измерительный приемник, *3.1* – входной преобразователь частоты, *3.2* – усилитель промежуточной частоты, *3.3* – низкочастотная часть измерительного приемника, *4* – образцовый аттенюатр промежуточной частоты, *5* – генератор промежуточной частоты

тектора приемника при воздействии шумового и синусоидального сигналов в требуемом динамическом диапазоне.

Измерения проводятся в три этапа:

– при включенных ГШ и усилителе путем регулировки с помощью ОАПЧ компенсирующего сигнала от ГПЧ добиваются на выходном индикаторе нулевых показаний (коэффициент передачи ОАПЧ – α_1). При этом компенсируется сигнал, вызванный шумами ГШ, исследуемого СВЧ усилителя и приемника,

– ГШ выключается и проводится компенсация шумов СВЧ усилителя и приемника (коэффициент передачи α_2).

– выключается СВЧ усилитель и компенсируется шум приемника (коэффициент передачи α_3).

По полученным отсчетам находится $K_ш$ СВЧ усилителя в соответствии с формулой, аналогичной приведенной в разделе 2.4.2:

$$K_ш = \frac{G}{\frac{\alpha_1/\alpha_3 - 1}{\alpha_2/\alpha_3 - 1} - 1} + \frac{1}{K_y}, \qquad (2.38)$$

где α_1/α_3 и α_2/α_3 – отношения коэффициентов передачи, выраженные в относительных единицах,

K_y – коэффициент усиления СВЧ усилителя,

G – избыточная относительная СПМШ ГШ.

Если отсчеты изменения коэффициентов передачи выражаются в дБ, то формула (2.38) принимает вид:

$$K_{ш} = \frac{G}{\dfrac{10^{0,1(\alpha_{1,дБ}-\alpha_{3,дБ})}-1}{10^{0,1(\alpha_{2,дБ}-\alpha_{3,дБ})}-1}-1} + \frac{1}{K_{у}}. \qquad (2.39)$$

При $K_{ш} K_{у} > 50$ (условие 2.23) коэффициент шума можно рассчитывать без поправочного члена, т.е.:

$$K_{ш} \approx \frac{G}{\dfrac{\alpha_1/\alpha_3 - 1}{\alpha_2/\alpha_3 - 1} - 1}. \qquad (2.40)$$

К достоинствам нулевого метода трех отсчетов можно отнести:
– отсутствие погрешности за счет нестабильности усиления измерительного приемника и вида его амплитудной характеристики,
– высокую точность относительных отсчетов, обеспечиваемую образцовым ослабителем ПЧ.

б) *Метод модуляции в СВЧ тракте* (“*нулевой метод двух отсчетов*”).

Модуляция по сигнальному каналу проводится с помощью СВЧ модулятора *3* (рис. 2.8), модуляция компенсирующего сигнала ПЧ – путем противо-

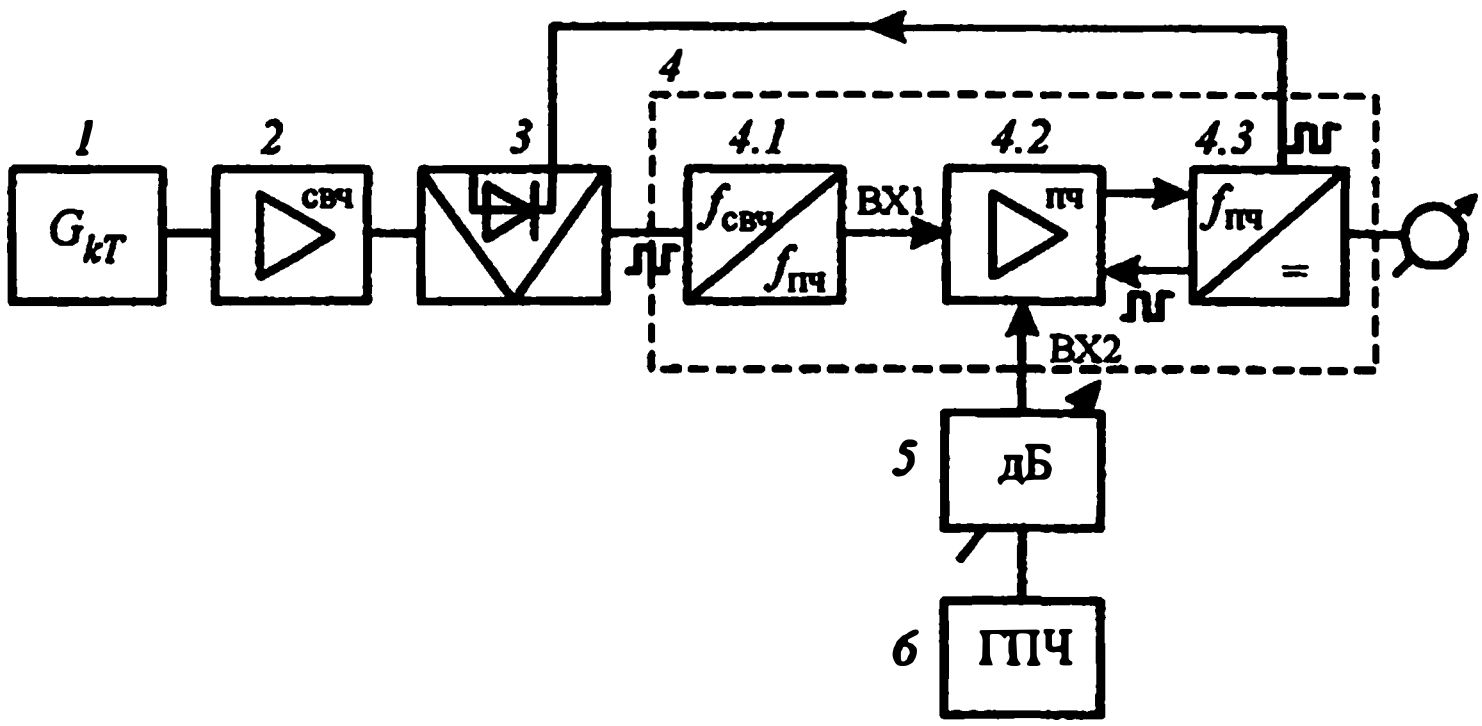


Рис. 2.8. Нулевой модуляционный измеритель $K_{ш}$ с применением ОАПЧ по методу 2-х отсчетов

1 – генератор шума, *2* – усилитель, *3* – СВЧ пинмодулятор, *4* – модуляционный СВЧ измерительный приемник, *4.1* – входной преобразователь частоты ИП, *4.2* – УПЧ, *4.3* – низкочастотная часть модуляционного измерительного приемника, *5* – ОАПЧ, *6* – генератор промежуточной частоты

фазного выключения генератора ПЧ [162]. В результате шум преобразователя оказывается немодулированным, и измерения сводятся к двум отсчетам:
– при включенном ГШ и СВЧ усилителе (коэффициент передачи ОАПЧ – α_1),
– при выключенном ГШ и включенном СВЧ усилителе (коэффициент передачи α_2).

Расчетная формула для коэффициента шума:

$$K_{ш} = \frac{G}{\alpha_2/\alpha_1 - 1} + \frac{1}{K_y}. \qquad (2.41)$$

При отсчетах разности коэффициентов передачи в децибелах:

$$K_{ш} = \frac{G}{10^{0,1(\alpha_{1,дБ} - \alpha_{2,дБ})} - 1} + \frac{1}{K_y}. \qquad (2.42)$$

Если выполняется условие $K_{ш} K_y > 50$ (формула 2.23), то

$$K_{ш} \approx \frac{G}{\alpha_2/\alpha_1 - 1}. \qquad (2.43)$$

Помимо сокращения измерительных операций, такой способ по сравнению с методом трех отсчетов повышает также точность измерений, что особенно проявляется при большом коэффициенте шума измерительного приемника и малом коэффициенте усиления СВЧ усилителя.

Достоинства метода трех отсчетов, упомянутые выше, здесь, естественно, также сохраняются.

2.5 ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОЙ ШКАЛЫ

В основу измерения коэффициента шума усилителей методом линейной шкалы [2, 108] положен модуляционный метод в варианте, позволяющем раздельно индицировать избыточную ОСПМШ генератора шума (G) и избыточную спектральную плотность мощности собственного шума с выхода исследуемого усилителя.

Схематически структура измерителя представлена на рис. 2.9 Процесс измерений состоит из двух этапов: "калибровка" и "измерение".

При операции "*калибровка*" шумовая мощность ГШ (рис. 2.10*а*) модулируется по закону меандра управляющим напряжением, поступающим от генератора опорного напряжения (ГОН) *5* через переключатель *3* (положение 1–3 рис. 2.9). Измерительный приемник (рис. 2.11) имеет в своем составе синхронный детектор *5*, синхронизируемый ГОН, и поэтому реагирует лишь на переменную составляющую поступающих на его вход сигналов, т.е. в данном случае на сигнал от ГШ.

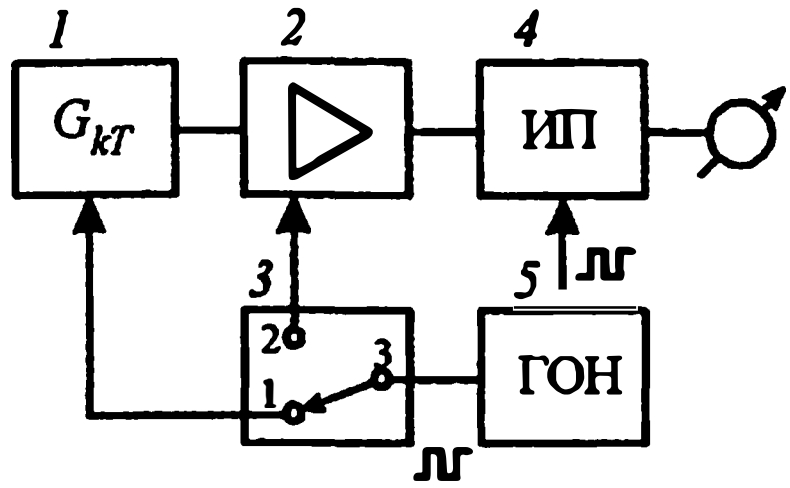


Рис. 2.9. Схема измерения $K_ш$ по методу линейной шкалы
1 – генератор шума, *2* – исследуемый усилитель, *3* – переключатель, *4* – модуляционный СВЧ измерительный приемник, *5* – генератор опорного напряжения

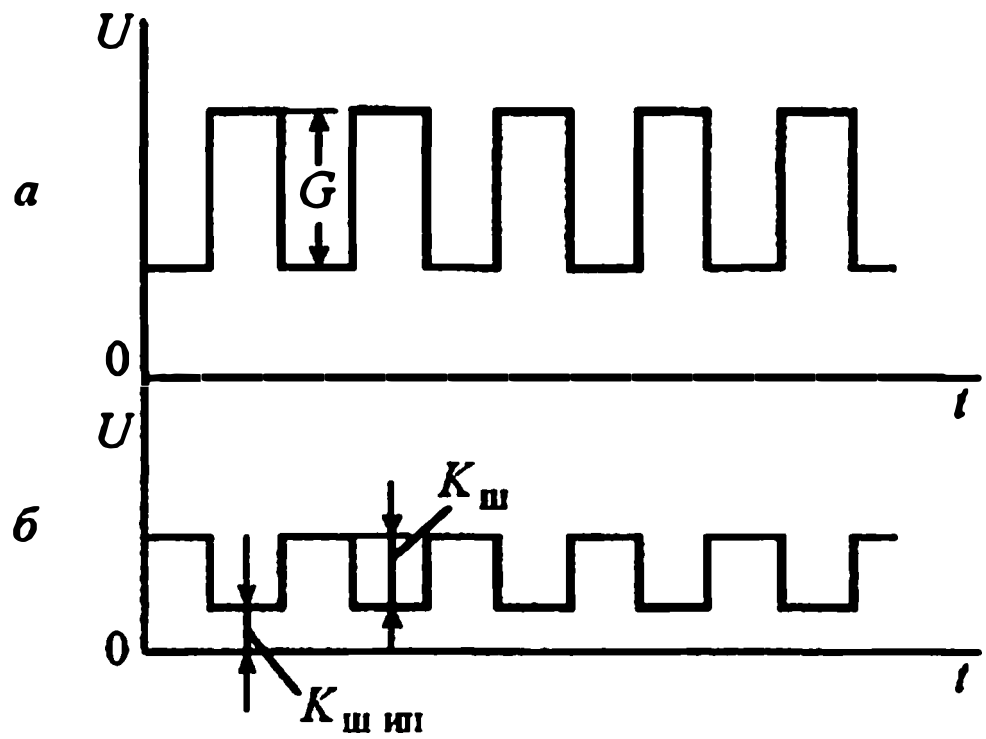


Рис. 2.10. Эпюры, поясняющие измерение $K_ш$ по методу линейной шкалы
а – режим "калибровка", *б* – режим "измерение"

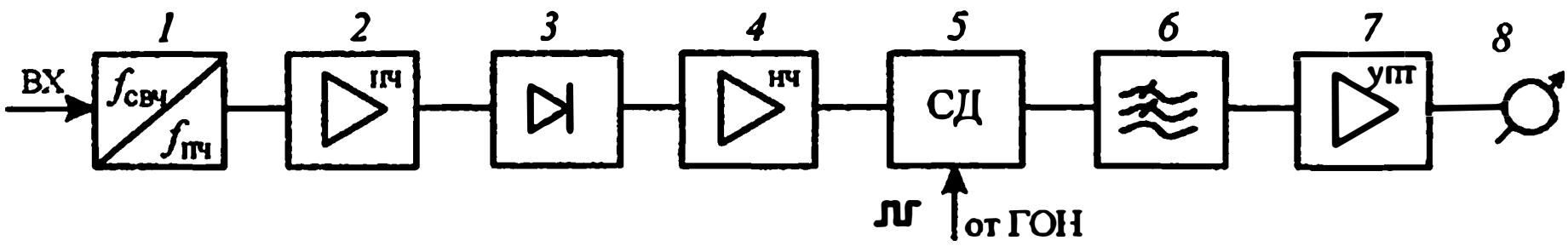


Рис. 2.11. Структурная схема модуляционного СВЧ измерительного приемника
1 – преобразователь частоты, *2* – усилитель ПЧ, *3* – квадратичный детектор, *4* – усилитель НЧ, *5* – синхронный детектор, *6* – фильтр нижних частот, *7* – усилитель постоянного тока, *8* – выходной индикатор

При операции "*измерение*" (переключатель *3* в положении 2–3 рис. 2.9) модулируется собственный шум усилителя (усилитель периодически запирается), ГШ при этом выключен, приемник реагирует на сигнал от собственных шумов усилителя (рис. 2.10*б*).

Измерительный приемник содержит линейные усилители и квадратичный детектор. Поэтому при калибровке показание α_1 выходного прибора ИП пропорционально ОСПМШ ГШ.

$$\alpha_1 = \kappa K_y G, \tag{2.44}$$

где K_y – коэффициент усиления усилителя,

$G = \dfrac{T_{гш} - T_0}{T_0}$ – относительная избыточная СПМШ ГШ,

$T_{гш}$ – полная шумовая температура ГШ,

κ – коэффициент пропорциональности.

Отклонение при операции "измерение"

$$\alpha_2 = \kappa\left(K_ш K_y - 1\right). \tag{2.45}$$

Наличие поправочного члена (минус единица в скобках) связано с тем, что при запирании усилителя шумовая температура на его выходе не обращается в абсолютный нуль, а остается близкой к T_0 (относительная шумовая температура равна 1), т.е. фактически 100 % модуляция выходного шума усилителя не достигается [2].

Из (2.44) и (2.45) следует:

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_1}{G}\left(K_ш - \frac{1}{K_y}\right). \tag{2.46}$$

Если отклонение α_1 на выходном приборе при калибровке устанавливается численно равным G, т.е.

$$\alpha_1 = G, \tag{2.47}$$

то

$$\alpha_2 = K_ш - \frac{1}{K_y}, \tag{2.48}$$

и

$$\boxed{K_ш = \alpha_2 + \frac{1}{K_y}.} \tag{2.49}$$

Во многих случаях коэффициент усиления велик и выполняется неравенство

$$K_{ш} >> \frac{1}{K_{у}} \qquad (2.50)$$

(как указывалось, в соответствии с [69], устанавливается условие; $K_{ш} K_{у} > 50$).

При этом $$\boxed{K_{ш} \approx \alpha_2,} \qquad (2.51)$$

т.е. отклонение на шкале выходного аналогового прибора пропорционально измеряемому значению коэффициента шума. Это обстоятельство позволило назвать рассматриваемый способ измерений "методом линейной шкалы".

Пропорциональность показаний измеряемой величине представляет удобство для оператора и, в отличие от других методов, обеспечивает одинаковую погрешность при различном соотношении между относительной СПМШ ГШ и величиной измеряемого коэффициента шума усилителя, что будет показано ниже.

Благодаря своим достоинствам метод линейной шкалы в различных вариантах получил широкое распространение во многих разработках отечественных ИКШ [2, 18, 22, 25, 30, 58, 77, 78, 115, 143, 144, 152].

Известны также многочисленные разработки ИКШ на основе этого метода, проведенные в ЦНИИА (г. Саратов), не описанные в литературе ("Шелест", "Растр", "Шомпол", "Реверс" и др.).

2.6 СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДА "ЛИНЕЙНОЙ ШКАЛЫ" И МЕТОДА "Y-ФАКТОРА"

Несмотря на разнообразие описанных выше методов измерения коэффициента шума, по основному принципу сравнения собственного шума усилителя и шума ГШ все методы могут быть разделены в основном на две группы.

К первой группе можно отнести способы, где один из отсчетов связан с воздействием собственного шума усилителя (в некоторых случаях с добавкой шума измерительного приемника), и второй отсчет – с воздействием шума усилителя совместно с шумом ГШ (сюда относятся способы, описанные в подразделах 2.2–2.4). Коэффициент шума (при большом $K_{у}$) находится при этом по формуле:

$$K_{ш} = \frac{G}{n-1} = \frac{G}{Y-1}. \qquad (2.52)$$

Здесь $Y = n$ – обозначение, принятое в американской литературе.

Этот способ возник первым и получил название "метода Y-фактора".

Ко второй – относятся способы, основанные на "методе линейной шкалы" (см. подраздел 2.5). Здесь сравниваются отсчеты приемника, связанные с собственным шумом усилителя и шумом ГШ в чистом виде.

При этом, если приемник квадратичный,

$$K_{ш} = nG, \tag{2.53}$$

где

$$n = \alpha_2/\alpha_1, \tag{2.54}$$

α_1 и α_2 – отсчеты, пропорциональные соответственно мощности шумов усилителя и ГШ.

Сопоставим формулы измерения методом Y-фактора (2.52) и методом линейной шкалы (2.53). Как видно, зависимость $K_{ш}$ от измеренного отношения n для метода Y-фактора является обратной и нелинейной, в то время как для метода линейной шкалы имеет место прямая пропорциональность $K_{ш}$ и n. Из-за этого в первом случае при использовании прямоотсчетных систем измерения $K_{ш}$ по стрелочному прибору теряется наглядность и снижается точность отсчетов.

Для анализа погрешностей найдем дифференциалы логарифмов (2.52) и (2.53), соответственно:

– для метода Y-фактора

$$d\ln K_{ш(Y)} = d\ln G - d\ln(n-1), \tag{2.55}$$

– для метода линейной шкалы

$$d\ln K_{ш(лш)} = d\ln G + d\ln n. \tag{2.56}$$

Вероятные относительные погрешности измерений приближенно выражаются через частные относительные погрешности:

$$\delta K_{ш(Y)} = \sqrt{(\delta G)^2 + (\delta n)^2 f^2(n)}, \tag{2.57}$$

где

$$f(n) = \frac{n}{n-1}, \tag{2.58}$$

и

$$\delta K_{ш(лш)} = \sqrt{(\delta G)^2 + (\delta n)^2}. \tag{2.59}$$

Как видно, составляющая погрешности δn для метода Y-фактора входит в формулу (2.57) с удельным весом, определяемым функцией $f(n)$ (2.58). Вид этой функции показан на рис. 2.12. Весовой коэффициент $f(n)$ при малых значениях n велик и уменьшается при увеличении n, стремясь к предельному значению, равному единице при $n \to \infty$. Следовательно, измерения с генераторами шума, имеющими малые значения G (например, тепловые, криогенные и др.), принципиально будут проводиться по этой методике с бо́льшей погрешностью.

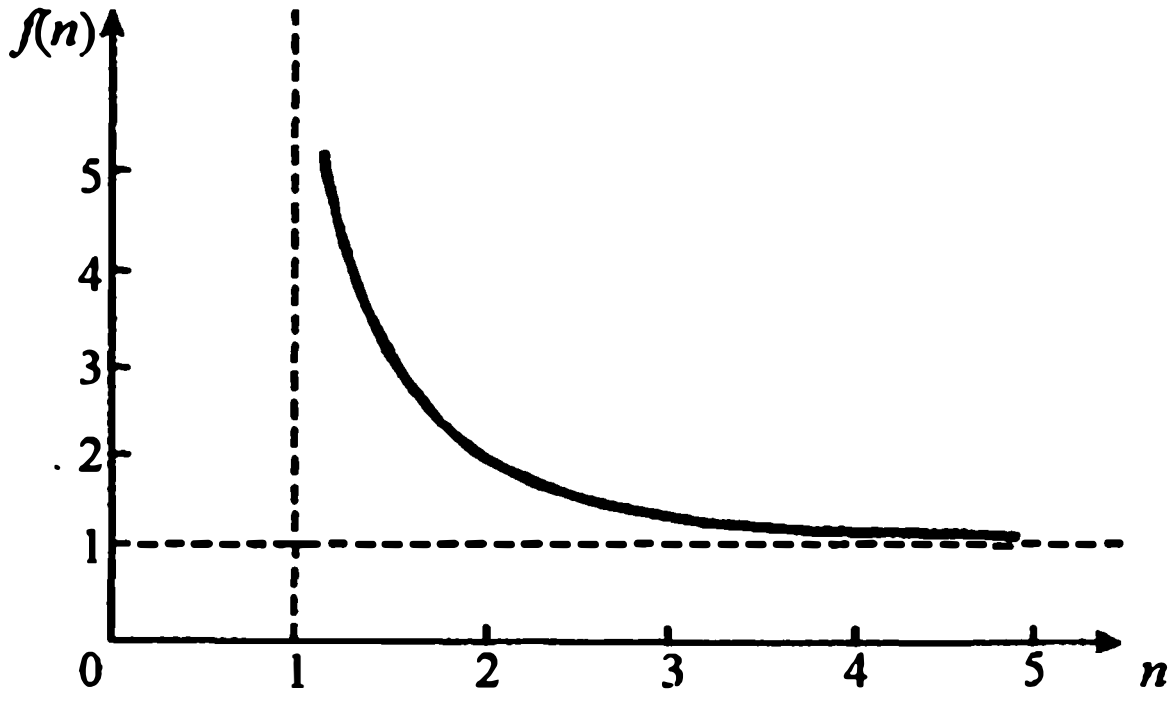


Рис. 2.12. Функция, определяющая удельный вес погрешности отсчета

В то же время при методе линейной шкалы дополнительная погрешность из-за изменения соотношения уровней шумов ГШ и усилителя не возникает, весовой коэффициент при составляющей относительной погрешности δn всегда остается равным единице.

Таким образом, измерения методом линейной шкалы являются более предпочтительными, чем измерения методом Y-фактора по двум причинам:

– обеспечивается удобный непосредственный отсчет по аналоговому индикатору,

– уменьшается погрешность измерений.

2.7 МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ СИСТЕМЫ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ УСИЛИТЕЛЯ

В подразделе 1.8 указано, что наиболее оптимальная для диапазона СВЧ система шумовых параметров усилителя содержит следующие четыре параметра:

– оптимальный коэффициент шума $K_{ш\ мин}$, т.е. $K_ш$ при наилучшем согласовании генератора с входом усилителя;

– крутизну изменения $K_ш$ при рассогласовании на входе усилителя $\beta_{кш}$;

– модуль оптимального коэффициента отражения $|\Gamma_{г\ опт}|$ от генератора, при котором достигается минимальный $K_ш$ (или соответствующий $КСВН_{г\ опт}$);

– фазу оптимального коэффициента отражения – $\psi_{г\ опт}$.

Для экспериментального нахождения этих параметров необходим ИКШ, позволяющий проводить непосредственную прямоотсчетную настройку на минимальный $K_ш$ (например, ИКШ, содержащий систему АРУ), и генератор шума с известным и регулируемым по модулю и фазе коэффициентом отражения.

Структурная схема, соответствующей измерительной установки [116] изображена на рис. 2.13. Генератор шума содержит источник шума *1*, развя-

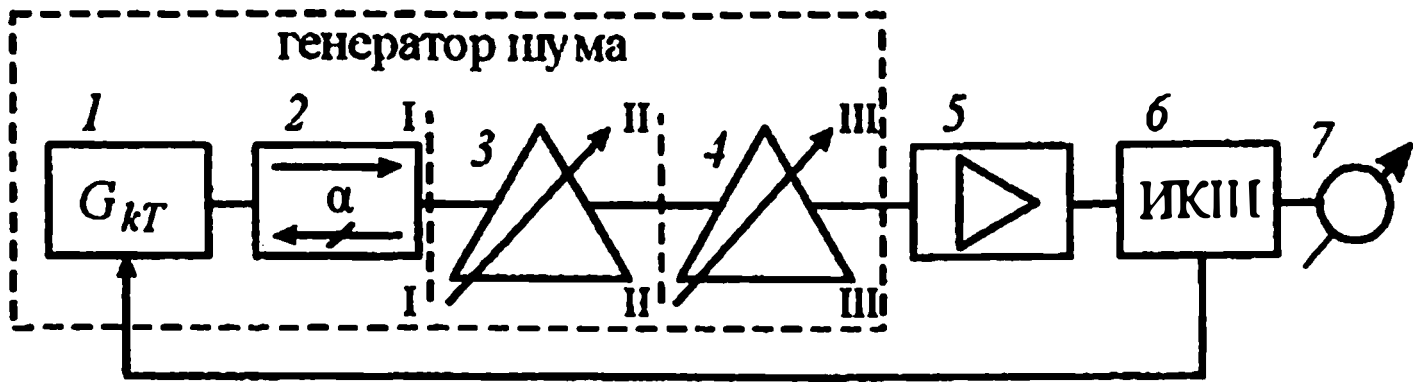


Рис. 2.13. Структурная схема установки для измерения шумовых параметров СВЧ усилителя

1 – источник шума, *2* – развязывающее устройство, *3*, *4* – согласующий трансформатор (СТ), *5* – исследуемый усилитель, *6* – ИКШ, *7* – выходной индикаторный прибор

зывающее устройство *2* и два согласующих трансформатора (СТ) *3*, *4*. Развязывающее устройство обеспечивает постоянство коэффициента отражения в сеч. I–I при включении и выключении источника шума. Согласующие трансформаторы должны обладать возможностью раздельной регулировки и отсчета коэффициента отражения по модулю и фазе. Часто используются СТ в виде погружаемого металлического штыря, который может также перемещаться вдоль линии передачи. ИКШ должен быть прямоотсчетным.

При аттестации измерительной установки на рабочих частотах определяются и записываются в таблицу положения органов регулировки СТ *3*, соответствующие коэффициенту отражения в сеч. II–II, равному нулю ($\Gamma_{II-II} = 0$).

СТ *4* предварительно градуируется по модулю $|\Gamma|$ (или КСВН) в зависимости от глубины погружения рассогласующего элемента (рис. 2.14). Так как в сечении II–II имеет место согласование, близкое к идеальному, выходной

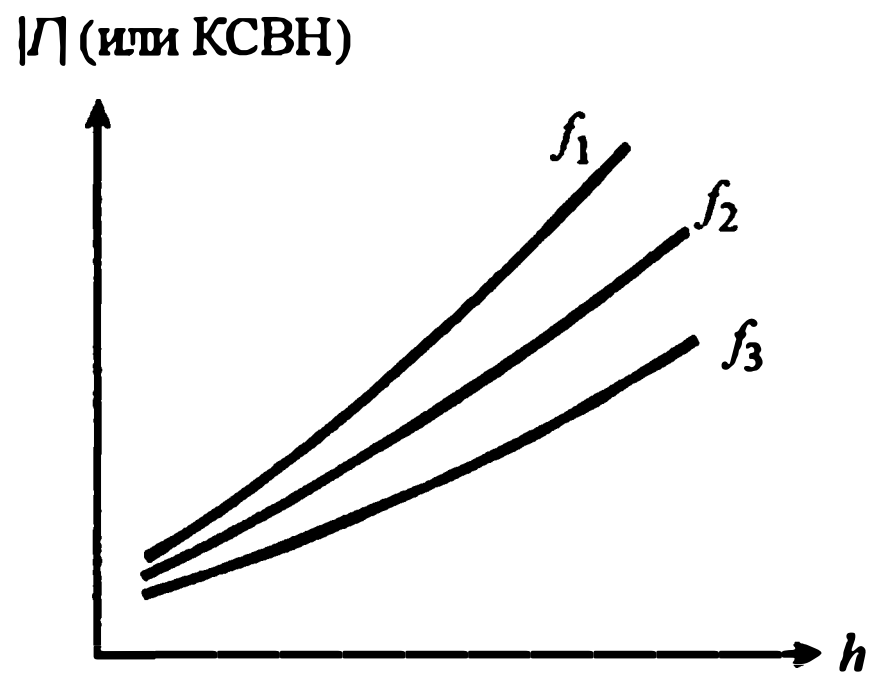


Рис. 2.14. Примерный вид градуировки согласующего трансформатора на рабочих частотах f_1, f_2, f_3
$|\Gamma|$ – вносимый коэффициент отражения,
h – глубина погружения рассогласующего элемента

КСВН генератора шума в целом полностью определяется рассогласованием СТ *4* (рис. 2.13). Регулировка выходного коэффициента отражения по фазе обеспечивается перемещением рассогласующего элемента СТ *4* вдоль линии передачи с помощью каретки с отсчетом положения.

Измерения выполняются следующим образом:

– положения регулирующих элементов СТ *3* ставятся в соответствии с градуировкой;

– регулировкой СТ *4* добиваются минимальных показаний на приборе *7* (рис. 2.13) и отсчитывают по его шкале $K_{ш\ мин}$;

– по градуировочным кривым СТ *4* отсчитывают значения модуля и фазы $|\Gamma_{г\ опт}|$, $(\sigma_{г\ опт})$ и $\psi_{г\ опт}$.

Так как $K_ш$ в зависимости от $\sigma_г$ изменяется практически по квадратичному закону, что затрудняет отсчет, для повышения точности может быть использован метод "вилки" [116].

При наличии измерителя импедансов величины $|\Gamma_{г\ опт}|$ и $\psi_{г\ опт}$ могут быть непосредственно измерены в сечении III–III, однако это усложняет измерительную установку и делается лишь при необходимости.

Для определения параметров рассогласования устанавливают с помощью СТ *4* возможно бо̀льший известный коэффициент отражения $|\Gamma|$ $(\sigma_г)$. Затем путем перемещения каретки находят максимальное значение $K_{ш\ макс}$. Далее, подставляя в формулу (1.133) уже известные значения $K_{ш\ мин}$, $\sigma_{г\ опт}$, $K_{ш\ макс}$ и $\sigma_г$ вычисляют значения $\beta_{кш}$.

В [116] приводятся некоторые результаты исследования электронного параметрического и транзисторного усилителей по параметру $\beta_{кш}$. Для транзисторного усилителя получены усредненные значения $\beta_{кш}$ – 1,05, для параметрического – 5,29. После введения поправок разброс измеренных значений составляет ± 2%.

В [31, 32] описывается интересная работа по дальнейшему уточнению и усовершенствованию методики измерения и расчета 4-х шумовых параметров усилителей с использованием измерителя *S*-параметров.

Измерение системы шумовых параметров вместо одиночного параметра $K_ш$ ведет к заметному усложнению процесса и увеличению объема измерений. В связи с этим в [116] даются некоторые практические рекомендации по использованию системы параметров.

В частности, отмечается, что для усилителей, у которых $\beta_{кш}$ существенно отличается от единицы, необходимо, помимо $K_{ш\ мин}$, проводить измерения $\beta_{кш}$ или максимального значения $K_{ш\ |\Gamma|}$ при заданном КСВН или $|\Gamma|$ генератора в наихудшей фазе (см. подраздел 1.7.3).

Для малошумящих СВЧ усилителей, у которых крутизна $\beta_{кш}$ отличается от единицы не более, чем на ± 10 %, влияние рассогласования на $K_ш$ может

быть оценено по формуле (1.123), учитывающей изменение коэффициента передачи для случая работы с пассивным четырехполюсником.

2.8 МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА

Ранее (подраздел 1.7.2) указывалось, что при измерении интегрального $K_{ш}$ в общем случае, когда шум и усиление в пределах полосы частот приемника от $f_н$ до $f_в$ не остаются постоянными, измеряемое значение выражается формулой

$$K_{ш\ инт} = \frac{\int_{f_н}^{f_в} K_{ш}(f) \cdot K_{у}(f) df}{\int_{f_н}^{f_в} K_{у}(f) df}. \qquad (2.60)$$

Возможны два способа нахождения интегрального коэффициента шума:
– путем измерения дифференциальных значений $K_{ш}(f)$ и $K_{у}(f)$ с последующим расчетом по формуле (2.60);
– путем однократного измерения $K_{ш\ инт}$ измерительным приемником, имеющим широкую полосу входных частот в интервале $f_н - f_в$.

Практически в первом случае полоса $\Delta f = f_в - f_н$ разбивается на достаточно большое число (n) малых интервалов Δf_i, в каждом из которых $K_{ш}$ и $K_{у}$ могут быть приняты постоянными.

Для каждого интервала измеряются дифференциальные значения $K_{ш i}$ и $K_{у i}$, а значение $K_{ш\ инт}$ находится по формуле:

$$K_{ш\ инт} = \frac{\sum_{i=1}^{n} K_{ш i} K_{у i}}{\sum_{i=1}^{n} K_{у i}}. \qquad (2.61)$$

При использовании широкополосного измерительного приемника измерения интегрального $K_{ш}$ существенно упрощаются, т.к. отпадает необходимость в аппаратуре, перестраиваемой по частоте, количество отсчетов сокращается до одного и не требуется дополнительная обработка результатов.

В то же время следует учесть, что для получения хорошей точности измеритель коэффициента шума должен при этом удовлетворять определенным требованиям [24]. В [24] показано, что значение коэффициента шума, измеренное методом линейной шкалы определяется по формуле:

$$K'_{\text{ш инт}} = \frac{G\int_{f_н}^{f_в} K_{\text{ш}}(f)K_{\text{у}}(f)K_{\text{ип}}(f)\,df}{\int_{f_н}^{f_в} G(f)K_{\text{у}}(f)K_{\text{ип}}(f)\,df}, \qquad (2.62)$$

где $K_{\text{ип}}$ – коэффициент передачи измерительного приемника,
G – значение ОСПМШ ГШ, устанавливаемое при калибровке приемника.

При сравнении (2.60) и (2.62) видно, что измеренное и теоретическое значения $K_{\text{ш инт}}$ совпадают друг с другом лишь при постоянстве величин $G(f)$ и $K_{\text{ип}}(f)$ в диапазоне частот $f_н - f_в$, т.е. когда

$$G(f) = G, \qquad (2.63)$$

$$K_{\text{ип}}(f) = \begin{cases} K_{\text{ип}} & \text{при} \quad f_н < f < f_в, \\ 0 & \text{при} \quad f < f_н \text{ или } f > f_в. \end{cases} \qquad (2.64)$$

При невыполнении этих условий возникает погрешность измерений,

$$\delta_{\text{кш инт}} = \left(\frac{K'_{\text{кш инт}}}{K_{\text{кш инт}}} - 1\right)100\,\%. \qquad (2.65)$$

Для численной оценки погрешности нужно знать конкретный вид функций $G(f)$ и $K_{\text{ип}}(f)$. Чем ближе эти функции к постоянным величинам в полосе Δf (условия 2.63 и 2.64), тем меньше погрешность. Вид формул (2.62) и (2.65) показывает, что погрешность в некоторой степени определяется характером зависимостей $K_{\text{ш}}(f)$ и $K_{\text{у}}(f)$ для исследуемого устройства, а также степенью их взаимной корреляционной связи.

В [24] описана установка для измерения интегрального $K_{\text{ш}}$ в диапазоне 0,2 – 2,1 ГГц, погрешность измерения которой, связанная с неидеальностью АЧХ приемника, не превышает 5 %.

Таким образом:

1. При нахождении интегрального $K_{\text{ш}}$ по его дифференциальным значениям следует учитывать закон изменения коэффициента передачи исследуемого устройства в полосе измерений (см. формулу 2.61).

2. Измерения $K_{\text{ш инт}}$ значительно упрощаются при использовании широкополосного ИКШ. При этом в заданном диапазоне частот АЧХ ИКШ должно быть близкой к прямоугольной, а генератор шума – иметь постоянную СПМШ и выходное сопротивление, равное волновому сопротивлению линии передачи (подраздел 1.7.2).

2.9 ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРИЕМНЫХ МОДУЛЕЙ

Ряд особенностей имеет методика измерения параметров чувствительности устройств, в которых происходит преобразование входной частоты. К ним относятся преобразователи и приемные модули [86], которые обычно делаются на основе преобразователя и содержат, кроме того, дополнительные устройства типа фильтров, схем защиты, усилителей преобразованной (промежуточной) частоты и др. Контролируемыми параметрами обычно являются коэффициент шума $K_{ш}$, коэффициент передачи d (или потери преобразования L) и ряд других.

По сравнению с измерением аналогичных параметров малошумящих усилителей, в случае преобразователей имеется ряд усложняющих обстоятельств. Это различные частоты на входе и выходе устройства; часто малый уровень измеряемого шума на выходе (преобразователь без УПЧ); многоканальность, которая приводит к необходимости учитывать условия согласования одновременно на нескольких частотах; сильная связь и взаимное влияние входных и выходных цепей [91]; необходимость абсолютных (а не только относительных) измерений мощности источников на входе и выходе при определении коэффициента передачи. Эти обстоятельства предъявляют дополнительные требования к условиям и методике измерений.

2.9.1 Условия измерений

Методика измерений $K_{ш}$ и d должна обеспечивать однозначность и воспроизводимость результатов. Для этого надо учесть и регламентировать основные факторы, влияющие на измеряемые величины [23]:

– согласование преобразователя с источником сигнала как на частоте сигнала, так и на частоте зеркального канала;
– согласование выхода преобразователя с нагрузкой на промежуточной частоте;
– уровень мощности гетеродина (и соответственно ток смесителя);
– значение выходной (промежуточной) частоты;
– уровень амплитудного шума гетеродина при удалении от несущей на промежуточную частоту;
– сопротивление нагрузки в цепи выпрямленного тока;
– начальный ток смещения.

Кратко обсудим вопрос о конкретном содержании и возможном единообразии упомянутых факторов.

Условия согласования преобразователя на высокой и промежуточной частотах уже обсуждались ранее в связи с теоретическим определением измеряемых величин (формулы 1.152–1.159).

Величина мощности гетеродина, как известно [91], имеет для конкретного преобразователя частоты оптимальное значение, приводящее к наименьшему $K_ш$. Для различных экземпляров преобразователей одного типа оптимальные мощности обычно близки и усредняются. Это усредненное значение может быть принято в качестве номинального и должно устанавливаться при испытаниях преобразователя.

Влияние шума гетеродина на коэффициент шума преобразователя зависит от типа генератора и значения промежуточной частоты: при больших промежуточных частотах оно уменьшается.

Возможны две постановки задачи: 1) измерение шума преобразователя при заданных промежуточной частоте и типе гетеродина, определяемых условиями применения; 2) оценка шума преобразователя при "идеальном" гетеродине, т.е. при отсутствии шумового вклада гетеродина.

В первом случае условия определяются самой постановкой вопроса, во втором – должна быть выбрана достаточно высокая промежуточная частота и применен малошумящий гетеродин.

Из современных СВЧ генераторов меньший шумовой вклад дают гетеродины на клистронах, лампах обратной волны, диодах Ганна, СВЧ транзисторах со стабилизацией частоты диэлектрическим резонатором [54, 131] (амплитудные шумы 165–175 дБ/Гц), бо́льшие шумы имеют генераторы на ЛПД (145–155 дБ/Гц).

Для уменьшения влияния шума гетеродина примерно на 20 дБ смесители преобразователя строятся по балансным [43] схемам (это характерно для приемных модулей). Критичность к уровню шума гетеродина при испытаниях в этом случае существенно уменьшается [23].

Сопротивление нагрузки в цепи выпрямленного тока устанавливается по рекомендациям на используемый смесительный диод и в соответствии с [63], если это не оговаривается специальными условиями измерений. В любом случае желательно, чтобы оно было близким к сопротивлению в условиях эксплуатации.

Если для установки начальной рабочей точки смесителя (диоды Шотки) необходимо заданное смещение, то оно обеспечивается с помощью внешнего источника тока при выбранном сопротивлении нагрузки.

Таким образом, необходимым требованием для достижения однозначности при измерении параметров преобразователей является выполнение перечисленных выше условий.

2.9.2 Измерение коэффициента шума

Измерение коэффициента шума устройства с преобразованием частоты обычно сводится к решению одной из двух задач: определению суммарного

шума преобразователя и УПЧ (формулы 1.141, 1.145); оценке собственного шума преобразователя (формулы 1.144, 1.146), например, при его разработке или выпуске в виде автономного устройства.

При измерении коэффициента шума преобразователя совместно с УПЧ (или ПУПЧ) методика измерений и погрешность практически не отличаются от методики и погрешности измерения параметров усилителей (подраздел 2.5). Модуляция при этом проводится в УПЧ, работающем совместно с преобразователем. Условия согласования на входе должны соответствовать (1.152, 1.156); согласование на выходе по промежуточной частоте определяется конструкцией устройства, не изменяется в процессе измерений и соответствует условиям последующего его применения.

При проектировании приемного устройства всегда желательно предусматривать работу преобразователя с конкретным УПЧ, (см. например, [28]), т.к. только для такого сочетания коэффициент шума является определенной величиной и может быть измерен наиболее точно. Во всех случаях, когда УПЧ приходится заменять в процессе измерений, возможны дополнительные ошибки из-за изменения импеданса на промежуточной частоте и рассогласования.

Более сложным является решение второй задачи об измерении собственного коэффициента шума преобразователя.

К достоинствам этого параметра $K_{ш\ пр}$ (подраздел 1.10) можно отнести то, что, во-первых, он характеризует шум непосредственно преобразователя, во-вторых, является обобщающим, т.к. одновременно учитывает влияние как шумовых источников в преобразователе, так и его коэффициент передачи.

Существует несколько практических подходов к оценке собственного шума преобразователя.

Распространен способ измерения так называемого "нормированного" коэффициента шума $K_{ш\ норм}$ [63], при котором преобразователь испытывается совместно с измерительным УПЧ, коэффициент шума которого нормирован (равен 1,5 или 3 дБ). Однако этот способ не обладает достаточной строгостью.

Во-первых, как видно, коэффициент шума преобразователя измеряется с некоторой добавкой. Во-вторых, возможна неоднозначность в оценке собственного шума преобразователя.

Например, при $K_{ш\ упч} = 1{,}5$ дБ

$$K_{ш\ норм} = L(t_{пр} + 0{,}41) = K_{ш\ пр} + 0{,}41L\,. \qquad (2.66)$$

Из (2.66) видно, что для двух преобразователей, имеющих одинаковые собственные коэффициенты шума ($K_{ш\ пр}$), но разные потери преобразования, $K_{ш\ норм}$ имеет разную величину. Это приводит к неоднозначности сравнения преобразователей, особенно при малых промежуточных частотах, когда значение $t_{пр}$ велико.

Иногда собственный коэффициент шума преобразователя $K_{ш\ пр}$ находят расчетным путем по измеренному $K_{ш\ норм}$

$$K_{ш\ пр} = K_{ш\ норм} - 0{,}41L\,. \qquad (2.67)$$

Предварительно должны быть измерены потери преобразования и коэффициент шума УПЧ. Такие многоступенчатые измерения обычно ведут к большим погрешностям.

В некоторых случаях при использовании высокой промежуточной частоты ограничиваются измерением только коэффициента передачи (потерь преобразования) преобразователя. Это можно считать лишь частичной оценкой преобразователя, т.к. такой способ условно предполагает, что собственные шумы смесителя и гетеродина пренебрежимо малы, и позволяет в дальнейшем оценить шумовой вклад лишь последующих каскадов приемного устройства.

Наиболее последовательным является метод непосредственного измерения собственного $K_ш$ преобразователя модуляционными приемниками [23, 92].

Такой метод позволяет исключить многоступенчатые операции раздельного измерения шумового отношения [52] и коэффициента передачи [92] и обеспечить непосредственный отсчет наиболее показательного шумового параметра преобразователя – его собственного коэффициента шума.

Известны способы модуляции шумов преобразователя: по мощности гетеродина и модулятором промежуточной частоты в УПЧ.

Рассмотрим более подробно способ модуляции в УПЧ [23] (рис. 2.15). При такой модуляции измеренное значение $K_{ш\ изм}$, например, при одноканальном режиме составляет:

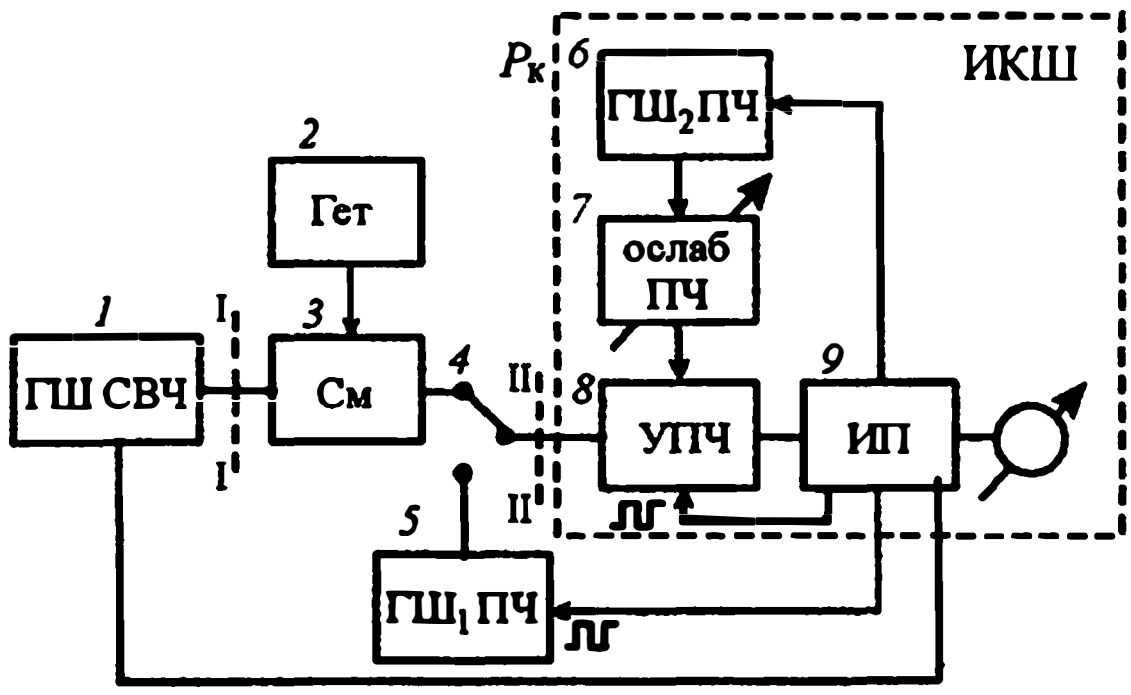


Рис. 2.15. К пояснению способа измерения коэффициентов шума и передачи преобразователя

1 – ГШ СВЧ, *2* – гетеродин, *3* – исследуемый смеситель, *4* –переключатель каналов, *5* – калибровочный ГШ промежуточной частоты, *6* – компенсирующий ГШ промежуточной частоты, *7* – регулируемый ослабитель ПЧ, *8* – УПЧ, *9* – измерительный приемник

$$K_{\text{ш изм}} = L(t_{\text{пр}} + K_{\text{ш упч}} - 1). \qquad (2.68)$$

Если ввести противофазный компенсирующий сигнал $p_{\text{к}}$ промежуточной частоты от ГШ_2 ПЧ *6* (рис. 2.15), то

$$K_{\text{ш изм}} = L(t_{\text{пр}} + K_{\text{ш упч}} - 1 - p_{\text{к}}). \qquad (2.69)$$

Условие необходимой компенсации по ПЧ:

$$p_{\text{к}} = p_{\text{к}_0} = K_{\text{ш упч}} - 1 \qquad (2.70)$$

(это эквивалентно сигналу компенсации на входе преобразователя, равному $Lp_{\text{к}_0}$). При этом

$$K_{\text{ш изм}} = Lt_{\text{пр}} = K_{\text{ш пр}}. \qquad (2.71)$$

Как осуществить условие (2.70)? Если к входу УПЧ вместо преобразователя присоединить его эквивалент при нормальной температуре T_0 (ГШ СВЧ *1* выключен) и путем изменения величины $p_{\text{к}}$ ослабителем *7* добиться нулевых показаний измерительного приемника, то будет достигнуто условие

$$p_{\text{к}} = K_{\text{ш упч}}. \qquad (2.72)$$

Затем сигнал компенсации нужно уменьшить на единицу. Это можно сделать, если предварительно откалибровать шкалу приемника по калибровочному ГШ_1 промежуточной частоты *5* с известным абсолютным уровнем мощности.

Для уменьшения ошибок при всех переключениях должно соблюдаться равенство выходных импедансов источников, подключаемых ко входу УПЧ. В [102] описывается метод выравнивания этих импедансов с контролем по высокочастотному мосту. Это радикально решает вопрос согласования, но усложняет измерительную установку. Во многих случаях вопрос решается путем компромиссного подбора сопротивлений.

После завершения компенсации включается ГШ СВЧ *1* и переходят к измерению коэффициента шума преобразователя стандартным методом.

На рис. 2.16 представлены эпюры, поясняющие изложенный способ измерений применительно к разработанной установке [23] с использованием приемника ИП-5 *9* (Рис. 2.15), работающего по методу линейной шкалы (см. подраздел 2.5).

Погрешность измерения собственного коэффициента шума преобразователя зависит от необходимой величины компенсирующего сигнала, т.е. от доли пересчитанных шумов УПЧ, и определяется формулой [23]:

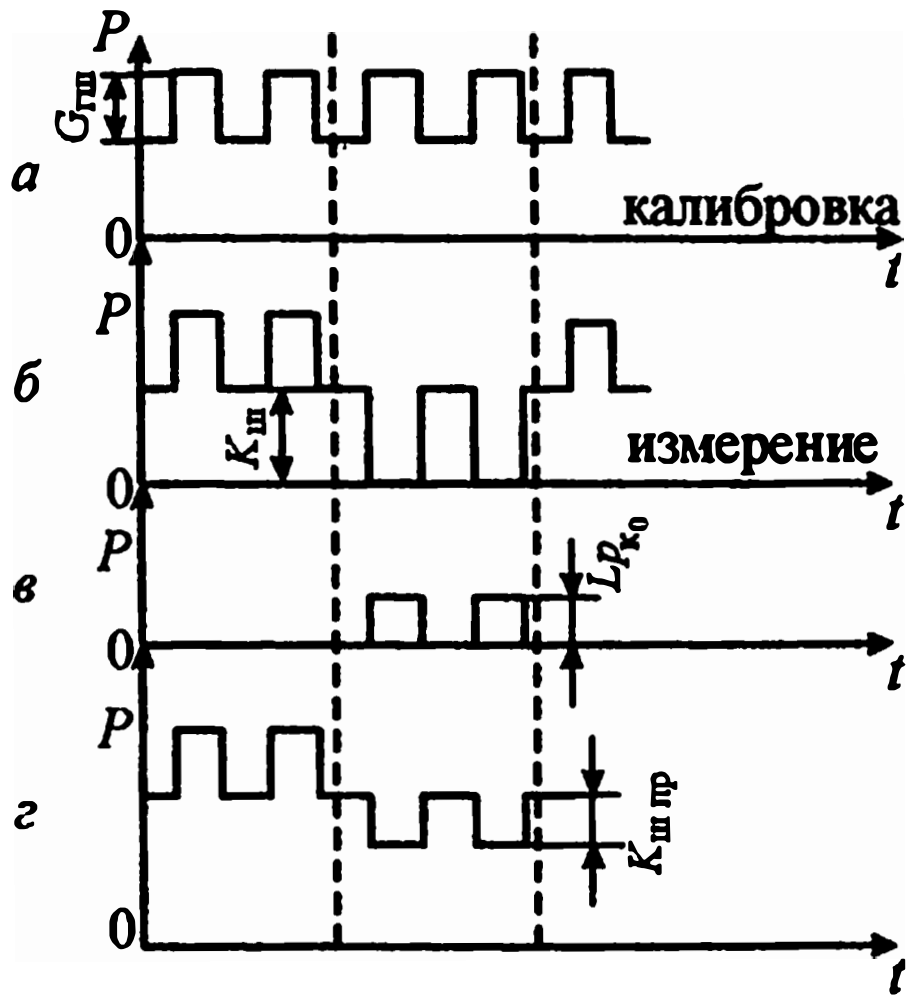


Рис. 2.16. Эпюры напряжений на выходе квадратичного детектора
а – режим калибровки, $G_{гш}$ – избыточная ОСПМШ калибровочного сигнала; *б* – режим измерения без компенсации; *в* – сигнал компенсации, приведенный ко входу смесителя; *г* – режим измерения с компенсацией

$$\delta K_ш = \sqrt{(\delta K_{ш1})^2 + \left(\frac{\delta T_0}{1+K_1}\right)^2}, \qquad (2.73)$$

где $\delta K_{ш1}$ – погрешность измерения коэффициента шума без компенсации (совместно с шумом УПЧ);
δT_0 – погрешность установки добавочного шумового сигнала по ПЧ с ОСПМШ, равной единице;

$$K_1 = K_ш / L\,. \qquad (2.74)$$

2.9.3 Измерение коэффициента передачи

Как отмечалось ранее, коэффициент передачи *d* является одним из основных параметров преобразователя и необходим при расчетах чувствительности приемного устройства, в составе которого работает преобразователь.

Известны различные методы измерения *d*, в частности, дифференциальный метод и метод амплитудной модуляции, описанные и рекомендуемые в [63], метод панорамного измерения с переносом частоты [159], метод автоматизированного расчета [29] и другие.

Ниже описывается метод измерения коэффициента передачи с использованием источников шумовых сигналов на входе и выходе преобразователя [23]. Этот метод удобен тем, что коэффициент передачи может измеряться попутно с измерением коэффициента шума преобразователя на одной и той же установке. Его величина находится путем сравнения ОСПМШ ГШ СВЧ *1* (рис. 2.15) на входе преобразователя ($G_{свч}$) и ОСПМШ того же ГШ на выходе преобразователя после преобразования ее в шум промежуточной частоты ($G_{пч}$):

$$d = G_{пч}/G_{свч}\,. \qquad (2.75)$$

Значение $G_{свч}$ определяется путем предварительной калибровки ГШ СВЧ по ОСПМШ. Для нахождения $G_{пч}$ вход приемной части установки калибруется по чувствительности с помощью $ГШ_1$ ПЧ *5* (переключатель *4* в положении I-III). Выходное сопротивление $ГШ_2$ ПЧ *6* устанавливается равным усредненному значению выходного сопротивления контролируемых преобразователей.

В некоторых случаях [102] для повышения точности измерений используют согласование выходных сопротивлений с помощью ВЧ-моста.

Встроенный ГШ ПЧ *6* служит для оперативной калибровки приемника в процессе измерений без переключения на генератор *5*. Мощность генератора *6* предварительно перекалибровывается ко входу приемника (сеч. II-II) путем сравнения с генератором *5*.

Если в процессе измерений d при калибровке устанавливать показание

$$\alpha_1 = G_{пч}/G_{свч}\,, \qquad (2.76)$$

то отсчет при измерении будет численно равен коэффициенту передачи:

$$\alpha_1 = d\,. \qquad (2.77)$$

Таким образом, существует возможность создания измерителя d с непосредственным отсчетом.

Погрешность измерения коэффициента передачи, как видно из описания метода, определяется главным образом погрешностями градуировки ГШ СВЧ и ГШ ПЧ, погрешностью измерительного приемника и рассогласованием на входе и выходе преобразователя.

2.9.4 Панорамный метод измерения параметров преобразователей

В настоящее время, помимо установок, измеряющих коэффициенты шума и передачи преобразователей при фиксированных промежуточных частотах (например, [23, 79], см. подразделы 2.9.2, 2.9.3), на предприятии [87]

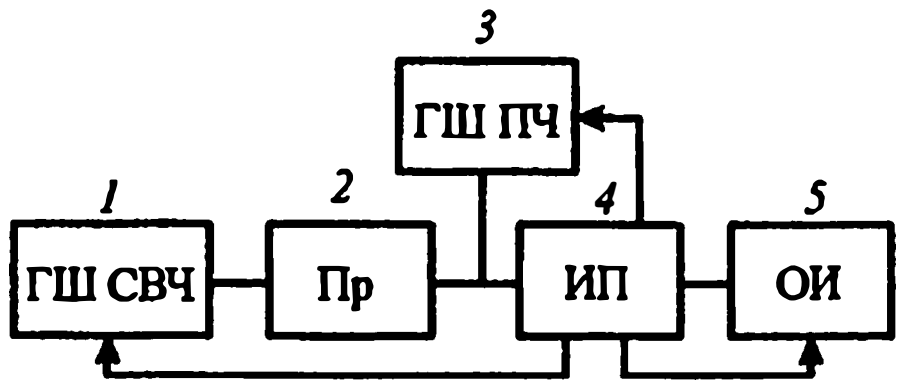


Рис. 2.17. Упрощенная структурная схема панорамного измерителя $K_ш$ и L преобразователя

1 – генератор шума СВЧ; *2* – преобразователь; *3* – генератор шума ПЧ; *4* – измерительный приемник с перестраиваемой входной частотой; *5* – осциллографический индикатор

С.И.Веденеевой разработаны автоматизированные панорамные установки, позволяющие наблюдать изменение и измерять указанные параметры в широкой полосе промежуточных частот, что является более удобным и информативным. При этом входная частота узкополосного измерительного приемника *4* (рис. 2.17), подключенного к выходу преобразователя *2*, периодически перестраивается в заданном диапазоне выходных частот преобразователя, а измеренные значения $K_{ш\,пр}$ и L рассматриваются на осциллографическом индикаторе *5*. Генераторы шума *1* и *3* служат для калибровки чувствительности на высокой и промежуточных частотах.

Для целей панорамного измерения параметров преобразователей в волноводных каналах сечением 35×15 мм, 23×10 мм, 16×8 мм и в коаксиальном канале сечением 7/3,04 мм разработаны установки на основе измерительного приемника [144].Одна из этих установок (в коаксиальном канале) имеет следующие параметры: коэффициент шума преобразователей измеряется с погрешностью ± 0,6 дБ, коэффициент передачи – с погрешностью ± 1,5 дБ.

Для панорамных измерений с успехом могут быть использованы также ИКШ серии Х5 [79], входные частоты которых соответствуют промежуточным частотам с выхода исследуемых преобразователей. При этом ко входу преобразователя должен подключаться генератор шума, соответствующий диапазону входных частот.

Панорамные измерения возможны для преобразователей, имеющих в своем составе ПУПЧ, т.к. в противном случае возникает неконтролируемая погрешность за счет различного согласования выхода смесителя и входа измерительного приемника при перестройке промежуточной частоты.

Таким образом, в результате рассмотрения особенностей измерения параметров преобразователей можно сделать следующие **в ы в о д ы**.

1. Для достижения точности и однозначности измерения коэффициентов шума и передачи СВЧ преобразователей должно быть обеспечено выполнение стандартных требований по режиму работы преобразователя и согласованию на частотах основного и зеркального каналов, а также на промежуточной частоте (подраздел 1.10).

2. Наиболее рационально контролировать коэффициент шума преобразователя совместно с конкретным УПЧ, предназначенным для совместной работы с этим преобразователем.

3. При измерении собственного коэффициента шума преобразователя (без ПУПЧ) особое внимание в процессе измерений должно уделяться контролю за неизменностью согласования на выходе преобразователя по промежуточной частоте при переключениях.

4. Применение модуляционного метода с компенсацией собственных шумов измерителя и двух генераторов шума дает возможность обеспечить прямоотсчетные измерения коэффициентов шума и передачи преобразователя на единой установке с погрешностью порядка 0,5 дБ. Разработаны панорамные методы и установки для контроля параметров $K_{ш}$ и d преобразователя в диапазоне промежуточных частот.

2.10 ИЗМЕРЕНИЕ ШУМОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ УСИЛИТЕЛЬНЫХ И ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

Как указывалось выше (подраздел 1.6), при коэффициентах шума менее 1,5–2 единиц более показательной, чем $K_{ш}$, характеристикой усилительных и приемных устройств является их шумовая температура.

Формально шумовая температура может быть найдена по измеренному коэффициенту шума путем вычисления по формуле:

$$T_{у} = (K_{ш} - 1) \cdot T_0 . \qquad (2.78)$$

При этом имеется в виду стандартный $K_{ш}$, измеренный при условии подключения ко входу согласованной нагрузки, находящейся при температуре T_0.

Такой способ нахождения $T_{у}$ приводит к значительной погрешности при малых $T_{у}$. Нетрудно показать [147], что относительные погрешности определения $K_{ш}$ ($\delta K_{ш}$) и $T_{у}$ ($\delta T_{у}$) связаны следующим соотношением

$$\delta T_{у} = \alpha_{погр} \delta K_{ш} , \qquad (2.79)$$

где

$$\alpha_{погр} = \frac{T_0 + T_{у}}{T_{у}} . \qquad (2.80)$$

Коэффициент увеличения погрешности $\alpha_{погр}$ представлен на рис. 2.18 в зависимости от значения $T_у$ и, как видно, при малых $T_у$ сильно возрастает.

С целью уменьшения погрешности используются методы измерения $T_у$, при которых ко входу устройства поочередно подключаются шумовые источники разного уровня [49, 71, 99, 147, 162].

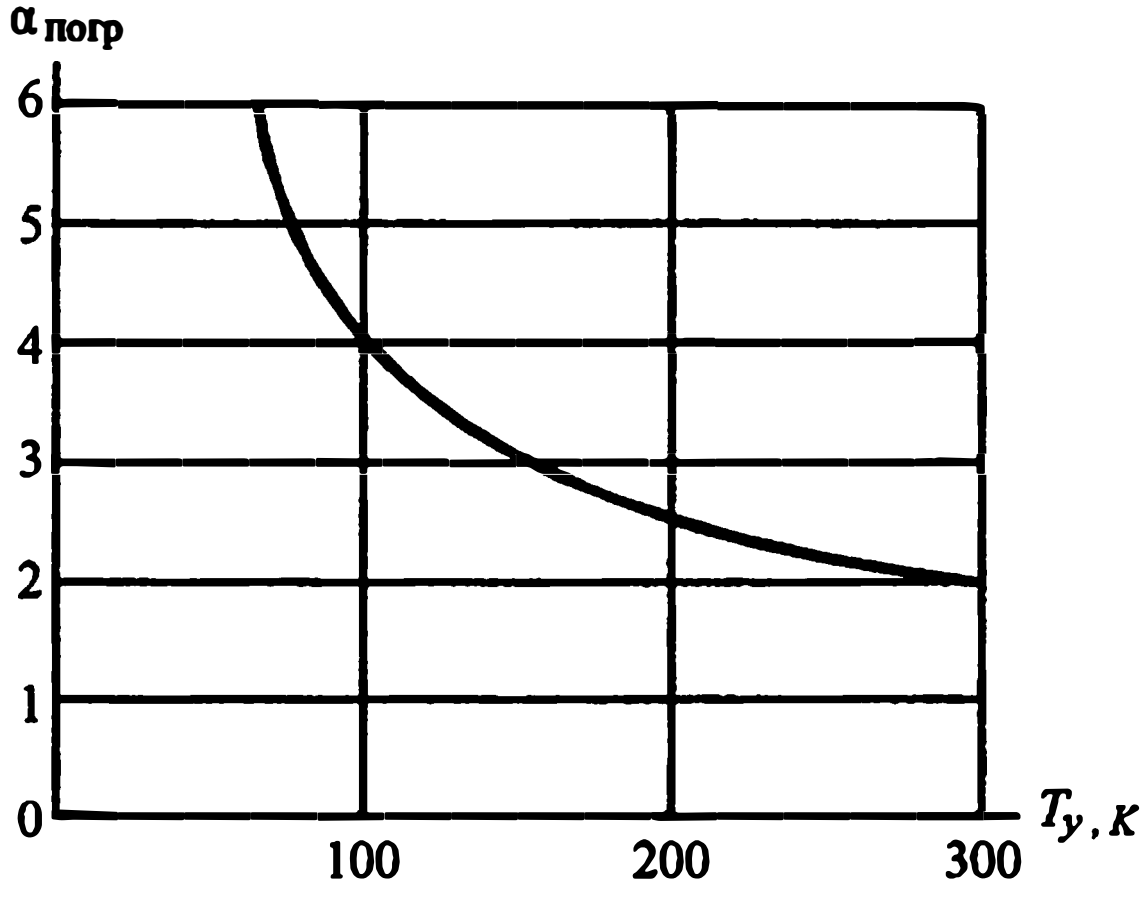


Рис. 2.18. Коэффициент увеличения погрешности в зависимости от шумовой температуры усилителя

2.10.1 Метод нахождения $T_у$, основанный на измерении отношения мощностей при подключении ко входу двух шумовых источников

а) *Случай отсутствия потерь на СВЧ тракте.*

Этот метод напоминает метод Y-фактора (подраздел 2.2), однако, в более общем виде. Ко входу исследуемого устройства *4* (рис. 2.19) с помощью переключателя *3* по очереди подключаются согласованные генераторы шума *1* и *2* с эквивалентными температурами T_1 и T_2 и измеряется отношение выходных мощностей (при условии большого $K_у$)

$$n = \frac{T_1 + T_у}{T_2 + T_у}. \qquad (2.81)$$

Шумовая температура находится как

$$\boxed{T_у = \frac{T_2 - T_1}{1 - n}}. \qquad (2.82)$$

В [49] проводилось исследование оптимальных уровней T_1, T_2, при которых измерения $T_у$ заданной величины получаются наиболее точными. Минимальная погрешность имеет место при выполнении условия

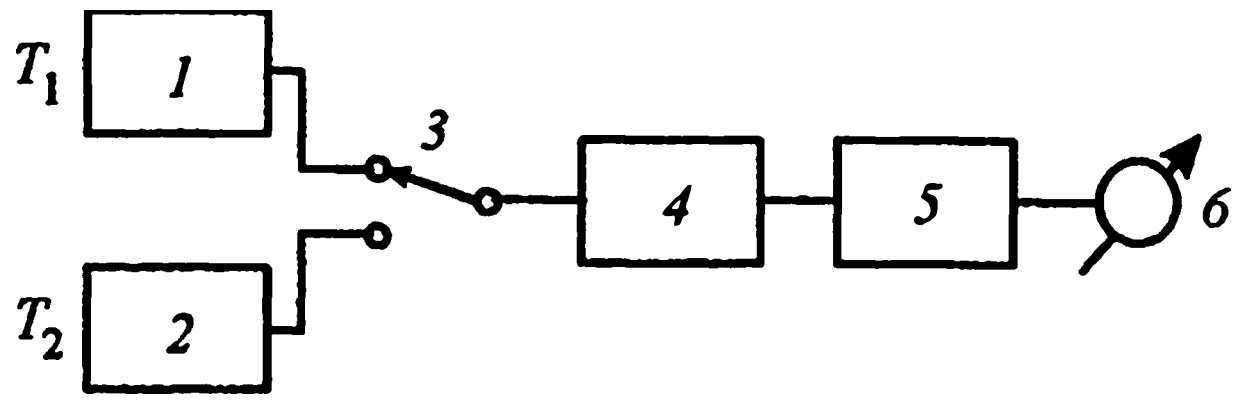


Рис. 2.19. Определение T_y методом двух шумовых источников
1, *2* – шумовые источники, *3* – СВЧ переключатель, *4* – исследуемое устройство, *5* – измерительный приемник, *6* – индикаторной прибор

$$T_{y\,мин} = \sqrt{T_1 \cdot T_2}\,. \tag{2.83}$$

В [147] оптимальное условие (2.83) уточнено с учетом существующих погрешностей определения T_1, T_2 и n.

При этом необходимое условие приобретает вид:

$$T_{y\,мин} = \sqrt{\frac{\delta n + \delta T_1 + \delta T_2}{\delta n} T_1 T_2}\,, \tag{2.84}$$

где δn, δT_1 и δT_2 – относительные погрешности определения величин n, T_1 и T_2.

Вероятная погрешность измерения

$$\delta T_y = \sqrt{A_т^2 + \delta n^2 + B_т^2 \delta^2 T_1 + C_т^2 \delta^2 T_2}\,, \tag{2.85}$$

где

$$A_т = \frac{(T_1 + T_y)(T_2 + T_y)}{T_y (T_2 - T_1)}, \tag{2.86}$$

$$B_т = \frac{T_1 (T_2 + T_y)}{T_y (T_2 - T_1)}, \tag{2.87}$$

$$C_т = \frac{T_2 (T_1 + T_y)}{T_y (T_2 - T_1)}. \tag{2.88}$$

Коэффициент $A_т$ имеет минимальное значение при условии (2.84). Коэффициенты $B_т$ и $C_т$ экстремальных значений не имеют и уменьшаются при увеличении T_2.

Формула для погрешности (2.85) и условие (2.84) показывают, что при измерении малых T_y ($T_y < 300$ К) рационально в качестве источника с темпе-

ратурой T_1 выбирать согласованные нагрузки, находящиеся при криогенных температурах.

Погрешность тем меньше, чем ниже температура первого источника шума. Кроме того, погрешность уменьшается, если при прочих равных условиях увеличивать эквивалентную температуру T_2.

Практически используются излучатели, находящиеся при температурах T_1 жидкого гелия (4,2 К) и жидкого азота (77 К). Источником бóльшего уровня (T_2) могут быть нагрузки при комнатной температуре T_0, нагреваемые нагрузки (обычно не более 1000 °С), газоразрядные источники. На рис. 2.20 показано изменение коэффициента $A_т$ в зависимости от измеряемой температуры $T_у$ при различных сочетаниях T_1 и T_2. Видны (отмечены точкой) оптимальные значения измеряемой температуры (по коэффициенту $A_т$). Малые значения $A_т$ для низких температур $T_у$ (30; 60 К) можно получить только при использовании охлажденных нагрузок ($T_1 < T_0$).

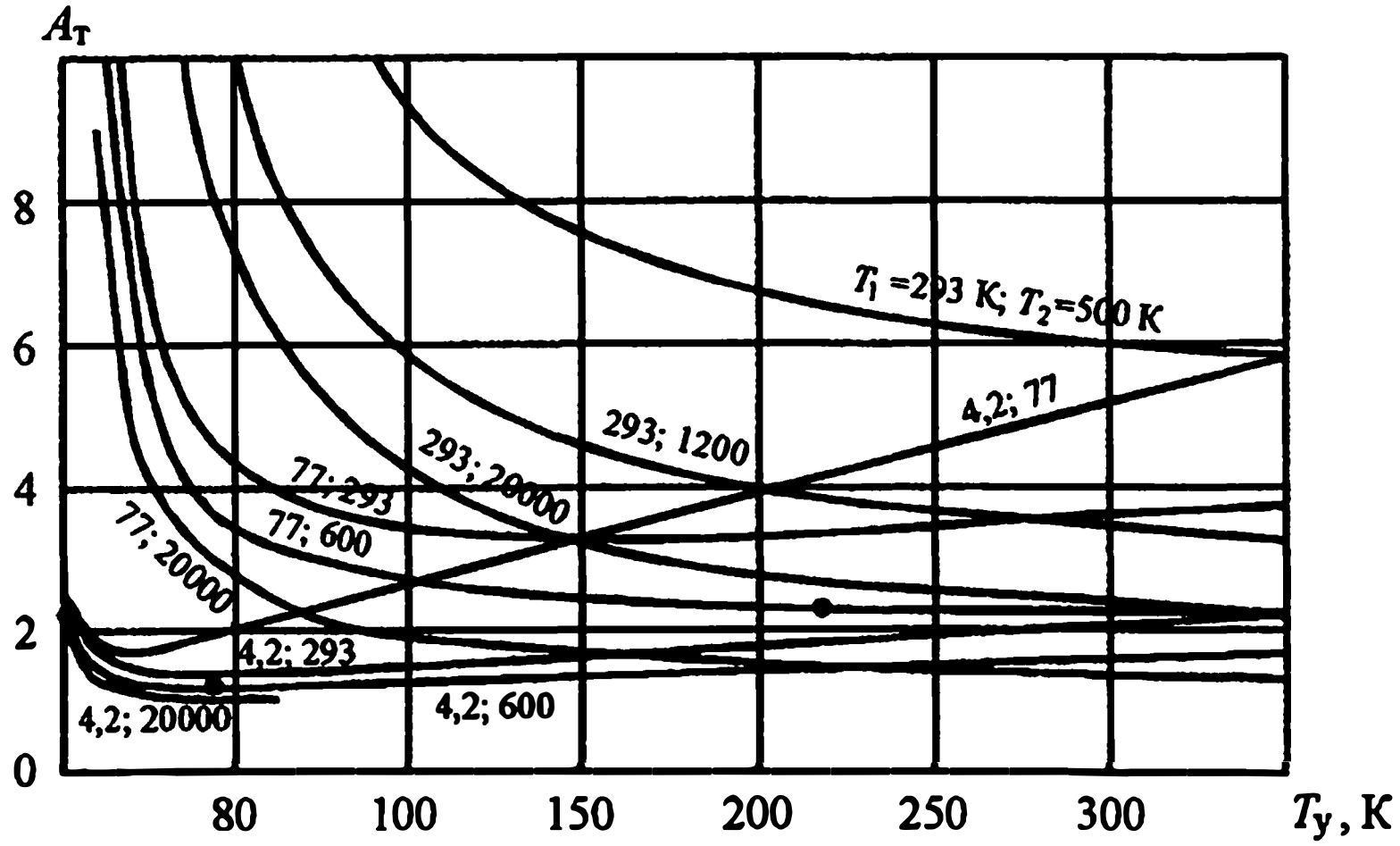


Рис. 2.20. Зависимость коэффициента $A_т$ от измеряемой температуры $T_у$
Здесь и далее • – обозначение точек, соответствующих минимуму кривых

б) *Учет потерь в СВЧ тракте.*

При использовании криогенных источников шума заслуживает внимания вопрос о потерях в СВЧ тракте, соединяющем источник с входом исследуемого устройства, и погрешности измерения этих потерь.

Шумовая температура источника (рис. 2.21), состоящего из согласованной нагрузки при температуре T_1 и отрезка линии передачи а-б, находящегося при температуре T_N и обладающего коэффициентом потерь N ($N \geq 1$).

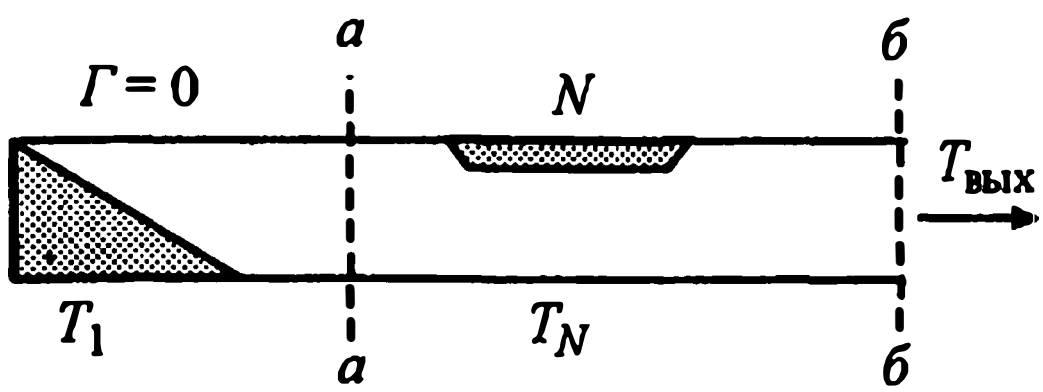


Рис. 2.21. К влиянию потерь N в линии передачи на выходную шумовую температуру

$$T_{вых} = \frac{T_1}{N} + T_N\left(1 - \frac{1}{N}\right). \qquad (2.89)$$

В общем случае элементы тракта, вносящие потери, могут находиться при различных температурах. При этом $T_{вых}$ определяется более сложной формулой [186], которая требует знания распределения температур и потерь вдоль линии передачи.

Зависимость (2.89) при $T_N = T_0$ графически показана на рис. 2.22. Как видно, при $T_1 > T_0$ выходная шумовая температура уменьшается, при $T_1 < T_0$ – увеличивается, причем тем больше, чем меньше начальная температура.

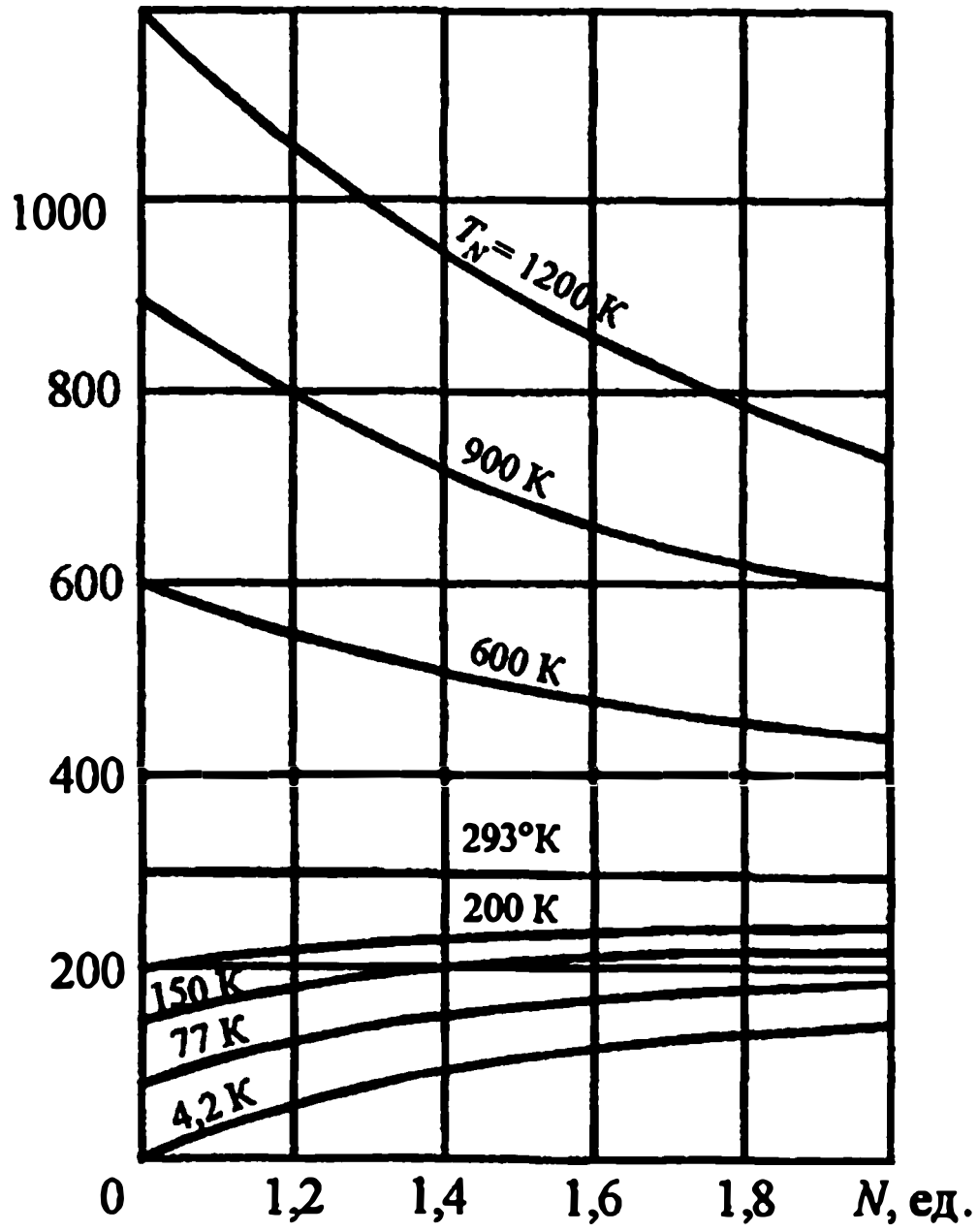


Рис. 2.22. Зависимость шумовой температуры на выходе СВЧ тракта с потерями от величины коэффициента потерь ($T_N = T_0$)

Пример:

При $N = 1{,}1$ (потери порядка 0,5 дБ) и $T_1 = 4{,}2$ К температура на выходе $T_{\text{вых}} \approx 60$ К, т.е. в 15 раз больше, чем исходная температура на входе.

При $T_1 = T_0$ выходная температура при изменении N не изменяется и остается равной T_0.

В формулу для вычисления T_y (2.82) при наличии потерь следует вместо T_1 вводить $T_{\text{вых}}$, найденную по формуле (2.89)

Относительная вероятная погрешность определения $T_{\text{вых}}$ при этом [147]

$$\delta T_{\text{вых}} = \sqrt{\delta^2 T_{\text{вых}\,N} + \delta^2 T_{\text{вых}\,T_1}}\,, \tag{2.90}$$

$$\delta T_{\text{вых}\,N} = \frac{T_0 - T_1}{T_1 + T_0(N-1)}\delta N \tag{2.91}$$

– погрешность за счет неточного определения потерь (погрешность δN),

$$\delta T_{\text{вых}\,T_1} = \frac{1}{1 + \dfrac{T_0}{T_1}(N-1)}\delta T_1\,. \tag{2.92}$$

Наличие погрешности в определении $T_{\text{вых}}$, в свою очередь, влияет на увеличение погрешности измерения T_y, которая теперь будет иметь вид [147]:

$$\delta T_y = \sqrt{A_{TN}^2 \delta^2 n + B_{TN}^2 \left(b_1^2 \delta^2 N + b_2^2 \delta^2 T_1\right) + C_{TN}^2 \delta^2 T_2}\,, \tag{2.93}$$

где A_{TN}, B_{TN}, C_{TN} находятся по формулам (2.86), (2.87), (2.88), но с подстановкой $T_{\text{вых}}$ вместо T_1,

$$b_1 = \frac{T_0 - T_1}{T_1 + T_0(N-1)}, \tag{2.94}$$

$$b_2 = \frac{1}{1 + \dfrac{T_0}{T_1}(N-1)}\,. \tag{2.95}$$

В формуле (2.93) представляет интерес исследование произведения $B_{TN} b_1 \delta N = \beta_N$, определяющего составляющую погрешности в измерении T_y, возникающую из-за неточности δN учета потерь в СВЧ тракте, особенно для случая использования источников шума с $T_1 < T_0$.

Подставляя значения B_{TN} и b_1 из (2.87) и (2.94), получим:

$$\beta_N = \left(1 + \frac{T_0}{T_y}\right)\delta N \,. \qquad (2.96)$$

Заметим, что эта погрешность не зависит от величины T_1 и абсолютного значения N.

На рис. 2.23 представлена зависимость β_N от T_y. Погрешность δN приията равной 4 % (~ 0,2 дБ). При малых T_y погрешность имеет большую величину. Например, при $T_y = 60$ К $\beta_N = 24$ %.

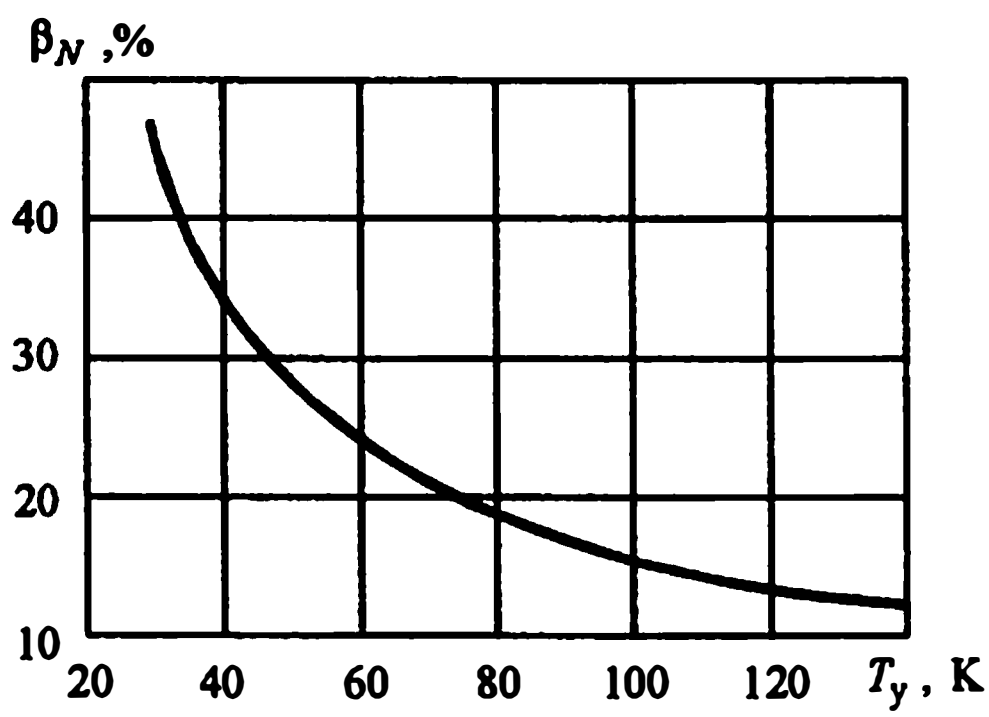


Рис. 2.23. Зависимость погрешности из-за неточности учета потерь в СВЧ тракте от шумовой температуры усилителя ($\delta N = 0{,}04$; $T_N = T_0 = 293$ К)

Что касается оптимального значения T_y, наиболее точно измеряемого с помощью двух заданных уровней, то при наличии потерь оно сдвигается в сторону более высоких температур. Это хорошо видно из (2.83), где вместо T_1 следует ставить $T_{вых} > T_1$ и вместо δT_1 – величину $\delta T_{вых} > \delta T_1$.

В [147] рассмотрен ряд конкретных примеров, помогающих выбрать необходимые уровни шумовых источников и допустимую погрешность измерения потерь в СВЧ тракте.

2.10.2 Метод измерения шумовой температуры путем поочередной модуляции источника шума и исследуемого устройства

Шумовая температура усилителя может быть найдена путем измерения отношения мощностей шума, поступающих вначале от исследуемого устройства с присоединенной к его входу согласованной нагрузкой при температуре T_1 (рис. 2.24), затем – от образцового источника с избыточной эквивалентной температурой T_2 с последующим усилением тем же приемным устройством. Это может быть осуществлено методом поочередной модуляции коэффициента усиления исследуемого устройства *4* и мощности генератора шума *2*.

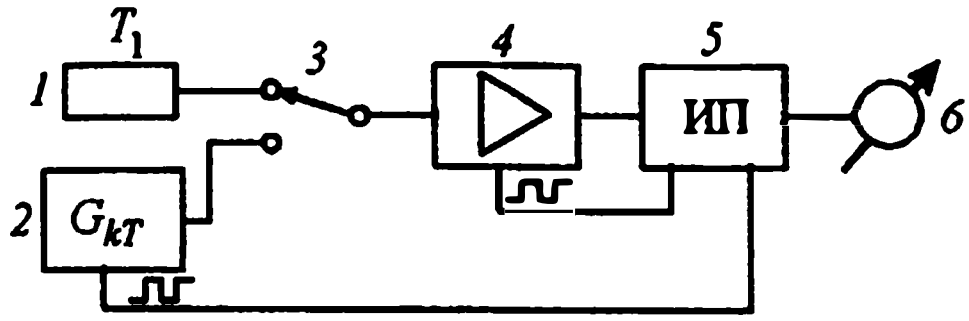


Рис. 2.24. Структурная схема измерителя шумовой температуры приемного устройства методом поочередной модуляции

1 – нагрузка при температуре T_1, *2* – образцовый генератор шума с эквивалентной температурой T_2, *3* – СВЧ переключатель, *4* – исследуемое устройство, *5* – измерительный приемник, *6* – индикаторный прибор

Таким образом, методика измерений является родственной методу линейной шкалы (см. подраздел 2.5) с той лишь разницей, что нагрузка, подключаемая к входу устройства *4* в общем случае имеет температуру

$$T_1 \neq T_0 . \tag{2.97}$$

В результате измерений (при $K_y \to \infty$) получается отношение величин

$$n = \frac{T_1 + T_y}{T_2}, \tag{2.98}$$

откуда следует:

$$\boxed{T_y = nT_2 - T_1 .} \tag{2.99}$$

Из формулы (2.99) видна принципиальная возможность создания измерительной аппаратуры с непосредственным отсчетом T_y: для этого в состав приемника должна быть введена система компенсации величины T_1 на выходном приборе.

Из (2.98) и (2.99) нетрудно получить выражение для вероятной относительной погрешности измерения T_y:

$$\delta T_y = \sqrt{\alpha_{погр}^2 \left(\delta^2 n + \delta^2 T_2\right) + \left(\alpha_{погр} - 1\right)^2 \delta^2 T_1}, \tag{2.100}$$

где:

$$\alpha_{погр} = 1 + \frac{T_1}{T_y} . \tag{2.101}$$

Как видно, коэффициент $\alpha_{погр}$, определяющий темп роста погрешности, зависит от соотношения T_1/T_y (рис. 2.25) и не зависит от T_2. Если приблизить T_1 к нулю (например, $T_1 = 4{,}2$ К), то $\alpha_{погр} \approx 1$ и погрешность

$$\delta T_y \approx \sqrt{(\delta n)^2 + (\delta T_1)^2}, \tag{2.102}$$

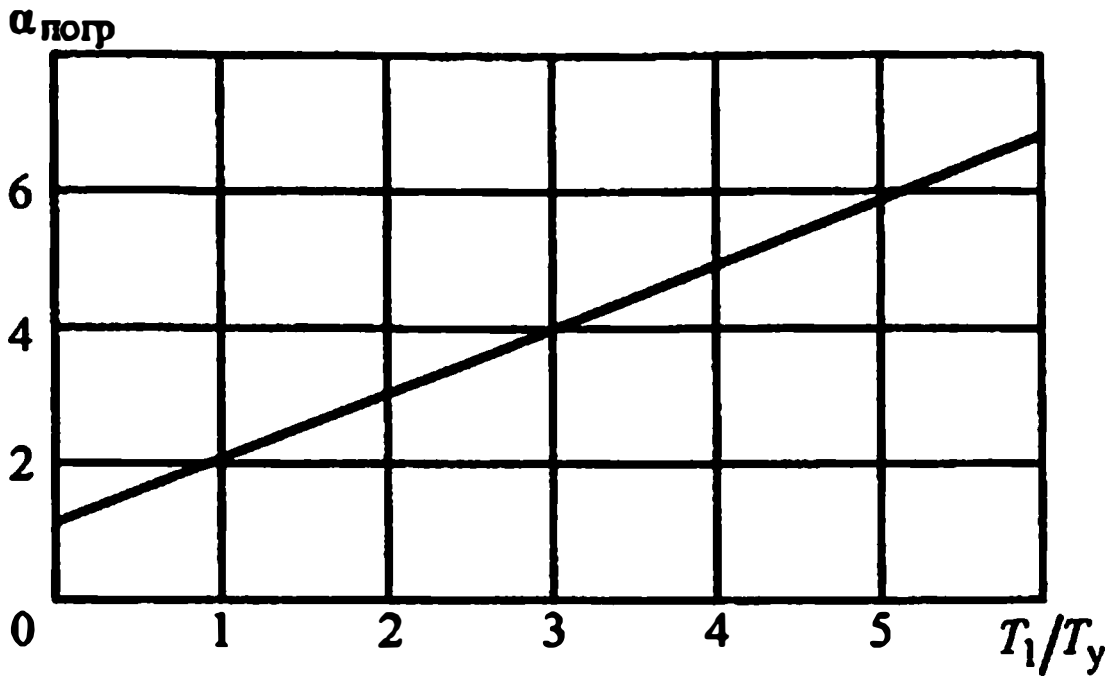


Рис. 2.25. Зависимость коэффициента $\alpha_{погр}$, определяющего темп роста погрешности от отношения T_1/T_y

что соответствует погрешности измерения коэффициента шума методом линейной шкалы (см. 2.59).

Если в тракте есть *заметные потери*, то

$$\alpha_{погр} = \alpha_N = 1 + \frac{T_{вых}}{T_y} = 1 + \frac{T_0(N-1)+T_1}{NT_y}. \qquad (2.103)$$

Вероятная относительная погрешность

$$\delta T_y = \sqrt{\alpha_N^2\left(\delta^2 n + \delta^2 T_2\right) + (\alpha_N - 1)^2\left(b_1^2\delta^2 N + b_2^2\delta^2 T_1\right)}, \qquad (2.104)$$

где b_1 и b_2 – определяются по формулам (2.94) и (2.95).

Составляющая погрешности, зависящая от неточности определения потерь δN, равна:

$$\gamma_N = b_1(\alpha_N - 1)\delta N = \frac{T_0 - T_1}{NT_y}\delta N. \qquad (2.105)$$

Характер зависимости этой составляющей при T_1 = 77 К, T_2 = 293 К, δN = 0,04 от величины измеряемой T_y представлен на рис. 2.26. Как видно, для T_y порядка 50–100 К погрешность доходит до 15–20 %, т.е. имеет заметную величину. В то же время она несколько меньше, чем для метода двух шумовых источников (15–27 %, рис. 2.23).

Для снижения погрешности γ_N необходимо уменьшать погрешность измерения потерь в СВЧ тракте.

В [147] приведены примеры расчета погрешности измерения T_y, которые могут помочь при проектировании измерительной аппаратуры.

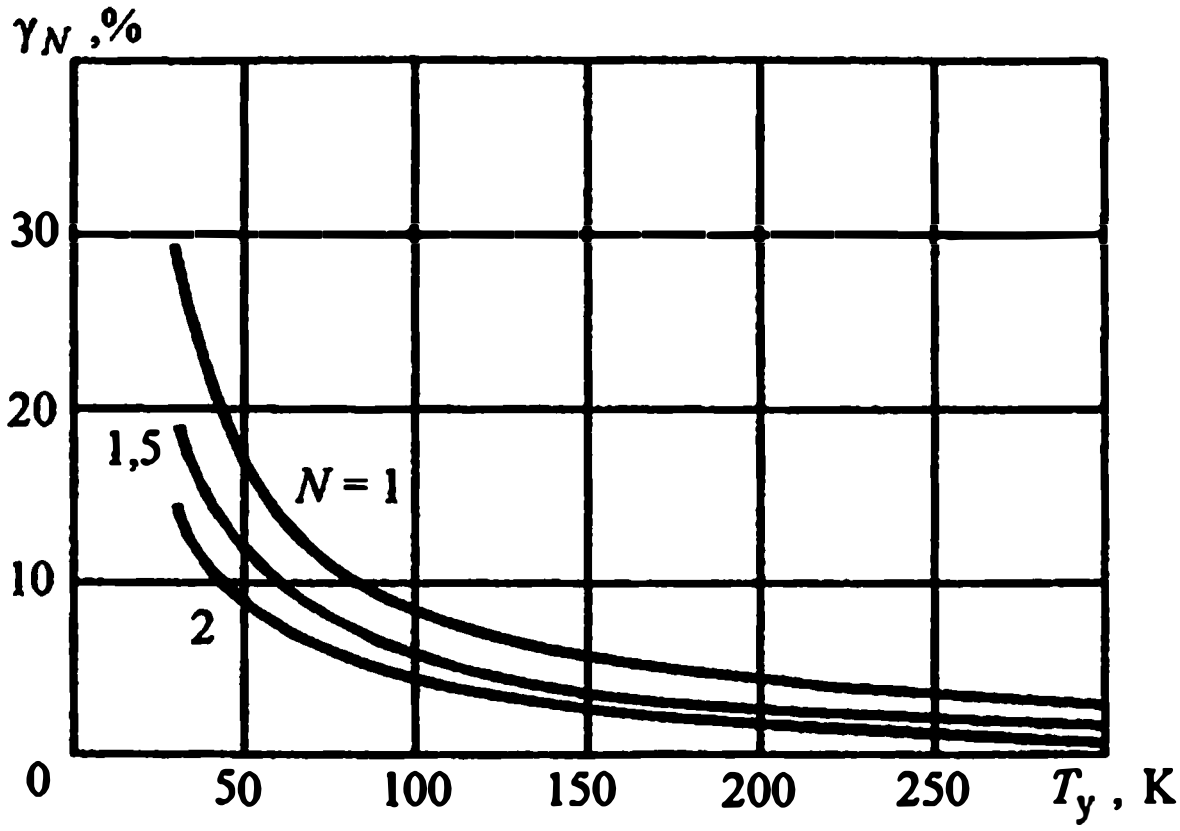


Рис. 2.26. Зависимость погрешности, связанной с неточностью определения потерь в СВЧ тракте, от шумовой температуры усилителя T_y ($\delta N = 0{,}04$, $T_1 = 77$ К, $T_2 = 293$К)

2.10.3 Нулевой модуляционный метод измерения шумовой температуры усилителя

В [162] описан метод измерения T_y, где для повышения точности использован источник добавочного шума и модуляционный измерительный приемник с нулевым способом отсчета.

Ко входу испытываемого усилителя *6* (рис. 2.27) подключается низкотемпературный ГШ *1*. Добавочный шум подается от газоразрядного ГШ *4*, работающего в импульсном режиме, через направленный ответвитель *2*. Работа ГШ и СВЧ переключателей *7*, *12* синхронизирована таким образом, что при включенном ГШ переключатели *7* и *12* пропускают сигналы с выхода усилителя *6* на вход приемника *14* через образцовый ослабитель *10*. При выключенном ГШ сигналы направляются в приемник через компенсационный ослабитель *9*.

Перед измерением при выведенном ослабителе *10* и нсработающем ГШ с помощью компенсационного ослабителя *9* производится установка нуля на выходе приемника *14*.

После этого включается модуляция ГШ и на входе приемника возникает сигнал с переменной составляющей, пропорциональной мощности избыточного шума от ГШ на входе усилителя *6*. Далее, с помощью образцового ослабителя *10* на выходе модуляционного приемника *14* устанавливается нулевое показание.

Если считать, что коэффициент усиления усилителя *6* велик и можно пренебречь шумовым вкладом ослабителей, шумовая температура усилителя может быть найдена по формуле:

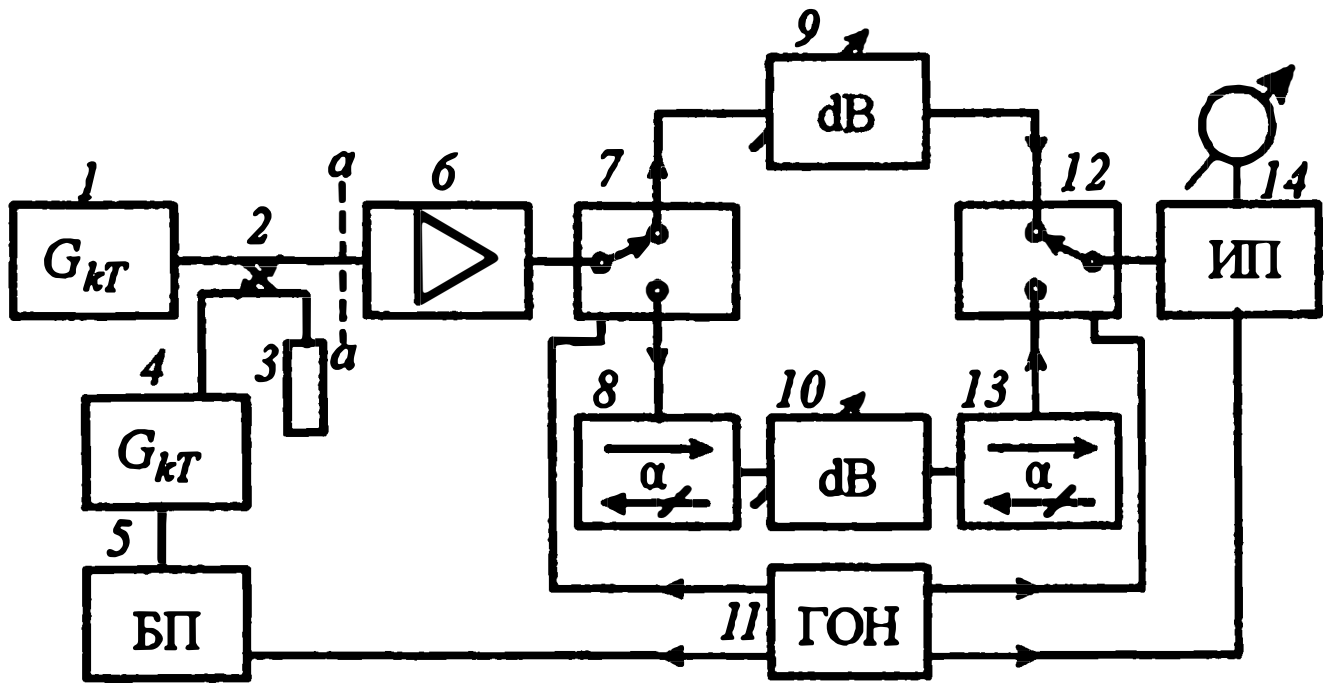


Рис. 2.27. Схема измерения шумовой температуры усилителя нулевым модуляционным методом [162]

1 – низкотемпературный (гелиевый) ГШ; *2* – направленный ответвитель; *3* – нагрузка; *4* – газоразрядный ГШ; *5* –блок питания ГШ; *6* – исследуемый усилитель; *7*, *12* – СВЧ переключатели; *8*, *13* – ферритовые развязки; *9* – компенсационный ослабитель; *10* – образцовый ослабитель; *11* – генератор опорного напряжения; *14* – модуляционный измерительный приемник

$$T_y = \frac{T_2}{n-1} - T_1, \tag{2.106}$$

где T_1 – шумовая температура охлажденного источника в сечении а-а, T_2 – приращение температуры шума в том же сечении при включении шумовой лампы, n – ослабление, введенное образцовым ослабителем *10* для достижения нулевого показания приемника.

Относительные частные погрешности, вызванные неопределенностью T_1, T_2, n, как показано в [162], составляют:

$$\delta T_{y(T_1)} = \frac{T_1(n-1)}{T_2 - T_1(n-1)}\delta T_1, \tag{2.107}$$

$$\delta T_{y(T_2)} = \frac{T_2}{T_2 - T_1(n-1)}\delta T_2, \tag{2.108}$$

$$\delta T_{y(n)} = \frac{T_2 n}{(n-1)[T_2 - T_1(n-1)]}\delta n, \tag{2.109}$$

где δT_1, δT_2, δn – относительные погрешности соответственно величин T_1, T_2 и n.

Из формул видно, что относительная погрешность измерения T_y при заданных значениях составляющих δT_1, δT_2, δn падает с увеличением T_2 и уменьшением T_1.

Пример:

при $T_y = 10$ К, $T_1 = 10 \pm 1$ К, $T_2 = 200 \pm 10$ К, $\delta n = \pm 4$ %

относительная погрешность

$$\delta T_y = \pm\sqrt{\delta^2 T_{y(T_1)} + \delta^2 T_{y(T_2)} + \delta^2 T_{y(n)}} = \pm 16\,\%.$$

Достоинствами этого метода являются:

– исключение зависимости погрешности от нестабильности K_y исследуемого усилителя,

– повышение точности отсчета n за счет применения поляризационного ослабителя,

– отсутствие необходимости переключений в СВЧ тракте.

К недостаткам метода можно отнести некоторую сложность установки и трудность аттестации малого уровня T_2.

Анализ методики измерения шумовой температуры усилительных и приемных устройств позволяет сделать следующие **в ы в о д ы**.

1. Использование для определения шумовой температуры T_y метода ее расчета по измеренному значению коэффициента шума приводит к значительным погрешностям.

2. Для повышения точности измерения T_y используются методы с применением низкотемпературных шумовых источников.

а). *Первый* – метод измерения отношения сигналов на выходе исследуемого устройства при поочередном подключении к его входу двух шумовых источников, один из которых является низкотемпературным (жидкий гелий или азот) [147] .

б). *Второй* – метод поочередной модуляции исследуемого устройства и образцового генератора шума. Ко входу устройства при этом также подключается низкотемпературный источник шума [147].

в). *Третий* метод [162] является нулевым с использованием газоразрядного источника добавочного шума и образцового СВЧ ослабителя.

Метод поочередной модуляции требует специальной программы модуляции, однако, дает возможность создания аппаратуры с непосредственным отсчетом шумовых температур и обладает по сравнению с первым преимуществом в точности.

Нулевой метод с образцовым СВЧ ослабителем [162] разработан в Комитете Стандартов СССР и потенциально обладает, по-видимому, наибольшей точностью. Он используется для прецизионных измерений.

3. Формулы измерений шумовой температуры (2.82), (2.99), (2.106), приведенные в настоящем разделе для различных методов, выведены в предположении, что исследуемый усилитель имеет очень большое усиление. При реальных значениях коэффициента усиления ($K_у$) усилителей в каждую из этих формул должна вводиться положительная поправка [90, 162], равная $T_0/K_у$, учитывающая влияние теплового шума ослабителя или модуляторов, включаемых на выходе усилителя.

4. Существенную роль при работе с низкотемпературными источниками играют потеря в СВЧ тракте, они должны быть учтены с высокой точностью.

Имются формулы и графики для расчета погрешности измерений $T_у$ из-за потерь.

При потерях порядка 0,5 дБ и погрешности их измерения 0,2 дБ шумовая температура $T_у$ = 60 К может быть измерена с погрешностью 18–25 %.

5. Описанная в подразделах 2.10.1 и 2.10.2 методика расчета погрешностей измерения $T_у$ использована в ГОСТе [65].

2.11 ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ МЕТОДОМ ДВУХ ГЕНЕРАТОРОВ ШУМА

Получил распространение [10, 69, 132] метод измерения коэффициента усиления $K_у$ малошумящих СВЧ усилителей, основанный на сравнении мощностей, попадающих на приемник от двух однотипных генераторов шума, работающих в режиме низкочастотной амплитудной модуляции, один из которых *2* (рис. 2.28) находится на входе испытываемого усилителя, а второй *4* – на его выходе ("метод двух ГШ").

Сравнение мощностей производится с помощью модуляционного измерительного приемника *6*, содержащего квадратичный детектор. Если мощно-

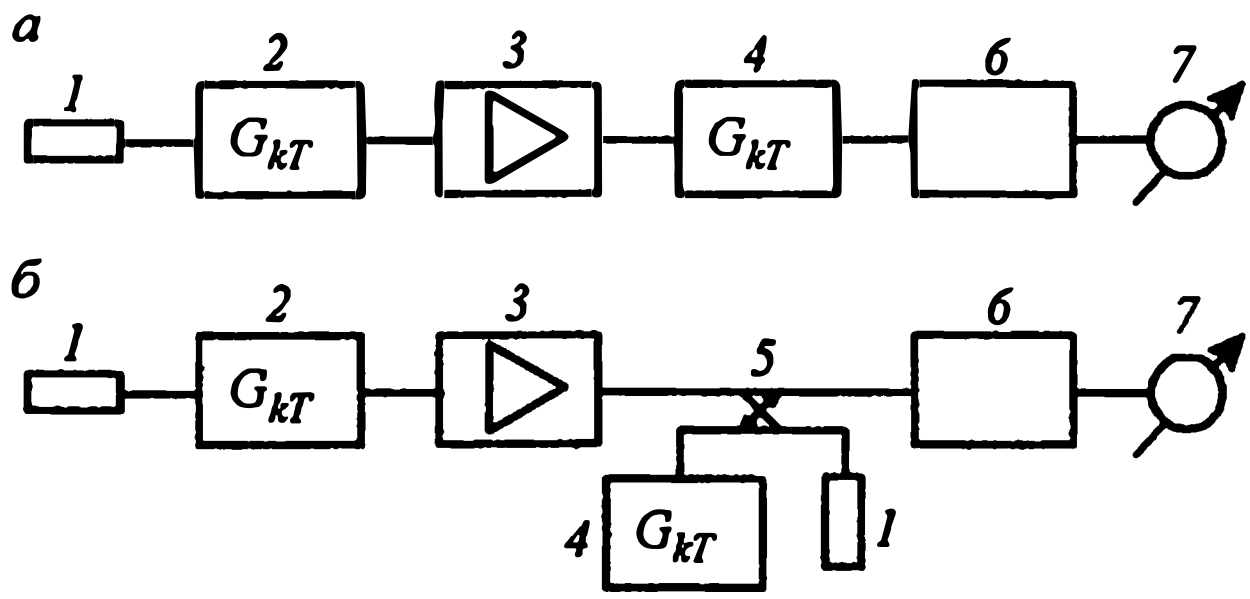


Рис. 2.28. Структурная схема измерителя коэффициента усиления методом двух ГШ
1 – согласованная нагрузка, *2* – первый ГШ, *3* – исследуемый усилитель, *4* – второй ГШ, *5* – направленный ответвитель, *6* – модуляционный измерительный приемник, *7* – индикаторный прибор

сти генераторов одинаковы, то коэффициент усиления одноканального усилителя определится как выраженная в децибелах разность показаний приемника α_1 и α_2 при работе соответственно первого и второго ГШ:

$$K_{\text{у, дБ}} = \alpha_{1,\text{дБ}} - \alpha_{2,\text{дБ}}. \qquad (2.110)$$

Если мощности ГШ не равны, то в измеренное значение вводится поправка

$$\Delta K_{\text{у, дБ}} = G_{2,\text{дБ}} - G_{1,\text{дБ}}, \qquad (2.111)$$

где G_1 и G_2 – ОСПМШ соответственно первого и второго ГШ, которая предварительно определяется путем сравнения ГШ по ОСПМШ.

Действительное значение $K_\text{у}$ при этом

$$K_{\text{у, дБ}} = \alpha_{1,\text{дБ}} - \alpha_{2,\text{дБ}} + \Delta K_{\text{у, дБ}}. \qquad (2.112)$$

Схема рис 2.28*а* используется в том случае, когда ГШ позволяет работать "на проход" и имеет при этом малые потери, например, газоразрядный ГШ. Если такой возможности нет, то второй ГШ подключается к тракту через направленный ответвитель (рис. 2.28*б*), поправка $K_\text{у}$ при этом включает также переходное затухание направленного ответвителя. По схеме рис. 2.28*б* обычно включается полупроводниковый ГШ, который располагает запасом шумовой мощности.

Как правило, $K_\text{у}$ измеряется методом двух ГШ на установках для измерения коэффициента шума, в состав которых дополнительно вводится второй ГШ на выходе СВЧ усилителя. В результате основные параметры усилителя ($K_\text{ш}$ и $K_\text{у}$) контролируются на одной и той же измерительной установке, притом практически одновременно. Это упрощает измерительную аппаратуру. Широкополосность шумовых источников избавляет от необходимости их настройки на каждой рабочей частоте.

Но вместе с тем при использовании метода двух ГШ, в отличие от метода с использованием генератора синусоидальных сигналов, для получения правильных результатов измерений необходимо учитывать соотношения между полосами частот измерительного приемника и исследуемого усилителя.

В [10] проводится анализ метода двух ГШ при использовании двухканального супергетеродинного измерительного приемника и оценка погрешности измерений в случае испытания СВЧ усилителей различных типов. *Выводы* этого анализа кратко сводятся к следующему.

– Для широкополосных усилителей, когда справедливо условие

$$\Delta f_{\text{ус}} >> 2 f_{\text{пр}}, \qquad (2.113)$$

где $\Delta f_{ус}$ – ширина полосы частот усилителя, $f_{пр}$ – промежуточная частота приемника. в результате измерений методом двух ГШ получается действительное значение коэффициента усиления независимо от полосы усилителя промежуточной частоты и чувствительности приемника по зеркальному каналу.

– При измерении $K_у$ узкополосных СВЧ усилителей (например, усилителей обратной волны) следует стремиться к выполнению условий

$$\Delta f_{пр} < \Delta f_{ус} < f_{пр}, \tag{2.114}$$

$$a_{зер} = 1, \tag{2.115}$$

где $a_{зер}$ – относительная чувствительность приемника по зеркальному каналу ($0 < a_{зер} < 1$), $\Delta f_{пр}$ – ширина полосы УПЧ приемника.

Действительное значение $K_у$ при этом на 3 дБ больше измеренного $K_{у\ изм}$ и находится как

$$\boxed{K_{у,\,дБ} = K_{у\ изм,\,дБ} + 3\ дБ.} \tag{2.116}$$

– При измерении $K_у$ двухканальных СВЧ усилителей (например, электронных параметрических) должны выполняться соотношения:

$$2f_{пр} - \Delta f_{пр} > \Delta f, \tag{2.117}$$

либо

$$2f_{пр} + \Delta f_{пр} < \Delta f, \tag{2.118}$$

и

$$a_{зер} = 1, \tag{2.119}$$

где Δf – частотный интервал между каналами приема СВЧ усилителя.

Для обеспечения необходимых условий, сформулированных выше, и снижения погрешностей из-за высокочастотного рассогласования следует при проектировании измерительных установок соответствующим образом выбирать величины промежуточной частоты и полосы УПЧ приемника, а также применять хорошо согласованные широкополосные смесители и генераторы шума.

В современных измерительных установках с микропроцессорами [79, 173] второй генератор шума иногда не ставится, в его роли выступают собственные шумы приемника, которые предварительно калибруются по ГШ, и результат вводится в запоминающее устройство.

Метод двух ГШ может быть использован не только при измерении $K_у$ усилителей, но и при измерении коэффициента передачи (потерь преобразования) смесителей, приемных модулей и др. [10]. Второй ГШ при этом должен работать на преобразованной частоте. Из этого следует, что при опреде-

лении поправки ΔK_y здесь необходимо знать абсолютные значения СПМШ первого и второго ГШ. При измерении K_y усилителей предварительнос сравнение ГШ проводится на одинаковой частоте, т.е. измерения носят лишь относительный характер.

2.12 АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА

Описанные ранее методы (подразделы 2.2–2.4) показывают различные принципиальные возможности измерения $K_ш$ путем сравнения шума усилителя с шумом ГШ. В простейшем виде эти методы сравнительно легко осуществимы практически и широко применялись на первой стадии развития шумовой измерительной техники. Они применяются также и сейчас при эпизодических измерениях и отсутствии более совершенной аппаратуры. Благодаря своей простоте и поэтому меньшей вероятности возникновения ошибок некоторые из этих методов используются также в качестве контрольных при поверке более сложных измерителей.

В настоящее время созданы многочисленные модели ИКШ, которые, принципиально базируясь в основном на рассмотренных выше методах, обладают большей точностью и производительностью, а также рядом дополнительных сервисных возможностей за счет введения автоматизации модуляционных программ, цифровой обработки сигналов и т.д. [46, 101, 107, 118, 194, 203, и др.]

Среди новых возможностей таких измерителей можно отметить следующие:

– повышенную точность сравнения шумовых сигналов,
– непосредственный отсчет измеряемых величин по шкале выходного индикатора,
– постоянный контроль за калибровкой ИКШ,
– возможность настройки усилителя на оптимальные параметры при непрерывном наблюдении за измеряемой величиной по шкале прибора,
– автоматическое введение поправок при измерениях,
– отсчет измеряемых величин с повышенной разрешающей способностью в цифровой форме,
– вывод данных и документализация результатов измерений,
– возможность работы ИКШ в составе автоматизированных измерительных комплексов,
– панорамные измерения параметров в диапазоне частот,
– самоконтроль измерителей и др.

Для примера можно упомянуть одну из пионерских работ в области автоматизации измерений, проведенную в 1973 году на предприятии [87] Б.И.Олейнером, в результате которой была создана система автоматической на-

стройки СВЧ усилителя на оптимальные значения $K_{ш}$ и $K_{у}$ путем выбора электрического режима с помощью ЭВМ.

Более конкретно некоторые из перечисленных особенностей измерителей в дальнейшем будут отмечены в связи с описанием различных ИКШ конкретных типов.

ВЫВОДЫ

1. Измерения коэффициента шума сводятся к сравнению собственного шума испытываемого устройства с шумом отградуированного по СПМШ шумового генератора. Это дает возможность, в отличие от применения синусоидального источника сигнала,

– исключить необходимость точного измерения полосы частот измерительного приемника,

– исключить ошибки, связанные с экранированием генератора.

2. Существующие методы можно классифицировать в зависимости от заложенного в их основу уравнения измерений.

Первая группа соответствует "методу Y-фактора"; к ней можно отнести методы двойного и *n*-кратного превышения, метод постоянного уровня, модуляционные (прямоотсчетные и нулевые) методы 2-х и 3-х отсчетов.

Ко второй группе относятся способы измерений, основанные на "методе линейной шкалы". Измерения этим методом обеспечивают:

– удобный линейный непосредственный отсчет измеряемого $K_{ш}$ на выходном аналоговом приборе,

– бо́льшую точность сравнения шума ГШ и усилителя, не зависящую от соотношения между относительной СПМШ ГШ и измеряемым $K_{ш}$.

3. Значительные преимущества при измерении $K_{ш}$ дает применение модуляционного метода. При его использовании:

– исключается поправка, связанная с собственным шумом измерительной аппаратуры,

– обеспечивается линейность амплитудной характеристики по мощности (квадратичность по напряжению),

– повышается чувствительность, расширяется динамический диапазон и улучшается точность измерительной системы,

– появляется возможность использования разнообразных рациональных программ при шумовых измерениях.

4. В таблице 2.1 проводится сравнение методов измерения $K_{ш}$ по ряду основных технических характеристик, которое может помочь в выборе метода для тех или иных целей. Цифры погрешностей указаны ориентировочно при некоторых усредненных условиях, главным образом для возможности сопоставления методов.

5. Автоматизация современных ИКШ на базе вычислительной техники повышает точность и удобство измерений, создает возможность работы ИКШ в составе автоматизированных измерительных систем.

6. При введении в состав ИКШ второго генератора шума появляется возможность измерения не только $K_ш$, но и $K_у$ (или коэффициента передачи) исследуемого устройства на той же установке.

Таблица 2.1

Основные технические характеристики различных методов измерения $K_ш$

№№ п.п.	Метод измерения	Погрешность измерения $K_ш$ (без погрешности ГШ), %	Возможность автоматизации измерений	Вид расчетной зависимости $K_ш$ (тип шкалы)	Исключение собственных шумов ИП
1.	Метод двойного превышения	± 10	–	обратная нелинейная	не исключ.
2.	Метод *n*-кратного превышения (Y-фактора)	± 10	имеется	—"—	не исключ.
3.	Метод постоян-ного уровня	± 6	–	—"—	исключ.
4.	Модуляцион-ный метод 3-х отсчетов	± 5	не имеется	–	исключ.
5.	Модуляцион-ный метод 2-х отсчетов	± 4	не имеется	—"—	исключ.
6.	Нулевой модуляцион-ный метод 3-х отсчетов	± 2,5	–	–	исключ.
7.	Нулевой модуляцион-ный метод 2-х отсчетов	± 2	–	–	исключ.
8.	Метод линейной шкалы	± 3	имеется	линейная, прямопропор-циональная	исключ.

3. АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ УСИЛИТЕЛЬНЫХ И ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

3.1. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИКШ, ЕЕ ПАРАМЕТРЫ И РАСЧЕТ

Современный ИКШ СВЧ диапазона (рис. 3.1) является сложной установкой высокой чувствительности, содержит входной и выходной СВЧ тракты и автоматический измеритель отношений величин напряжений на промежуточной частоте.

Входной СВЧ тракт является генератором шумового стандартного сигнала (ГШСС), выходной СВЧ тракт вместе с автоматическим измерителем отношений обычно представляет собой супергетеродинный модуляционный измерительный приемник сверхвысоких частот (ИП). На выходе может быть примснен также СВЧ приемник прямого усиления [22], при этом отпадает необходимость в перестраиваемом гетеродинном генераторе.

Как указывалось, наиболее распространенный метод измерения коэффициента шума состоит в сравнении собственного шума усилителя с шумом ГШСС, уровень которого известен. При этом в автоматизированных измерителях может использоваться раздельная модуляция шума ГШСС и исследуемого усилителя по закону низкочастотного меандра [2].

Основные составные части ИКШ-ГШСС и ИП могут быть структурно выполнены по-разному, в зависимости от диапазона длин волн, характеристик испытываемого прибора, наличия СВЧ узлов и т.д.

Необходимые функциональные возможности и заданная точность измерений могут быть обеспечены при условии выполнения определенных требований к элементам измерителя коэффициента шума.

Нормирование параметров элементов измерительной установки часто сводят к перечню требований к отдельным элементам, входящим в состав ГШСС и ИП. Такой подход приводит к необходимости при каждом варианте построения ГШСС и ИП возвращаться к пересмотру этих норм.

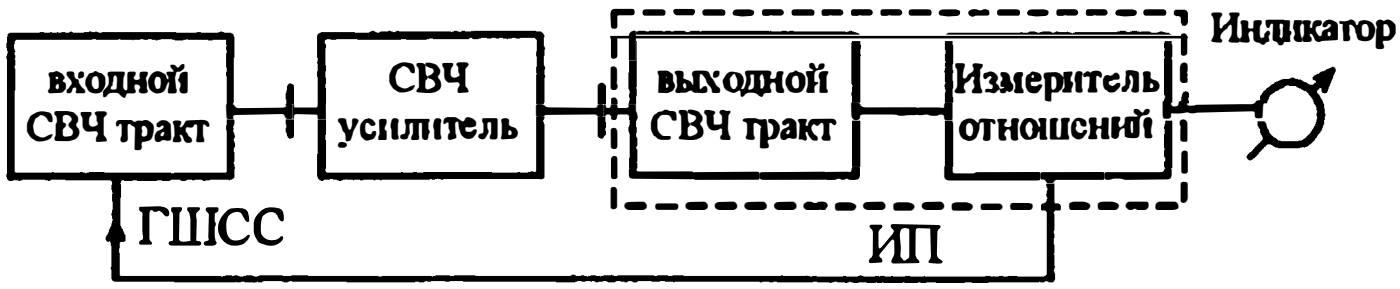


Рис. 3.1. Обобщенная структурная схема ИКШ СВЧ диапазона

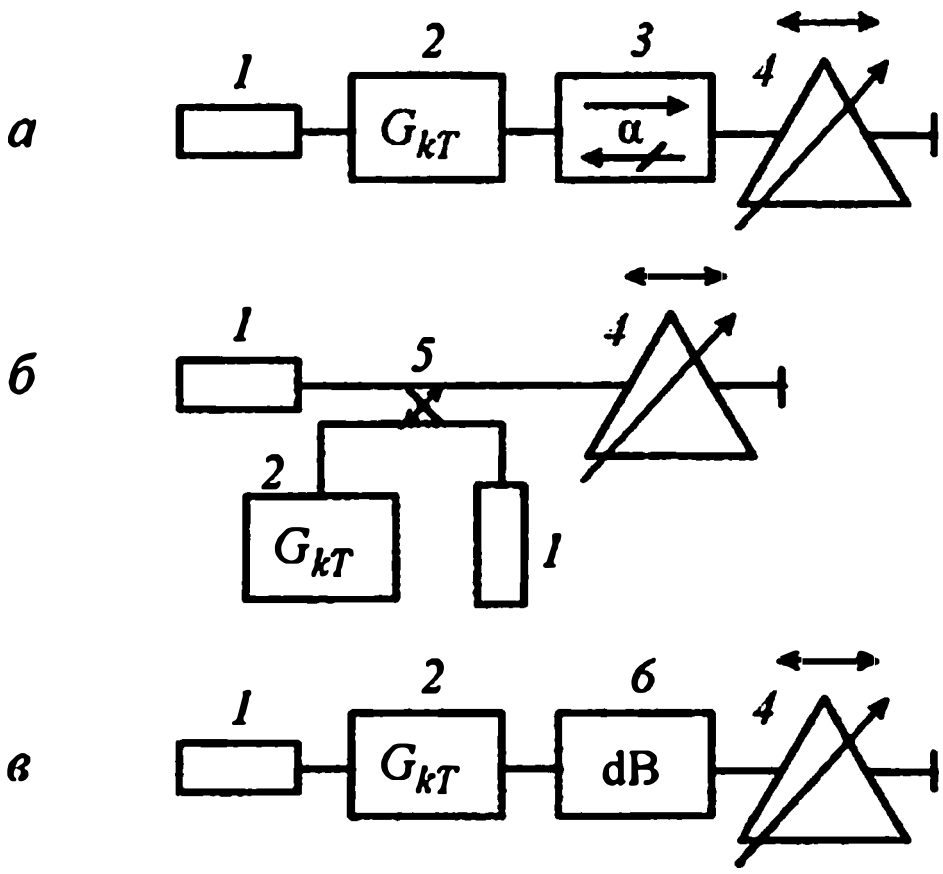


Рис. 3.2. Некоторые варианты построения ГШСС

1 – согласованная нагрузка, *2* – газоразрядный генератор шума, *3* – ферритовый вентиль, *4* – согласующий трансформатор, *5* – направленный ответвитель, *6* – аттенюатор

На рис. 3.2 для примера показано несколько вариантов построения ГШСС, каждый из которых может быть использован в определенных условиях.

Для структурной схемы рис. 3.2*а* требования к КСВН согласованной нагрузки *1* невелики, т.к. выходной КСВН генератора определяется главным образом свойствами вентиля *3*. В то же время нагрузка *1* в тракте на рис. 3.2*б* существенным образом влияет на выходной КСВН и должна быть нормирована более строго. Генераторы шума на рис. 3.2*б*, *в* должны обладать повышенной мощностью по сравнению с генератором шума на рис. 3.2*а* при одинаковых требованиях к уровню мощности на выходе ГШСС и т.д.

С целью единого подхода к различным ИКШ представляется рациональным [15] относить перечень требований к обобщенным узлам ИКШ-ГШСС и ИП – в целом, а не к отдельным элементам, входящим в их состав. Это позволяет одновременно охарактеризовать разнообразные варианты обобщенных узлов ИКШ с различной внутренней структурой и тем самым упростить вопрос нормирования.

Конкретные варианты построения ГШСС и ИП, естественно, также представляют собой важный вопрос. Они будут рассмотрены отдельно в последующем.

3.1.1 Параметры ГШСС

Для обеспечения измерения разновидностей коэффициента шума, упомянутых в подразделе 1.7 ($K_{ш\Sigma}$, $K_{шр}$, $K_{ш^*}$, $K_{ш\ мин}$, $K_{ш|\Gamma|}$), ГШСС должен иметь известную ОСПМШ во включенном и выключенном состояниях и регулируемый выходной импеданс.

Следует учесть также, что одной из характерных ошибок, возникающих при измерении шумовых сигналов малого уровня, является ошибка, связанная с паразитной модуляцией шумов приемного устройства (в нашем случае – исследуемого СВЧ усилителя или ИП) вследствие изменения импеданса на его входе при включении [82].

Для устранения этой ошибки необходимо обеспечить постоянство выходного сопротивления ГШСС во включенном и выключенном режимах.

Отметим также ошибку, которая может возникнуть из-за значительной частотной изрезанности ОСПМШ ГШСС, особенно в случае двухканального режима работы супергетеродинного измерительного приемника. Она проявляется при неравенстве коэффициентов усиления исследуемого усилителя на частотах основного и зеркального каналов [13].

Учитывая изложенное, к числу регламентируемых выходных характеристик ГШСС нужно отнести следующие [15]:

– рабочий диапазон частот,

– уровень избыточной ОСПМШ при включении и погрешность его определения,

– уровень избыточной ОСПМШ в выключенном состоянии и погрешность его определения,

– пределы регулирования модуля и фазы выходного коэффициента отражения,

– максимальное изменение модуля и фазы выходного коэффициента отражения при включении,

– параметр частотной изрезанности характеристики ОСПМШ ГШСС $\beta_{f(G)}$, он вводится аналогично параметрам $\beta_{f(Kш)}$ и $\beta_{f(Ky)}$ [13] по формуле:

$$\beta_{f(G)} = \frac{\Delta G}{\Delta f} \cdot \frac{f}{G}, \qquad (3.1)$$

где Δf – частотный интервал, на протяжении которого изменение ОСПМШ ΔG может быть принято пропорциональным изменению частоты, f – частота.

3.1.2 Параметры СВЧ измерительного приемника

Основная функция приемника – обеспечение измерения отношений шумовых сигналов от ГШСС и исследуемого усилителя с заданной точностью. Диапазон измеряемых отношений и уровень поступающих сигналов определяется величиной ОСПМШ ГШСС, усилением и уровнем шума усилителя.

Существенную роль при шумовых измерениях играет флуктуационная составляющая погрешности, которая не должна превышать заданной величины. Она зависит от соотношения измеряемого шумового сигнала и собственного шума измерительного приемника [14] (т.е. от его коэффициента шума).

Для настройки усилителя на минимальный коэффициент шума в приемниках часто используется система автоматической регулировки усиления (АРУ) [18, 25]. Система АРУ конкретного приемника способна работать, начиная с некоторого минимального отношения сигнал/шум на входе приемника [14, 77]. Это отношение также зависит от коэффициента шума ИП и от величины поступающих сигналов. Оно должно быть бо́льшим, чем некоторое минимально допустимое $(С/Ш)_{мин}$.

Измерительный приемник обеспечивает модуляцию выходного шума исследуемого усилителя и ГШСС по закону низкочастотного меандра. Если форма или глубина модуляции шума усилителя и шума ГШСС окажутся различными, то это может привести к дополнительной ошибке сравнения [12].

Должны быть нормированы также точность установки рабочей частоты и разрешающая способность приемника по частоте. При значительной погрешности установки рабочей частоты и недостаточной разрешающей способности возникают ошибки измерений, связанные с неравномерностью частотных характеристик ГШСС и исследуемого усилителя [13]. Отметим также, что при наличии сигналов на частотах паразитных каналов приема (например, 2 и 3 гармониках) нужно оговаривать дополнительное запирание приемника на этих частотах.

Из сказанного следует, что к числу параметров, характеризующих измерительный СВЧ приемник относятся:

– рабочий диапазон частот,
– разрешающая способность по частоте (абсолютная и относительная),
– точность установки рабочей частоты,
– пределы ОСПМШ сравниваемых шумовых сигналов,
– пределы измеряемых отношений шумовых сигналов,
– погрешность измерения отношений шумовых сигналов,
– величина паразитной модуляции собственного шума приемника,
– минимальное отношение сигнал/шум на входе приемника, необходимое для обеспечения работоспособности системы АРУ,

– постоянная времени приемника,
– глубина и форма низкочастотной модуляции поступающих сигналов,
– коэффициент подавления паразитных каналов приемника,
– максимальный КСВН входа.

Измерительный приемник должен обеспечивать соответствующими синхронизирующими импульсами систему модуляции шума ГШСС.

В зависимости от специальных условий измерений перечень регламентируемых параметров обобщенных узлов ИКШ может несколько изменяться. Например, для панорамного измерителя следует добавить требования о равномерности ОСПМШ ГШСС, повышенном быстродействии ИП, автоматизации перестройки гетеродина; при наличии параллельной функции измерения коэффициента усиления методом двух ГШ измерительный приемник должен содержать встроенный СВЧ генератор шума и т.д.

3.1.3 Расчет обобщенной структурной схемы ИКШ

Обобщенная структурная схема ИКШ приведена на рис. 3.1. Необходимые характеристики обобщенных узлов ИКШ можно рассчитать исходя из параметров исследуемого усилителя и допустимых величин составляющих общей погрешности измерений коэффициента шума [17].

Исходными параметрами усилителя следует считать:
– граничные частоты рабочего диапазона $f_{\text{у мин}}$, $f_{\text{у макс}}$;
– минимальные и максимальные значения измеряемых коэффициентов шума $K_{\text{ш мин}}$, $K_{\text{ш макс}}$ и усиления $K_{\text{у мин}}$, $K_{\text{у макс}}$;
– максимальные значения КСВН входа и выхода усилителя* $\sigma_{\text{вх макс}}$, $\sigma_{\text{вых макс}}$ и максимально допустимый КСВН нагрузки усилителя $\sigma_{\text{н макс}}$;
– максимальные значения параметров частотной изрезанности коэффициентов шума $\beta_{f(\text{Кш})}$ и усиления $\beta_{f(\text{Ку})}$;
– крутизну изменения коэффициента шума в зависимости от рассогласования на входе усилителя $\beta_{\text{Кш}}$.

Задаваемой величиной является также относительная погрешность измерения коэффициента шума**

$$\delta K_{\text{ш}} = \sqrt{\delta^2 K_{\text{ш}G} + \delta^2 K_{\text{ш}\,n_0} + \delta^2 K_{\text{ш}\theta} + \delta^2 K_{\text{ш}f} + \delta^2 K_{\text{ш мод}} + \delta^2 K_{\text{ш пму}} + \delta^2 K_{\text{ш пмп}}} \qquad (3.2)$$

---

* Имеется в виду "холодный" либо "горячий" КСВН в зависимости от физической основы работы усилителя конкретного типа.

** Для упрощения законы распределения составляющих погрешностей принимаются нормальными. Они могут быть учтены путем введения соответствующих коэффициентов (см. подраздел 3.5 и [130]). Общая погрешность $\delta K_{\text{ш}}$ и все составляющие имеют смысл предельных.

Здесь $\delta K_{шG}$, $\delta K_{ш\,n_0}$ – соответственно погрешность градуировки ГШСС по уровню избыточной ОСПМШ G и погрешность уровня его шума n_0 в выключенном состояния по отношению к уровню при температуре $T_0 = 293$ К;
$\delta K_{ш\,\theta}$ – погрешность измерения приемником отношения уровней шумовых сигналов:

$$\delta K_{ш\,\theta} = \sqrt{\delta^2 K_{ш\,ос} + \delta^2 K_{ш\,фл}}\ , \qquad (3.3)$$

где $\delta K_{ш\,ос}$ – погрешность отсчетной системы;
$\delta K_{ш\,фл}$ – погрешность, вносимая флуктуациями;
$\delta K_{ш\,f}$ – частотная погрешность.

$$\delta K_{ш\,f} = \sqrt{\delta^2 K_{ш\,f_1} + \delta^2 K_{ш\,f_2} + \delta^2 K_{ш\,f_3}}\ , \qquad (3.4)$$

где $\delta K_{ш\,f_1}$ – погрешность за счет конечной разрешающей способности приемника по частоте;
$\delta K_{ш\,f_2}$ – погрешность за счет ошибки установки рабочей частоты приемника $\delta f_р$, возникающая при значении параметра частотной изрезанности ОСПМШ ГШСС $\beta f_{(G)}$, отличном от нуля;
$\delta K_{ш\,f_2}$ – то же при $\beta f_{(Кш)}$ и $\beta f_{(Ку)}$, отличных от нуля;
$K_{ш\,мод}$ – погрешность за счет неидеальности системы модуляции шума усилителя;
$K_{ш\,пму}$, $K_{ш\,пмп}$ – погрешности, вносимые паразитной модуляцией шумов усилителя и приемника соответственно.

Первый этап расчета состоит в предварительном анализе общей погрешности измерений $\delta K_ш$ и выборе численных значений ее составляющих, удовлетворяющих условию:

$$\boxed{\delta K_ш \le \delta K_{ш\,доп},} \qquad (3.5)$$

где $\delta K_{ш\,доп}$ – допустимая общая погрешность.

Далее необходимые значения параметров ГШСС и ИП определяются по формулам и в последовательности указанным в таблицах 3.1 и 3.2. Если полученные при этом требования к каким-либо параметрам обобщенных узлов трудно удовлетворить практически, расчет может быть повторен при других возможных комбинациях величин составляющих погрешностей.

Требования к обобщенным узлам ИКШ, определенные по формулам и табл. 3.1, 3.2 должны быть обеспечены соответствующими конструкциями

Таблица 3.1

№	Параметр ГШСС	Зависимость	Формула	Примечание
1	2	3	4	5
1.	Рабочий диапазон частот $f_{гшсс,\,мин} - f_{гшсс,\,макс}$	$f_{гшсс,\,мин} \le f_{у,\,мин}$ $f_{гшсс,\,макс} \ge f_{у,\,макс}$	(1') (2')	
2.	Уровень избыточной ОСПМШ во включенном состоянии G^*	$G_{мин} < G < G_{макс}$	(3')	
	$G_{мин}$	$G'_{мин} \ge n_{мин} \times$ $\times (K_{ш,\,макс} + K_{ш\,пп}/K_{у,\,мин})$	(4')	В соответствии с [14], значения $n_{мин}$ и $K_{ш\,пп}$ определяются по формулам (15''), (16'') табл. 3.2.
		$G''_{мин} \ge$ $\ge \frac{K_{ш,\,макс} K_{у,\,мин} + K_{ш\,пп}}{(\delta K_{ш\,фл} Q - 1) K_{у,\,мин}}$	(5')	В качестве $G_{мин}$ выбирается бо́льшее из значений $G'_{мин}$ и $G''_{мин}$, определенных по формулам (4') и (5').
	$G_{макс}$	$G_{макс} < pq$	(6')	Определяется динамическим диапазоном p измерительного приемника по отношению к пределу q шкалы, на ко-торой проводится кали-бровка
3.	Погрешность δG уровня G	$\delta G \le \delta K_{шG}$	(7')	
4.	Уровень ОСПМШ в выключенном состоянии n_o	$n_o = 1$	(8')	При измерении стандартного коэффициента шума
5.	Погрешность δn_o уровня n_o	$\delta n_o \le K_{ш,мин} \delta K_{ш\,n_o}$	(9')	
6.	Параметр частотной изрезанности ОСПМШ ГШСС $\beta f_{(G)}$	$\beta f_{(G)} \le \frac{\delta K_{ш\,f_2}}{\delta f_\rho}$	(10')	В соответствии с [15]. Значение δf_ρ определяется по формуле (4'') табл. 3.2.
7.	Пределы регулирования модуля $\lvert\Gamma_{рег}\rvert$ и фазы $\varphi_{рег}$ выходного коэффициента отражения	$0 \le \lvert\Gamma_{рег}\rvert \le K_{рег} \lvert\Gamma_{вх}\rvert_{макс}$ $\Delta\varphi_{рег} \ge \pi$	(11') (13')	$\lvert\Gamma_{вх}\rvert_{макс} = \frac{\sigma_{вх,\,макс} - 1}{\sigma_{вх,\,макс} + 1}$ (12') Коэффициент $K_{рег}$ зависит от свойств усилителя; для ЛБВ условно может быть принят $K_{рег} \approx 1{,}2$

Таблица 3.1 (окончание)

1	2	3	4	5
8.	Допустимое относительное изменение входного КСВН при включении ГШСС $\delta\sigma_{вых}$	$\delta\sigma_{вых} \le 2\sqrt{\frac{\delta K_{ш\,пму}}{\beta_{кш}}}$	(14')	Соотношение (14') справедливо при измерении оптимального коэффициента шума $K_{ш\,мин}$ [15] в связи с примерно квадратичной зависимостью $K_ш$ от сопротивления источника сигнала вблизи $K_{ш\,мин}$ [116]

* При заданных параметрах приемника $K_{ш\,мин}$, Q, $n_{мин}$, p, q (см. табл. 3.1 и 3.2).

Таблица 3.2.

№	Параметр ИП	Зависимость	Формула	Примечание
1	2	3	4	5
1.	Рабочий диапазон частот $f_{ип,\,мин} - f_{ип,\,макс}$ Относительная разрешающая способность по частоте $\psi_f = \frac{\Delta f_{ип}}{f_{ип,\,мин}}$ ($\Delta f_{ип}$ – абсолютная разрешающая способность при одноканальном приеме)	$f_{ип,\,мин} \le f_{у,\,мин}$ $f_{ип,\,макс} \ge f_{у,\,макс}$ $\psi_f = 2\sqrt{\frac{\delta K_{ш\,f_1}}{\beta_{f(K_ш)}\beta_{f(K_у)}}}$	(1") (2") (3")	В соответствии с [13].
2.	Относительная погрешность установки рабочей частоты $f_р$ приемника $\delta f_р$	$\delta f_р \le \frac{\delta K_{ш\,f_3}}{\beta_{f(K_ш)}}$	(4")	То же
3.	Пределы измеряемых отношений шумовых сигна-лов θ	$\theta_{мин} \le \theta \le \theta_{макс}$ $\theta_{мин} = \frac{K_{ш\,мин}}{G}$ $\theta_{макс} = \frac{K_{ш\,макс}}{G}$	(5") (6") (7")	При выбранном значении G. То же
4.	Пределы ОСПМШ шумовых сигналов, поступающих в канал делимого при операциях "измерение", A'	$A'_{мин} \le A' \le A'_{макс}$ $A'_{мин} = K_{ш,\,мин} K_{у,\,мин}$ $A'_{макс} = K_{ш,\,макс} K_{у,\,макс}$	(8") (9") (10")	

Таблица 3.2 (окончание)

1	2	3	4	5
5.	Пределы ОСПМШ шумовых сигналов, поступающих в канал делителя при операциях "измерение" и "калибровка", а также в канал делимого при операции "калибровка", B'	$B'_{мин} \le B' \le B'_{макс}$ $B'_{мин} = GK_{у.мин}$ $B'_{макс} = GK_{у.макс}$	(11") (12") (13")	При выбранном значении G. То же
6.	Погрешность измерений $\delta K_{ш\theta}$ отношений шумовых сигналов $\theta = A'/B'$	$\delta K_{ш\theta} = \sqrt{\delta^2 K_{ш\,ос} + \delta^2 K_{ш\,фл}}$	(14")	
7.	Коэффициент шума СВЧ измерительного приемника $K_{ш\,пр}$	$K_{ш\,пр} \le K_{ш.мин} K_{у.мин} \cdot (Q\delta K_{ш\,фл} - 1)$	(15")	В соответствии с [14]; Здесь $Q \approx \sqrt{\Delta f_{ш}\tau}$ -- модуляционный выигрыш приемника, τ -- постоянная времени
8.	Минимальное отношение сигнал/шум на входе приемника, необходимое для обеспечения работоспособности системы АРУ, $n_{вых}$	Выбирается в характерных пределах: $n_{вых} = 0{,}2 \text{ -- } 1$	(16")	
9.	Входной КСВН приемника, $\sigma_{вп}$	$\sigma_{вп} \le \sigma_н$	(17")	$\sigma_н$ -- допустимый КСВН нагрузки
10.	Коэффициент глубины модуляции измеряемых сигналов, $d_м$	$d_м \ge 1 - \delta K_{ш\,мод}$	(18")	В соответствии с [12]
11.	Допустимая величина паразитной модуляции собственного коэффициента шума ИП, $\Delta K_{ш\,пр}$	$\Delta K_{ш\,пр} \le K_{ш.мин} K_{у.мин} \cdot \delta K_{ш\,вых}$	(19")	
12.	Минимальная постоянная времени приемника, $\tau_{вых}$	$\tau_{вых} \ge Q^2/\Delta f_{пр}$	(20")	
13.	Коэффициент подавления паразитных каналов приема, $Д_{пк}$	При подавлении паразитного сигнала до уровня менее 3 % от основного $Д_{пк} \le \frac{0{,}03 P_с K_{у\,с}}{P_{пс} K_{у\,пс}}$, где $P_с$, $P_{пс}$ – мощность полезного и паразитного сигналов; $K_{у\,с}$ и $K_{у\,пс}$ – усиления СВЧ усилителя на частотах полезного и паразитного сигналов	(21")	Рассматривается лишь при наличии паразитных сигналов $P_{пс}$

узлов и параметрами входящих в них элементов. Выполнение этих требований обеспечивает необходимую точность измерения коэффициента шума при заданных условиях.

Пример:

Необходимо определить требования к ГШСС и ИП измерителя коэффициента шума для следующих условий:

$f_{\text{у мин}} = 1{,}5$ ГГц, $K_{\text{у мин}} = 30$ (15 дБ), $\beta_{f(K_{\text{ш}})} = 1{,}5$,

$f_{\text{у макс}} = 3$ ГГц, $K_{\text{у макс}} = 1000$ (30 дБ), $\beta_{f(K_{\text{у}})} = 6{,}0$,

$K_{\text{ш мин}} = 2$, $\sigma_{\text{вх макс}} = \sigma_{\text{вых макс}} = 2$, $\beta_{K_{\text{ш}}} = 1{,}3$,

$K_{\text{ш макс}} = 100$, $\sigma_{\text{н}} = 3$ (доп. КСВН нагрузки), $\delta K_{\text{ш доп}} = 0{,}1$.

Известно также, что $K_{\text{ш ип}} = 50$, $Q = 100$, $n_{\text{мин}} = 0{,}3$, $p = 10$, $q = 100$ и отношение мощностей полезного и паразитного сигналов на входе

$$\frac{P_{\text{с}} K_{\text{ус}}}{P_{\text{пс}} K_{\text{у пс}}} \approx 12 .$$

Расчет выполнятся в три этапа.

1 этап. *Предварительный анализ погрешностей.*

Допустимое значение погрешности измерений $\delta K_{\text{ш}} \le \delta K_{\text{ш доп}} = 0{,}1$, в соответствии с (3.2), может быть обеспечено при следующих значениях составляющих: $\delta K_{\text{ш}\,G} = 0{,}06$ (типовое значение погрешности градуировки ГШСС); $\delta K_{\text{ш ос}} = 0{,}03$; $\delta K_{\text{ш}\,n_{\text{о}}} = 0{,}02$;

$\delta K_{\text{ш фл}} = \delta K_{\text{ш}\,f_1} = \delta K_{\text{ш}\,f_2} = \delta K_{\text{ш}\,f_3} = \delta K_{\text{ш мод}} = \delta K_{\text{ш пму}} = 0{,}005$;

$K_{\text{ш пмп}} = 0{,}01$. При этом $\delta K_{\text{ш}} = 0{,}08$, т.е. требование (3,5) выполняется.

2 этап. *Определение требований к ГШСС.*

В соответствии с формулами табл. 3.1 находим:

$f_{\text{ГШСС, мин}} \le 1{,}5$ ГГц; $f_{\text{ГШСС, макс}} \ge 3$ ГГц; $G'_{\text{мин}} = 20{,}4$; $G''_{\text{мин}} = 27$.

Следовательно, принимаем $G_{\text{мин}} \ge 27$. Далее находим $G_{\text{макс}} \le 10^3$. Таким образом, $27 < G < 1000$. Примем $G = 60$, что соответствует газоразрядному источнику шума. Далее находим: $\delta G = 0{,}06$; $n_{\text{о}} \approx 1$; $\delta n_{\text{о}} = 0{,}04$; $\beta_{f(G)} \le 1{,}6$; $0 \le |\Gamma_{\text{рег}}| \le 0{,}4$; $\Delta\varphi_{\text{рег}} > \pi$; $\delta\sigma_{\text{вых}} \le 0{,}12$.

3 этап. *Определение требований к ИП.*

В соответствии с формулами табл. 3.2, находим $f_{\text{ип мин}} \le 1{,}5$ ГГц, $f_{\text{ип макс}} = 3$ ГГц; $\psi_f \le 0{,}05$; $\Delta f_{\text{ип}} < \psi_f f_{\text{ип, мин}} = 75$ МГц. Выбираем $\Delta f_{\text{ип}} = 10$ МГц. Далее находим $\Delta f_{\text{р}} \le 0{,}003$; $0{,}03 < \theta < 1{,}6$; $60 < A' < 10^5$; $1800 < B' < 6 \cdot 10^4$; $\delta K_{\text{ш}\theta} \approx 0{,}04$; $K_{\text{ш ип}} \le 240$; $\sigma_{\text{ип}} \le 3$; $d_{\text{М}} \ge 0{,}995$; $\Delta K_{\text{ш ип}} \le 0{,}06$; $\tau_{\text{мин}} \ge 10^{-1}$с. Выбираем $\tau = 1$ с; $Д_{\text{пк}} \le 0{,}4$. Как видно из расчетов, необходимые параметры

ГШСС и ИП получаются практически реальными и могут быть положены в основу конструирования ИКШ.

Расчет рассматривается в Приложении к наиболее распространенной задаче измерения коэффициента шума малой величины на фиксированных частотных точках, но может быть аналогично построен и для других случаев.

Следует отметить, что расчет ИКШ не является решением строго детерминированной задачи. Однако наличие общей схемы подхода к этому вопросу может принести известную пользу.

3.2 ГЕНЕРАТОРЫ ШУМОВОГО СТАНДАРТНОГО СИГНАЛА

Генераторы шумового стандартного сигнала (ГШСС) предназначены для работы в составе ИКШ и в зависимости от частоты, конкретной цели проводимых измерений, заданной точности и др. могут иметь различное устройство.

3.2.1 Структурные схемы ГШСС

В соответствии с [46] ГШСС СВЧ диапазона подразделяются на простые и составные. Простой генератор шума содержит источник шума и согласованную нагрузку. Составной генератор шума может содержать развязывающие элементы, ослабители, устройства согласования и др. [69, с.77].

На рис. 3.3 показаны характерные разновидности построения составных ГШСС.

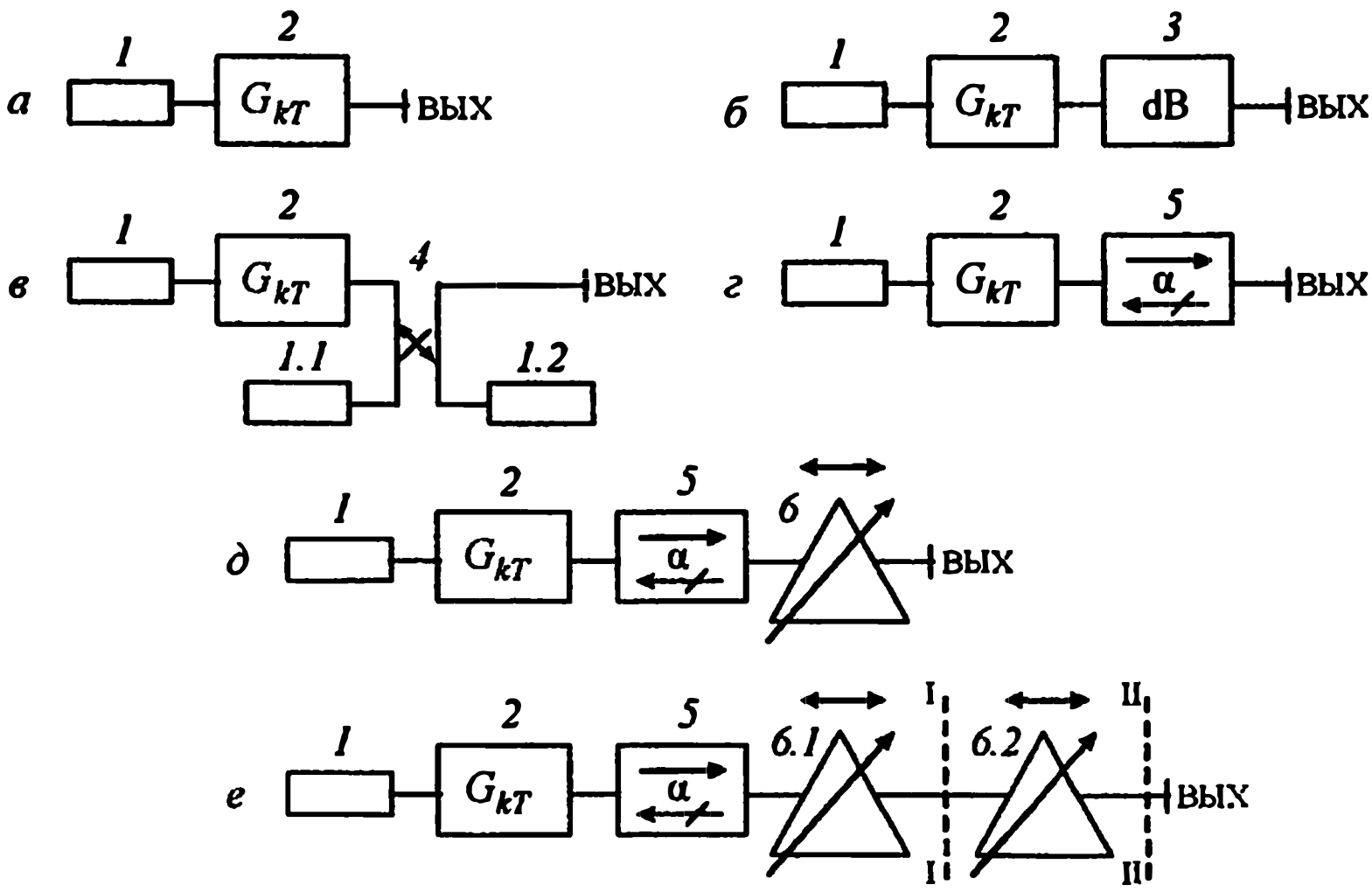


Рис. 3.3. Структурные схемы ГШСС

1 – согласованная нагрузка, *2* – источник шума, *3* – поглощающий ослабитель, *4* – направленный ответвитель, *5* – ферритовый вентиль, *6* – согласующий трансформатор

Источниками шума генераторов шума, используемых в автоматизированных ИКШ, обычно являются газоразрядные лампы, полупроводниковые или вакуумные диоды. В некоторых случаях в качестве источников шума применяются также СВЧ усилители.

На рис. 3.3*а* показан простой ГШ, содержащий источник шума *2* и согласованную нагрузку *1*. Такая структура характерна для волноводных и коаксиальных каналов с газоразрядным источником шума. При выключении лампы согласование генератора в основном обеспечивается за счет нагрузки, подключенной к генератору слева, т.к. наличие негорящей лампы вносит лишь небольшое ослабление. Нагрузка в составе полупроводникового ГШ (ГШП) обычно является встроенной и согласование достигается развязывающими элементами.

На рис. 3.3*б* показан генератор с поглощающим ослабителем *3*.

Ослабитель выполняет три функции:

– улучшает согласование генератора,

– снижает уровень шума ГШСС до необходимой величины,

– уменьшает изменение коэффициента отражения от выхода ГШСС при включении и выключении ГШ.

Последняя функция важна для устранения эффекта "паразитной модуляции" [82], т.е. изменения шума исследуемого приемного устройства в результате изменения коэффициента отражения от ГШСС.

Оптимальной обычно считается ОСПМШ, соизмеримая с измеряемым коэффициентом шума. При таком соотношении меньшие требования предъявляются к линейности амплитудных характеристик ИКШ. Однако, если ИКШ содержит систему АРУ, уровень шума ГШСС должен быть достаточно большим для обеспечения требуемого отношения сигнал/шум на входе, необходимого для устойчивой работы [14].

Кроме того, для возможности градуировки ГШСС с нормированной точностью на стандартной измерительной аппаратуре этот уровень желательно иметь не менее некоторого предела (15–20 kT_0), связанного с флуктуационной ошибкой. Градуировка ГШСС без потери точности при меньших уровнях также возможна, но для этого измерительная установка должна быть дополнена специальными МШУ с целью снижения ее $K_ш$.

В качестве развязывающего устройства, помимо ослабителя, может быть также использован направленный ответвитель (рис. 3.3*в*). При этом выходной КСВН ГШСС определяется главным образом согласованной нагрузкой *1.2*, а выходной уровень шума и развязка – переходным ослаблением ответвителя.

На рис. 3.3*г* показан ГШСС с использованием в качестве элемента развязки ферритового вентиля *5*. Применение вентиля с малыми прямыми поте-

рями обеспечивает необходимые развязку и согласование и, кроме того, позволяет практически сохранить уровень СПМШ ГШ, что в ряде случаев является необходимым.

ГШСС, собранные по схемам рис. 3.3*д*, *е*, имеют регулируемый выходной импеданс, что достигается введением в их состав согласующих трансформаторов (СТ) *б* с независимой регулировкой модуля и фазы коэффициента отражения.

С помощью согласующего трансформатора *6.1* в схеме рис. 3.3*е* может быть достигнута передача максимальной мощности шума из ГШСС в последующее устройство.

Схема рис. 3.3*е* [117] позволяет не только регулировать, но и устанавливать необходимый выходной коэффициент отражения ГШСС. С этой целью вначале с помощью СТ *6.1* в сечении I–I устанавливается импеданс, равный волновому сопротивлению линий передачи (например, по заранее снятым градуировочным кривым), затем рассогласующий элемент СТ *6.2* устанавливается по глубине в положение, соответствующее заданному модулю коэффициента отражения (или КСВН). Может быть, например, реализована система, когда ГШСС имеет фиксированный по модулю выходной коэффициент отражения с регулировкой его фазы в пределах 360 градусов.

Каковы области использования различных ГШСС при измерении коэффициента шума?

Структурные схемы рис. 3.3*а*, *б*, *в*, *г* используются при измерении характеристического коэффициента шума $K_{ш\rho}$, когда необходимо согласование источника на волновое сопротивление. Измерения тем точнее, чем меньше коэффициент отражения от выхода ГШСС.

В этом отношении простой генератор (рис. 3.3*а*), в котором не приняты специальные меры по улучшению согласования и его неизменности при выключении источника, не рекомендуется использовать при необходимости измерять $K_ш$ с высокой точностью (возможна погрешность 1 дБ и более).

Генераторы, собранные по схемам рис. 3.3*б*, *в*, *г*, обычно имеют хорошие развязку и согласование (КСВН меньше 1,1–1,15) в широкой полосе частот и могут быть рекомендованы при измерении $K_{ш\rho}$.

Как уже указывалось, коэффициент шума $K_{ш\rho}$ (и соответственно ГШСС по структурным схемам рис. 3.3*б*, *в*, *г*) рационально использовать при контроле приемных устройств, одновременно работающих в широкой полосе частот (интегральный $K_ш$), многоканальных устройств и в панорамных измерителях.

Структурные схемы рис. 3.3*д*, *е* с согласующими трансформаторами используются при измерении $K_{ш*}$, $K_{ш\,мин}$, $K_{ш|\Pi}$, $K_{шz}$ и систем шумовых пара-

метров [116]. Так как согласование осуществляется в сравнительно узкой полосе частот, то измерения при этом проводятся на фиксированных частотных точках (дифференциальный $K_{ш}$).

Генератор шума по схеме рис. 3.3*д* может быть использован при измерении минимального ($K_{ш\ мин}$) и номинального ($K_{ш*}$) коэффициентов шума, при определении которых необходима возможность регулировки выходного коэффициента отражения ГШСС, но нет надобности знать величины его модуля ($|\Gamma|$) и фазы (ψ) после проведения настройки.

Этот генератор может быть применен также при прецизионных измерениях характеристического $K_{шр}$, при этом выходное сопротивление генератора с помощью СТ *1* должно быть сделано точно равным волновому. Контроль за настройкой выходного сопротивления проводится с помощью измерителя импедансов.

Схема рис. 3.3*г*, как уже указывалось, позволяет не только регулировать выходной коэффициент отражения, но и устанавливать его необходимое значение. Поэтому этот генератор используется при измерении коэффициентов шума при заданном комплексном коэффициенте отражения от источника ($K_{шz}$) и максимального коэффициента шума при выборе неблагоприятной фазы коэффициента отражения и заданном его модуле ($|\Gamma|$).

Генератор шума по схеме рис. 3.3*г* применяется также при измерении системы шумовых параметров усилителя (подраздел 1.8).

Предельно возможные значения вводимого рассогласования определяются характеристиками согласующих трансформаторов *6* (рис. 3.3*д*, *е*). Требования к рассогласованию зависят от входного коэффициента отражения приемного устройства, к которому присоединяется ГШСС.

При больших рассогласованиях (КСВН > 2) возможно появление в согласующем трансформаторе заметных активных потерь, которые к тому же могут изменяться при перестройках ("вариация потерь") и искажать действительную картину динамики согласования. В связи с этим вариация потерь нормируется (обычно – не более 0,15 дБ) и контролируется.

Таким образом, согласующие трансформаторы должны иметь конструкцию, позволяющую проводить раздельную регулировку модуля и фазы коэффициента отражения с отсчетом положения органов регулировки и обладать малыми собственными потерями.

В [45] приведены результаты работы по созданию согласующих устройств для ИКШ серии Х5 [79], удовлетворяющих указанным требованиям. В [9] описан согласующий трансформатор с особо малыми потерями в виде металлического шарика в волноводе, управляемого магнитом.

В [133] для уменьшения потерь в штыревых трансформаторах предложена секционированная конструкция рассогласующего элемента. Это дало воз-

можность снизить потери во всех волноводных трансформаторах сантиметрового диапазона длин волн.

В Приложении 3 приведены технические данные согласующих трансформаторов в волноводных и коаксиальном трактах, разработанных на предприятии [87] для диапазона от 1 до 17,85 ГГц.

Любой ГШСС перед использованием в ИКШ должен быть отградуирован по уровню выходной СПМШ на специальных установках путем сравнения с вторичной рабочей мерой СПМШ. Градуировка проводится по располагаемой мощности, т.е. по максимальной мощности, которую может отдать генератор при комплексно-сопряженном его согласовании с входом измерительной установки. При этом предполагается, что устройства для согласования входят в состав соответствующей измерительной установки. Обычно такая градуировка в сантиметровом диапазоне выполняется с погрешностью не выше ±(0,25–0,4) дБ.

ГШСС должен также удовлетворять требованиям, перечисленным в подразделе 3.1.1, по уровню СПМШ во включенном и выключенном состояниях, заданным пределам регулировки коэффициента отражения, предельному изменению коэффициента отражения при включении, частотой изрезанности и рабочему диапазону частот.

Учитывая, что параметры ГШСС должны долговременно сохраняться в период эксплуатации и при воздействии изменения внешних условий, необходимо уделять большое внимание надежности его конструкции и стабильному питанию.

В Приложении 1 приведен перечень разработанных на предприятии [87] конструкций ГШСС в различных каналах для диапазона 1–17,85 ГГц, которые могут быть использованы при проектировании ИКШ.

3.2.2. Виды источников шума

К первичным СВЧ источникам шума, входящим в состав ГШСС, предъявляется ряд требований, связанных с обеспечением необходимой точности измерений и удобством их использования. К числу таких требований следует отнести [16]:

– долговременную стабильность СПМШ,

– равномерность СПМШ в широком диапазоне частот и хорошее согласование с линией передачи,

– уровень СПМШ, соизмеримый с шумом усилителей (единицы–десятки kT_0).

Желательно иметь также малую зависимость СПМШ от режима питания и окружающих условий, возможность работы в режиме модуляции, малый разброс параметров различных экземпляров первичных источников шума.

В составе ГШСС СВЧ диапазона применяются главным образом следующие типы источников:
– газоразрядные,
– полупроводниковые,
– диодные вакуумные,
– температурные (тепловые и охлаждаемые),
– источники шума на основе усилителей.

Кратко рассмотрим основные свойства этих источников.

3.2.2.1 Газоразрядные генераторы шума

В газоразрядных генераторах причиной шумового излучения является главным образом хаотическое движение электронов в положительном столбе плазмы газового разряда, характеризуемое электронной температурой разряда T_e.

Волноводный шумовой генератор [154, 155, 191] представляет собой разрядную трубку, расположенную в волноводе *1* под малым утлом (5–10°) к его оси (рис. 3.4).

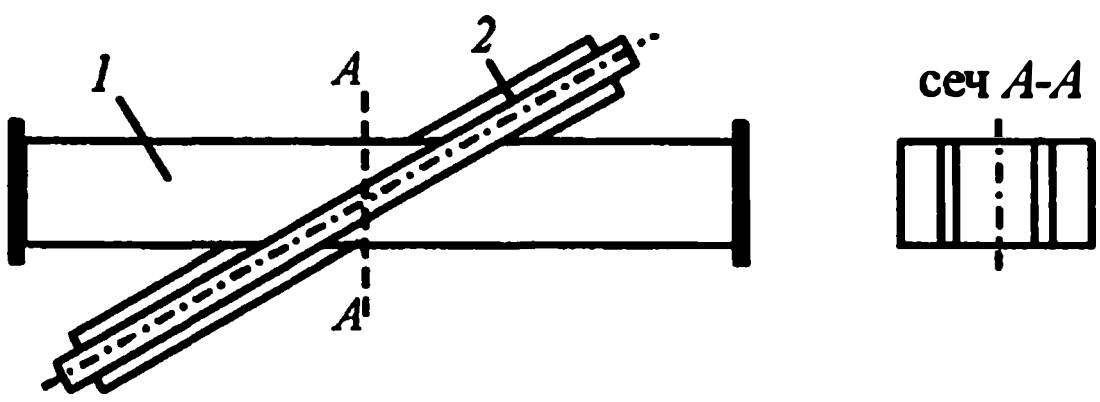


Рис. 3.4. Схема волноводного газоразрядного генератора шума
1 – волновод, *2* – стеклянная трубка с газовым разрядом

ГШ в коаксиальном канале обычно выполняется в виде спиральной линии, внутри которой размещается разрядная трубка. Имеются конструкции, где трубка расположена на близком расстоянии параллельно центральному проводнику коаксиала. Известны также ГШ на основе симметричной полосковой линии [166]. В любом случае должна быть обеспечена хорошая электродинамическая связь СВЧ поля с газовым разрядом.

Электронная температура положительного столба может быть найдена из соотношения [97]:

$$\frac{\exp\left(-\frac{eV_j}{kT_e}\right)}{\sqrt{\frac{eV_j}{kT_e}}} = 1{,}2\cdot 10^7 \left(C_0 P_0 R_{\text{тр}}\right)^2, \qquad (3.6)$$

где: e – заряд электрона ($1{,}6\cdot10^{-19}$ К или $4{,}8\cdot10^{-10}$ ед. CGSE)
V_j – потенциал ионизации газа (21,5 В для Ne; 15,7 В для Ar)
k – постоянная Больцмана ($1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К),
P_0 – давление газа, мм рт.ст.,
C_0 – константа, характеризующая газ ($5{,}9\cdot10^{-3}$ для Ne; $5{,}3\cdot10^{-2}$ В для Ar)
$R_{тр}$ – радиус разрядной трубки, см.

На рис. 3.5. показана зависимость приведенной к потенциалу ионизации электронной температуры от произведения $C_0P_0R_{тр}$, построенная в соответствии с (3.6). Эта зависимость учитывается при разработке шумовых газоразрядных трубок. Обычно выбирается область характеристики со сравнительно небольшой крутизной, т.к. при этом меньше сказывается технологический разброс по давлению и диаметру трубки на величину электронной температуры.

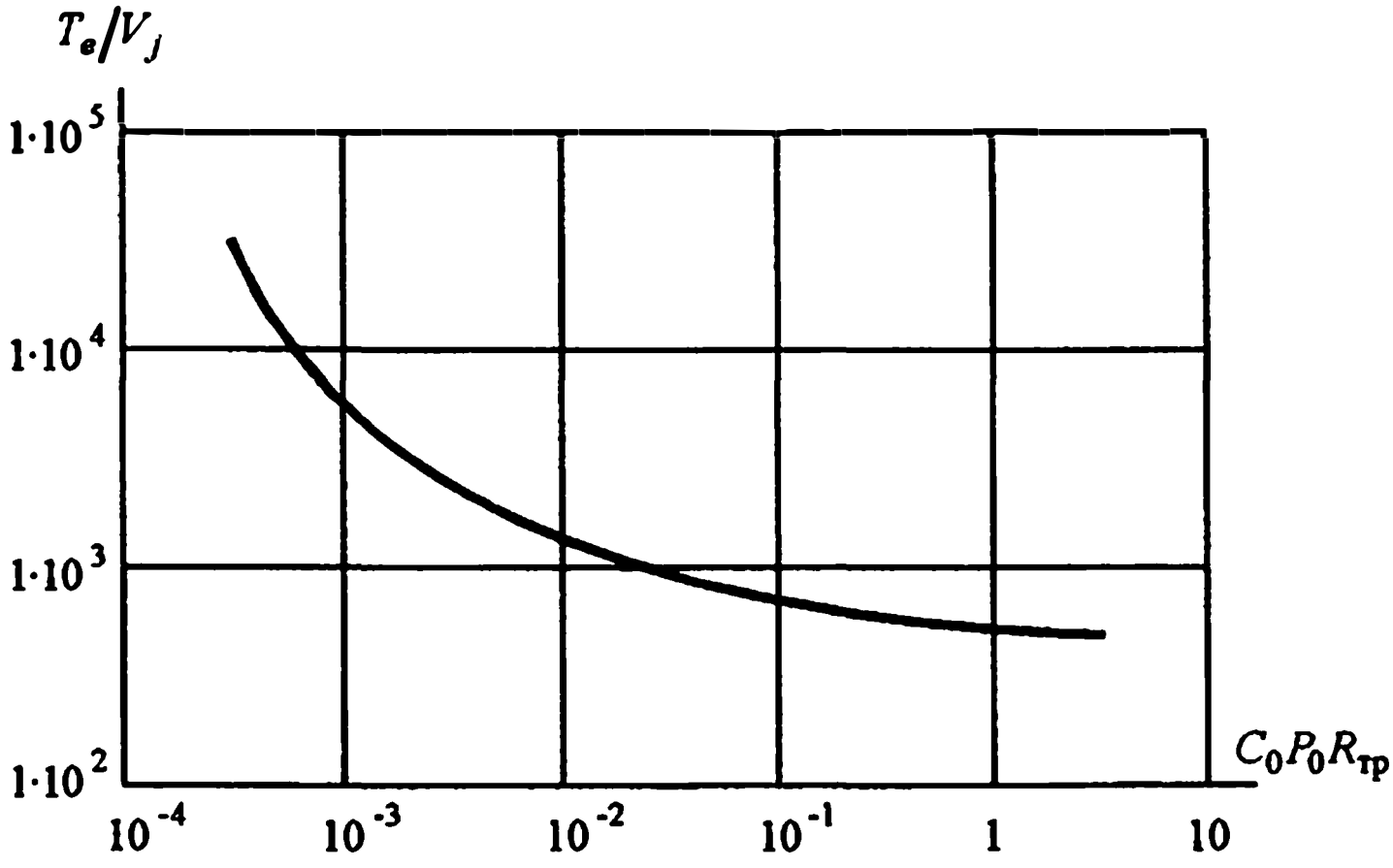


Рис. 3.5. Зависимость приведенной к потенциалу ионизации электронной температуры от произведения $C_0P_0R_{тр}$

В большинстве случаев в качестве газов выбираются неон или аргон [166, 191] при давлениях, составляющих единицы или десятки мм рт.ст.

В плазме газового разряда обычно наблюдаются низкочастотные так называемые "анодные" колебания, которые вызывают некоторую модуляцию коэффициента отражения от генератора шума и шумовой мощности. Это имеет значение при использовании ГШ для испытания приемных устройств с малыми промежуточными частотами (единицы–сотни кГц). При аргоновом наполнении эти колебания выражены значительно меньше, чем при неоновом. Однако при выборе разрядной трубки следует учитывать, что аргоновые генераторы требуют заметно большего напряжения для поджига и обеспечива-

ют примерно вдвое меньшую СПМШ (порядка 30 kT_0) по сравнению с неоновыми (60 kT_0).

Относительная избыточная СПМШ на выходе генератора при работе на согласованную нагрузку ($Z_н = ρ$) может быть приближенно представлена как

$$G = \left[\frac{T_e}{T_0}\left(1-\frac{1}{N_p}\right)-1\right] d_{ст} d_{вых}\left(1-\left|\Gamma_г\right|^2\right), \qquad (3.7)$$

где T_c – электронная температура газового разряда,

$T_0 = 293$ К,

$N_р$ – затухание, связанное с наличием разряда (определяющее связь разряда с полем),

$d_{ст}$ и $d_{вых}$ – коэффициенты передачи соответственно стекла трубки лампы и участка волновода от лампы до выхода генераторной секции,

$\Gamma_г$ – коэффициент отражения от выхода генераторной секции.

Как видно из (3.7), существенное влияние на СПМШ может оказывать затухание в разряде $N_р$, которое зависит от режима лампы. Если величина этого затухания мала, например, $N_р < 10$, то СПМШ заметно падает. Кроме того, при малых $N_р$ появляется критичность СПМШ к режиму лампы за счет поправочного члена в формуле (3.7). При больших значениях $N_р$ этой критичности нет, т.к. поправочный член $1/N_р$ сам по себе становится очень малым. Оценки показывают, что как допустимые в этом смысле можно принять значения $N_р \geq 5$ (или 7 дБ). Обычно стараются сделать $N_р \geq 100$ (или 20 дБ).

Результаты исследований, проведенных в Советском Союзе [16, 121 – 123] с газоразрядными лампами типа ГШ-2, ГШ-5, ГШ-6, ГШ-10, ГШ-11, говорят о большой идентичности различных экземпляров (разброс по СПМШ в основном не превышает ± 1 %) и сохраняемости уровня СПМШ в течение нескольких лет.

Газоразрядные лампы обладают малой зависимостью СПМШ от частоты (крутизна порядка 1–2 %/ГГц) и от анодного тока (крутизна порядка нескольких десятых долей процента на миллиампер, ошибка на 2 % в установке анодного тока через лампу приводит к неповторяемости в СПМШ не более ± 0,3 %).

Малая частотная зависимость СПМШ газоразрядных генераторов удобна для их использования в панорамных ИКШ.

В [16] показано, что при исследовании лампы ГШ-11 повторная установка лампы в высокочастотный патрон приводила к изменению СПМШ генератора не более, чем на ± 0,5 %. Для повышения стабильности СПМШ после первого включения рекомендуется генератор шума прогреть в течение 20–30

минут. В течение этого времени СПМШ уменьшается на 2–3 %, принимая в дальнейшем стабильное значение.

Аналогичные результаты по малому разбросу СПМШ получены зарубежными исследователями для ламп с аргоновым наполнением [176].

Газоразрядные лампы обладают сравнительно малой инерционностью при включении и выключении (доли и единицы мс), однако это следует учитывать при использовании их в ИКШ в режиме модуляции [123, 139, 169].

В [16] описан один из ГШСС, разработанный на основе газоразрядной лампы ГШ-11 в диапазоне 1,5–3,0 ГГц, обладающий собственной нестабильностью по выходной СПМШ не более ± 0,1 дБ. Погрешность градуировки по абсолютному уровню СПМШ такого ГШСС не превышает ± 0,26 дБ.

В [118] приведены данные о газоразрядных генераторах шума, выпускаемых зарубежными фирмами.

Сведения о газоразрядных генераторах и шумовых трубках, разработанных на предприятии [87], имеются в Приложении 1.

3.3.2.2 Полупроводниковые генераторы шума

Полупроводниковые генераторы шума (ГШП) на ЛПД (ГШЛПД), в которых для генерации шума используется эффект лавинного пробоя [33], нашли широкое применение во встроенных системах для оперативной оценки чувствительности радиотехнических систем благодаря высокому уровню выходной мощности (СПМШ порядка 30 дБ/kT_0'), простоте, малогабаритности, малому энергопотреблению и быстродействию (ед. мкс) [19, 190]. Известна, например, серия ГШП "Орленок" на диапазон 0,5–17,85 ГГц, разработанная на предприятии [87]. ГШП без развязки работают в режиме резкого рассогласования с нагрузкой [103], вследствие чего точная непосредственная градуировка таких генераторов затруднена. Поэтому ГШП включают в измерительный тракт через ответвитель, вентиль или аттенюатор.

Для успешного использования генератора шума в ИКШ, как указывалось, необходимо их хорошее согласование, уровень, соизмеримый с шумом исследуемого приемного устройства, и высокая стабильность. Для достижения этого проведена разработка специальных метрологических ГШП в коаксиальном канале с повышенной стабильностью серии "Оленек" (литеры М41-307, М41-308, М41-310, М41-311).

Подробные исследования метрологических свойств подобных ГШП [19] позволили прийти к следующим выводам.

– Кремниевые шумовые ЛПД p^+-n-структуры обладают высокой стабильностью СПМШ во времени, соизмеримой со стабильностью газоразрядных ГШ. При испытаниях в течение 2–6 месяцев нестабильность была не более ± 0,1 дБ.

– Зависимость СПМШ от температуры носит монотонный характер, крутизна в диапазоне температур 15–35 °С составляет 0,16–0,17 %/град.
– Крутизна зависимости СПМШ от тока (вблизи оптимального значения тока) составляет 0,6–0,9 % на 1 % изменения тока. Для поддержания стабильного уровня СПМШ ток через ГШЛПД должен поддерживаться с точностью 0,5–1 %.
– Частотные зависимости ОСПМШ исследованных образцов ГШП обладают заметной неравномерностью, доходящей в двадцатипроцентном диапазоне частот до 0,6 дБ.

Таким образом, генераторы шума на основе ЛПД обладают высокими техническими характеристиками. В Приложении 1 указаны параметры, гарантируемые при выпуске ГШ, предназначенных для использования в ИКШ, в диапазоне 0,01–17.85 ГГц.

Известны также разработки генераторов шума на полупроводниковых диодах других типов [88, 109, 155].

Работы по совершенствованию параметров ГШП, в частности, по улучшению частотных характеристик СПМШ, продолжаются.

В [182] описан полупроводниковый генератор шума HP346B, работающий в широком диапазоне от 10 МГц до 26,5 ГГц и имеющий КСВН < 1,35, неравномерность частотной характеристики СПМШ в этом диапазона 3 ДБ (изменение от 14 до 17 дБ)

В [195] приведены параметры генератора HPR-347B (диапазон частот от 26,5 до 40 ГГц, КСВН < 1,42, ОСПМШ от 10 до 13 дБ), а также генератора Q-347B (диапазон частот от 33 до 50 ГГц, КСВН < 1,52, ОСПМШ от 6 до 13 дБ).

Высокая стабильность и преимущества перед газоразрядными ГШ по габаритам, массе и энергопотреблению способствуют все более широкому распространению полупроводниковых ГШ при использовании их в составе ИКШ [118].

. *3.2.2.3 Диодные вакуумные источники шума*

В вакуумных шумовых диодах используется генерация шума за счет дробового эффекта на катоде. Для диода, работающего в режиме насыщения, средний квадрат шумового тока, в соответствии с формулой Шотки [50], равен:

$$\overline{I_{ш}^2} = 2eI\Delta f\,, \qquad (3.8)$$

где e – заряд электрона,
I – постоянный анодный ток через диод,
Δf – эквивалентная полоса частот приемного устройства.

Если диод работает в режиме ограничения пространственным объемным зарядом, флуктуации шумового тока уменьшаются и средний квадрат шумового тока при этом

$$\overline{I^2_{\text{ш пр}}} = \overline{I^2_{\text{ш}}} K^2_{\text{деп}}, \qquad (3.9)$$

где $K^2_{\text{деп}} \leq 1$ – коэффициент подавления (депрессии) дробового шума.

Для диодных генераторов выбирается режим насыщения диода.

Эквивалентная схема диодного шумового генератора [95] показана на рис. 3.6.

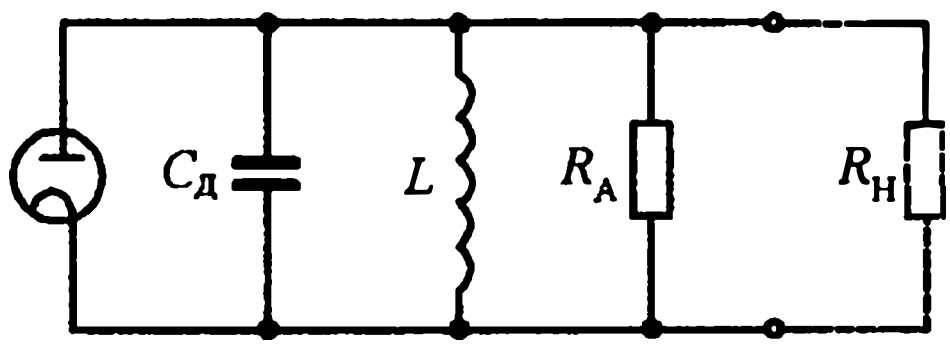


Рис. 3.6. Эквивалентная схема шумового диодного генератора

$C_д$ – собственная емкость диода и схемы,

L – компенсирующая индуктивность для нейтрализации емкости,

R_A – анодное сопротивление,

R_H – сопротивление нагрузки.

Шумовая мощность, выделяемая на согласованном сопротивлении нагрузки $R_H = R_A$, связана с дробовыми шумами:

$$\boxed{P_{\text{ш}} = \frac{1}{4}\overline{I^2_{\text{ш}}} R_A = \frac{1}{2} eI\Delta f R_A .} \qquad (3.10)$$

Как видно, имеет место удобная линейная зависимость шумовой мощности от величины анодного тока, что и используется практически в диодных генераторах для регулировки выходной мощности. Анодный ток регулируется путем изменения напряжения накала прямонакального катода. Для достижения стабильности выбранной выходной мощности (постоянства анодного тока) напряжение накала должно быть хорошо стабилизировано.

Формула (3.10) позволяет на низких частотах (до 100 МГц) достаточно точно рассчитывать абсолютную величину шумовой мощности генератора. На более высоких частотах проявляется влияние индуктивности выводов и собственной емкости диода, а также инерционности электронов. При этом шумовая мощность рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{ш, вч}} = P_{\text{ш, нч}} K_{\text{попр}}, \qquad (3.11)$$

где $P_{ш,\ нч}$ – мощность, найденная по формуле (3.10),
$K_{попр}$ – поправочный коэффициент:

$$K_{попр} = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2\right]^2}, \qquad (3.12)$$

λ_0 – собственная резонансная длина волны шумового диода,
λ – длина волны, на которой производится измерение.

Значение λ_0 во многом определяется конструкцией генератора шума и экземпляром диода, поэтому точность расчетного значения мощности по формуле (3.11) снижается, и на высоких частотах диодный генератор шума практически требует калибровки.

Для коаксиальных каналов разработаны конструкции шумовых генераторов на основе диода 2Д2С [8, 84], имеющего малые междуэлектродные емкости и индуктивности выводов, а также торированный вольфрамовый катод, хорошо обеспечивающий режим насыщения.

В таблице 3.3 (поз. 1–3) приведены некоторые характеристики этих генераторов. Здесь же (поз. 4) приведены характеристики коаксиального генератора 343А HP.

Как видно, упомянутые коаксиальные генераторы предназначаются главным образом для диапазона промежуточных частот. Они могут быть применены в ИКШ СВЧ диапазона, например, в качестве опорного ГШ при измере-

Таблица 3.3

№	Тип генератора	Диапазон частот (длин волн)	Канал, волновое сопротивление	СПМШ, kT_0	КСВН	Источник информации
1.	Г2-32	1–600 МГц	16/4,6 мм 75 Ом	0–50	1,3	[137]
2.	Генератор шума ЦЮ1.400.128	1–600 МГц	16/6,95 50 Ом	0,5–40	1,1	–
3.	Генератор шума Я 8Х-280	2–600 МГц	7/3,04 мм 50 Ом	5–20	1,1	[56]
4.	HP343A	10–600 МГц	50 Ом	3,3–4,6 (5,2–6,6 дБ)	1,2–1,3	[118]
5.	2Д7С	8,8–12 см	волновод сеч. 72×34 мм	50	1,4	[8, 84]

нии коэффициента передачи смесителей (подраздел 2.9) и для контроля чувствительности ИКШ по входу промежуточной частоты. Эти генераторы обладают высокой стабильностью; известно их применение в составе группового эталона СПМШ ВНИИФТРИ [61] и в зарубежных шумовых стандартах [118].

Заметим что в табл. 3.3 указывается избыточная СПМШ диодных генераторов, которая не включает СПМШ за счет теплового излучения его входного сопротивления.

В [84] приведены параметры, а в [8] описаны некоторые свойства диодного вакуумного генератора шума на лампе 2Д7С (таблица 3.3, поз. 5). Генератор предназначен для работы в диапазоне длин волн от 8,8 до 12 см. Он выполнен в волноводном канале сечением 72×34 мм и представляет собой диод, возбуждающий излучатель в виде резонансной щели в поперечном сечении волновода. Для каждой рабочей частоты необходимая длина щели подбирается замыкателями. Генератор предназначается для измерителей коэффициента шума малошумящих СВЧ усилителей соответствующего диапазона длин волн.

3.2.2.4 Температурные источники шума

Температурный источник шума на СВЧ представляет собой согласованную с линией передачи нагрузку, находящуюся при известной температуре $T_{\text{сн}}$. В зависимости от значения температуры источники можно разделить на:
– тепловые источники шума, когда

$$T_{\text{сн}} > T_{\text{к}}, \tag{3.13}$$

где $T_{\text{к}}$ – комнатная температура (или температура окружающей среды),
– охлаждаемые (криогенные) источники шума – при

$$T_{\text{сн}} < T_{\text{к}} . \tag{3.14}$$

СПМШ излучения в согласованной с шумовым источником нагрузке при выполнении (1.27), в соответствии с формулой Рэлея-Джинса, составляет:

$$\boxed{p_{\text{ш}} = kT_{\text{сн}}.} \tag{3.15}$$

При измерениях обычно используется разность между полной СПМШ шумового температурного источника и СПМШ второго согласованного источника, находящегося при температуре окружающей среды. Эта разность называется избыточной СПМШ и выражается формулой:

$$\boxed{p_{\text{ш, изб}} = k(T_{\text{сн}} - T_{\text{к}}).} \tag{3.16}$$

В большинстве случаев $T_к = T_0$, и тогда избыточная СПМШ

$$p_{ш,\,изб} = k(T_{сн} - T_0). \qquad (3.17)$$

Как видно, при

$$T_{сн} < T_0 \qquad (3.18)$$

избыточная СПМШ получается отрицательной, что, однако, имеет чисто условный характер.

Отличительной положительной особенностью температурного источника является возможность расчета его СПМШ по измеренным физическим температурам используемых излучателей, т.е. возможна довольно точная косвенная градуировка такого излучателя. В этом отношении он имеет преимущество перед газоразрядными и полупроводниковыми ГШ, для которых расчет СПМШ может быть сделан лишь приближенно.

К недостаткам температурных источников с точки зрения их непосредственного использования в ИКШ, можно отнести:

– малый уровень СПМШ, что ограничивается допустимой температурой нагрева,

– невозможность модуляции их по питанию, что необходимо для автоматизированных ИКШ.

Указанные особенности определяют основные области использования температурных источников:

– эталонирование уровня СПМШ, где важна возможность точного косвенного расчета СПМШ,

– контрольные измерения коэффициента шума неавтоматическими методами,

– измерение шумовых температур приемных устройств,

– калибровка радиоастрономической и другой высокочувствительной аппаратуры.

Рассмотрим некоторые примеры конструкций и использования. На основании работ [41, 142, 163 и др.] созданы первичный эталон и система поверки средств измерения СПМШ в диапазоне 0,002–178,3 ГГц [61, 124].

Первичный эталон содержит в своем составе тепловые и криогенные излучатели различных диапазонов частот.

При контрольных измерениях коэффициента шума непосредственное использование температурного излучателя позволяет получить результаты с более высокой точностью. Так как при этом приходится иметь дело с сигналами очень малого уровня (СПМШ порядка единиц kT_0), при этих измерениях приходится использовать отсчетную аппаратуру повышенной чувствительности типа модуляционных радиометров и применять метод усреднения. В

[132 и др.] описаны первые применения теплового излучателя для непосредственного измерения коэффициента шума ЛБВ. Подобные измерения проводятся неавтоматизированными методами (метод *n*-кратного превышения, метод постоянного уровня и др.), где не требуется модуляция шумового источника по питанию.

При измерении шумовых температур усилителей используются охлаждаемые температурные излучатели, т.к. это дает повышение точности [26]. В работах [38, 51, 130, 163, 171] описаны некоторые криогенные генераторы в волноводных и коаксиальных каналах, разработанные в Советском Союзе, в [118] приведены данные о зарубежных разработках. Погрешность определения выходного уровня шума таких генераторов обычно ± (0,5–2) %.

В связи с развитием микрополосковой СВЧ техники появились тепловые генераторы *миниатюрной конструкции* с повышенной экономичностью. В [53] описан сравнительно малоинерционный СВЧ генератор для дм и см диапазонов длин волн с излучателем, расположенным на поликоровой подложке, выходным уровнем, регулируемым в пределах 20–300 К и со встроенным термодатчиком.

Тепловой генератор шума с коаксиальным выходом на основе микрополосковой линии описан в [164]. В диапазоне рабочих частот 2–4 ГГц уровень его избыточной температуры шума может изменяться в пределах 0–90 К при частотной неравномерности ± 2 К, коэффициент стоячей волны не более 1,2. Генератор может использоваться для контрольных измерений коэффициента шума и для калибровки приемных устройств по чувствительности. Экономичный генератор разработан В.А.Пузановым.

Следует упомянуть также о температурных генераторах *антенного типа* [89, 114, 170, 200]. Такой генератор представляет собой антенну, диаграмма направленности которой перекрывается в поперечной плоскости распределенным согласованным поглотителем, находящимся при известной температуре. Излучение, принятое такой антенной от поглотителя и переданное в СВЧ линию передачи, может быть рассчитано и использовано как выходной сигнал генератора.

Одно из первых применений подобного излучателя известно в радиоастрономии. В [114] описан способ калибровки антенны радиометра по так называемому "черному" диску, который представляет собой плоский излучатель в пространстве, электродинамически связанный с антенной.

Криогенный антенный излучатель 3-х миллиметрового диапазона [170], используемый для калибровки чувствительности радиометрических модулей, представляет собой рупорную антенну *3* (рис. 3.7), которая передвигаясь из положения *А* в положение *Б*, поочередно принимает излучение от поглотителей, расположенных в кювете *1*. Один из поглотителей *2* находится при комнат-

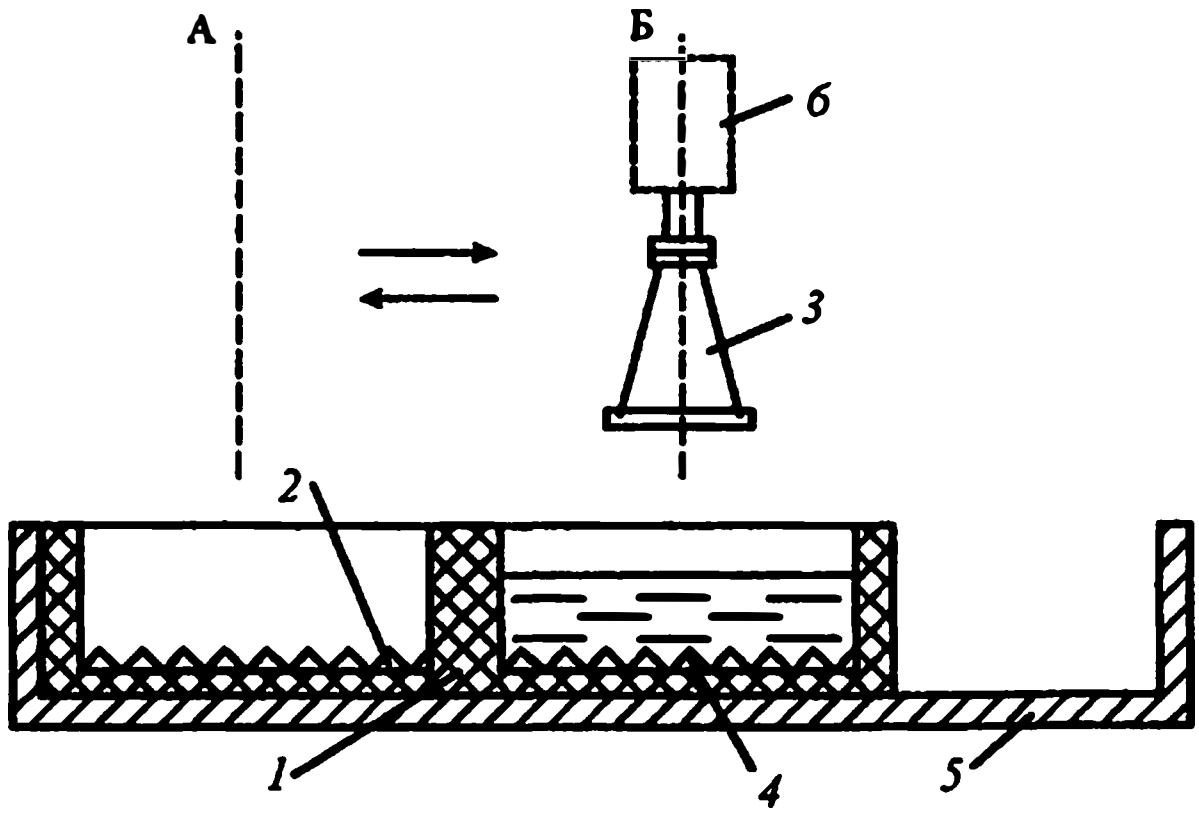


Рис. 3.7. Схема криогенного антенного излучателя

1 – кювета, *2* – тепловой излучатель при температуре T_0 , *3* – рупорная антенна, *4* – тепловой излучатель при температуре 77 К, *5* – подставка, *6* – исследуемое приемное устройство

ной температуре, а второй *4* – при температуре кипения жидкого азота (77 К). Калибровочный сигнал определяется разностью излучений из кювет.

Аттестация излучателя по уровню шумов проводится косвенным методом по измерению затухания и КСВН антенны, что является достоинством излучателя данного типа.

Расчетная погрешность в определении калибровочного сигнала составляет ± (0,4–0,6) дБ.

3.2.2.5 Источники шума на основе усилителей

Источник шума на основе усилителя (рис. 3.8) представляет собой совокупность СВЧ усилителя соответствующего диапазона и подключенной к его входу согласованной нагрузки. Шумовая мощность снимается с выхода усилителя. Она определяется шумами самого усилителя и усиленными шумами входной нагрузки. За счет увеличения усиления уровень шума генератора может быть сделан высоким, поэтому возможно использование такого генератора во встроенных системах контроля чувствительности приемных устройств.

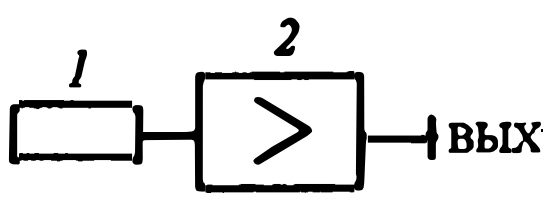


Рис. 3.8. Структурная схема источника шума на основе усилителя

1 – согласованная нагрузка, *2* – СВЧ усилитель

Современные широкополосные малошумящие твердотельные усилители позволяют реализовать подобные генераторы шума на частотах до 10 ГГц с временно́й нестабильностью по шумовой температуре меньше 0,6 К/ч [85]. Равномерность СПМШ и широкодиапазонность генератора определяются в основном амплитудно-частотной характеристикой усилителя. Для улучшения согласования на выходе иногда ставится ослабитель [120]. В [120] описан генератор шума для диапазона 5–1200 МГц, выполненный на транзисторах КТ3115А. СПМШ на выходе генератора – порядка 5000 kT_0 при неравномерности не более ±1 дБ, КСВН ≤ 1,2.

На основании изложенного в подразделе 3.2 можно сделать следующие **в ы в о д ы**.

1. Наиболее распространенными источниками шума, применяемыми в настоящее время в ИКШ СВЧ диапазона, являются газоразрядные и полупроводниковые (ГШЛПД). Используются также диодные, температурные и источники шума на основе усилителей.

2. Газоразрядные ГШ обладают высокой стабильностью, хорошей равномерностью СПМШ в широком диапазоне частот и применяются как при измерении $K_ш$ на отдельных частотных точках, так и в панорамных ИКШ.

3. Полупроводниковые ГШ обладают повышенной шумовой мощностью и высоким быстродействием, поэтому используются как в ИКШ, так и в устройствах встроенного контроля чувствительности приемных устройств, где их сигнал вводится через направленный ответвитель. Они малогабаритны и экономичны.

4. В качестве эталонных источников шума используются температурные источники (нагреваемые и охлаждаемые), уровень СПМШ которых может быть найден расчетным путем.

5. Устройство ГШСС должно выбираться в зависимости от конкретной цели его использования. Существуют две основные разновидности ГШСС:

– с неизменным выходным сопротивлением, равным волновому сопротивлению линии передачи; используются при широкополосных измерениях;

– с выходным сопротивлением, регулируемым согласующими устройствами; используются при измерениях на отдельных частотных точках.

В обоих случаях выходное сопротивление генератора должно оставаться неизменным при включении и выключении шумового источника.

Конструктивное выполнение ГШСС должно обеспечивать стабильность его электрических параметров.

6. Существующая система поверки обеспечивает в зависимости от конструкции генератора шума и диапазона частот погрешность его градуировки по СПМШ в пределах ± (0,25–0,4) дБ.

7. В Приложении 1 приводятся сведения о простых и составных генераторах шума (ГШСС) различной конструкции, разработанных на предприятии [87] и в других организациях. Приводятся данные о газоразрядных и полупроводниковых генераторах в волноводных и коаксиальных каналах для всего сантиметрового диапазона длин волн. Они могут быть использованы при проектировании ИКШ.

3.3 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИЕМНИКИ

Можно сказать, что измерительный приемник, входящий в состав ИКШ, представляет собой радиометр [73], работающий по специальной программе. Он должен обеспечить необходимую чувствительность, частотный диапазон и разрешающую способность по частоте, модуляцию поступающих шумовых сигналов, возможность точного измерения отношений сигналов. Полезной для настройки исследуемого устройства на минимальный шум является система автоматической регулировки усиления. Если приемник содержит в своем составе генератор шума, работающий на его входной частоте, то это дает дополнительную возможность также измерять коэффициент усиления исследуемого устройства.

3.3.1 Структурные схемы приемников

Современные измерители коэффициента шума в большинстве случаев строятся на основе использования супергетеродинного метода приема [118]. Варианты построения преобразователя приведены в [69, с.78] и [4].

Известно также использование в ИКШ СВЧ приемников прямого усиления [22], о которых подробнее будет сказано в последующем.

Характерное построение схемы измерительного приемника супергетеродинного типа для ИКШ приведено на рис. 3.9.

Схема не представляет собой реализации приемной части какого-либо конкретного ИКШ (примеры такого построения будут приведены в последующем), но она содержит типовые узлы, о назначении которых пойдет речь ниже.

СВЧ модулятор *3* обеспечивает низкочастотную амплитудную модуляцию приходящих на вход шумовых измеряемых сигналов. Частота модуляции обычно не превышает нескольких килогерц, ее закон обеспечивается блоком программ *9* и определяется методом измерений конкретного ИКШ. От качества СВЧ модулятора *3* зависит глубина и форма модуляции. Широко используются модуляторы на пиндиодах [68, 112]. В подразделе 3.3.2 специально обсуждаются требования к пинмодуляторам, предназначенным для работы в составе ИКШ.

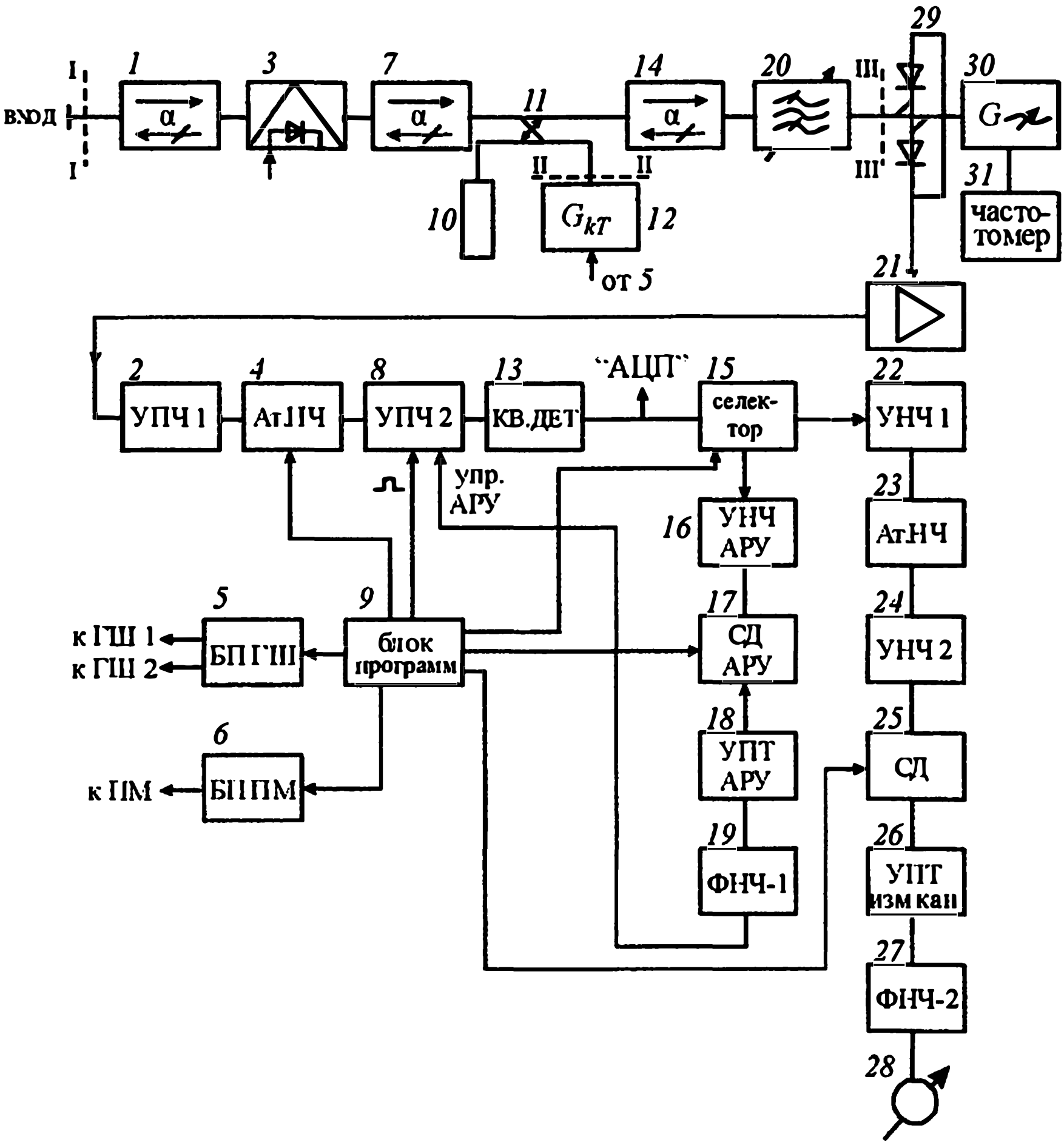


Рис. 3.9. Структурная схема приемной части ИКШКУ с супергетеродинным преобразователем

1, *7*, *14* – ферритовые вентили, *2*, *8* - УПЧ, *3* – СВЧ модулятор, *4* – аттенюатор ПЧ, *5* – блок питания ГШ, *6* – блок питания пинмодулятора, *9* – блок программ, *10* – СВЧ поглотитель, *11* – направленный ответвитель, *12* – генератор шума, *13* – квадратичный детектор, *15* – селектор каналов, *16* – УНЧ канала АРУ, *17* – синхронный детектор канала АРУ, *18* – УПТ канала АРУ, *19* – фильтр нижних частот канала АРУ, *20* – полосовой СВЧ фильтр, *21* – ПУПЧ, *22*, *24* – УНЧ измерительного канала, *23* – аттенюатор низкой частоты, *25* – синхронный детектор измерительного канала, *26* – УПТ измерительного канала, *27* – ФНЧ измерительного канала, *28* – выходной индикатор, *29* – смеситель, *30* – гетеродин, *31* – частотомер

Модуляция сигналов возможна также в УПЧ *8* измерительного присмника. Однако, в отличие от модуляции в СВЧ тракте, вместе с измеряемым сигналом при этом модулируются шумы преобразователя (*29*, *30*), ПУПЧ *21* и УПЧ (*2*, *8*), что вызывает дополнительный паразитный сигнал.

Этот сигнал должен быть или скомпенсирован, или учтен в виде поправки к измеряемой величине. Способ модуляции в УПЧ рационально использовать в случае, когда измеряемые сигналы значительно превышают собственный шум измерительного приемника.

Генератор шума *12* включается в СВЧ тракт через направленный ответвитель *11* для обеспечения возможности измерения коэффициента усиления СВЧ усилителя методом двух ГШ (подраздел 2.11). ОСПМШ генератора G и переходное затухание ответвителя желательно выбирать таким образом, чтобы ОСПМШ генератора, пересчитанная к сечению I–I, была близкой к ОСПМШ $G_{\text{гшсс}}$, подключаемого ко входу исследуемого усилителя, т.е.

$$G \approx G_{\text{гшсс}} / d_{\text{I–II}}, \tag{3.19}$$

где $d_{\text{I–II}}$ – коэффициент передачи СВЧ элементов между сечениями I–I и II–II.

При этом поправка $\Delta K_{\text{у}}$, входящая в формулу (2.112), имеет небольшую величину.

Генератор шума *12* удобно также использовать для оперативного контроля коэффициента шума приемной части ИКШ по его ОСПМШ, приведенной к входному сечению I–I.

При выборе переходного ослабления направленного ответвителя *11* следует стремиться к тому, чтобы рабочее затухание ответвителя (между входом и выходом в верхнем канале) было минимальным, например, не превышало 0,5–0,6 дБ, т.к. оно непосредственно влияет на уменьшение проходящего сигнала. Для оценки можно использовать формулу для рабочего затухания

$$N_{\text{раб, дБ}} = 10 \lg\left(1 - \frac{1}{N_{\text{пер}}}\right), \tag{3.20}$$

где $N_{\text{пер}}$ – переходное ослабление, выраженное в отн. ед. ($N_{\text{пер}} > 1$).

Смеситель *29* с гетеродином *30* обеспечивают преобразование частоты поступающих сигналов в промежуточную частоту, определяемую средней частотой УПЧ (2,8). Обычно используется балансный смеситель с разнополярными диодами, обеспечивающий:

– лучший коэффициент шума за счет подавления шумов гетеродинного генератора,

– более удобное согласование с ПУПЧ,

– развязку гетеродинного и сигнального входов, что уменьшает паразитную модуляцию (подраздел 3.1.1) шумов преобразователя.

ПУПЧ *21* располагается в непосредственной близости от смесителя или конструктивно объединяется с ним для достижения лучшего согласования, минимального коэффициента шума и устранения паразитных наводок. Коэффициент шума приемной части ИКШ ($K_{ш,\ икш}$) в первую очередь определяется коэффициентом шума преобразователя ($K_{ш,\ пр}$) и ПУПЧа, но также коэффициентом передачи d_{I-III} элементов СВЧ тракта между сечениями I–I и III–III.

Фильтр зеркального канала (преселектор) *20* ставится, если необходимо повысить разрешающую способность измерителя по частоте за счет запирания зеркального канала. В последнее время в качестве фильтра часто используются ЖИГ-фильтры [3], что дает возможность проводить перестройку по частоте путем электрического управления. Линейная зависимость резонансной частоты ЖИГ-фильтра от тока подмагничивания позволяет создать систему согласованной перестройки фильтра и гетеродинного генератора.

В некоторых случаях [18] для повышения разрешающей способности по частоте промежуточная частота $f_{пч}$ выбирается низкой (порядка нескольких мегагерц), в этом случае частотный интервал между каналами приема ($2f_{пч}$) уменьшается, фильтр зеркального канала не ставится, а за рабочую частоту ИКШ условно принимается частота гетеродина. Преимуществами такого способа являются:

– упрощение установки за счет отсутствия фильтра,

– повышение чувствительности за счет исключения потерь фильтра на частоте настройки и двухканального режима приема,

– отсутствие необходимости сопряжения частот фильтра и гетеродина.

Необходимая разрешающая способность ИКШ связана с частотными характеристиками измеряемых параметров усилителя. Более подробно этот вопрос рассмотрен в подразделе 3.3.3 и [82].

Гетеродинный генератор *30* определяет пределы перестройки измерительной установки по частоте. Используется как ручная, так и автоматическая (в панорамных измерителях) перестройка гетеродина.

Общие требования к гетеродинному генератору следующие.

– Обеспечение перестройки в необходимом диапазоне частот.

– Индикация частоты с заданной точностью. Для широкополосных устройств обычно достаточной бывает точность прямоотсчетных шкал (0,3–0,5 %), в других случаях используется частотомер.

– Необходимый для работы смесителя уровень мощности, не изменяющийся при перестройке частоты. Для смесителей с точечными диодами обычно требуется мощность порядка долей или единиц милливатт, для смесителей с диодами Шотки требуется мощность порядка 10 милливатт.

– Малый уровень собственных шумов гетеродинного генератора на промежуточной частоте. Хорошими шумовыми свойствами обладают гетеродины на отражательных клистронах, ЛОВ, диодах Ганна [131]. Генераторы на ЛПД обладают повышенным уровнем шума.

В Приложении 4 приводится перечень некоторых промышленных СВЧ генераторов, которые могут быть использованы в установках для измерения коэффициента шума.

Кратко остановимся на назначении развязывающих элементов *1*, *7*, *14*.

Ферритовый вентиль *1* служит для улучшения согласования входа приемной части ИКШ. При этом для испытываемого усилителя обеспечивается благоприятный режим работы по согласованию на его выходе.

Вентиль *7* улучшает согласование в СВЧ тракте, в частности, в сторону источника сигнала и тем самым уменьшает отражение части мощности от ГШ *12*, распространяющейся влево. Это уменьшает частотную неравномерность мощности ГШ, поступающей в сторону приемника, и повышает стабильность калибровки мощности ГШ *12*, приведенной к сечению I–I, что делается при паспортизации измерительной установки.

Вентиль *14* препятствует проникновению в СВЧ тракт излучения со стороны смесителя (мощность гетеродина, собственное шумовое излучение преобразователя). При отсутствии этого вентиля возможно возникновение сигнала "паразитной модуляции" из-за различного коэффициента отражения от выхода модулятора *3* при его включенном и выключенном состояниях. Наличие или отсутствие наводок и сигнала "паразитной модуляции" может быть оценено при включении наиболее чувствительной шкалы приемника, при работающем модуляторе и отсутствии сигнала на "входе" (рис. 3.9).

Следует заметить, что наличие любого из перечисленных развязывающих элементов приводит к ухудшению собственного коэффициента шума приемника за счет влияния прямых потерь. Поэтому при проектировании измерительных установок вопрос о необходимости тех или иных развязывавших элементов должен решаться конкретно в зависимости от параметров других СВЧ элементов и необходимой точности измерений.

После преобразования и предварительного усиления в ПУПЧ *21* сигналы попадают на вход УПЧ *2*, который может содержать управляемый аттенюатор *4* с известными ступенями ослабления. Аттенюатор может управляться вручную или автоматически (автоматический выбор пределов). От параметров УПЧ зависит входная частота и ширина полосы частот (разрешающая способность) измерительного приемника.

Преобразование сигналов в квадратичном детекторе позволяет получать на выходном индикаторе *28* показания, пропорциональные мощностям изме-

ряемых сигналов, что представляет удобство при измерениях и используется во всех современных ИКШ.

Выходной сигнал квадратичного детектора может обрабатываться цифровыми средствами либо аналоговой радиометрической схемой.

Возможна обработка встроенным микропроцессором [79, 194] или внешней ЭВМ [115]. При обработке с помощью ЭВМ используется выход "АЦП".

Структура аналоговой низкочастотной обрабатывающей части представлена на рис. 3.9. Аналоговый ИКШ, содержащий систему автоматической регулировки усиления (АРУ), дает возможность настраивать СВЧ усилитель на оптимальные значения параметров (минимальный $K_ш$, максимальный $K_у$) при непосредственном наблюдении измеряемых величин по выходному индикатору, что является существенным эксплуатационным достоинством. Одним из способов построения такой системы [2, 18] является разделение сигнала после детектора на два канала с помощью временно́го селектора *15*, (рис. 3.9).

Первый канал (элементы *22–28*) – измерительный, в него подаются и индицируются выходным индикатором *28* сигналы, пропорциональные мощности шума исследуемого усилителя ($K_ш$). Второй канал (элементы *16–19*) – опорный, или канал АРУ, в него поступают сигналы, пропорциональные мощности шума опорного источника (ГШ), подключенного ко входу СВЧ усилителя. Выходное напряжение канала АРУ подается на УПЧ в качестве управляющего его усилением по системе отрицательной обратной связи.

При работе АРУ коэффициент передачи системы СВЧ усилитель–УПЧ автоматически поддерживается постоянным, а сигнал на индикаторе *28* всегда пропорционален измеряемому шуму. Таким образом, даже при изменении $K_у$ СВЧ усилителя в процессе его настройки, показания на выходе измерительного канала соответствуют коэффициенту шума и регистрируют его изменения.

Работа селектора *15* и программа модуляции шумов входного ГШ и СВЧ усилителя синхронизируется с помощью блока программ. Часто блоки питания ГШ *5* и СВЧ пинмодуляторов *6* входят непосредственно в состав ИКШ.

Опорный и измерительный каналы строятся по принципу модуляционного радиометра, т.е. содержат усилители частоты модуляции (*16*, *22*, *24*), синхронные детекторы (*17*, *25*), получающие опорные напряжения от блока программ, УПТ (*18*, *26*), фильтры нижних частот (*19*, *27*). Для регулировки выходных сигналов в измерительный канал включается аттенюатор низкой частоты *23*.

Модуляционный выигрыш в чувствительности такой системы при измерении шумовых сигналов определяется соотношением полос пропускания УПЧ ($\Delta f_{упч}$) и ФНЧ ($\Delta f_{фнч}$):

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta f_{\text{упч}}}{\Delta f_{\text{фнч}}}}. \qquad (3.21)$$

Модуляционный выигрыш влияет на флуктуационную составляющую погрешности измерений, что особенно важно при испытании усилителей с малыми $K_{\text{ш}}$ и $K_{\text{у}}$. Ширина полосы $\Delta f_{\text{фнч}}$ обычно выбирается в зависимости от условий измерений (регулировка постоянной времени τ). Более подробно вопрос о влиянии постоянной времени на погрешность рассмотрен в подразделе 3.3.4.

Для устойчивой работы системы АРУ необходимо некоторое минимальное отношение мощностей сигнала и шума $(С/Ш)_{\text{мин}}$ на входе (сеч. I–I. рис. 3.9) приемной части ИКШ. Отношение С/Ш определяется СПМШ ГШ, $K_{\text{ш}}$, $K_{\text{у}}$ СВЧ усилителя и коэффициентом шума приемной части ИКШ [14].

В Приложении 2 приведены две разновидности структурной схемы СВЧ части приемника в микрополосковом исполнении, разработанные на предприятии [87]. В Приложении 3 приводятся технические параметры СВЧ элементов, входящих в эти схемы, а также параметры коаксиальных и волноводных элементов для сантиметрового диапазона длин волн. Разработанные элементы могут быть использованы при проектировании ИКШ.

3.3.2. Требования к СВЧ модуляторам ИКШ

Как уже указывалось, в автоматических модуляционных ИКШ необходима низкочастотная амплитудная модуляция шума ГШ и исследуемого усилителя. При модуляции в УПЧ требуется компенсация собственного шума приемника перед измерениями и систематическая ее проверка в дальнейшем. Модуляция СВЧ усилителя и ГШ по питанию может вызвать заметные погрешности, связанные с нарушением их рабочего режима [12]. Эти недостатки можно устранить, применяя в СВЧ каналах достаточно быстродействующие модуляторы и используя СВЧ усилитель и ГШ в режиме непрерывной работы.

Рассмотрим требования к модуляторам СВЧ применительно к ИКШ, работающему для конкретности по методу линейной шкалы (рис. 3.10).

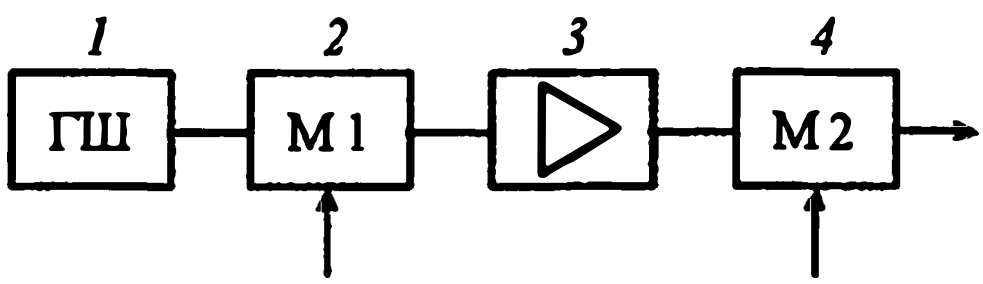


Рис. 3.10. Упрощенная структурная схема СВЧ-части ИКШ, работающего по методу линейной шкалы

1 – генератор шума, *2* – модулятор ГШ, *3* – СВЧ усилитель, *4* – модулятор усилителя

Основные условия, характеризующие модулятор СВЧ, идеальный с точки зрения использования его в ИКШ, могут быть сформулированы следующим образом:

– коэффициент передачи модулятора в закрытом состоянии

$$d_{зак} = 0; \tag{3.22}$$

– коэффициент передачи в открытом состоянии

$$d_{отк} = 1; \tag{3.23}$$

– КСВН в закрытом $\sigma_{зак}$ и открытом $\sigma_{отк}$ состояниях

$$\sigma_{зак} = \sigma_{отк} = 1; \tag{3.24}$$

– абсолютная эквивалентная температура собственного шумового излучения СВЧ модулятора в закрытом состоянии

$$T_{зак} = T_0 \quad (T_0 = 293\ \text{К}); \tag{3.25}$$

– абсолютная эквивалентная температура собственного шумового излучения в открытом состоянии

$$T_{отк} = 0\ \text{К} \ \text{при} \ d_{отк} = 1, \tag{3.26}$$

$$T_{отк} = T_0 (1 - d_{отк}) \ \text{при} \ d_{отк} \neq 1; \tag{3.27}$$

– время переключения модулятора

$$\tau_п = 0. \tag{3.28}$$

Рассмотрим, к каким последствиям приводит отклонение от условий (3.22–3.28).

а) Погрешности, вносимые модулятором мощности генератора шума М1.

Неполное запирание мощности ГШ вызывает две составляющие погрешности при измерении коэффициента шума.

Первая связана с неполной глубиной модуляция мощности ГШ при калибровке:

$$\boxed{\delta_1 = \frac{d_{зак}}{d_{отк}}.} \tag{3.29}$$

Погрешность δ_1 может быть только положительной, т.е. приводит к завышению действительного значения коэффициента шума.

Вторая ошибка, возникает из-за *просачивания мощности ГШ на вход СВЧ усилителя* сквозь модулятор М1 во время работы модулятора М2, т.е. при измерении шумовой мощности СВЧ усилителя. Эта погрешность может быть тоже только положительной и выражается, как

$$\delta_2 = \frac{G d_{зак}}{K_ш}, \qquad (3.30)$$

где G – относительная СПМШ ГШ.

Зависимость (3.30) при $K_ш = 3$ показана на рис. 3.11. Как видно, при недостаточном запирании М1 погрешность достигает заметной величины. Ее можно уменьшить, выбирая ГШ с малым уровнем выходной мощности.

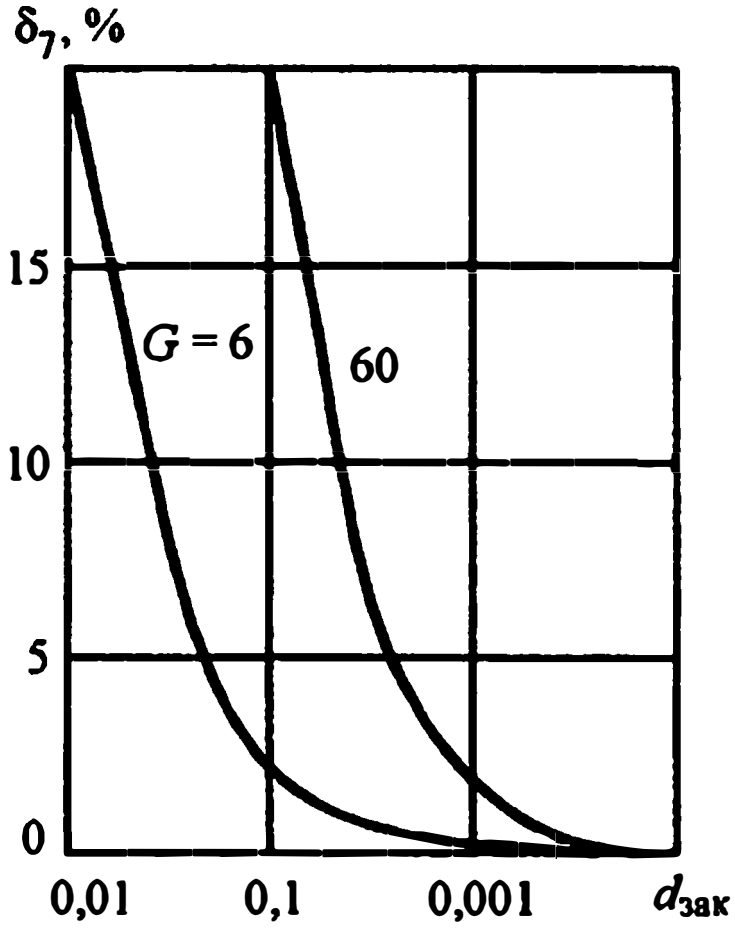


Рис. 3.11. Погрешность из-за просачивания мощности через модулятор ГШ в зависимости от коэффициента передачи модулятора ($K_ш = 3$)

Наличие потерь в открытом модуляторе М1 из-за поглощения и отражения ($d_{отк} \neq 1$, $\sigma_{отк} \neq 1$) дополнительных погрешностей не вызывает, если ГШ градуируется по уровню СПМШ совместно с модулятором. При этом, однако, заслуживает внимания вопрос о стабильности потерь модулятора во времени.

Наличие собственного шумового излучения модулятора М1, отличающегося от оговоренного условиями (3.25) и (3.27), вызывает погрешность калибровки шкалы приемника неопределенного знака, численно равную соответствующей погрешности в измерении $K_ш$:

$$\delta_3 = \frac{t_{отк} - t_{зак}}{T_{гш} - T_0}, \qquad (3.31)$$

где $t_{отк}$ – избыточная температура шумового излучения открытого модулятора;

$$t_{отк} = T_{отк} - T_0(1 - d_{отк}), \qquad (3.32)$$

$T_{отк}$ – абсолютная температура шумового излучения открытого модулятора,
$t_{зак}$ – избыточная температура шумового излучения закрытого модулятора

$$t_{зак} = T_{зак} - T_0,$$

$T_{гш}$ – абсолютная температура шумового излучения ГШ.

Погрешность δ_3 уменьшается при увеличении СПМШ ГШ. При условии

$$t_{отк} = t_{зак} \tag{3.33}$$

она может обращаться в нуль.

Избыточное шумовое излучение модулятора в запертом состоянии приводит также к некоторому завышению $K_ш$, причем соответствующая погрешность

$$\boxed{\delta_4 = \frac{t_{зак}}{K_ш \cdot T_o}.} \tag{3.34}$$

Погрешность, связанная о неидеальностью модулятора ГШ, в целом выражается формулой

$$\delta K_{ш(M1)} \approx \delta_1 + \delta_2 + \delta_4 \pm \delta_3. \tag{3.35}$$

б) Погрешности, вносимые модулятором выходной мощности шума СВЧ усилителя М2.

Относительная погрешность измерения $K_ш$ из-за влияния *неполной глубины модуляции* ($d_{зак} \neq 0$) при наличии потерь в открытом состоянии ($d_{отк} \neq 0$) составляет:

$$\boxed{\delta_5 = -\frac{d_{зак}}{d_{отк}}.} \tag{3.36}$$

Погрешность δ_5 имеет отрицательный знак, т.е. всегда уменьшает действительное значение $K_ш$.

Наличие потерь в открытом модуляторе ($d_{отк} \neq 1$) и *неполное его согласование* ($\sigma_{отк} \neq 1$) приводят к эквивалентному повышению $K_ш$ измерительного приемника, в результате увеличивается случайная составляющая погрешности измерений за счет хаотических колебаний стрелки выходного прибора $\delta_ф$. В случае, когда шумовой сигнал с выхода СВЧ усилителя существенно меньше собственного шума приемника ошибка за счет увеличения флуктуаций:

$$\boxed{\delta_6 = \delta_ф\left(\frac{1}{d_\Sigma} - 1\right),} \tag{3.37}$$

где d_Σ – коэффициент передачи, связанный с наличием дополнительных потерь из-за поглощения и отражения.

Если сигнал с выхода СВЧ усилителя существенно больше шума приемника, погрешность за счет шумовых флуктуаций практически не изменяется из-за потерь в открытом модуляторе М2.

Погрешность за счет *собственного шумового излучения модулятора* может возникнуть при несоблюдении условий (3.25) и (3.27). Она приближенно может быть представлена, как

$$\delta_7 = \frac{t_{отк} - t_{зак}}{K_ш K_у T_0}, \qquad (3.38)$$

где $K_у$ – коэффициент усиления исследуемого усилителя.

Как видно из (3.38), погрешность δ_7 уменьшается при увеличении $K_ш$ и $K_у$ СВЧ усилителя. Заметим, что в принципе эта погрешность может отсутствовать не только при выполнении условий (3.25) и (3.27), но и при наличии равенства

$$t_{отк} = t_{зак}. \qquad (3.39)$$

Инерционность работы модулятора СВЧ приводит к искажению формы огибающей высокочастотного импульса на его входе по сравнению с меандром. В случае, если измерительный приемник обладает избирательностью по частоте и фазе, то погрешность за счет уменьшения первой гармоники сигнала [12] составляет:

$$\delta_8 = \frac{\sin\frac{\pi\tau_п}{T_п}}{\frac{\pi\tau_п}{T_п}} - 1, \qquad (3.40)$$

где $\tau_п$ – длительность фронтов трапецеидального импульса, образовавшегося из-за инерционности модулятора,

$T_п$ – период.

Погрешность за счет сдвига фазы (при опорном напряжении в виде меандра)

$$\delta_9 = \cos\varphi - 1, \qquad (3.41)$$

где φ – угол сдвига фазы первой гармоники.

В целом погрешность, связанная с применением модулятора мощности СВЧ усилителя,

$$\delta K_{ш(М2)} \approx \delta_5 \pm \sqrt{\delta_6^2 + \delta_7^2 + \delta_8^2 + \delta_9^2}. \qquad (3.42)$$

В [12] описаны результаты исследования и применения СВЧ модуляторов на пиндиодах [72] в установке для измерения коэффициента шума на частотах 2–4 ГГц. Проводились исследования собственного шумового излучения модуляторов на радиометрической установке. С точностью до 5–10 К (предел чувствительности установки) избыточное излучение у пинмодуляторов не обнаружено, т.е. они в отношении излучения приближаются к идеальным (условия 3.25 и 3.27).

В установке для измерения $K_ш$ использовались модуляторы, имеющие в закрытом состоянии затухание более 30 дБ ($d_{зак} \le 0{,}001$) и потери в открытом состоянии не более 2 дБ ($d_{отк} \ge 0{,}63$). Длительность фронтов, огибающих СВЧ импульсов составляла 30–50 мкс ($\tau_п / T_п = 0{,}004$). Измерялся коэффициент шума усилителя при $K_у \approx 20$ дБ и $G = 60$, $K_ш \approx 3$. Подсчеты по формулам (3.35, 3.42) при этих условиях показывают, что $\delta K_{ш(М1)} = 3{,}3$ %, $\delta K_{ш(М2)} = 0{,}16$ %, общая погрешность за счет неидеальности модуляции – $\delta K_{ш(М)} = 3{,}44$ %. Экспериментальная проверка показала, что фактические погрешности не превышают расчетных величин.

Практика применения модуляторов на пиндиодах во всем сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн показала достоинства этого способа модуляции в смысле обеспечения точности, надежности и удобства измерений $K_ш$.

Погрешности измерений, вносимые пинмодуляторами, обычно учитываются путем введения общей поправки, определяемой при паспортизации ИКШ.

3.3.3 Разрешающая способность приемника по частоте

Абсолютная разрешающая способность приемника по частоте при одноканальном приеме (приемник прямого усиления или супергетеродин с фильтром зеркального канала) определяется шириной полосы пропускания полосового СВЧ фильтра (приемник прямого усиления) или УПЧ (Δf) (супергетеродинный приемник):

$$\Delta f = f_{макс} - f_{мин}, \qquad (3.43)$$

где $f_{макс}$ и $f_{мин}$ – максимальная и минимальная частоты, принимаемые измерительным приемником (рис. 3.12).

Для супергетеродинного приемника при одноканальном приеме (рис. 3.12*а*):

$$\boxed{\Delta f = \Delta f_{упч}.} \qquad (3.44)$$

При двухканальном приеме (рис. 3.12*б*):

$$\boxed{\Delta f = 2 f_0 - \Delta f_{упч}.} \qquad (3.45)$$

где f_0 – средняя частота УПЧ приемника.

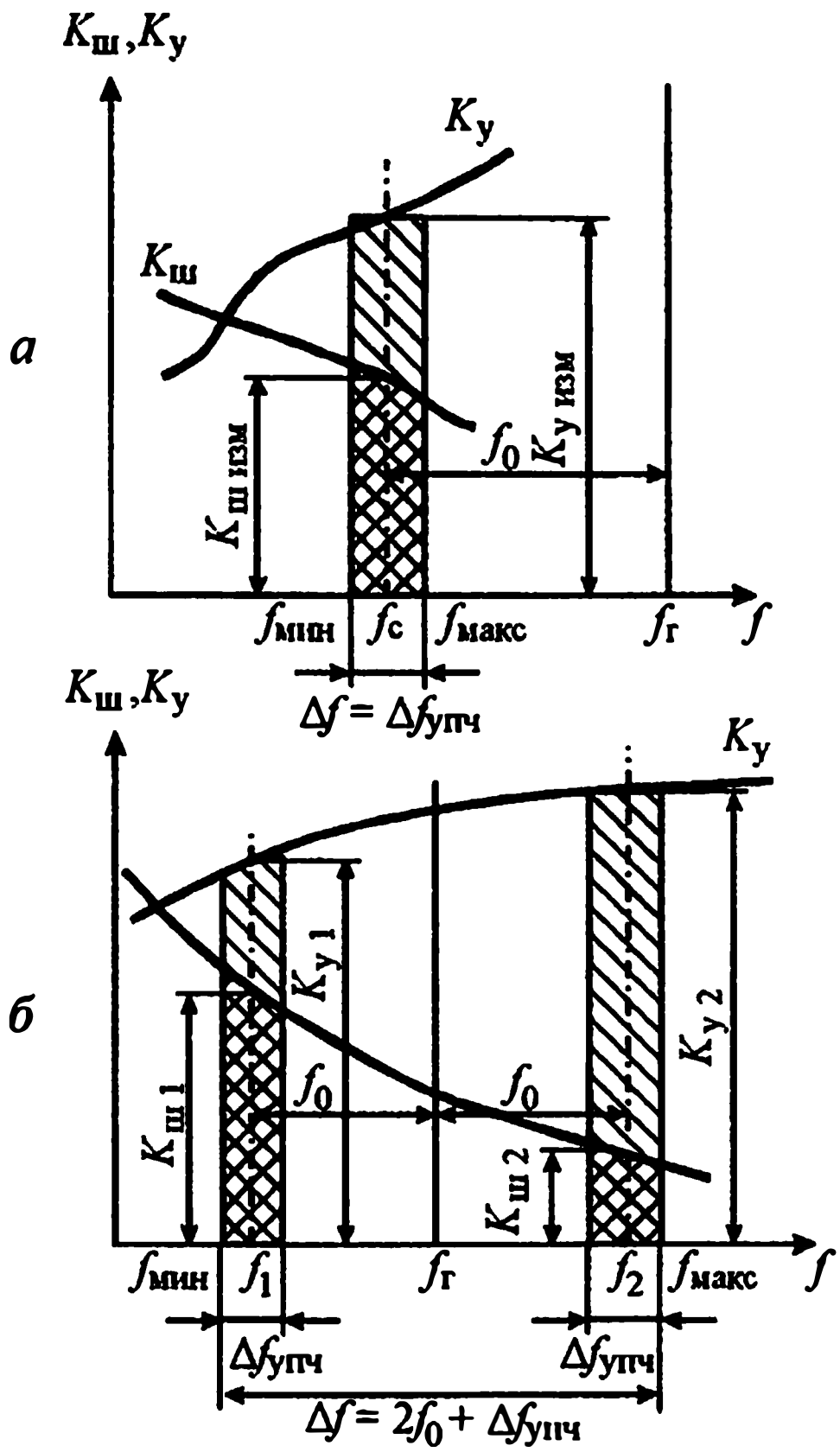


Рис. 3.12. К вопросу о разрешавшей способности приемника по частоте при одноканальном (*а*) и двухканальном (*б*) приеме

Относительная разрешающая способность по частоте ψ_f определяется как отношение абсолютной разрешающей способности к частоте сигнала $f_с$.

При этом для одноканального приема

$$\psi_f = \frac{\Delta f_{упч}}{f_0}. \qquad (3.46)$$

Для двухканального приема

$$\psi_f = \frac{2f_0 + \Delta f_{упч}}{f_г}, \qquad (3.47)$$

где $f_г$ – частота гетеродина, обычно при двухканальном приеме условно принимаемая за частоту сигнала.

Величина разрешающей способности по частоте в ряде случаев существенно влияет на погрешность измерения коэффициентов шума и усиления [13].

а). *Погрешность измерения коэффициента шума при двухканальном приеме.*

При двухканальном приеме измеряются усредненные значения $K_ш$ и $K_у$. Представим измеренное значение $K_ш$ как

$$K_{ш\,изм} = K_{ш\,ср}(1-\xi), \tag{3.48}$$

где

$$K_{ш\,ср} = \frac{K_{ш1} + K_{ш2}}{2}. \tag{3.49}$$

Измеренное значение $K_у$ равно:

$$K_{у\,изм} = \frac{K_{у1} + K_{у2}}{2} = K_{у\,ср}. \tag{3.50}$$

Здесь $K_{ш1}$, $K_{ш2}$, $K_{у1}$, $K_{у2}$ – усредненные в полосе $\Delta f_{упч}$ значения $K_ш$ и $K_у$ исследуемого усилителя по мощности на частотах $f_1 = f_г - f_0$ и $f_2 = f_г + f_0$ (рис. 3.12), ξ – поправочный член, связанный с частотной неравномерностью $K_ш$ и $K_у$.

В [13] показано, что поправочный член рассчитывается по формуле:

$$\xi = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta K_ш}{K_{ш\,ср}} \cdot \frac{\Delta K_у}{K_{у\,ср}}, \tag{3.51}$$

где $\Delta K_ш$ и $\Delta K_у$ – разности соответственно $K_ш$ и $K_у$ на частотах f_1 и f_2.

На рис. 3.13 показана зависимость ξ от относительного изменения $K_у$ при переходе с частоты f_1 на f_2 при различных относительных изменениях $K_ш$.

Например, если $K_у$ изменяется вдвое ($\Delta K_у / K_у = 0{,}66$), а $K_ш$ на 10 % ($\Delta K_ш / K_ш = 0{,}1$), то погрешность измерений ξ составляет 1,65 % (точка "а" на рис. 3.13).

Приращения $\Delta K_у$ и $\Delta K_ш$ можно выразить через соответствующие производные и, учитывая, что обычно $f_2 - f_1 \approx \Delta f$, записать выражение для ξ в следующем виде:

$$\xi = \frac{1}{4 K_{у\,ср} K_{ш\,ср}} \cdot \frac{\partial K_у}{\partial f} \cdot \frac{\partial K_ш}{\partial f} (\Delta f)^2. \tag{3.52}$$

Умножив и разделив (3.52) на f_0^2, с учетом (3.44) и (3.46), получим:

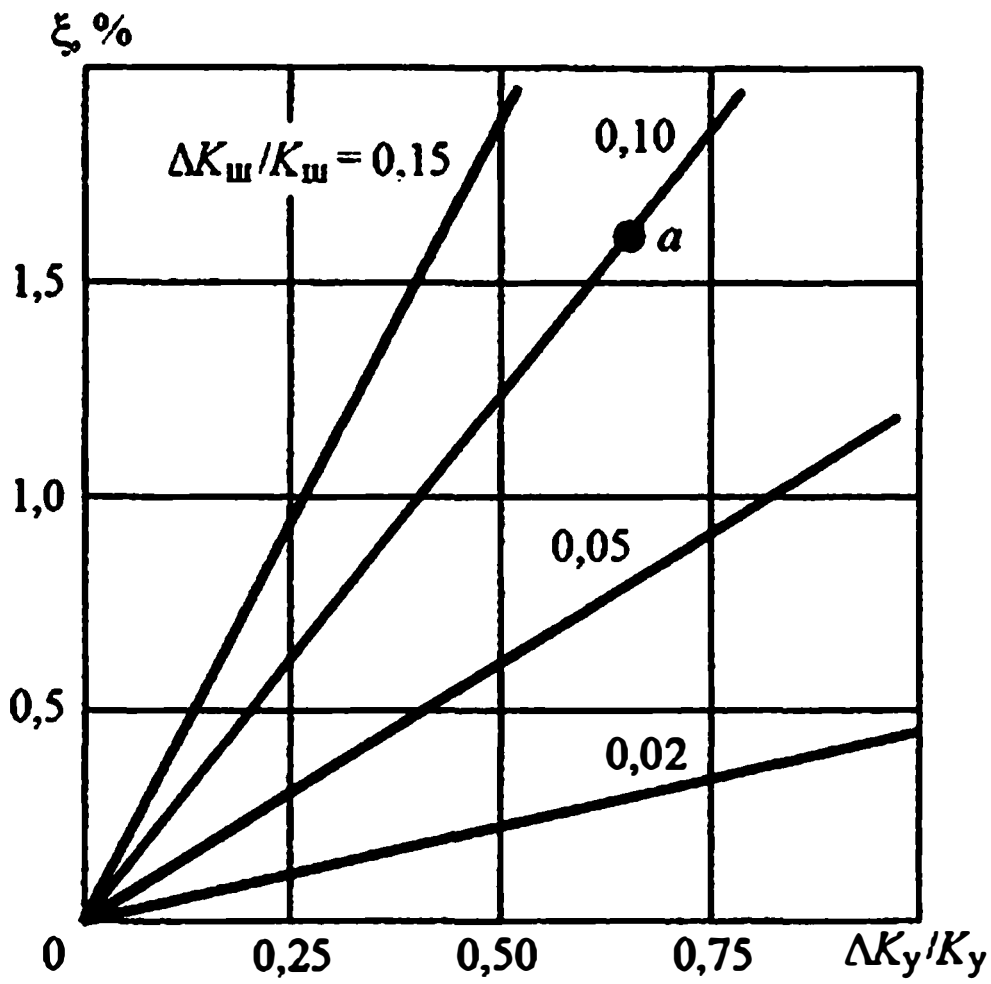


Рис. 3.13. Зависимость поправочного члена от относительного изменения $K_у$ при различных относительных изменениях $K_ш$

$$\xi = \frac{1}{4}\left(\frac{f_c}{K_{у\,ср}}\cdot\frac{\partial K_у}{\partial f}\right)\cdot\left(\frac{f_c}{K_{ш\,ср}}\cdot\frac{\partial K_ш}{\partial f}\right)\cdot\psi_f^2. \qquad (3.53)$$

Относительная разрешающая способность по частоте, необходимая для того, чтобы поправочный член не превышал заданной величины ξ, определится из (3.53) как

$$\psi_f \le \sqrt{\frac{\xi K_{у\,ср} K_{ш\,ср}}{\left(f_c\frac{\partial K_у}{\partial f}\right)\cdot\left(f_c\frac{\partial K_ш}{\partial f}\right)}} = 2\sqrt{\frac{\xi}{\beta_{f(K_ш)}\beta_{f(K_у)}}}. \qquad (3.54)$$

Входящие в формулу (3.54) величины

$$\beta_{f(K_ш)} = \frac{f_c}{K_{ш\,ср}}\cdot\frac{\partial K_ш}{\partial f} \approx \frac{f_c}{K_{ш\,ср}}\cdot\frac{\Delta K'_ш}{\Delta f'}, \qquad (3.55)$$

$$\beta_{f(K_у)} = \frac{f_c}{K_{у\,ср}}\cdot\frac{\partial K_у}{\partial f} \approx \frac{f_c}{K_{у\,ср}}\cdot\frac{\Delta K'_у}{\Delta f'} \qquad (3.56)$$

могут быть приняты в качестве безразмерных параметров, характеризующих степень изрезанности частотных характеристик усилителя $K_ш(f)$ и $K_у(f)$ ("па-

раметры частотной изрезанности"). В формулах (3.55, 3.56) $\Delta K'_{ш}$ и $\Delta K'_{у}$ – приращения $K_{ш}$ и $K_{у}$ усилителя при изменении частоты на $\Delta f'$. Для возможности расчетов по формуле (3.54) значения величин $\beta_{f(K_{ш})}$ и $\beta_{f(K_{у})}$ должны быть оценены в среднем по экспериментальным кривым исследуемого прибора (рис. 3.14).

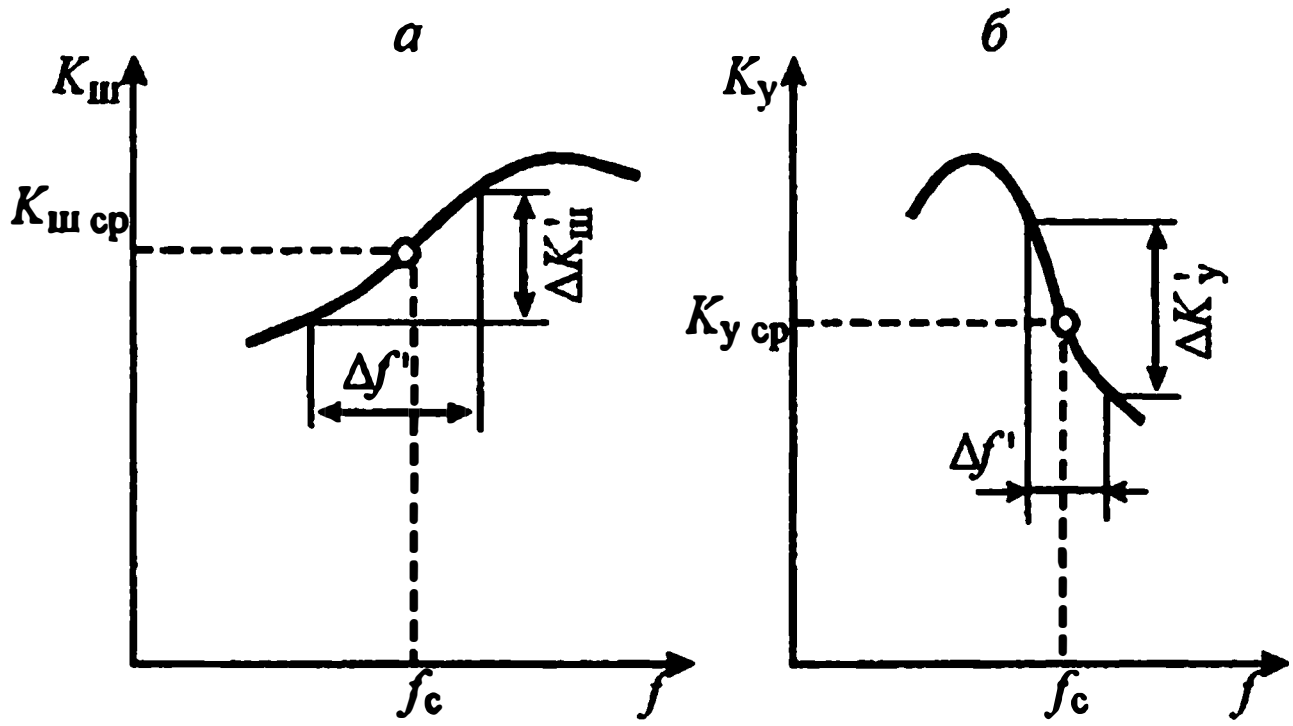


Рис. 3.14. К определению параметров изрезанности $\beta_{f(K_{ш})}$ и $\beta_{f(K_{у})}$

Определив по (3.54) требуемую разрешающую способность, можно, пользуясь (3.45), выбрать необходимые параметры измерительного приемника. Для обеспечения практического выбора промежуточной частоты приемника при двухканальном приеме по известной рабочей частоте и найденной разрешающей способности на рис. 3.15 приводится номограмма, построенная для случая ширины полосы $\Delta f_{\text{УПЧ}} = 2$ МГц.

б) *Погрешность измерения коэффициента усиления при двухканальном приеме.*

Зависимость коэффициента усиления от частоты часто имеет характер периодической изрезанности. Если период изрезанности составляет $\Delta f_{\text{изр}}$, а характер ее принять косинусоидальным, то, как показано в [13], разрешающая способность приемника должна выбираться исходя из требования:

$$\psi_f \le \frac{\Delta f_{\text{изр}}}{f_{\text{п}}} \arccos\left(1 - \frac{2\delta K_{у}}{\dfrac{K_{у\,\text{макс}}}{K_{у\,\text{мин}}} - 1}\right), \qquad (3.57)$$

где $\delta K_{у}$ – допустимая величина относительной погрешности измерения $K_{у}$,

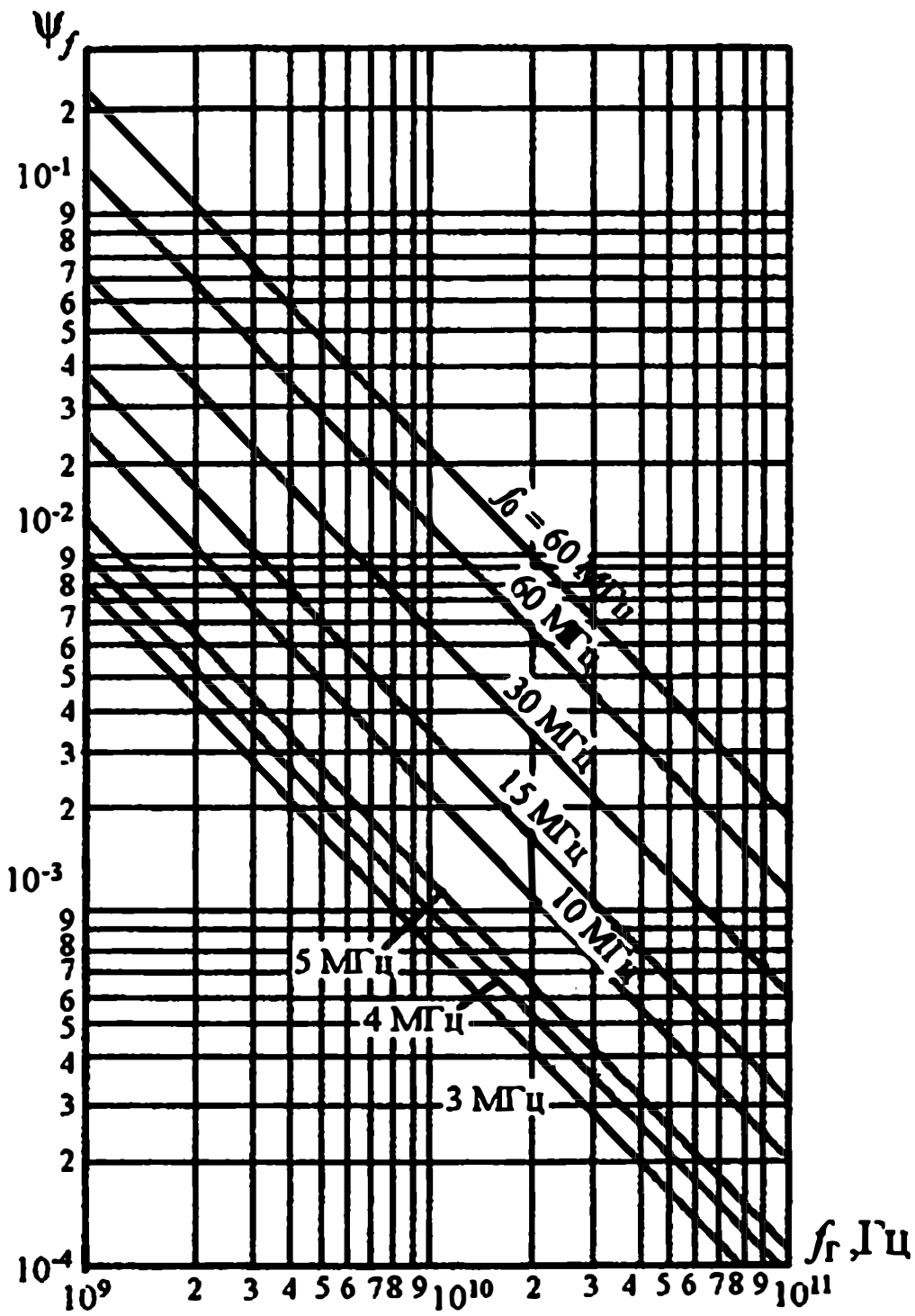


Рис. 3.15. Зависимость относительной разрешающей способности по частоте при двухканальном приеме от частоты гетеродина при различных значениях промежуточной частоты приемника f_0 и $f_{упч} = 2$ МГц

$K_{у\ макс}$ и $K_{у\ мин}$ – максимальное и минимальное значения $K_у$ в районе рассматриваемой частотной точки.

Наибольшая относительная погрешность будет при измерении $K_у$ в области минимума усиления.

в) *Влияние разрешающей способности на измеренное значение ширины полосы усилителя по шумам.*

В случае резкой зависимости шума усилителя от частоты (рис. 3.16) при измерениях возможно искажение действительного вида этой зависимости вследствие недостаточной разрешающей способности приемника по частоте даже при одноканальном приеме ($\Delta f = \Delta f_{упч}$). Для узкополосных усилителей это может привести к заметному относительному уменьшению измеренной величины полосы по допустимым шумам ($K_{ш\ пред}$).

Среднее (измеренное) значение коэффициента шума при постоянном $K_у$ в пределах Δf:

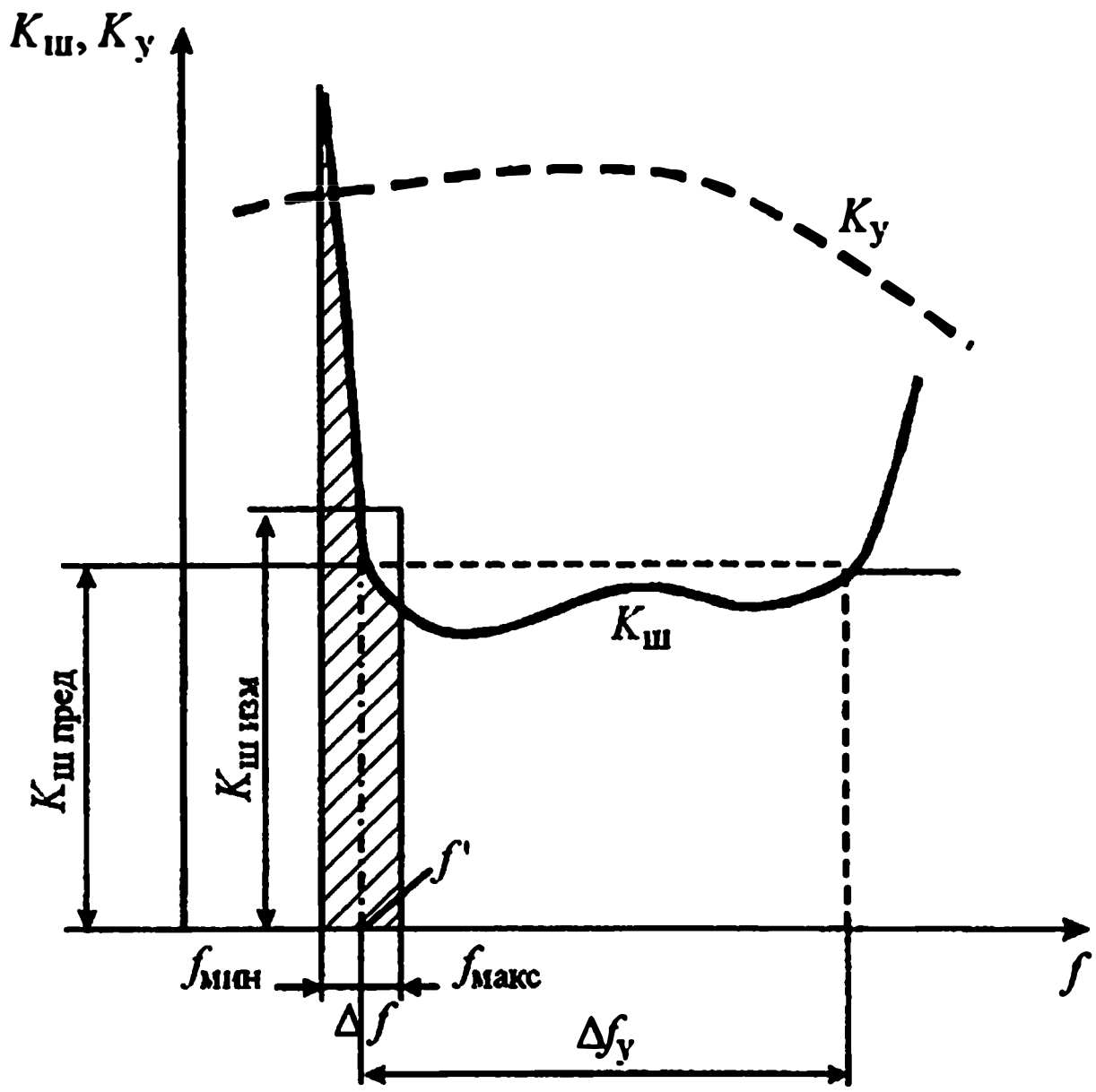


Рис. 3.16. Характер зависимости коэффициента шума от частоты

$$K_{ш\ изм} = \frac{1}{\Delta f} \int_{f_{мин}}^{f_{макс}} K_{ш}(f)\,df \,. \qquad (3.58)$$

В крайних точках полосы (например, f'), где функция $K_{ш}(f)$ резко изменяется и имеет заметную кривизну ($\partial^2 K_{ш} / \partial f^2 \neq 0$), значение $K_{ш\ изм}$ может существенно отличаться от $K_{ш}(f')$. При сужении Δf погрешность будет уменьшаться. Максимальная ошибка в определении полосы усилителя по шумам может быть не более $\Delta f = \Delta f_{упч}$.

г) *Погрешность, связанная с неточным определением частоты гетеродина и промежуточной частоты измерительного приемника.*

При *одноканальном* режиме приема частота сигнала определяется как

$$f_{с1} = f_{г} + f_{0} \qquad (3.59)$$

или

$$f_{с2} = f_{г} - f_{0} \qquad (3.60)$$

Относительная погрешность определения частоты сигнала

$$\delta f_c = \pm\sqrt{\delta^2 f_г + (\Delta f_0 / f_0)^2}\ . \qquad (3.61)$$

Здесь $\delta f_г$ – относительная погрешность установки частоты гетеродина, Δf_0 – абсолютная погрешность определения средней частоты УПЧ приемника.

Погрешность определения измеряемой величины ($K_ш$ или $K_у$), возникающая в результате ошибки δf_c, может быть выражена следующим образом: для коэффициента шума

$$\boxed{\delta K_ш = \beta_{f(K_ш)} \delta f_c\ ,} \qquad (3.62)$$

для коэффициента усиления

$$\boxed{\delta K_у = \beta_{f(K_у)} \delta f_c\ .} \qquad (3.63)$$

Пример.

Пусть $\delta f_г$ = 0,3 %, Δf_0 = 0,5 МГц, $f_c \approx f_г$ =3000 МГц, $\beta_{f(K_ш)}$=3. Воспользовавшись формулами (3.61) и (3.62), можно найти, что при этих условиях $\delta K_ш \approx 1$ %.

При двухканальном приеме, как указывалось, в качестве рабочей принимается частота гетеродина $f_г$, поэтому

$$\boxed{\delta f_c = \pm\delta f_г\ .} \qquad (3.64)$$

Погрешность Δf_0 приводит лишь к некоторому изменению разрешающей способности приемника по частоте.

Ошибки в определении $K_ш$ и $K_у$ по-прежнему находятся по формулам (3.62) и (3.63), но с учетом формулы (3.64).

Таким образом, анализ частотных погрешностей приводит к следующим **выводам**.

– При измерении $K_ш$ и $K_у$ широкополосных СВЧ усилителей приемниками, имеющими разрешающую способность порядка нескольких мегагерц, частотная погрешность практически не возникает.

– При измерении полосы по коэффициенту шума узкополосных приборов, например, электронных параметрических усилителей (ЭПУ), усилителей обратной волны (УОВ) и других возможно занижение измеренной полосы, абсолютная погрешность из-за конечного значения разрешающей способности не превышает ширины полосы входных частот приемника.

– При двухканальном приеме частотные погрешности $K_ш$ и $K_у$ в сильной степени зависят от изрезанности характеристик $K_ш(f)$ и $K_у(f)$, которую рационально описывать параметрами частотной изрезанности $\beta_{f(K_ш)}$ и $\beta_{f(K_у)}$

(формулы 3.55 и 3.66). Погрешности должны оцениваться индивидуально для каждого типа усилителей.

Величина этих погрешностей при параметрах исследуемых усилителей, наиболее часто встречающихся в практике измерений, для $K_ш$ составляет единицы процентов, для $K_у$ может быть более 10 %.

Требования к разрешающей способности измерителей $K_ш$ и $K_у$ при их расчете и конструировании должны основываться на анализе возможных частотных погрешностей.

3.3.4 Влияние собственных шумов измерителей коэффициентов шума и усиления на погрешность измерений

При измерении $K_ш$ и $K_у$ СВЧ усилителей по методу линейной шкалы с помощью модуляционных приемников, обобщенная схема которых приведена на рис. 3.17, существенное влияние на погрешность измерений оказывает шум приемников. В зависимости от значений измеряемых величин и мощности шума ГШ это влияние может быть различным. Если в приемнике используется система автоматической регулировки усиления, возникают дополнительные требования к параметрам элементов измерительной установки.

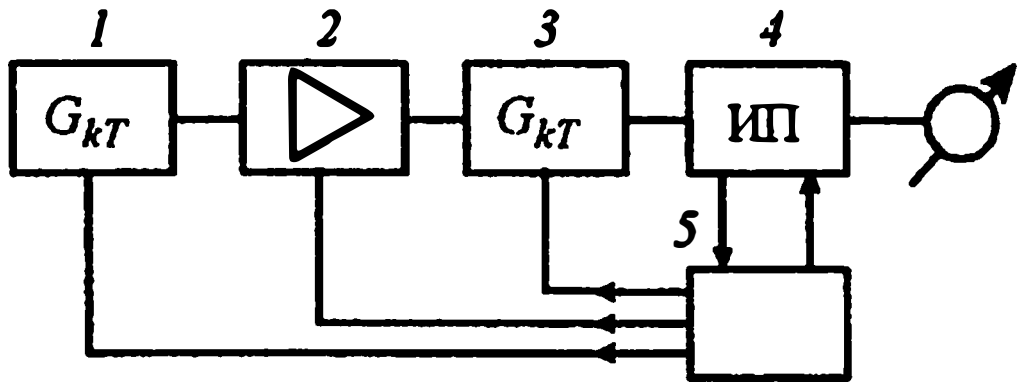


Рис. 3.17. Обобщенная структурная схема модуляционного измерителя коэффициентов шума и усиления

1 – генератор шума 1, *2* – исследуемый усилитель, *3* – генератор шума 2, *4* – измерительный приемник, *5* – модулирующее устройство

а) *Флуктуационный порог при измерении коэффициента шума.*

Если внешний шумовой сигнал соизмерим с собственным шумом измерительного приемника, то флуктуационный порог зависит как от уровня этого сигнала, так и от уровня собственного шума приемника. (Влияние нестабильностей и наводок в низкочастотной части приемника в дальнейшем не рассматривается).

Относительная погрешность измерения $K_ш$, связанная с флуктуационным порогом, может быть при этом выражена следующей формулой [14]:

$$\delta K_{\text{ш фл}} = \sqrt{\delta^2 K'_{\text{ш}} + \delta^2 K''_{\text{ш}}} \ . \qquad (3.65)$$

Здесь $\delta K'_{\text{ш}}$ – флуктуационная погрешность, возникающая при операции "калибровка", когда измеряется сигнал, пропорциональный относительной СПМШ генератора *1* (рис. 3.17). Величина этой погрешности прямо пропорциональна мощности суммарных шумов на входе приемника в момент "калибровки" $[(G_1 + K_{\text{ш}})K_{\text{у}}d + K_{\text{ш ип}}]\Delta f$ и обратно пропорциональна величине измеряемого шумового сигнала $G_1 K_{\text{у}} d\Delta f$, а также модуляционному выигрышу Q (см. подраздел 3.3.1):

$$\boxed{\delta K'_{\text{ш}} = \left(1 + \frac{K_{\text{ш}} K_{\text{у}} d + K_{\text{ш ип}}}{G_1 K_{\text{у}} d}\right)\frac{1}{Q},} \qquad (3.66)$$

где $K_{\text{ш ип}}$ – коэффициент шума приемника *4* (рис. 3.17),
$K_{\text{ш}}$ – коэффициент шума усилителя *2*,
$K_{\text{у}}$ – коэффициент усиления усилителя *2*,
d – коэффициент передачи ГШ *3* в выключенном состоянии.
G_1 – ОСПМШ ГШ *1*.

Погрешность $\delta K''_{\text{ш}}$ возникает при операции "измерение $K_{\text{ш}}$", когда измеряется сигнал, пропорциональный $K_{\text{ш}}$. Рассуждая аналогично предыдущему, можно записать:

$$\boxed{\delta K''_{\text{ш}} = \left(1 + \frac{K_{\text{ш ип}}}{K_{\text{ш}} K_{\text{у}} d}\right)\frac{1}{Q}.} \qquad (3.67)$$

Если выполняется условие

$$G_1 >> K_{\text{ш}}, \qquad (3.68)$$

обычно справедливое при измерении $K_{\text{ш}}$ малошумящих усилителей с использованием газоразрядных ГШ с неослабленной мощностью, то основной является погрешность $\delta K''_{\text{ш}}$.

Если по какой-либо причине калибровочный сигнал делается малым, т.е.

$$G_1 << K_{\text{ш}}, \qquad (3.69)$$

то значительно возрастает и становится доминирующей погрешность $\delta K'_{\text{ш}}$.

В промежуточном случае, когда

$$G_1 \approx K_{\text{ш}}, \qquad (3.70)$$

следует учитывать обе составляющие погрешности ($\delta K'_{ш}$ и $\delta K''_{ш}$), т.е. пользоваться формулой (3.65) в полном виде.

Характер зависимостей $\delta K'_{ш}$ и $\delta K''_{ш}$ от коэффициента шума приемника показан на рис. 3.18 и 3.19.

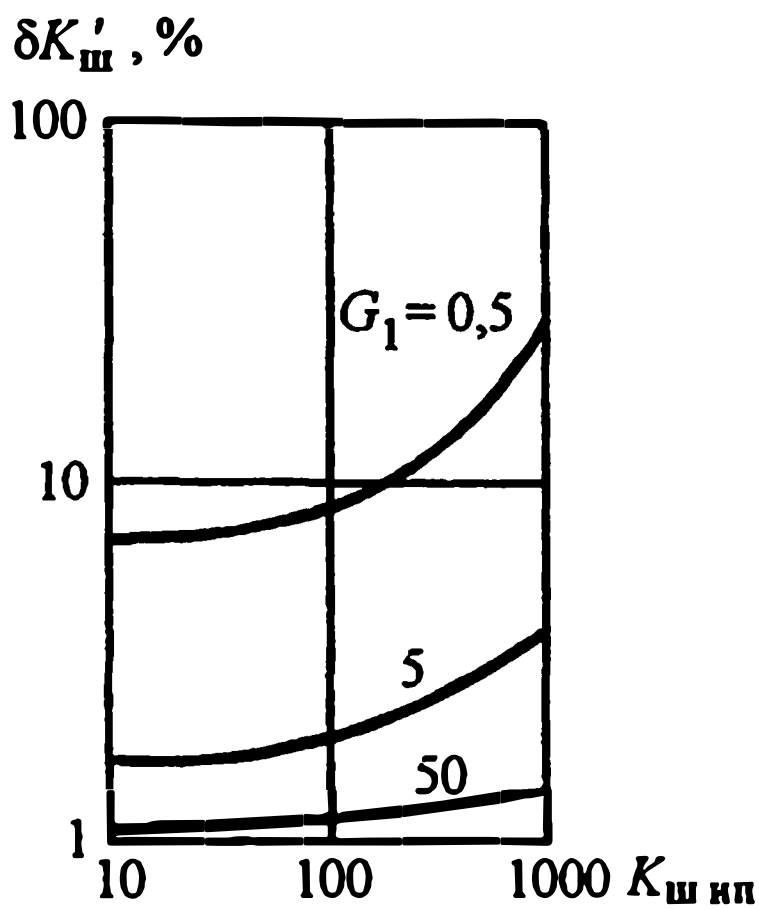


Рис. 3.18. Зависимость погрешности $\delta K'_{ш}$ от коэффициенте шума приемника при различных ОСПМШ ГШ ($K_{ш}$ = 3, $K_{у}$ = 100, Q = 100)

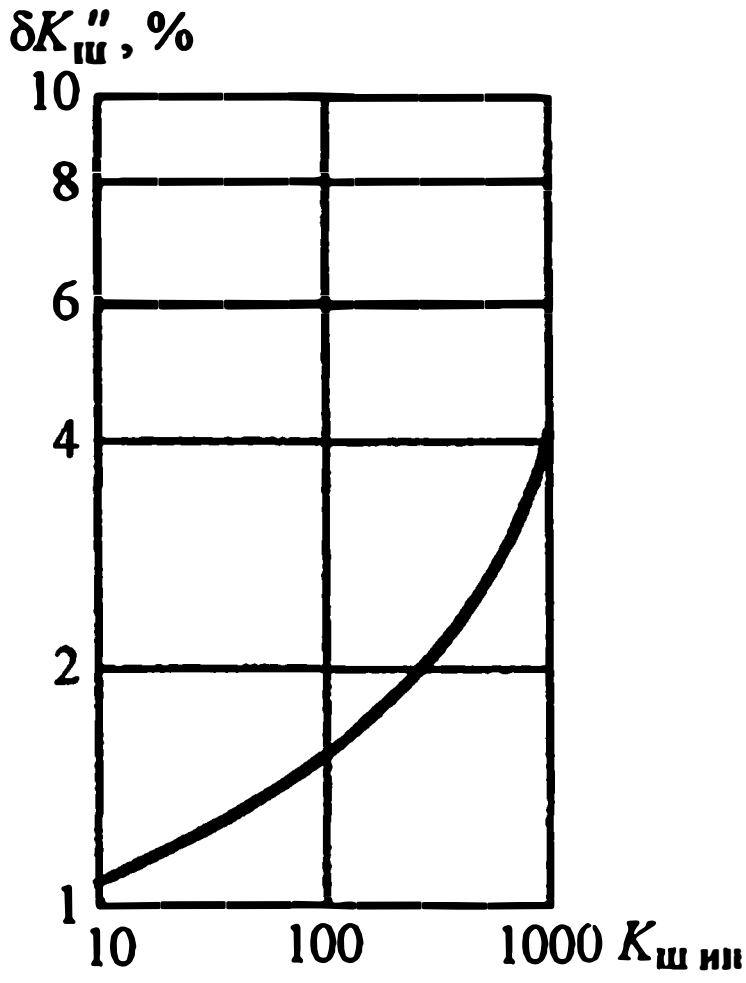


Рис. 3.19. Зависимость погрешности $\delta K''_{ш}$ от коэффициента шума приемника ($K_{ш}$ = 3, $K_{у}$ = 100, Q = 100)

Пользуясь формулами (3.65), (3.66) и (3.67), можно рассчитывать необходимый коэффициент шума измерительного приемника, модуляционный выигрыш и т.д., предварительно приняв известными остальные входящие туда величины.

Пример.

Флуктуационная погрешность $\delta K_{ш\,фл}$ измерений $K_ш$ СВЧ усилителя с $K_ш$ порядка 3 и $K_y \geq 10$ не должна превышать 1 %; известно также, что приемник обеспечивает модуляционный выигрыш $Q = 500$, $d \geq 0{,}9$ и $G_1 = 60$. Необходимо определить максимально допустимый коэффициент шума измерительного приемника.

Так как из условия видно, что выполняется соотношение (3.68), следует пользоваться формулой (3.67). Из формулы (3.67) следует, что

$$K_{ш\,ип} \leq \left(\delta K''_ш Q - 1\right) K_ш K_y d = \left(0{,}01 \cdot 500 - 1\right) \cdot 3 \cdot 10 \cdot 09 = 108 .$$

б) *Флуктуационный порог при измерении коэффициента усиления.*

При измерении K_y методом двух ГШ флуктуационная погрешность проявляется главным образом в момент отсчета показаний, связанных с работой генератора шума *2* (рис. 3.17).

Относительная величина этой погрешности

$$\boxed{\delta K_y = \left(1 + \frac{K_{ш\,ип}}{G_2}\right)\frac{1}{Q},} \qquad (3.71)$$

где G_2 – относительная СПМШ ГШ *2*.

Характер зависимости δK_y от $K_{ш\,ип}$ при разных значениях G_2 показан на рис. 3.20.

По допустимой величине погрешности измерения K_y с помощью формулы (3.71) могут быть выбраны необходимые значения $K_{ш\,ип}$, Q, G_2. Далее, по известным формулам, в свою очередь, можно определить при необходимости значения параметров, от которых зависят $K_{ш\,ип}$, Q, G_2.

в) *Минимальное отношение сигнал/шум на входе измерительного приемника с АРУ.*

Приведенное ко входу приемника отношение мощности шумов $G_1 K_y d$ (сигнал) от шумового генератора *1* к мощности шумов приемника и испытываемого усилителя $K_{шΣ} = K_ш K_y d + K_{ш\,ип}$ (шум) может быть записано следующим образом:

$$\boxed{n = \frac{G_1 K_y d}{K_{шΣ}} \approx \frac{G_1}{K_ш + K_{ш\,ип}/K_y d}.} \qquad (3.72)$$

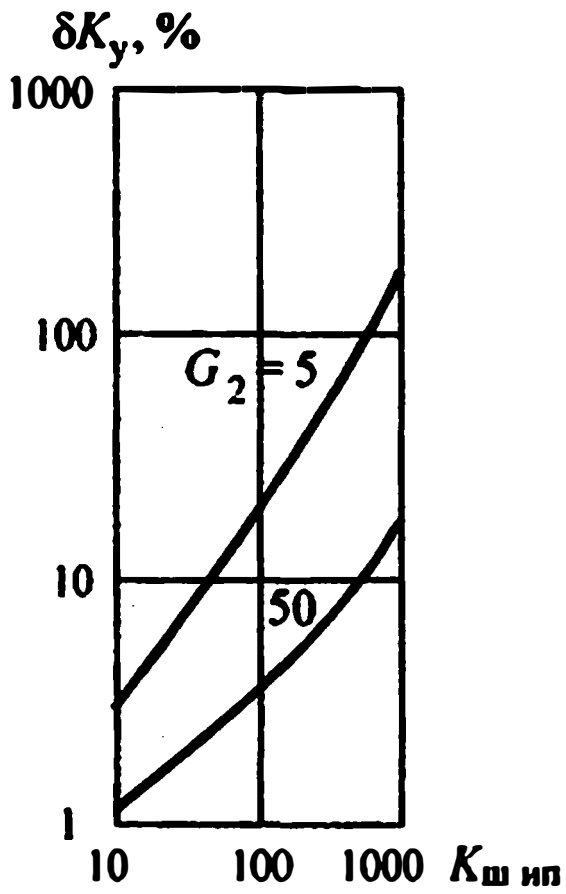


Рис. 3.20. Зависимость флуктуационной составляющей погрешности измерения $K_у$ от величины коэффициента шума приемника при $Q = 100$ и различных значениях ОСПМШ ГШ

Для устойчивой работы системы АРУ при настройке усилителя это отношение не должно становиться меньшим некоторой величины $n_{мин}$

$$\boxed{n \geq n_{мин}.} \qquad (3.73)$$

Величина $n_{мин}$ для измерительных приемников различных типов обычно определяется экспериментально. На рис. 3.21 показана зависимость n от величины $K_{ш\ ип}$ при различных значениях G_1 .

Нетрудно показать, что в режиме "измерение $K_ш$" относительный уровень флуктуаций (по отношению к полезному сигналу) в канале АРУ увеличен по сравнению с относительным уровнем флуктуаций в измерительном

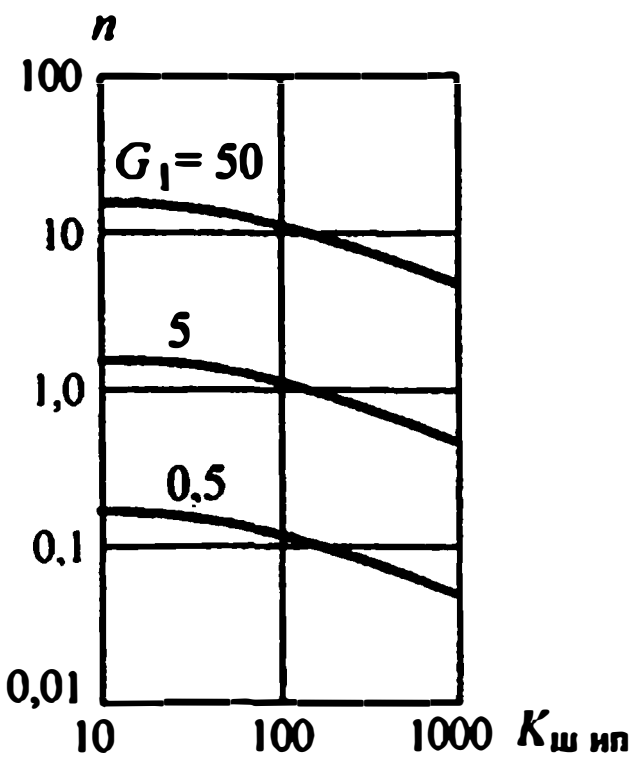


Рис. 3.2$_1$. Зависимость отношения сигнал/шум от величины коэффициента шума приемника при различных значениях ОСПМШ ГШ ($K_ш = 3$. $K_у d = 100$, $Q = 100$)

канале, во-первых, в $1 + K_{ш\Sigma}/G_1$ раз, и, во-вторых, в число раз, равное отношению напряжения задержки к напряжению смещения на управляющих электродах усилительных элементов УПЧ. Это увеличение флуктуаций при малых n достигает значительной величины, что, в конечном счете, приводит к нарушению работоспособности системы АРУ.

Кроме того, следует иметь в виду, что при малых n из-за влияния системы АРУ будет неизбежно возрастать флуктуационная погрешность при измерении $K_ш$.

Во многих случаях

$$\frac{K_{ш\,ип}}{K_у d} << K_ш, \tag{3.74}$$

и тогда условие (3.73) с учетом (3.72) может быть записано в следующем виде:

$$G_1 >> n_{мин} K_ш. \tag{3.75}$$

Пользуясь формулами (3.72), (3.73) и (3.75), можно оценивать пределы работоспособности установок в режиме работы с АРУ по пределам параметров исследуемого усилителя ($K_ш$ и $K_у$) и по параметрам измерительной установки (G_1, $K_{ш\,ип}$, d).

Таким образом, выражения, приведенные в настоящем разделе для погрешностей измерений $K_ш$ и $K_у$, вызванных собственными шумами приемника (формулы 3.65, 3.66, 3.67, 3.71), и условия работоспособности системы АРУ (формулы 3.72, 3.73, 3.75) позволяют при проектировании ИКШ выбирать необходимые значения ОСПМШ генераторов шума, а также коэффициент шума и модуляционный выигрыш приемника.

3.3.5 Требования к приемной части ИКШ прямого усиления

ИКШ прямого усиления [132] имеют некоторые преимущества перед супергетеродинными ИКШ. Здесь отпадает необходимость в гетеродинном генераторе и смесителе, прием сигналов происходит на одной частоте, т.е. отсутствует зеркальный канал приема. По этой причине исключается необходимость в применении фильтра зеркального канала, который должен перестраиваться по частоте строго синхронно с гетеродином.

Частотная селекция в ИКШ прямого усиления достигается с помощью полосно-пропускающего СВЧ фильтра. Необходимы также измерительный СВЧ усилитель и СВЧ квадратичный детектор, работающие в полосе рабочих частот исследуемого усилителя.

Для нормальной работы приемника прямого усиления в составе ИКШ в связи с широкополосностью поступающих шумовых сигналов необходимо выполнение ряда требований к элементам, входящим в состав приемника [22].

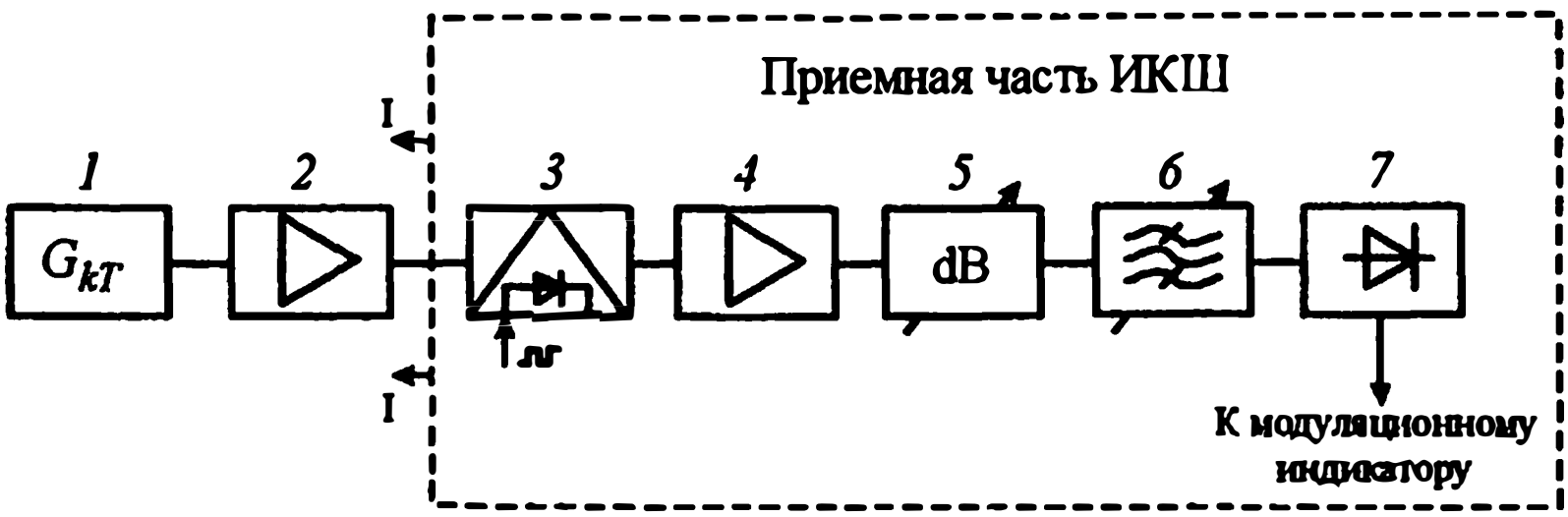


Рис. 3.22. Структурная схема ИКШ с приемником прямого усиления
1 – генератор шума, *2* – исследуемый усилитель, *3* – СВЧ модулятор, *4* – измерительный СВЧ усилитель, *5* – электрически управляемый ослабитель, *6* – перестраиваемый полосно-пропускающий фильтр, *7* – квадратичный детектор

На рис. 3.22 изображена упрощенная структурная схема ИКШ прямого усиления.

Напряжение сигнала на выходе квадратичного детектора *7* пропорционально значению измеряемого коэффициента шума $K_{ш}$ и, как видно из структурной схемы, может быть выражено следующим образом:

$$u_{вых} = K_{ш} K_{у} K_{у\,изм} d_{тр} d_{фп} K_{д} \Delta f_{ф} k T_0, \qquad (3.76)$$

где $K_{у}$ и $K_{у\,изм}$ – коэффициенты усиления исследуемого и измерительного усилителей; $d_{тр}$ – коэффициент передача элементов *3*, *5* тракта ($0 < d < 1$); $d_{фп}$ – коэффициент передачи фильтра в полосе пропускания; $K_{д}$ – коэффициент передачи квадратичного детектора (В/Вт); $\Delta f_{ф}$ – полоса пропускания фильтра; k – постоянная Больцмана; $T_0 = 293$ К; $K_{ш}$ – коэффициент шума усилителя.

Для обеспечения минимально необходимого напряжения этого сигнала ($u_{вых\,мин}$) должно выполняться следующее условие:

$$K_{у\,изм} \geq \frac{u_{вых\,мин}}{K_{ш\,мин} K_{у\,мин} d_{тр} d_{фп} K_{д} \Delta f_{ф} k T_0}, \qquad (3.77)$$

где $K_{ш\,мин}$ и $K_{у\,мин}$ – минимально возможные значения коэффициентов шума и усиления исследуемого усилителя.

Коэффициент шума приемники $K_{ш\,ип}$ (сеч. I–I, рис. 3.22), должен удовлетворять требованиям, сформулированным в подразделе 3.3.4:

$$K_{ш\,ип} \leq K_{ш\,мнн} K_{у\,мин} \left(Q \delta K_{ш\,фл} - 1\right), \qquad (3.78)$$

где $Q = \sqrt{\Delta f_ф \tau}$ – модуляционный выигрыш схемы обработки сигнала на выходе квадратичного детектора;

τ – постоянная времени индикатора приемника;

$\delta K_{ш\,фл}$ – допустимая величина составляющей относительной погрешности измерения $K_ш$, вносимой флуктуациями.

Одним из определяющих является требование к коэффициенту передачи фильтра в полосе заграждения $d_{ф3}$, т.к. при малом затухании в фильтре сигнал на выходе квадратичного детектора будет пропорционален не только мощности шумовых сигналов в пределах рабочей полосы пропускания фильтра, но и мощности внеполосных сигналов шумового спектра.

Необходимым требованием к коэффициенту передачи фильтра, в полосе заграждения является условие:

$$d_{ф3} \le \frac{d_{фп} d_{тр} \Delta f_ф \delta_{вн}}{100 \Delta f_{уи}}, \qquad (3.79)$$

где $\Delta f_{уи}$ – полоса пропускания измерительного усилителя;

$\delta_{вн}$ – относительная погрешность измерений из-за внеполосных сигналов, %.

Для обеспечения достаточной разрешающей способности ИКШ по частоте должно выполняться условие:

$$\Delta f_ф << \Delta f_у, \qquad (3.80)$$

где $\Delta f_у$ – ширина полосы частот исследуемого усилителя.

Это условие может быть конкретизировано, если заранее задается абсолютная разрешающая способность установки $\Delta f_{разр}$, следующий образом:

$$\Delta f_ф \le \Delta f_{разр}. \qquad (3.81)$$

Условия (3.80) и (3.81) не должны при этом противоречить выполнению требований (3.77) и (3.78), что возможно, например, при выборе очень малой полосы $\Delta f_ф$.

Общие требования к установке можно дополнить очевидными условиями о том, что рабочие диапазоны частот измерительного усилителя и квадратичного детектора $\Delta f_д$ должны соответствовать рабочему диапазону исследуемого усилителя. При этом должны выполняться условия:

$$\Delta f_{уи} \ge \Delta f_у, \qquad (3.82)$$

$$\Delta f_д \ge \Delta f_у. \qquad (3.83)$$

Условия (3.82) и (3.83) должны выполняться лишь с небольшим запасом, т.к. при слишком большой полосе $\Delta f_{уи}$ трудно выполнить условие (3.79), в то

же время при неоправданно большой полосе $\Delta f_д$ возрастает шумовой вклад детектора.

Следует указать также, что для обеспечения точных измерений $K_ш$ измерительный усилитель *4* должен обладать высокой линейностью, а квадратичный детектор строго сохранять свою характеристику во всем диапазоне приходящих сигналов.

Интенсивность и результаты работ, проводимых в настоящее время по разработке широкополосных малогабаритных транзисторных усилителей [27, 134], узкополосных перестраиваемых ферритовых фильтров [3, 201], широкополосных квадратичных СВЧ детекторов [119, 141, 189] позволяют надеяться, что в ближайшие годы весь диапазон СВЧ будет обеспечен элементами, необходимыми для создания широкополосных перестраиваемых приемников прямого усиления, необходимых, в частности, для создания соответствующих ИКШ.

3.4 НЕКОТОРЫЕ МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА

В настоящем разделе описаны практически разработанные измерители коэффициента шума. Выбор представленных измерителей преследует цели:
– проследить на ряде примеров основные этапы совершенствования ИКШ,
– предоставить краткие сведения о некоторых наиболее характерных моделях ИКШ, выпускаемых в настоящее время в нашей стране и за рубежом.

3.4.1 Прибор “ИКШ”

Измеритель коэффициента шума типа “ИКШ” [109] является первым автоматизированным ИКШ, разработанным в Советском Союзе. В основу его работы, также как и приборов [132, 150, 151, 165] , положен метод *n*-кратного превышения в автоматизированном варианте. Мощность ГШ, присоединенного ко входу усилителя (рис. 3.23), модулируется по закону низкочастотного меандра. Индикация ведется по переменной составляющей напряжения на

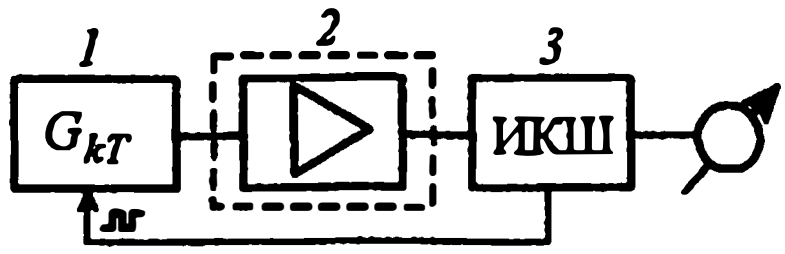


Рис. 3.23. Структурная схема прибора “ИКШ”
1 – генератор шума, *2* – исследуемый усилитель, *3* – “ИКШ”

выходе детектора. Шкала выходного прибора строится в соответствии с формулой (2.15) при условии

$$\alpha_2 = \text{const.} \qquad (3.84)$$

Выполнение условия (3.84) достигается введением в приемник системы АРУ, которая автоматически поддерживает постоянной сумму шумов ГШ и шумов исследуемого усилителя. В результате показания прибора α_1 однозначно связаны с измеряемым $K_ш$, т.е. достигается непосредственный отсчет измеряемой величины. Благодаря системе АРУ обеспечивается возможность настройки усилителя на минимальный $K_ш$ по показаниям выходного прибора. Непосредственный отсчет и возможность настройки на минимальный $K_ш$ являются достоинствами измерителя.

К недостаткам прибора "ИКШ" можно отнести то, что в составе измеренной величины $K_ш$ содержится часть, обязанная собственному шуму измерительного приемника, и для нахождения $K_ш$ усилителя в чистом виде необходимо вводить соответствующую поправку (формула 2.8, подраздел 2.2).

3.4.2 Измерительные приемники ИП-3, ИП-5

В основу работы этих измерителей [2, 18] положен метод линейной шкалы (подраздел 2.5) в автоматизированном варианте.

Приемники ИП-3 и ИП-5 имеют аналогичные функциональные схемы, отличием модели ИП-5 является исполнение ее на интегральных микросхемах. Приемник работает в составе установки для измерения коэффициента шума и является измерителем отношений шумовых сигналов на промежуточной частоте. Для удобства сравнения сигналов приемник имеет двухканальное устройство, содержит селектор и систему автоматической регулировки усиления (АРУ). На рис. 3.24 показана упрощенная структурная схема приемника с двумя подключенными к его входу обобщенными источниками шумовых сигналов ИС1 и ИС2, которыми могут быть ГШ, усилитель и др. Селектор *6* поочередно с частотой 20 Гц подключает к выходу квадратичного детектора *4* измерительный канал *8* или канал АРУ *7*.

Источники ИС1 и ИС2 включаются с частотой 80 Гц таким образом, что в каждый из каналов попадает по два импульса сигнала соответственно от источников ИС1 и ИС2 (рис. 3.25*а*, *б*, *в*). Каналы *7* и *8* содержат усилители, синхронные детекторы и усредняющие фильтры нижних частот, т.е. представляют собой низкочастотные обрабатывающие схемы модуляционного радиометра.

На усилитель промежуточной частоты (УПЧ) подается управляющее напряжение системы отрицательной обратной связи с выхода канала АРУ. Этим обеспечивается работа системы АРУ, поддерживающей постоянным уровень

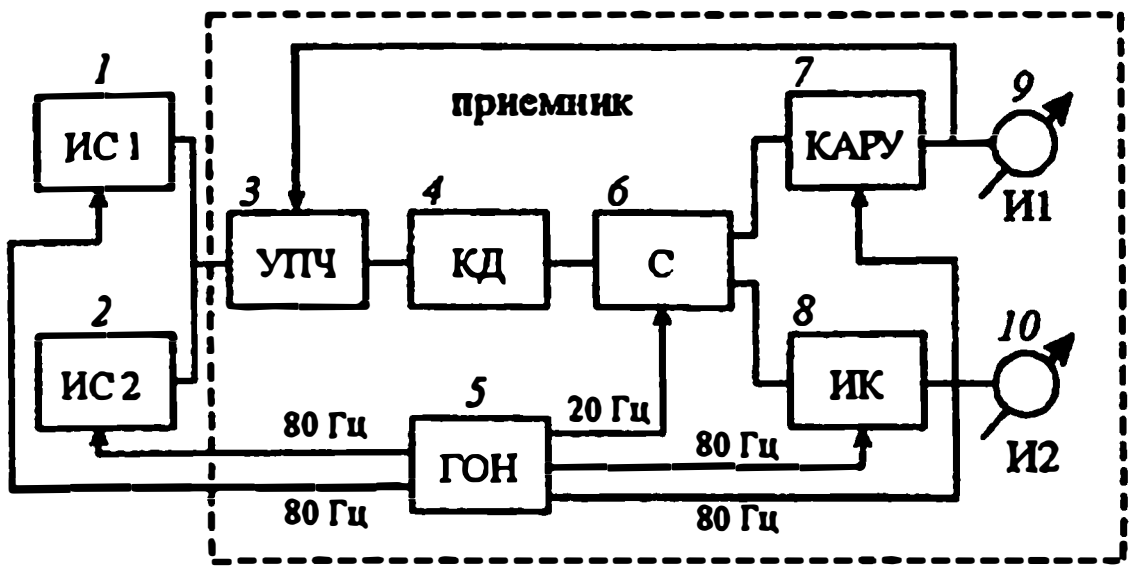


Рис. 3.24. Структурная схема приемника ИП-5 с подключенными источниками сигнала
1, *2* – источники шумовых сигналов, *3* – усилитель промежуточной частоты, *4* – квадратичный детектор, *5* – генератор опорного напряжения, *6* – селектор, *7* – канал системы АРУ, *8* – измерительный канал, *9*, *10* – индикаторные приборы

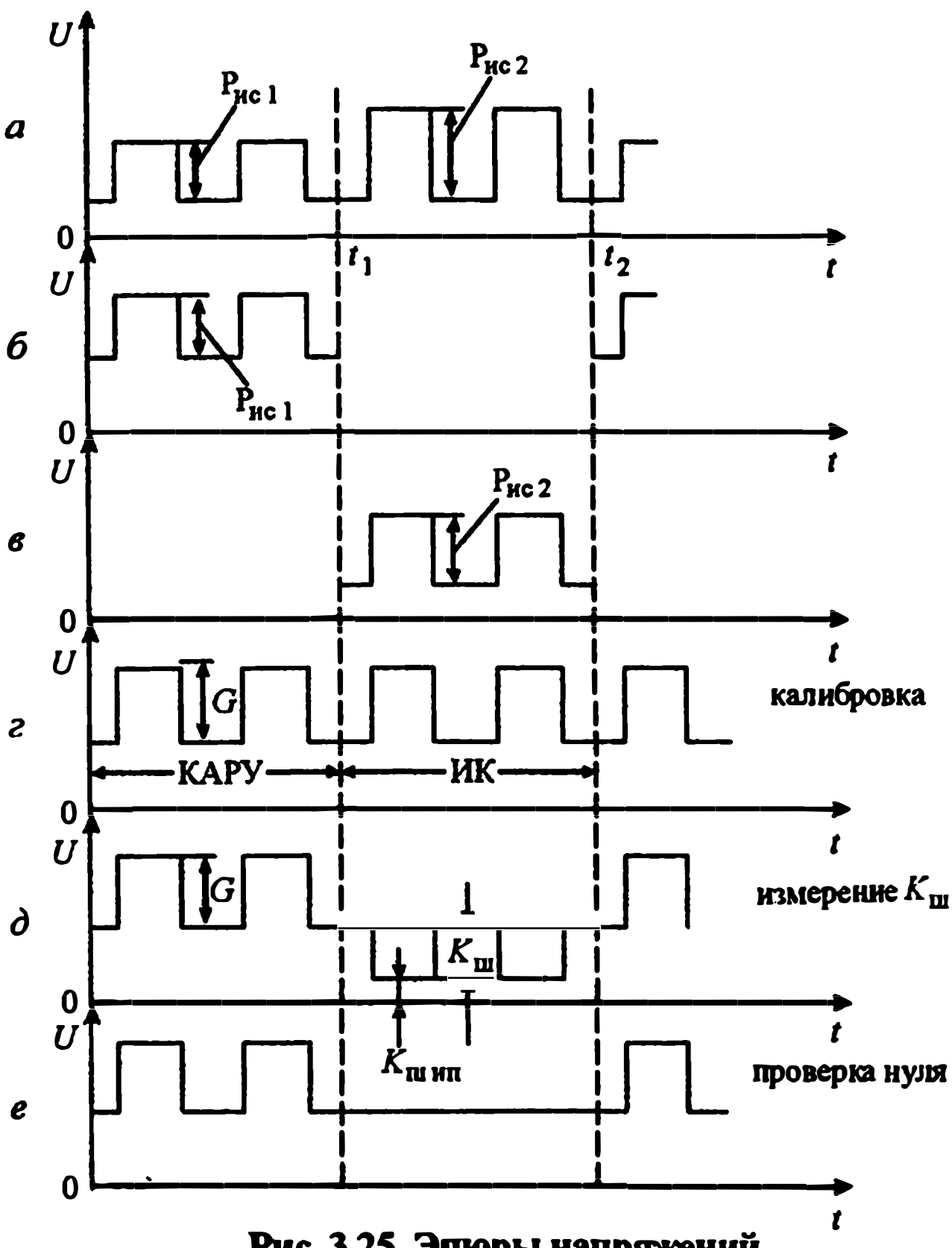


Рис. 3.25. Эпюры напряжений
а) на входе селектора (рис. 3.24), *б*) на входе канала АРУ, *в*) на входе измерительного канала, *г*) на входе селектора в режиме "калибровка" (рис. 3.26), *д*) в режиме "измерение $K_ш$", *е*) в режиме "проверка нуля". t_1, t_2 – моменты переключения селектора

сигнала от источника ИС1 на индикаторе И1. Показания индикатора И2 всегда пропорциональны мощности источника ИС2.

На рис. 3.26 показана упрощенная структурная схема установки для измерения $K_ш$ СВЧ усилителя, где в качестве ИС1 выступает генератор шума, а в качестве ИС2 – СВЧ усилитель. При этом используется один индикатор, устанавливаемый на выходе измерительного канала.

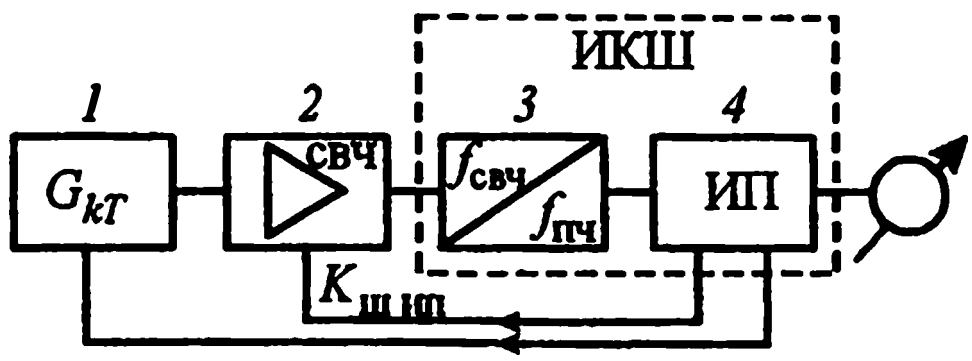


Рис. 3.26. Структурная схема установки для измерения $K_ш$ СВЧ-усилителя с использованием приемников ИП-3 или ИП-5

1 – генератор шума, *2* – исследуемый усилитель, *3* – преобразователь частоты, *4* – измерительный приемник ИП-5

Модуляция шума усилителя производится либо с помощью СВЧ модулятора, либо по его питанию. Поэтому шум усилителя (его коэффициент шума) измеряется независимо от собственного шума ИКШ ($K_{ш\,ип}$).

Измерения выполняются в два этапа: "калибровка" и "измерение". При операции "калибровка" модулируется только шум ГШ, форма модуляции показана на рис. 3.25*г*. В измерительный канал (ИК) также, как и в канал АРУ (КАРУ), поступают импульсы, пропорциональные ОСПМШ ГШ (G). Ручкой "калибровка", регулирующей усиление, устанавливается на выходном индикаторе показание, численно равное G.

При операции "измерение" форма модуляции соответствует рис. 3.25*д*, в измерительный канал подаются импульсы, полученные в результате модуляции шума исследуемого усилителя, показания индикатора при этом равны коэффициенту шума усилителя (см. подраздел 2.5).

Для проверки нуля выходного индикатора используется программа модуляции, показанная на рис. 3.25*е*.

Система АРУ, работающая по опорному сигналу от ГШ, позволяет проводить непосредственную настройку СВЧ усилителя на минимальный шум независимо от изменений коэффициента усиления этого усилителя.

В приемнике ИП-5 предусмотрен режим измерения шумовой температуры усилителя с непосредственным отсчетом по шкале по методу, описанному в подразделе 2.10. При этом для повышения точности могут быть использованы низкотемпературные шумовые источники.

Сигнал, компенсирующий шумовую температуру нагрузки. подключенной ко входу усилителя, формируется из сигнала ГШ, поэтому случайные изменения K_y усилителя и приемника не вызывают дополнительной погрешности компенсации [18].

Приемник позволяет также сравнивать СПМШ двух ГШ, что дает возможность использовать его при градуировке ГШ и при измерении коэффициента усиления СВЧ усилителя методом двух ГШ (подраздел 2.11).

Таким образом, использование в приемниках ИП-3 и ИП-5 модуляционного метода и метода линейной шкалы обеспечивает их высокую чувствительность, удобство настройки усилителей и точность отсчетов, исключает влияние на показания выходного прибора собственных шумов измерительной аппаратуры. Последнее обстоятельство особенно важно при измерении параметров электронных приборов в процессе их разработки и выпуска и является отличительной особенностью описываемых приемников.

Основные технические характеристики измерительного приемника ИП-5.

– Входные частоты (в зависимости от сменного УПЧ):	60 МГц 5 МГц
– Входная полоса пропускания	2 МГц
– Измеряемые отношения СПМШ	0–30 дБ
– Погрешность измерения отношений СПМШ	± 0,15 дБ
– Обеспечивает питание двух газоразрядных или полупроводниковых ГШ	
– Обеспечивает питание двух пинмодуляторов	
– Габариты	615×488×342 мм
– Масса	40кг

3.4.3 Измерительный приемник ИПМ-1

Приемник предназначен для измерения отношений СПМШ шумовых сигналов на промежуточной частоте и представляет собой трехканальную систему с временны́м разделением каналов [25]. Показание на выходе каждого канала пропорционально мощности поступающего шумового сигнала и регистрируется отдельным индикатором.

В основе работы приемника лежит метод линейной шкалы.

Измеряемыми сигналами в зависимости от вида измерений могут быть шумы генераторов шума, усилителей, преобразователей и т.д.

Поясним работу приемника на примере измерения коэффициентов шума и усиления. На рис. 3.27 приведена упрощенная структурная схема установ-

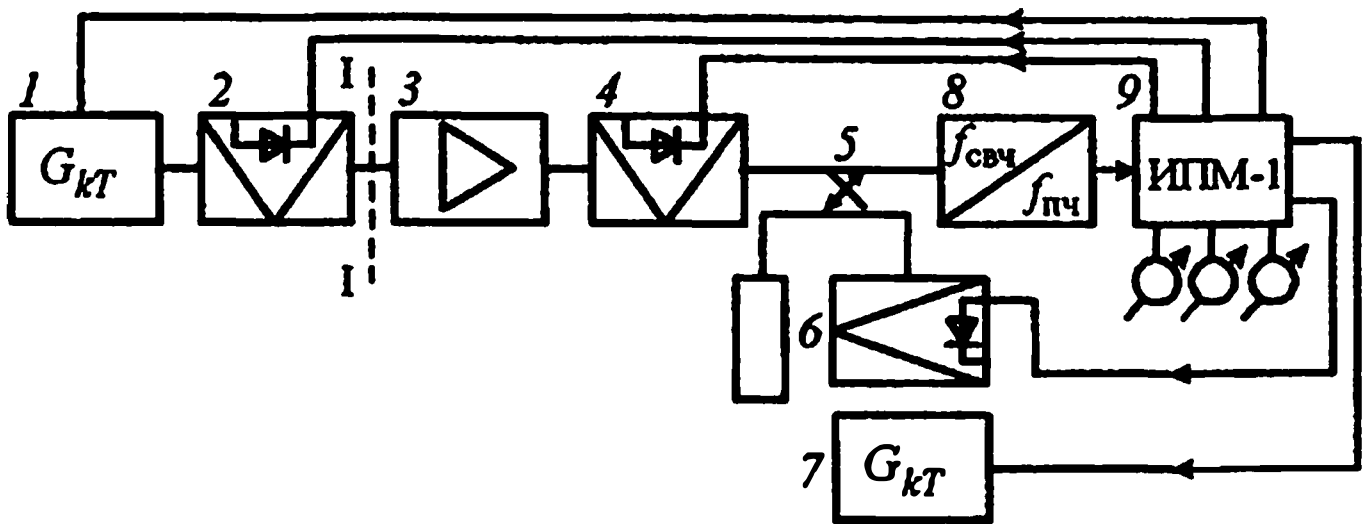


Рис. 3.27. Структурная схема установки для измерения $K_ш$ и $K_у$ с приемником ИПМ-1

ки, предназначенной для этой цели. Используется модуляционный метод измерений; при этом показания индикаторов измерительного приемника пропорциональны СПМШ амплитудно-модулированных источников шума: ГШ и СВЧ усилителя. Модуляция по необходимому закону осуществляется либо по питанию, либо СВЧ модуляторами. СВЧ сигналы преобразуются в сигналы промежуточной частоты, после чего подаются на вход приемника.

Коэффициент шума СВЧ усилителя определяется путем сравнения его собственного шума с шумом заранее отградуированного генератора шума *1*.

Коэффициент усиления определяется путем сравнения показаний приемника при включении генераторов шума *1* или *7*.

Измерения проводятся по программе повторяющихся циклов (рис. 3.28). Период одного цикла $T_ц$ разбивается на шесть одинаковых тактов. Длительность такта

$$T_т = T_ц / 6. \qquad (3.85)$$

На рис. 3.28 схематически показано изменение приведенной к сеч. I (см. рис. 3.27) СПМШ генераторов шума ($G_{гш1}$, $G_{гш2}$), СВЧ усилителя ($G_{ус}$) и СВЧ измерительного приемника ($G_{ип}$) в течение цикла.

Сигналы ГШ и СВЧ усилителя амплитудно модулированы с частотой 5 КГц для обеспечения отделения этих сигналов с помощью синхронного детектирования от фона собственных шумов измерительного приемника. Период цикла измерений можно условно разбить на три временных интервала (первый–второй, третий–четвертый и пятый–шестой такты), каждый из которых соответствует прохождению сигналов в одном автономном канале измерений, имеющем свой индикатор на выходе. В каждом канале применен дифференциальный метод измерений, сущность которого состоит в том, что результирующий выходной сигнал канала формируется как разность значений сигналов в двух соседних тактах (рис. 3.29). Для этого применены селекторы, выделяющие сигналы каждого такта, интеграторы, усредняющие эти сигналы, и операционные усилители, работающие в дифференциальном режиме.

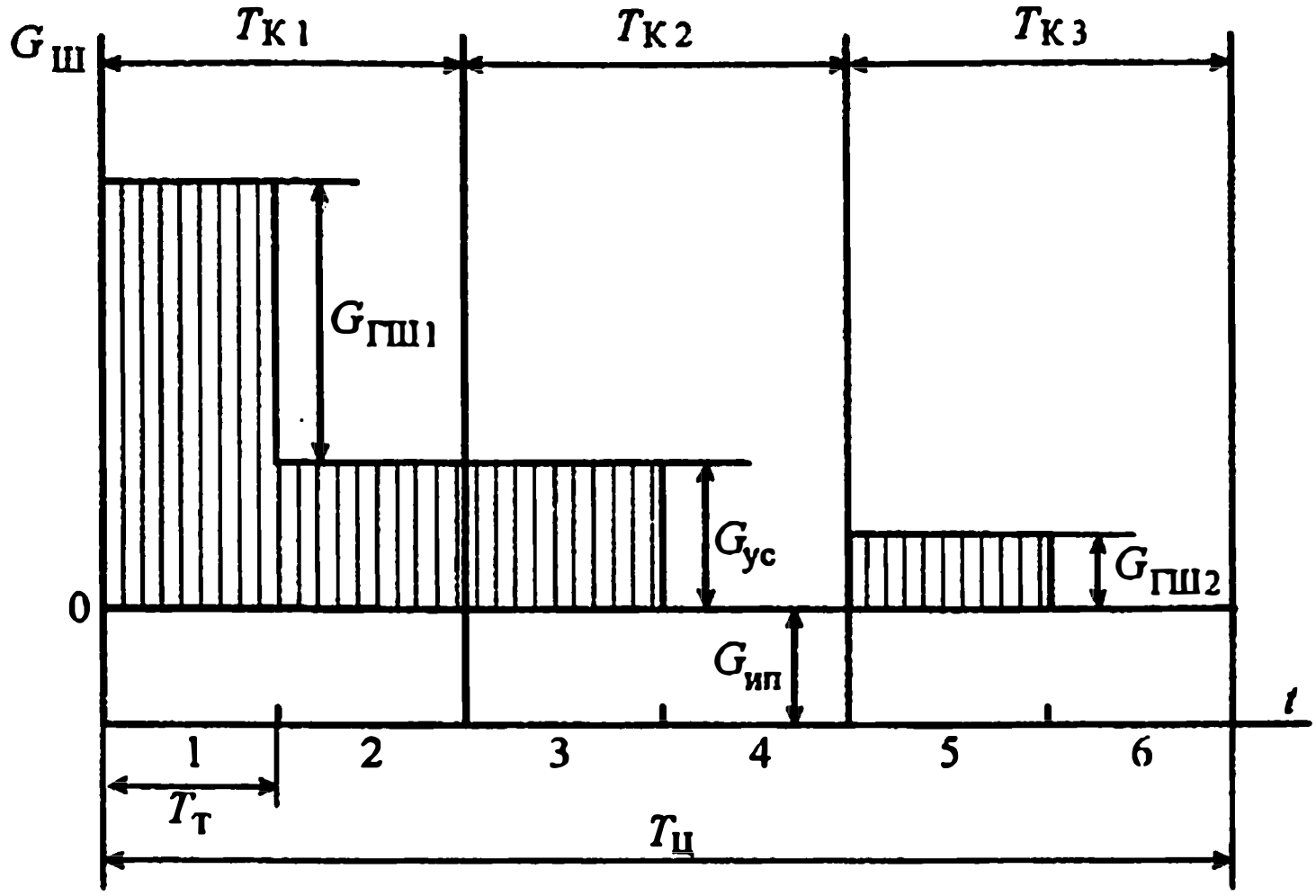


Рис. 3.28. Изменение СПМШ ГШ, СВЧ усилителя и СВЧ измерительного приемника в течение цикла

1–6 – номера тактов, штриховкой показана модуляция с частотой 5 КГц.

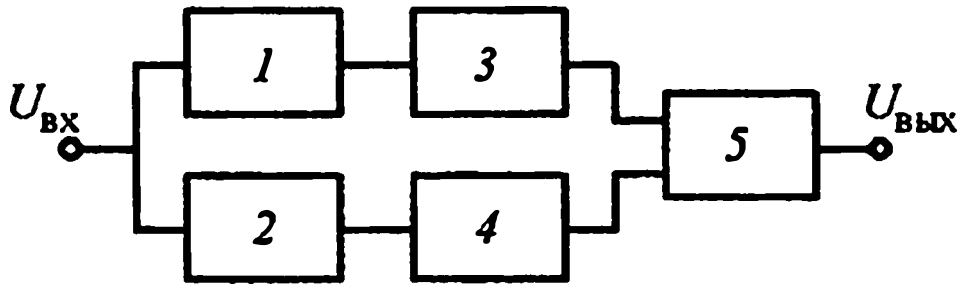


Рис. 3.29. Структурная схема измерительного канала

1, *2* – селекторы, *3*, *4* – интеграторы, *5* – дифференциальный каскад

В результате, как видно из рис. 3.28, на выходе измерительных каналов появляются напряжения, соответственно пропорциональные СПМШ ГШ, СПМШ собственных шумов усилителя (что может быть пересчитано в коэффициент шума) и СПМШ ГШ 2.

При измерения $K_ш$ калибровка проводится путем установки в первом канале показания, численно равного относительной СПМШ первого ГШ. Так как коэффициенты передачи всех каналов строго одинаковы, то показание индикатора второго канала оказывается при этом равным $K_ш$ СВЧ усилителя.

Коэффициент усиления определяется как выраженная в дБ разность показаний в первом и третьем каналах, калибровка устанавливается с учетом поправки на разность СПМШ первого и второго ГШ (подраздел 2.11).

Наличие автономных индикаторов в каждом канале позволяет в процессе измерений $K_ш$ и $K_у$, в отличие от других аналоговых ИКШ, проводить контроль калибровки непрерывно.

Структурная схема измерительного приемника показана на рис. 3.30. Предусмотрен промежуточный выход ("Вых 1") суммарного сигнала (до разделения по каналам) для возможности использования его при работе с внешней ЭВМ по методу обработки мгновенных значений [20].

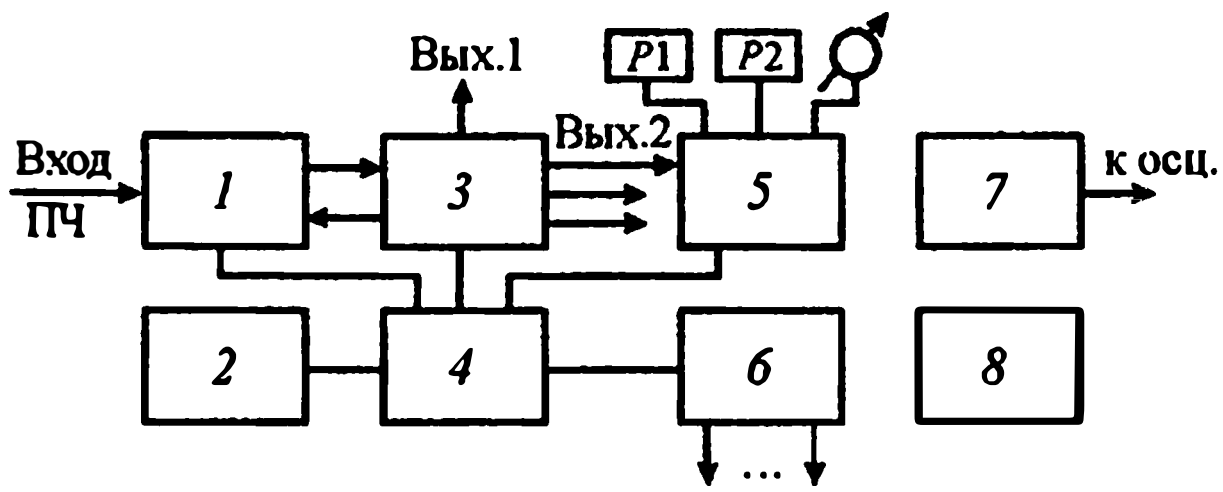


Рис. 3.30. Структурная схема измерительного приемника ИПМ-1

1 – УПЧ и квадратичный детектор, *2* – генератор и имитатор, *3* – измерительный канал и АРУ, *4* – система коммутации, *5* – плата индикаторов, *6* – плата питания ГШ, ПМ и СВЧ усилителя, *7* – плата контроля, *8* – блок питания

Приемник имеет два цифровых и один аналоговый индикатор. Аналоговый индикатор в сочетании с системой АРУ удобен при настройке исследуемого прибора на минимальное значение $K_ш$.

Сигналы трех аналоговых выходов могут быть поданы на АЦП ЭВМ для реализации измерений $K_ш$ и $K_у$ по методу обработки усредненных значений [20].

Приемник содержит встроенную систему самоконтроля [11], включающую имитатор, вырабатывающий напряжение, аналогичное изображенному на рис. 3.28, но с заданным соотношением амплитуд, т.е. соответствующее известным значением $K_ш$ и $K_у$. Эти значения приемник должен показывать при включении имитатора.

Основные технические характеристики измерительного приемника ИПМ-1

– Входные частоты (в зависимости от сменного УПЧ):	5 МГц 60 МГц 200–2100 МГц
– Измеряемые отношения СПМШ	0–20 дБ
– Погрешность измерения отношений СПМШ (при работе совместно с ЭВМ погрешность может быть уменьшена)	± 0,15 дБ
– Обеспечивает питание двух полупроводниковых ГШ и трех пинмодуляторов	
– Габариты	340×157×270 мм
– Масса	11 кг

Программа работы приемника может адаптироваться к конкретному виду СВЧ тракта.

Приемник ИПМ-1 является универсальные малогабаритным прибором для сравнения шумовых сигналов по СПМШ и в сочетании с соответствующими СВЧ трактами позволяет измерять $K_ш$ и $K_у$ усилителей и приемно-усилительных устройств, а также проводить градуировку ГШ в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн.

3.4.4 Автоматизированный измеритель параметров СВЧ четырехполюсников с ЭВМ

В [115] описано одно из первых применений средств вычислительной техники в установке для одновременного измерения коэффициентов шума и усиления СВЧ четырехполюсников. В основе измерений лежит метод линейной шкалы [168], при этом использован модуляционный измерительный приемник [18].

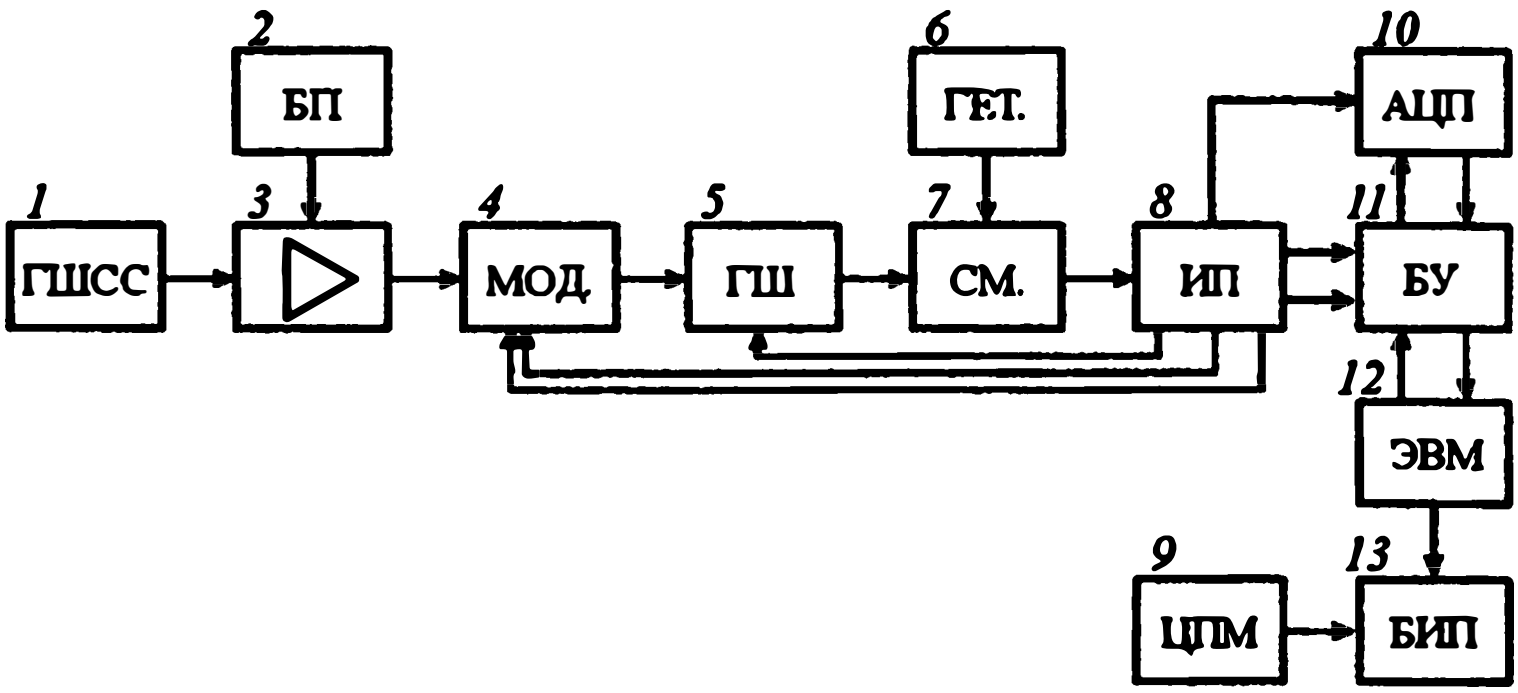


Рис. 3.31. Структурная схема автоматизированного измерителя $K_ш$ и $K_у$ с применением ЭВМ

1 – ГШСС, *2* – блок питания, *3* – исследуемый четырехполюсник, *4* – модулятор, *5* – ГШ, *6* – гетеродин, *7* – смеситель, *8* – модуляционный измерительный приемник, *9* – цифропечатающая машина, *10* – аналого-цифровой преобразователь, *11* – блок управления, *12* – ЭВМ, *13* – блок интерфейсных плат

На рис. 3.31 приведена структурная схема измерителя. Элементы *1*–*8* и программа их работы соответствуют методу линейной шкалы, описанному в подразделе 2.5. Однако обработка сигналов измерительного и опорного каналов (до их усреднения) производится не радиометрическими способами, а цифровыми.

Коэффициент шума определяется по формуле:

$$K_ш = G\frac{u_1 K_a}{u_2} + \frac{1}{K_у}, \qquad (3.86)$$

где G – ОСПМШ ГШ,
u_1 и u_2 – выходные напряжения соответственно в измерительном и опорном каналах,
K_a – коэффициент деления низкочастотного аттенюатора приемника,
K_y – коэффициент усиления четырехполюсника.

Коэффициент усиления равен:

$$K_y = 10 \lg \frac{K_{пр} u_2}{u_3} + 10 \lg \Delta K_y, \qquad (3.87)$$

где u_3 – напряжение, пропорциональное СПМШ ГШ *5*,
$K_{пр}$ – коэффициент ослабления в общем тракте приемника,
ΔK_y – поправочный коэффициент, учитывающий разность СПМШ ГШСС *1* и ГШ *5*.

Программно-модулированные сигналы с выходов измерительного и опорного каналов интегрируются с помощью "идеального интегратора" [106] в каскадах АЦП *10*. Время интегрирования составляет единицы миллисекунд, тогда как эффективная постоянная времени – единицы секунд. Это свойство интегратора во многом определяет выигрыш в быстродействии измерителя. Полученные величины преобразуются в цифровую форму и через блок управления *11* вводятся в ЭВМ *12*. Математическая обработка в соответствии с формулами (3.86) и (3.87) проводится по разработанной программе. Значения $K_ш$ и K_y находятся как средние из $m_ц$ циклов измерений по $n_и$ импульсов в каждом цикле, индицируются на экране ЭВМ и документируются с помощью ЦПМ *9*. Наряду со значениями $K_ш$ и K_y вычисляется и отражается на выходном индикаторе также величина дисперсии результатов измерений. Таким образом, применение измерительного приемника в сочетании с вычислительными средствами позволяет сократить время измерения параметров и проводить в процессе измерений оценку достоверности результатов по величине дисперсии.

Использование внешней ЭВМ по сравнению со встроенным микропроцессором дает возможность гибкого изменения программы и более широкие возможности при измерении и обработке сигналов.

Повышенное быстродействие описываемой установки позволило решить задачу об определении времени готовности твердотельных усилителей по коэффициенту шума.

3.4.5 Панорамные ИКШ серии "Х5-"

Панорамные цифровые ИКШ серии "Х5-" [79] разработаны для широкого диапазона частот от 0,01 до 37,5 ГГц. Наличие встроенного микропроцес-

сора расширяет функциональные возможности измерителя, автоматизирует управление [101]. С помощью микропроцессора достигается следующее:
– автоматизированный ввод поправки на частотный ход СПМШ используемых генераторов шума,
– ввод поправок, учитывающих частотный ход собственных шумов и коэффициента передачи измерителя,
– автоматизирован выбор пределов измерения,
– осуществляется функция управления частотой,
– управление генераторами шума,
– управление временем измерения,
– управление всем процессом измерения.

Упрощенная структурная схема измерителя приведена на рис. 3.32.

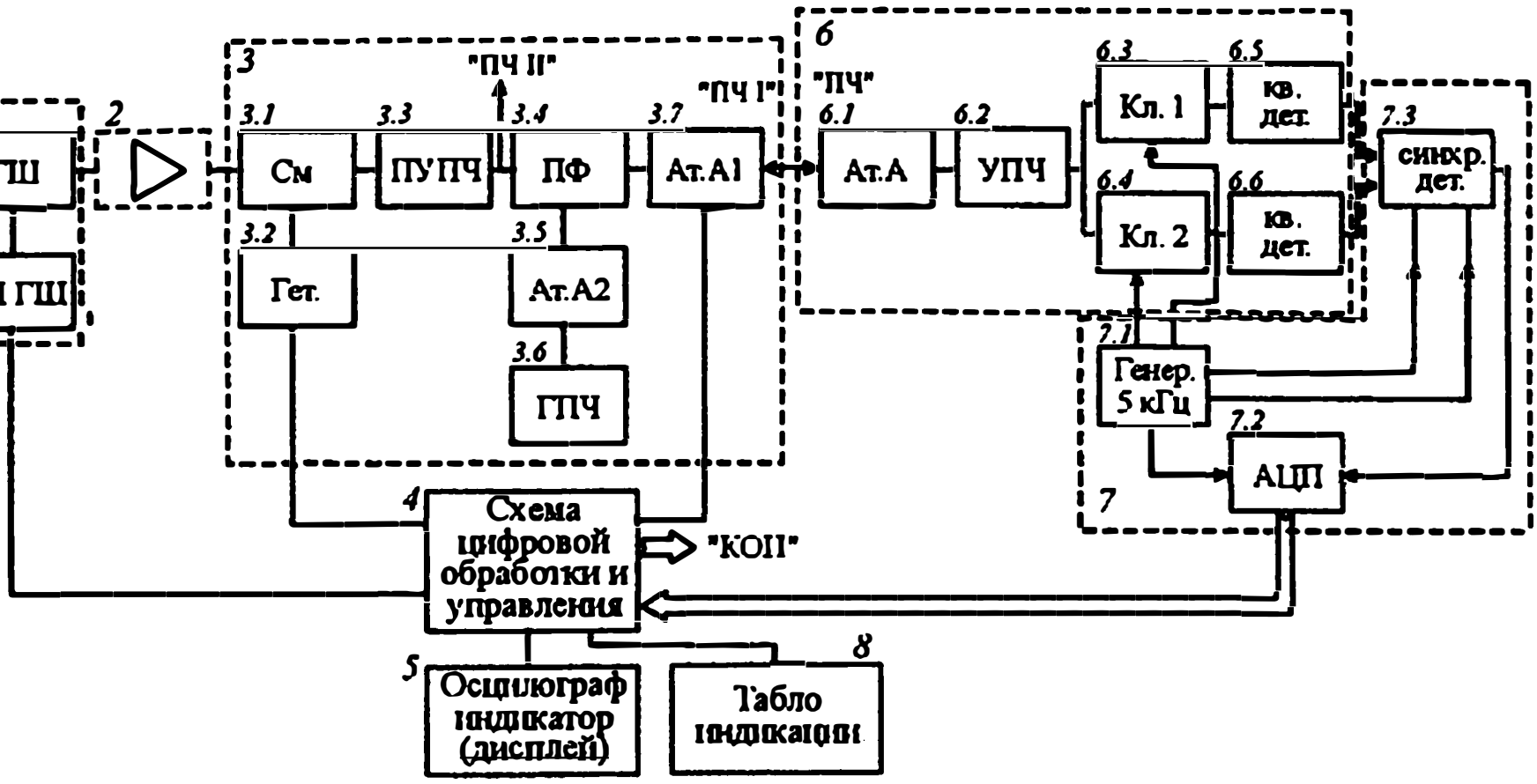


Рис. 3.32. Структурная схема цифрового панорамного ИКШ серии "Х5-"
1 – генератор шума, *2* – исследуемый объект, *3* – преобразователь, *4* – схема цифровой обработки и управления, *5* – осциллографический индикатор, *6* – узел УПЧ и квадратичного детектора, *7* – узел АЦП, *8* – табло цифровой индикации

Шумовой сигнал от генератора шума *1* через исследуемый объект *2* поступает на вход преобразователя частоты *3*. Частота преобразования (т.е. рабочая частота измерителя) определяется частотой электрически управляемого гетеродинного генератора *3.2*. Перестройка частоты производится либо вручную (режим работы на фиксированной частоте), либо автоматически – для панорамного режима работы. Через ПУПЧ *3.3* полосовой фильтр *3.4*, аттенюатор А1 сигналы поступают на узел УПЧ и квадратичного детектора. Генератор промежуточной частоты *3.6* и аттенюатор А2 используются при самоконтроле линейности усилителей и затухания аттенюатора А. Ступенча-

тый аттенюатор А может управляться с передней панели, а также автоматически таким образом, чтобы сигнал на входе УПЧ *6.2* не выходил за установленные пределы. Далее сигнал разветвляется на два канала, в каждом из которых имеется ключ и квадратичный детектор. Ключи запирают сигналы противофазно с частотой 5 КГц. Назначение модуляции состоит в том, что она позволяет освободиться от постоянной составляющей напряжения на выходе квадратичных детекторов, произвести линейное синхронное детектирование в синхронном детекторе *7.3*, обеспечить уменьшение фликкер-шума и фона. Путем обратной демодуляции противофазных сигналов удается избежать влияния флуктуационной погрешности, возникающей за счет введения модуляции. Далее, напряжения, пропорциональные мощностям поступающих сигналов, преобразуются в коды с помощью интегрирующего АЦП *7.2* и передаются в схему цифровой обработки и управления *4*, содержащую микропроцессор.

Управление измерителем осуществляется с помощью клавиатуры на передней панели. Обработанная информация высвечивается в виде кривой на экране встроенного дисплея *5* с разбивкой на 100 частотных точек. Индикация в точке метки выдается на табло индикации *8*, причем для повышения точности в этой точке в стандартном режиме делается усреднение результата по 7 отсчетам (0,8 с). При этом время развертки составляет примерно 2 секунды. В случае необходимости время усреднения может быть увеличено.

Принцип измерений $K_ш$ соответствует методу *Y*-фактора. При этом ГШ, подключенный к входу исследуемого устройства, периодически включается и выключается по установленной программе. Соответствующие отсчеты запоминаются микропроцессором, усредняются и над ними проводятся арифметические действия по нахождению $K_ш$.

Для того, чтобы сделать поправку с целью исключения влияния на результат собственных шумов измерителя, предварительно перед измерением $K_ш$ (а также при большинстве других видов измерений) непосредственно к СВЧ входу измерителя подключается генератор шума с известной СПМШ. При этом автоматически измеряется и вводится в память величина собственного шума измерителя. Эта величина в дальнейшем является своего рода калибровочным сигналом во входном сечении измерителя. Она используется для внесения поправки при измерении собственного $K_ш$ исследуемого устройства и как известный сигнал на выходе исследуемого устройства – при измерении его коэффициента передачи (аналогично измерениям по методу двух ГШ, см. подраздел 2.11).

В состав панорамных ИКШ серии “Х5-” могут входить дополнительные устройства, такие как согласующие трансформаторы, направленные ответвители, адаптеры для размещения транзисторов, источники питания, феррито-

вые вентили, низкотемпературные генераторы шума, добавочные газоразрядные ГШ и другие.

Высокая чувствительность измерителей, точность отсчетной системы и набор необходимых дополнительных устройств позволяют проводить целый комплекс измерений, таких как:

– измерение $K_ш$ и $K_у$ транзисторных и электронных усилителей при различных условиях СВЧ согласования,
– измерение шумовой температуры усилителей,
– измерение коэффициентов шума и передачи преобразователей,
– проводить согласование и градуировку генераторов шума,
– проводить измерение малых величин ослабления и ряд других видов измерений.

Контроль правильности работы ИКШ производится методом двух отсчетов, минуя математическую обработку сигналов в микропроцессоре, а также по тестовым программам.

Ниже приводятся некоторые обобщенные характеристики измерителей [79].

Основные технические характеристики панорамных ИКШ серии "Х5-".

– Диапазон входных частот	0,01–37,5 ГГц
– Погрешность настройки по частоте	± 2 %
– Измеряемые значения $K_ш$	1–1000 (0–30 дБ)
– Погрешность* измерения $K_ш$	± (0,4–1)дБ
– Измеряемые значения $K_у$	1–10^6 (0–60 дБ)
– Погрешность измерения $K_у$	± (0,1–0,6) дБ
– Измеряемые значения шумовой температуры	20–400 К
– Погрешность измерения шумовой температуры	± 1 дБ
– Измеряемые значения СПМШ ГШ	2–100 kT_0
– Погрешность измерения СПМШ ГШ	± (0,2–0,3) дБ
– Минимальное время развертки	около 2с
– Масса:	
– индикатор $K_ш$	20 кг
– преобразователь	12 кг
– блок питания ГШ газоразрядного	12 кг
– генератор шума газоразрядный	11 кг
– генератор шума низкотемпературный	5 кг

В табл. 3.4 дается перечень существующих панорамных ИКШ серии "Х5-" с указанием их диапазонов частот и дополнительных функциональных возможностей.

* Совместно с погрешностью градуировки ГШ по СПМШ.

таблица 3.4

Рабочие диапазоны частот панорамных измерителей серии "X5-".

Тип ИКШ	Диапазон частот, ГГц	
	при испытании СВЧ усилителя	при испытании приемного устройства
X5-29	1–4	0,01–37,5
X5-29/1	1–4	0,70–4,00
X5-29/2*	1–4	0,70–12,05
X5-32*	3,20–5,64	3,20–5,64
X5-33**	3,20–5,64	3,20–5,64
X5-34*	5,60–8,30	5,60–8,30
X5-35**	5,60–8,30	5,60–8,30
X5-36*	8,15–12,05	8,15–12,05
X5-37**	8,15–12,05	8,15–12,05
X5-40	12,05–17.44	12,05–17,44
X5-43**	12,05–17,44	12,05–17,44
X5-41	17,44–25,86	17,44–25,86
X5-44**	17,44–25,86	17,44–25,86
X5-42	25,86–37,50	25,86–37,50
X5-45**	25,86–37,50	25,86–37,50
ХК5-48 ÷ + ХК5-50	0,005; 0,01–1,80 0,002	0,01–37,50

* Дополнительно измеряется шумовая температура усилителей.
** Дополнительно измеряется СПМШ ГШ.

3.4.6 Измерители характеристик шума X5-51 (X5-51/1, X5-51/2, X5-51/3)

Серия ИКШ X5-51 (разработана взамен измерителей X5-23 – X5-28) предназначена для измерения коэффициента шума приемных устройств, т.е. устройств с внутренним преобразованием частоты в диапазоне входных частот от 0,01 до 37,5 ГГц. Имеет широкую полосу входных частот приемной части (1–120 МГц), что позволяет проводить испытания разнообразных приемных устройств, имеющих выходные частоты в этом интервале [79].

В комплект измерителя входит полупроводниковый (диапазон 0,01–25,95 ГГц), либо газоразрядный (25,95–37,5 ГГц) генератор шума, обеспеченный соответствующим питанием.

Измерители имеют высокий уровень автоматизации, выход на КОП, предназначены для жестких условий эксплуатации.

Технические характеристики измерителей

– Диапазоны входных частот испытываемых приемных устройств (определяются применяемым ГШ):	
Х5–51	0,01–1,25 ГГц
Х5–51/1	1–18 ГГц
Х5–51/2	0,01–25,95 ГГц
Х5–51/3	25,95– 37,5 ГГц
– измеряемые значения $K_ш$	0–20 дБ
– Погрешность измерения $K_ш$ (в зависимости от диапазона частот)	± (0,31–0,53) дБ
– Потребляемая мощность	50–200 ВА
– Габариты:	
– индикатора $K_ш$	180×160×260 мм
– блока питания	186×160×260 мм
– Масса комплекта:	
– с твердотельным ГШ	5 кг
– с газоразрядным ГШ	16 кг

3.4.7 Приемники с аналоговым измерителем отношений для панорамных ИКШ

В панорамных ИКШ, описанных в подразделе 3.4.5, обработка сигналов с выхода квадратичного детектора в каждой частотной точке диапазона измерений проводится дискретным способом при помощи микропроцессора с усреднением необходимого числа отсчетов.

В процессе передачи результатов вычислений $K_ш$ на цифровой индикатор или дисплей с целью устранения мелькания цифр (или точек) данные дополнительно проходят через вспомогательное ПЗУ. В результате, в отличие от аналогового индикатора, здесь в значительной степени теряется непосредственная временна́я связь между измеряемым и индицируемым значениями $K_ш$. В то же время такая "живая" связь очень полезна при настройке исследуемого объекта на оптимальные параметры. В приемниках для панорамных ИКШ, описанных в [144, 152] этот недостаток устраняется путем введения в схему быстродействующих измерителей отношений аналогового типа [96], которые входят в состав аналогового вычислительного устройства.

В этих ИКШ также, как и в ряде других [30, 77, 78, 143], метод линейной шкалы реализуется путем применения двухчастотной программы модуляции

с последующим разделением сигналов в канал $K_ш$ и канал $K_у$ с помощью стробирования. Помимо $K_ш$ измеряется также $K_у$ исследуемого усилителя.

На рис. 3.33 в обобщенном виде показана структурная схема измерителя подобного типа [152] совместно с СВЧ трактом.

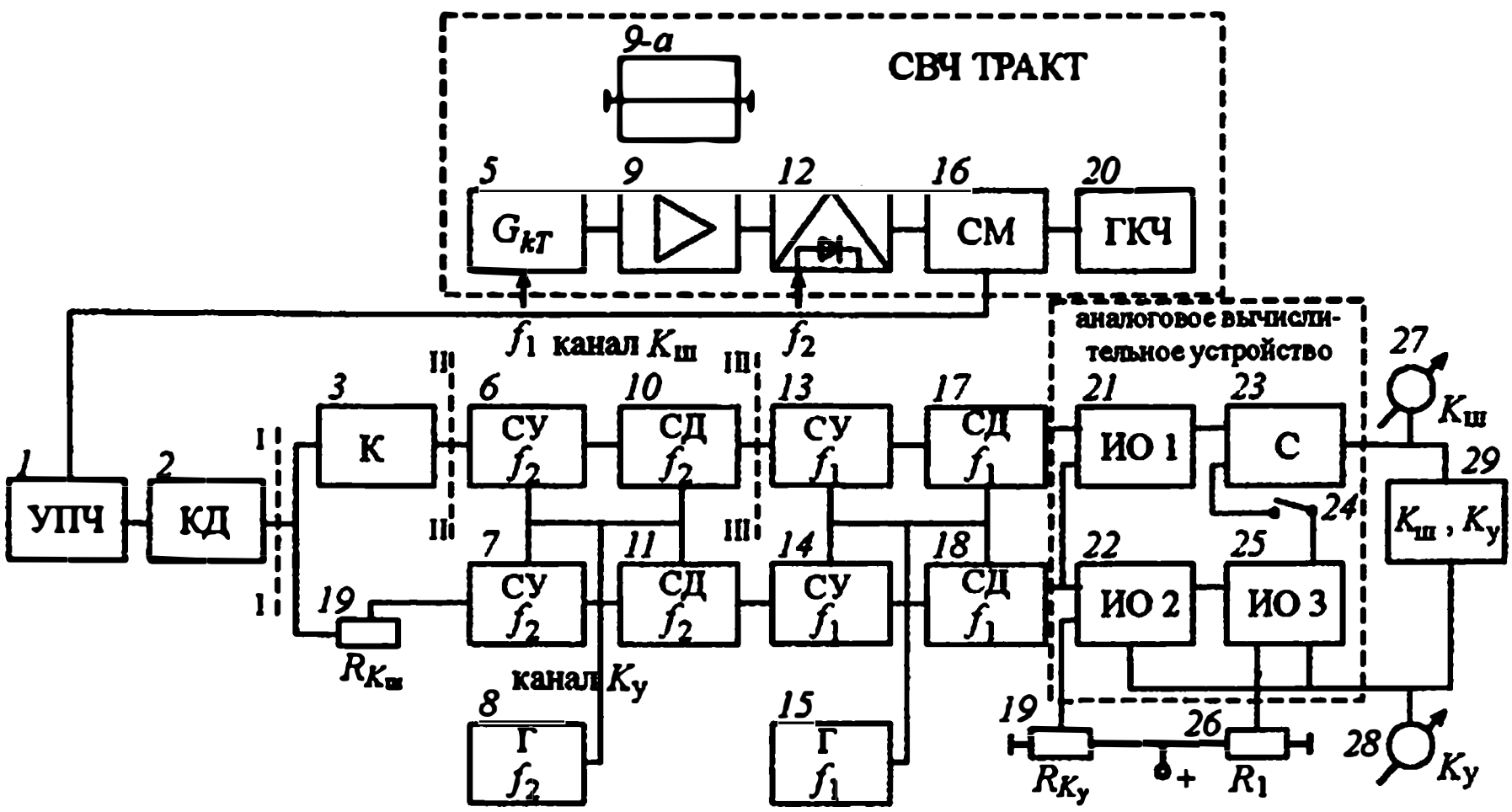


Рис. 3.33. Структурная схема панорамного ИКШ с приемником, содержащим аналоговый измеритель отношений

1 – усилитель промежуточной частоты, *2* – квадратичный детектор, *3* – ключ, *4* – резистор для калибровки шкалы $K_ш$, *5* – генератор шума, *6*, *7* – синхронные усилителя на частоту f_2, *8* – генератор частоты f_2, *9* – исследуемый СВЧ усилитель, *10*, *11* – синхронные детекторы на частоту f_2, *12* – СВЧ модулятор, *13*, *14* – синхронные усилители на частоту f_1, *15* – генератор частоты f_1, *16* – смеситель, *17*, *18* – синхронные детекторы на частоту f_1, *19* – резистор для калибровки шкалы $K_у$, *20* – генератор качающейся частоты, *21*, *22*, *25* – измерители отношений, *23* – сумматор, *24* – выключатель, *26* – резистор для установки поправки $1/K_у$, *27* – прибор индикации $K_ш$, *28* – прибор индикации $K_у$, *29* – осциллографический индикатор $K_ш$ и $K_у$

Шумовой сигнал ГШ *5* модулируется прямоугольными импульсами с частотой f_1. На выходе СВЧ усилителя *9* находится СВЧ модулятор *12*, обеспечивающий непрерывную модуляцию шумового сигнала ГШ и собственного шума СВЧ усилителя *2* прямоугольными импульсами с частотой f_2 с целью выделения их на фоне собственных шумов измерителя.* При этом

$$f_2 >> f_1 . \qquad (3.88)$$

* В некоторых случаях эту модуляцию делают в УПЧ [77], при этом перед измерениями требуется компенсация собственных шумов приемника.

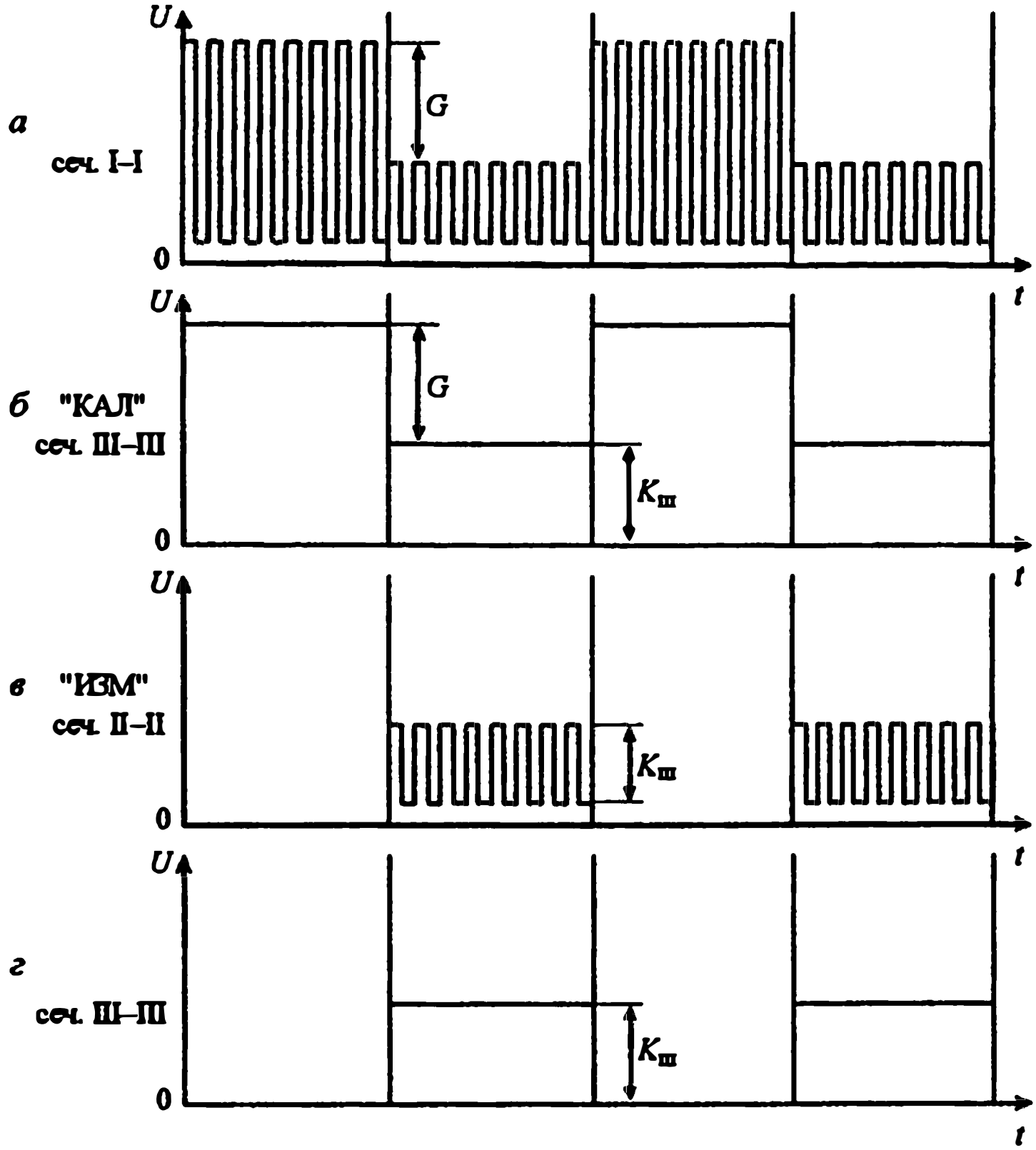


Рис. 3.34. Эпюры напряжений в различных сечениях (рис. 3.33) при измерении $K_ш$ методом стробирования

Вид сигналов после преобразования их по частоте в смесителе *16*, усиления в УПЧ *1* и квадратичного детектирования (сеч. I–I) показан на рис. 3.34.

В режиме "калибровка КШГ" ключ К *3* (рис. 3.33) замкнут, и упомянутый сигнал поступает в оба канала: "$K_ш$" и "$K_у$". После первого синхронного детектирования на частоте f_2 он приобретает вид, показанный на рис. 3.34*б*, после второго – на частоте f_1, сигнал из канала "$K_ш$" в виде постоянного напряжения, пропорционального СПМШ ГШ, поступает на вход *1* измерителя отношений ИО-1. На вход *2* ИО-1 подается выходное напряжение канала "$K_у$", регулируемое резистором $R_{кш}$, такой величины, при которой показания на индикаторе $K_ш$ (стрелочном или осциллографическом) численно равны относительной СПМШ ГШ. Этим нормируется чувствительность канала "$K_ш$".

В режиме "измерение $K_ш$" ключ К работает синхронно с ГШ, пропуская сигнал только в те полупериоды модулирующего напряжения частоты f_1, когда

ГШ выключен (рис. 3.34*в*). В результате после первого синхронного детектирования возникает сигнал, изображенный на рис. 3.34*г*, на вход *1* ИО 1 попадает напряжение, которое с точностью до поправочного члена $1/K_у$ (см. подраздел 2.2) пропорционально величине измеряемого коэффициента шума, а показания выходного индикатора численно равны этой величине.

В режиме "калибровка $K_у$" вместо исследуемого усилителя *9* включается отрезок тракта *9а* с малыми потерями, резистором $R_{ку}$ на индикаторе $K_у$ устанавливается показание – 0 дБ.

Тогда в режиме "измерение $K_у$", когда усилитель включен в тракт, на выходе измерителя отношений ИО 2 напряжение оказывается пропорциональным $K_у$, а на индикаторе $K_у$ – равным коэффициенту усиления.

При изменении $K_у$ СВЧ усилителя сигналы в каналах делимого и делителя изменяются пропорционально и результат измерений $K_ш$ и $K_у$ не изменяется. Поэтому система с измерителем отношений не требует стабилизации одного из сравниваемых уровней с помощью системы АРУ.

По измеренному $K_у$ с помощью измерителя отношений ИО 3 вычисляется отношение вида $1/K_у$ и через каскад суммирования *23* автоматически вводится в виде аналоговой поправки в измеряемое значение $K_ш$.

Более подробно вывод формулы измерений, описание работы аналогового измерительного устройства, а также порядок проведения калибровок и различных видов измерений описаны в [144, 152].

Таким образом, отличительной особенностью описываемых приемников [144, 152] для панорамных ИКШ является использование в схеме обработки сигналов высокоточных аналоговых измерителей отношений, что дает возможность вести наблюдение за $K_ш$ и $K_у$ СВЧ усилителя в реальном масштабе времени, т.е. практически синхронно с измерением этих величин, а также не использовать в приемниках систему АРУ.

Основные технические характеристики измерительных приемников [144, 152].

Параметр	Модель [152]	Модель [144]
– входная частота	60 или 5 МГц	60 или 5 МГц
– полоса пропускания	2 МГц	2 МГц
– пределы измеряемых $K_ш$	1–100	1–100
– погрешность измерения $K_ш$ (в составе установки):		
а) на фиксированных частотах	0,4–0,6 дБ	–
б) в панорамном режиме	0,8–1 дБ	–
– вклад приемника в погрешность измерения $K_ш$	–	0,1 дБ

– пределы измеряемых K_y	до 35 дБ	до 30 дБ
– пределы измеряемых величин потерь преобразования	–	0 – минус 10 дБ
– погрешность измерения K_y (в составе установки):		
а) на фиксированных частотах	0,4– 0,6 дБ	–
б) в панорамном режиме	0,8–1 дБ	–
– вклад приемника в погрешность измерения коэффициента передачи	–	0,2 дБ.
– первая/вторая (f_1/f_2) частоты модуляции	200 Гц/4 КГц	80 Гц/4 КГц

3.4.8 Зарубежные ИКШ

Интенсивная разработка автоматизированных ИКШ за рубежом началась в 60-х – 70-х годах. Основными центрами разработок явились фирмы Hewlett-Packard [83, 173, 194], AILTECH [128, 179, 193, 202], EatonCorp [184, 188], KayElemetricCorp, MagneticAB [129], Anritsy, Microel.Corp., Wavtek MicroWave [80] и др.

С течением времени модели ИКШ совершенствовались в направлении повышения точности отсчетов, автоматизации процесса измерений, расширения области входных частот, повышения чувствительности, расширения набора измеряемых параметров. Работа зарубежных измерителей, как правило, основывается на использовании метода *Y*-фактора.

Обзорные сведения о многих типах зарубежных ИКШ можно почерпнуть в [118, 203].

Рассмотрим подробнее работу и параметры последних моделей ИКШ двух ведущих фирм: Hewlett-Packard (HP8970B) и AILTECH (AIL2075).

3.4.8.1 Измеритель коэффициента шума AILTECH 2075

Измеритель [118, 128, 179, 193, 202] представляет собой блок с входной частотой, перестраиваемой в пределах 10–1800 МГц. Коэффициенты шума и усиления усилителей в указанном диапазоне частот могут измеряться непосредственно. При более высоких частотах перед измерителем включается внешний преобразователь частоты. Благодаря большому собственному усилению измеритель может работать без дополнительного предварительного усилителя промежуточной частоты.

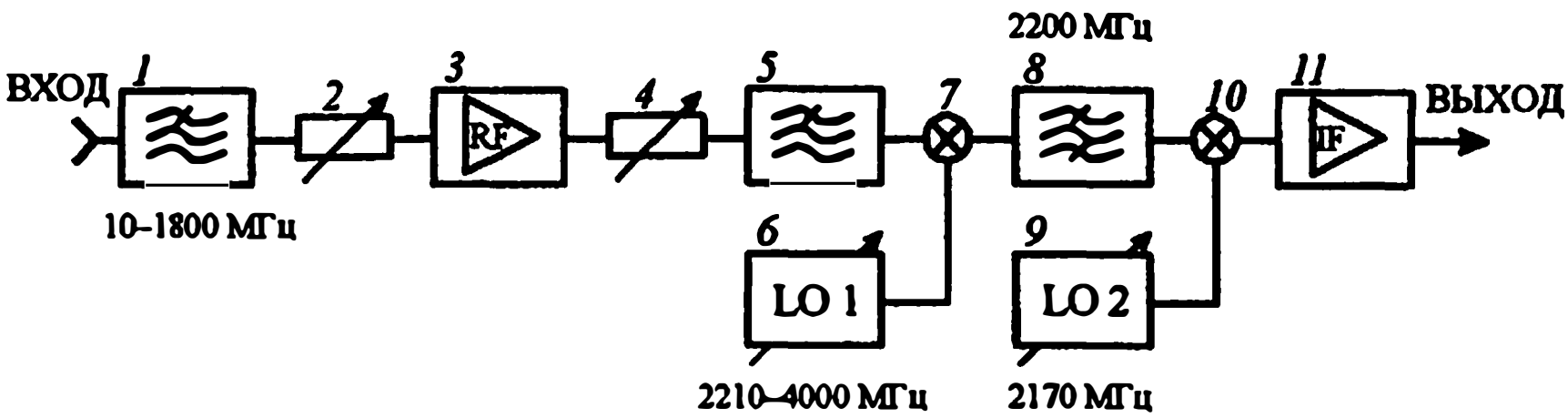


Рис. 3.35. Структурная схема входного преобразователя частот измерителя AILTECH 2075

1, *5* – фильтры нижних частот, *2*, *4* – регулируемые ослабители, *3* – усилитель радиочастот, *6* – перестраиваемый гетеродин 1, *7*, *10* – смесители, *8* – полосовой фильтр, *9* – гетеродин 2, работающий на фиксированной частоте, *11* – предварительный усилитель промежуточной частоты 30 МГц

Входная преобразовательная часть измерителя показана на рис. 3.35 [179]. При перестройке первого гетеродина *6* в пределах 2210–4000 МГц первая промежуточная частота 2200 МГц получается соответственно для сигналов 10–1800 МГц. После второго преобразования смесителем *10* частота сигналов преобразуется во вторую промежуточную частоту 30 МГц. Преобразователь выполнен в микрополосковом варианте. В качестве первого гетеродина используется ЖИГ-генератор. Сигнал на частоте 30 МГц передается в УПЧ измерителя, усиливается, детектируется квадратичным детектором и обрабатывается по необходимой программе. Измеритель содержит схему питания и модуляции полупроводникового ГШ. Измерения $K_ш$ проводятся по методу *Y*-фактора. Управление работой составных частей измерителя и обработка результатов измерений осуществляется с помощью микропроцессора по фиксированной программе. Результаты измерений $K_ш$ и $K_у$ индицируются в цифровом виде.

Основные технические характеристики ИКШ AILTECH 2075

– Диапазон входных частот (с перестройкой)	10–1800 МГц
– Погрешность настройки по частоте	± (0,5 МГц + 5 % от частоты)
– Измеряемые значения $K_ш$	0–30 дБ
– Погрешность сравнения с ГШ	± 0,05 дБ
– Измеряемые значения $K_у$	–20 – +65 дБ
– Погрешность измерения $K_у$	± 0,2 дБ
– Размеры	5,75×10,875×14 дюймов
– Масса	15,5 кг

3.4.8.2 Измеритель коэффициента шума HP 8970

Измеритель HP 8970B [173, 194, 195] имеет входную частоту, перестраиваемую в пределах 10–1600 МГц, производит обработку сигналов с помощью встроенного микропроцессора и имеет цифровую индикацию измеряемых значений коэффициентов шума и усиления. В этом отношении он аналогичен прибору AIL-2075.

Функции прибора могут быть расширены путем применения дополнительных блоков, поставляемых той же фирмой HP.

Измеритель HP 8970B совместно с перестраиваемым гетеродинным блоком HP 8970S и преобразователем 8970V представляет собой измерительную систему (Noise Figur Measurement System Models 8970S/V, 8970C) для измерения коэффициентов шума и усиления в диапазоне от 10 МГц до 26,5 ГГц, т.е. во всем диапазоне дециметровых и сантиметровых волн.

При использовании цифровой перестройки частоты гетеродина может быть получена индикация $K_ш$ и $K_у$ в зависимости от частоты на экране осциллографического дисплея или на двухкоординатном самописце. Осциллографическая индикация позволяет оптимизировать параметры усилителя в реальном масштабе времени. Для снижения флуктуационной составляющей погрешности измерений возможно усреднение измеряемых величин перед подачей на дисплей по 512 значениям.

При измерениях $K_ш$ и $K_у$ в диапазоне от 10 МГц до 26,5 МГц используется коаксиальный генератор шума HP 346 A/B/C.

В диапазоне от 26,5 ГГц до 50 ГГц применяются волноводные твердотельные шумовые источники на GaAs типа HPR/Q 347 B.

Измеритель HP 8970 может быть использован также для измерения двухполосного коэффициента шума преобразователей миллиметрового диапазона, имеющих выходную промежуточную частоту в интервале 10 МГц – 1,6 ГГц.

Основные технические характеристики измерителя HP 8970 B

– Диапазон входных частот(с перестройкой)	10–1600 МГц
– Погрешность настройки по частоте	± (1 МГц + 1 % от частоты)
– Измеряемые значения $K_ш$	0–30 дБ
– Измеряемые значения $K_у$	(–20 – +40) дБ
– Погрешность сравнения шумовых сигналов	± (0,1–0,15) дБ
– Собственный $K_ш$	не более 7 дБ + 0,003 дБ/МГц
– Максимальная входная мощность	10^{-4} Вт
– Размеры	143×425×476 мм
	(5,68×16,75×18,38 дюймов)
– Масса	15,5 кг

Основные технические характеристики измерительной системы HP 8970 S/V, 8970 C (рекомендуемые гетеродинные генераторы: HP8671B, 8672, 8673B/C/E, 8340B, 8341B, 83620A, 83622A, 83640A, 83630A, 83711B, 83712B, 83731B, 83732B, 83751A, 83752A)

– Диапазон входных частот	10 МГц–26,5 ГГц
– Измеряемые значения $K_ш$	0–30 дБ
– Погрешность сравнения при измерении $K_ш$	± 0,2 дБ до 18 ГГц
	± 0,4 дБ до 26,5 ГГц
– Погрешность сравнения при измерении $K_у$	± 0,28 дБ
– Собственный коэффициент шума (максимальный):	
в диапазоне 10–1600 МГц	12 дБ + 0,003 дБ/МГц
в диапазоне 1,6–18 ГГц	10–18 дБ
– Входной КСВН:	
в диапазоне 10МГц – 18 ГГц	2,25
в диапазоне 1,8–26,5 ГГц	2,7

3.5 ПОВЕРКА ИКШ

3.5.1 Погрешность измерения коэффициента шума

Общая теория и методика расчета погрешности измерения изложена во многих работах [48, 68, 75, 104, 130, 135, 136, 147, 157, и др.] В соответствии с [130], при измерении некоторой величины

$$Y = f(x_1, x_2, ...), \qquad (3.89)$$

являющейся функцией ряда параметров x_1, x_2 …, границы интервала, в котором с установленной вероятностью W находится относительная погрешность измерений, определяется формулой:

$$\delta y = (\delta y)_{сист} \pm K_\Sigma \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(x_i \frac{\partial \ln y}{\partial x_i} \sigma_i \right)^2}, \qquad (3.90)$$

где $(\delta y)_{сист}$ – систематическая составляющая погрешности, связанная главным образом с погрешностью метода измерений;

$\sigma_i = \frac{\delta_i}{K_i}$ – относительное среднестатистическое отклонение i-й составляющей погрешности измерений;

δ_i – интервал, в котором с вероятностью W_i находится i-я составляющая относительной погрешности;

K_Σ – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности и закона распределения (нормальный, равномерный, треугольный, арксинуса и др.) погрешности измеряемого параметра;
K_i – коэффициент, зависящий от вероятности W_i и закона распределения i-й составляющей погрешности измерения.

Конкретные значения K_Σ и K_i составляющей погрешности могут быть найдены из таблицы приведенной в [130].

Таблица 3,5

Значения коэффициентов в зависимости от закона распределения случайной величины

№ п.п.	Закон распределения	Вероятность			
		K_Σ , K_i			$K_{пред}$
		0,9	0,95	0,997	0,9973
1.	Нормальный	1,64	1,96	2,97	3,00
2.	Равномерный	1,56	1,65	1,72	1,73
3.	Треугольный	1,67	1,91	2,32	2,40
4.	Арксинус	1,34	1,38	1,40	1,40

Переходя к конкретной измеряемой величине – коэффициенту шума, можно записать:

$$\delta K_ш = (\delta K_ш)_{сист} \pm K_\Sigma \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(x_i \frac{\partial \ln K_ш}{\partial x_i} \cdot \frac{\delta_i}{K_i} \right)^2} \quad . \qquad (3.91)$$

Ограничим анализ наиболее распространенным случаем, когда измеряется оптимальный стандартный дифференциальный $K_ш$.

Систематическая составляющая $(\delta K_ш)_{сист}$ определяется при этом главным образом отличием температуры входной нагрузки усилителя при испытаниях от T_0 и конечной величиной K_y, т.е. практическим отклонением условий измерений от нормальных (формулы 1.53-1 и 1.53-5). Если при измерениях вводятся соответствующие поправки, учитывающие влияние указанных факторов (формулы 3.121 и 3.125), то в формуле (3.91) систематическая составляющая погрешности исключится и добавятся погрешности введения этих поправок, имеющие случайный характер.

Таким образом, погрешность измерения оптимального $K_ш$ при указанных условиях:

$$\delta K_ш = \pm K_\Sigma \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(x_i \frac{\partial \ln K_ш}{\partial x_i} \cdot \frac{\delta_i}{K_i} \right)^2} . \qquad (3.92)$$

Основными параметрами, через которые определяется $K_ш$ в соответствии с уравнениями измерений (2.52, 2.53), являются избыточная ОСПМШ ГШ G и отношение n (или V), определяемое измерителем. Соответствующие погрешности δG и δn, в свою очередь, выражаются через целый ряд более частных составляющих, совокупность которых определяется принятой методикой проверки ИКШ, и которые будут рассмотрены в последующем. Поэтому с достаточным правом (число составляющих более 5) можно считать [130] , что суммарная погрешность $\delta K_ш$ распределена по нормальному закону, и соответствующим образом выбирать значение коэффициента K_Σ в формуле (3.92). При расчете суммарной погрешности обычно задаются предельными значениями δ_i, устанавливаемыми экспериментально или теоретически, и законами распределения этих погрешностей, по которым находят коэффициенты K_i. Рекомендации о выборе законов распределения для различных погрешностей в зависимости от их характера можно найти, например, в [104, 130].

Численное значение суммарной погрешности существенным образом зависит от доверительной вероятности, принятой при расчете погрешности, т.к. при это меняется коэффициент K_Σ . Поэтому при характеристике конкретного ИКШ, наряду с цифрой погрешности, обязательно должна быть указана принятая доверительная вероятность.

В связи с этим следует заметить, что в настоящее время при оценках принимается доверительная вероятность 0,95, в то время как при выпуске большинства предыдущих ИКШ, таких как “Реверс”, “Растр”, “Шомпол” (ЦНИИА), измерителей с приемниками ИП-3, ИП-5 (ГНПП “Исток”), измерителей серии “Х5-” (з–д “Радиоприбор”) и др., она принималась равной 0,997, причем часто это не оговаривалось. Поэтому для возможности сравнения погрешностей ИКШ, выпущенных ранее, с современными должен вводится пересчетный коэффициент:

$$K_{срав} = K_{\Sigma(0.977)} / K_{\Sigma(0,95)} = 2,97/1,96 = 1,52$$

При этом погрешность $\delta K_{ш(0,997)}$, рассчитанная с вероятностью 0,997, пересчитывается в погрешность $\delta K_{ш(0,95)}$ при вероятности 0,95 по формуле:

$$\delta K_{\Sigma(0,95)} = \delta K_{\Sigma(0.997)} / K_{срав} = \delta K_{ш(0,997)} / 1,52$$

а) *Погрешность измерений $K_ш$ методом линейной шкалы.*

Рассмотрим более подробно погрешность измерения $K_ш$ методом линейной шкалы. При измерениях этим методом действительное значение коэффициента шума усилителя (при конечном значении $K_у$) [66]:

$$K_ш = K_{ш\,изм}\alpha_{попр} + \frac{1}{K_у} = Gn\alpha_{попр} + \frac{1}{K_у}, \qquad (3.93)$$

где $K_{ш\,изм}$ – измеренное значение $K_ш$ без введения поправок;

$\alpha_{попр}$ — поправочный коэффициент, учитывающий возможную систематическую погрешность, возникающую из-за автоматического режима работы ИКШ, вводимый при паспортизации установки;

$K_у$ – коэффициент усиления усилителя в момент измерения его $K_ш$.

В соответствии с [69, 130], а также с учетом изложенного в подразделах 2.6 и 3.5.1, границы интервала, в котором с установленной вероятностью 0,95 находится погрешность измерения оптимального* стандартного коэффициента шума методом линейной шкалы:

$$\delta K_ш = \pm 1{,}96\left[\left(\frac{\delta_{гш}}{3}\right)^2 + \left(\frac{\delta_в}{2{,}45}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{иб}}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{сл}}{3}\right)^2 + \left(\frac{\delta_т}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_f}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{ку}}{1{,}73}\right)^2\right]^{1/2}, \qquad (3.94)$$

где $\delta_{гш}$ – предельное значение погрешности градуировки ГШСС по ОСПМШ (все составляющие погрешности в %);

$\delta_в$ – предельное значение погрешности из-за вариации потерь в согласующем трансформаторе ГШСС при перестройках;

$\delta_{иб}$ – предельное значение погрешности определения отношений сигналов, вносимой СВЧ и измерительным блоком, за исключением случайной составляющей погрешности;

$\delta_{сл}$ – предельное значение случайной составляющей погрешности;

$\delta_т$ – предельное значение остаточной погрешности, вызванной отличием температуры поглощающих элементов тракта ГШСС от стандартной $T_0 = 293$ К (учитывается при измерении $K_ш < 3$ [69]);

δ_f – предельное значение частотной погрешности (учитывается лишь при измерении $K_ш$ узкополосных усилителей, а также двухканальных приемных устройств с высокой промежуточной частотой);

---

* При этом погрешность СВЧ рассогласования практически сводится к нулю настройкой согласующим трансформатором (подразд. 2.7) и поэтому не учитывается.

$\delta_{ку}$ – предельное значение погрешности в определении $K_ш$, возникающей в связи с погрешностью измерения $K_у$ (учитывается лишь при малых $K_у$ и большой погрешности его определения).

Погрешность относительных измерений $K_ш$, целью которых является установление лишь величины изменения $K_ш$, может быть получена из формулы (3.94) при условии

$$\delta_{гш} = \delta_в = \delta_т = \delta_{ку} = 0 . \qquad (3.95)$$

При этом

$$\delta K_{ш\,отн,\%} = \pm 1{,}96\sqrt{\left(\frac{\delta_{иб}}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{сл}}{3}\right)^2} . \qquad (3.96)$$

Погрешность измерения $K_ш$, соответствующая формуле (3.94), но выраженная в децибелах,

$$K_{ш,\,дБ} = 10\lg\left(1 + \frac{|K_ш, \%|}{100}\right). \qquad (3.97)$$

б) *Погрешность измерений $K_ш$ методом Y-фактора.*

Измерения проводятся на установке и по методике, описанным в подразделе 2.2. Коэффициент шума с учетом поправки, связанной с конечной величиной коэффициента усиления, определяется по формуле:

$$\boxed{K_ш = G\frac{1}{Y-1} + \frac{1}{K_у},} \qquad (3.98)$$

где $Y = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$, α_1 и α_2 – показания на шкале квадратичного приемника соответственно при включенном и выключенном ГШ.

С учетом (3.98) и аналогично (3.94) границы интервала, в котором с установленной вероятностью 0,95 находится погрешность измерения $K_ш$ методом Y- фактора определяется:

$$\boxed{\delta K_{ш,\%} = \pm 1{,}96\left[\left(\frac{\delta_{гш}}{3}\right)^2 + \left(\frac{\delta_в}{2{,}45}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{иб}}{1{,}73}\cdot\frac{Y}{Y-1}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{сл}}{3}\right)^2 + \left(\frac{\delta_т}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_f}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{ку}}{1{,}73}\right)^2\right]^{1/2}.} \qquad (3.99)$$

Составляющие погрешности, входящие в эту формулу, аналогичны составляющим, перечисленным в формуле (3.94).

Метод Y-фактора часто используется как контрольный по отношению к автоматизированному методу для определения поправочного коэффициента $\alpha_{\text{попр}}$ (см. формулу 3.93). В этом случае проводится сравнение значений $K_{\text{ш}}$, измеренных двумя способами, и поэтому существенна погрешность лишь относительных измерений $K_{\text{ш}}$, т.е. ряд составляющих в формуле (3.99) исключается. Так как переключений и перестроек в СВЧ тракте при этом не проводится, следует считать, что

$$\delta_{\text{гш}} = \delta_{\text{в}} = \delta_{\text{т}} = \delta_{f} = \delta_{\text{ку}} = 0, \qquad (3.100)$$

а погрешность *относительных* измерений методом Y-фактора

$$\delta K_{\text{ш},\%} = \pm 1{,}96 \sqrt{\left(\frac{\delta_{\text{иб}}}{1{,}73} \cdot \frac{Y}{Y-1}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\text{сл}}}{3}\right)^2}. \qquad (3.101)$$

Погрешность измерений, выраженная в децибелах, аналогично предыдущему рассчитывается по формуле (3.97).

в) *Погрешность измерений $K_{\text{ш}}$ методом постоянного уровня.*

Измерения проводятся на установке и по методике, описанным в подразделе 2.3. Коэффициент шума определяется по формуле:

$$K_{\text{ш}} = G \frac{1}{10^{0{,}1(d_1 - d_2)} - 1} + \frac{1}{K_{\text{у}}}, \qquad (3.102)$$

где d_1 и d_2 – выраженные в дБ показания аттенюатора, стоящего на выходе исследуемого усилителя, соответственно при выключенном и включенном ГШ.

Так как функции измерительного приемника при методе постоянного уровня сводятся к индикации сигнала постоянной величины, погрешность, вносимая приемником, очень мала. Однако возникает погрешность, связанная с отсчетами по СВЧ аттенюатору.

Границы интервала, в котором с условленной вероятностью 0,95 находится относительная погрешность измерения $K_{\text{ш}}$ методом постоянного уровня:

$$\delta K_{\text{ш},\%} = \pm 1{,}96 \left[\left(\frac{\delta_{\text{гш}}}{3}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\text{сл}}}{3}\right)^2 + \left(\frac{10^{0{,}1(d_1 - d_2)}}{10^{0{,}1(d_1 - d_2)} - 1} \cdot \frac{\delta d}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\text{в}}}{2{,}45}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\text{т}}}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{f}}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\text{ку}}}{1{,}73}\right)^2 \right]^{1/2}, \qquad (3.103)$$

где δd предельное значение погрешности определения величины $10^{0,1(d_1-d_2)}$ с помощью аттенюатора; остальные составляющее аналогичны перечисленным в формуле (3.94).

Метод постоянного уровня также может быть использован в качестве контрольного по отношению к автоматизированным методам.

Погрешность относительных измерений методом постоянного уровня:

$$\delta K_{\text{ш отн, \%}} = \pm 1{,}96\sqrt{\left(\frac{\delta_{\text{сл}}}{3}\right)^2 + \left(\frac{10^{0,1(d_1-d_2)}}{10^{0,1(d_1-d_2)}-1}\cdot\frac{\delta d}{1{,}73}\right)^2}. \qquad (3.104)$$

3.5.2 Методы поверки измерителей коэффициента шума

3.5.2.1 Цель и содержание поверки

Основное содержание поверки измерительного прибора (средства измерения) сводится к практическому определению погрешности измерений соответствующей величины, вносимой этим прибором при измерениях. Поверка – это, в первую очередь, испытание прибора на точность [66]. При поверке проводится также ряд других операций: внешний осмотр прибора, проверка комплектности, проверка наличия технической документацни, опробование действия органов управления, наличие основных функций, необходимых для проведения измерений и пр.

Как известно[157], существуют два метода поверки средства измерения: комплексный и поэлементный.

При *комплексном* методе сравниваются результаты измерений, полученные с помощью поверяемого средства, с результатами измерений той же величины на образцовом средстве. По полученному расхождению результатов судят о погрешности поверяемого средства измерений.

При методе *поэлементной поверки* контролируются параметры узлов, входящих в состав средства измерения и влияющих на погрешность измерений. По формуле, устанавливающей связь общей погрешности с погрешностями составляющих узлов, рассчитывается общая погрешность. Обычно на составляющие погрешности устанавливаются предельные нормы, при удовлетворении которым общая погрешность укладывается в установленные рамки.

С учетом того, что ИКШ представляет собой комплексное устройство, состоящее из нескольких разнотипных узлов (ГШСС, преобразователь, измерительный приемник и др.), которые часто имеют автономную конструкцию, в настоящее время, в соответствии с [66], принята комбинированная система поверки ИКШ. При этом проверяются укрупненные узлы, входящие в ИКШ

(ГШСС, приемник), а также учитываются некоторые специфические ошибки, связанные с особенностями методики измерения $K_ш$ и шумовых сигналов вообще (случайная составляющая, температурная, вариация потерь в согласующем трансформаторе). Некоторые принципиально возможные составляющие погрешности, такие, как погрешность из-за "паразитной" модуляции, частотная погрешность за счет неидеальной формы и глубины модуляции и некоторые другие, сводятся к пренебрежимо малым значения соответствующим построением ИКШ, выбором параметров входящих узлов (развязки и др.) и введением поправок. Погрешности регламентируются также указанием требований к параметрам исследуемых приборов (максимальное рассогласование, частотная изрезанность характеристик, крутизна изменения шума при рассогласовании на входе и др.).

В инструкции по поверке ИКШ обычно приводится перечень нормированных метрологических характеристик его функциональных частей, нормированные значения метрологических характеристик, указываются рекомендуемые средства измерений и их необходимая точность. Приводится также методика поверки, в частности, методика определения всех метрологических характеристик и обработки результатов проведенных измерений. На основании полученных результатов рассчитывается погрешность измерений и делается вывод о соответствии средства измерений его техническим условиям. В необходимых случаях вводятся поправки. Результаты поверки документируются в виде протоколов. На средство измерений, успешно прошедшее поверку, выдается паспорт установленной формы.

Обычно инструкция по поверке разрабатывается на прибор конкретного типа, в частности, ИКШ определенного типа, т.к. учитывает принятый метод измерений, имеющиеся органы управления, конструкцию и т.д. В автоматизированных ИКШ с микропроцессором поверка некоторых параметров и введение поправок обеспечивается встроенным контролером [101].

В то же время общность принципов работы ИКШ позволяет проследить основные закономерности поверки на конкретном примере.

В следующем разделе рассматриваются основные моменты поверки аналогового ИКШ (в частности, определения метрологических характеристик), работающего по методу линейной шкалы.

3.5.2.2 Определение метрологических характеристик ИКШ, работающего по методу линейной шкалы

Типичная структурная схема ИКШ приведена на рис. 3.36. Функциональные части поверяемого ИКШ должны соответствовать нормированным значениям метрологических характеристик, перечисленных в таблице 3.6.

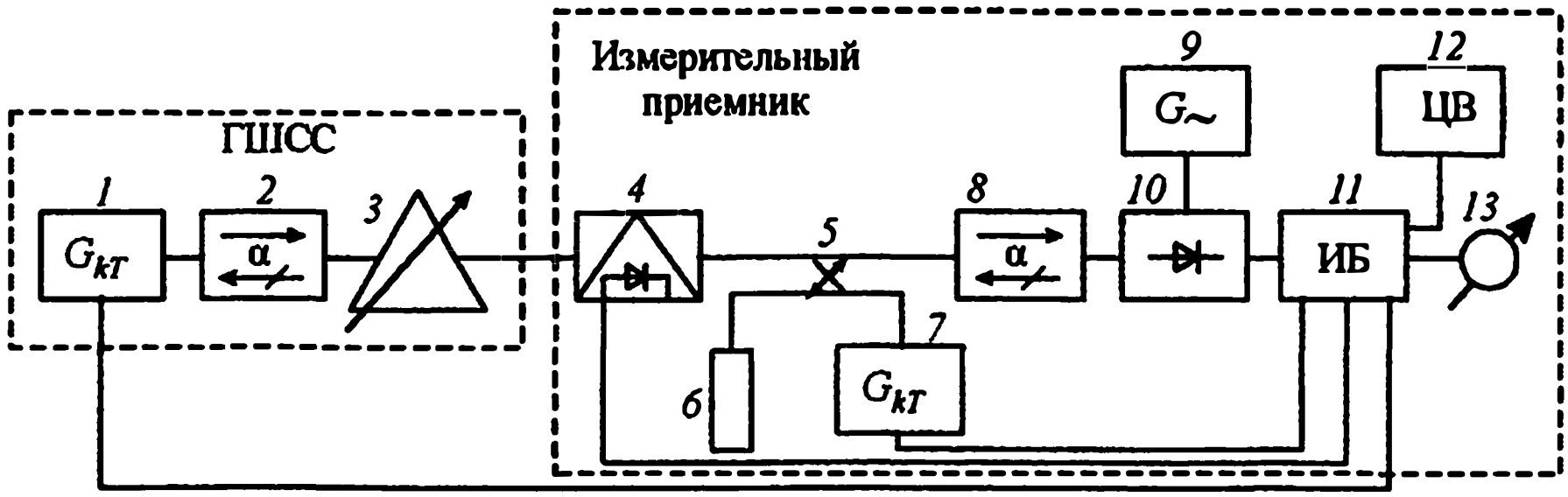


Рис. 3.36. Структурная схема ИКШ

1, *7* – генератор шума, *2*, *8* – ферритовый вентиль, *3* – согласующий трансформатор, *5* – направленный ответвитель, *6* – согласованная нагрузка, *9* – гетеродин, *10* – смеситель, *11* – измерительный блок, *12* – цифровой индикатор, *13* – аналоговый индикатор

Таблица 3.6

Нормированные значения метрологических характеристик

№	Наименование функциональной части	Метрологическая характеристика (МХ)	Нормированное значение МХ	Нормативно-технический документ	Примечание
1	2	3	4	5	6
1	ГШСС	Рабочий диапазон частот	$f_{мин} - f_{макс}$	ТУ	–
2	ГШСС	Избыточная ОСПМШ во включенном состоянии	G	–	–
3	ГШСС	Погрешность избыточной ОСПМШ	$\delta_{гш}$	ТУ	–
4	ГШСС	Пределы регулировки КСВН согласующим трансформатором (СТ)	$1 \div КСВН_{макс}$	ТУ	Для ГШСС с регулировкой КСВН
5	ГШСС	Максимальный КСВН выхода	$КСВН_{макс}$	ТУ	Для ГШСС без регулировки КСВН
6	ГШСС	Вариация потерь в СТ ГШСС при перестройках	$\delta_в$	ТУ	Для ГШСС с регулировкой КСВН
7	ГШСС	Отличие температуры на выходе включенного ГШСС от T_0*	ΔT	[69]	При $K_ш < 3$

Таблица 3.6 (окончание)

1	2	3	4	5	6
8	СВЧ измерительный приемник	Рабочий диапазон частот	$f_{мин} - f_{макс}$	ТУ	–
9	СВЧ измерительный приемник	Погрешность установки рабочей частоты	Δf	ТУ	–
10	СВЧ измерительный приемник	Разрешающая способность по частоте	ψ_f	ТУ	–
11	СВЧ измерительный приемник	Погрешность сравнения шумовых сигналов (без случайной составляющей погрешности)	$\delta_{нб}$	ТО	–
12	СВЧ измерительный приемник	Коэффициент шума	$K_ш$	ТО	–
13	ИКШ в целом	Погрешность измерения	$\delta K_ш$	ТУ	–

* Вводится как поправка по формуле: $K_ш = K_{ш\,изм} - \Delta T/T_0$, где $K_{ш\,изм}$ – измеренное значение $K_ш$

1) *Определение уровня избыточной ОСПМШ ГШСС и его погрешность* $\delta_{гш}$.

Определение уровня ОСПМШ ГШСС проводится путем сличения ГШСС с образцовым ГШ, аттестованным Госстандартом. Общая поверочная схема [61, 62] переноса уровня ОСПМШ от государственного первичного эталона до рабочего средства измерений (в нашем случае это ГШСС) в сокращенном виде приведена на рис. 3.37. На схеме указаны основные этапы компарирования погрешности шумовых эталонов и мер на каждой ступени. Схема разработана и практически внедрена для ГШ в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц. Пределы указанных погрешностей связанны с конкретной частотной точкой, типом канала СВЧ и типом используемого генератора шума.

Образцовые средства измерений обычно находятся в отраслевых лабораториях по поверке или на крупных промышленных предприятиях. Периодичность поверки, в соответствии с [46], в случае простых генераторов шума составляет для газоразрядных ГШ – 24 месяца, полупроводниковых – 12 месяцев, диодных – 6 месяцев. Для составных ГШ периодичность составляет 6 месяцев.

В качестве образцовых компараторов могут использоваться специальные компараторы, измерители типа ПК7 [79], тип Х5– [79] или другие компараторы, обеспечивающие необходимую точность сравнения.

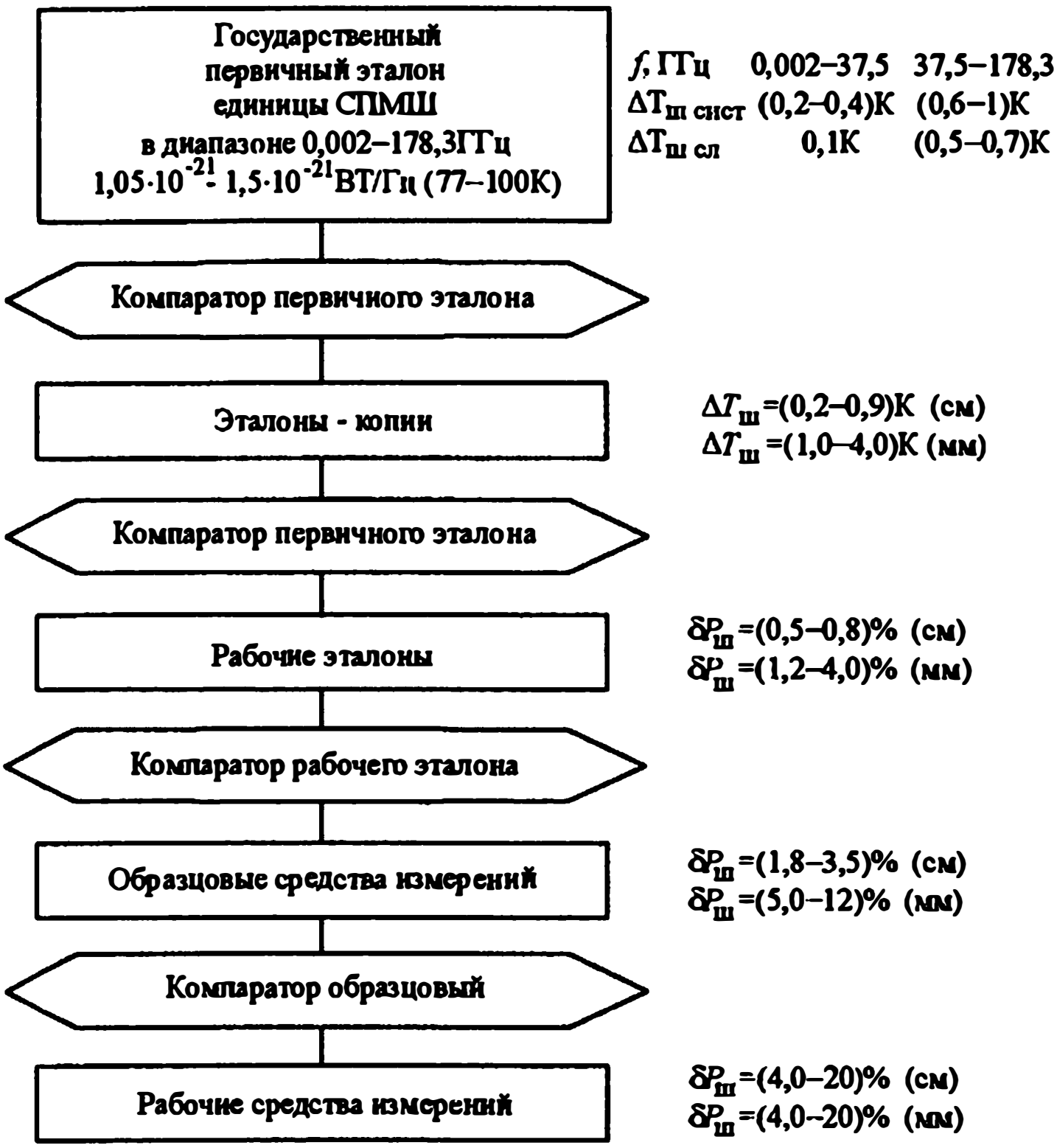


Рис. 3.37. Государственная поверочная схема для средств измерений СПМ шумового радиоизлучения в диапазоне частот 0,002÷178,3 ГГц (сокращенный вариант)

$\Delta T_{ш,\ сист}$ – систематическая погрешность, $\Delta T_{ш,\ ср}$ – средняя квадратическая погрешность, (см) – сантиметровый диапазон, (мм) – миллиметровый диапазон

При первичной поверке с целью уменьшения случайной составляющей погрешности проводятся несколько серий измерений ОСПМШ по частотному диапазону с последующим усреднением результатов.

С этой же целью в процессе измерений может быть применена ЭВМ [20, 158].

При градуировке ГШ измеряется номинальная мощность шума, т.е. мощность шума, которую способен отдать генератор в комплексно-сопряженную с его выходным импедансом нагрузку. Это обеспечивает однозначность градуировки и практически избавляет от погрешности при градуировке ГШ, связанной с высокочастотным рассогласованием [7, 46]. Согласование на максимальную мощность проводится с помощью согласующего трансформатора, включаемого между генератором шума и входом компаратора. Если ГШСС

содержит собственный согласующий трансформатор, то он может быть использован для проведения согласования при градуировке.

Известна также система согласования с помощью 12-полюсного рефлектометра [158], используемая до частоты 14 ГГц, позволяющая исключить ошибки рассогласования и уменьшить погрешность градуировки до ± 2 %.

Вопросы, связанные с согласованием, обсуждаются также в [175].

При невозможности проведения согласования возникает составляющая погрешности измерений из-за отражений, которую при малых значениях коэффициента отражения ($\Gamma < 0{,}2$) приближенно можно вычислить по формуле [46]:

$$\delta_{рас} \approx 2\left(|\Gamma_{огш}| \cdot |\Gamma_{вх}| + |\Gamma_{гш}| \cdot |\Gamma_{вх}|\right) \cdot 100\ \%, \qquad (3.105)$$

где $|\Gamma_{огш}|$, $|\Gamma_{вх}|$, $|\Gamma_{гш}|$ – модули коэффициентов отражения соответственно от образцового ГШ, входа компаратора и градуируемого ГШ.

В случае больших рассогласований погрешность вычисляется с использованием формулы (1.19).

В табл. 3.7 приведены погрешности, устанавливаемые в соответствии с [61], как предельные для рабочих генераторов шума (ГШСС) в зависимости от типа СВЧ канала, частоты и вида ГШ.

Таблица 3.7

Погрешность градуировки генераторов шума

№	Тип ГШ, канал, диапазон частот	Погрешность	
		при сравнении образцовой мерой	при сравнении с рабочим эталоном
1	2	3	4
1	ГШГР, ГШП 3,5/1,52; 7/3,04; 16/7; 16/4,5 мм 0,002 ÷ 0,6 ГГц 2 ÷ 100 отн.ед.	δ = (5 ÷ 20) %	–
2	НТГШ 3,5/1,52; 7/3,04 мм 0,002 ÷ 17,44 ГГц	Δ = (2 ÷ 6) К	Δ = (2 ÷ 5) К (канал 7/3,04 мм)
3	НТГШ 16 × 8; 11 × 5,5; 7,2 × 3,4 мм 12,05 ÷ 37,5 ГГц	Δ = (5 ÷ 6) К	Δ = (3 ÷ 4) К
4	ГШ ГР, ГШП 3,5/1,52; 7/3,04; 16/7; 16/4,6 мм 0,484 ÷ 17,44 ГГц 2 ÷ 100 отн.ед.	δ = (4 ÷ 20) %	δ = (3 ÷ 5) % (канал 7/3,04 мм)
5	ГШГР, ГШП 16 × 8; 11 × 5,5; 7,2 × 3,4 мм 12,05 ÷ 37,5 ГГц 2 ÷ 100 отн.ед.	δ = (4 ÷ 20) %	δ = (3 ÷ 5) %

Таблица 3.7 (окончание)

1	2	3	4
6	ГШГР, ГШП 5,2 × 2,6; 3,6 × 1,8; 2,4 × 1,2; 1,6 × 0,8 мм 37,5 ÷ 178,3 ГГц 2 ÷ 100 отн.ед.	δ = (7 ÷ 20) %	..
7	НТГШ 5,2 × 2,6; 3,6 × 1,8; 2,4 × 1,2; 1,6 × 0,8мм 37,5 ÷ 178,3 ГГц	Δ = (7 ÷ 20) К	–

Таблица 3.8

Погрешность градуировки генераторов шума

Частота, ГГц	Размеры, мм	$\delta_{гш}$, %			
		ГГШ	ГШП	$ГТШ_{сост}$	$ГШП_{сост}$
0,010 – 0,50	7/3; 16/6,95 16/4,6	– –	7,6 7,8	– –	8,0 8,5
0,5 – 4,0	16/6,95 16/4,6	6,0 6,0	7,2 –	6,6 6,6	7,5 7,5
0,7 – 4,0	7/3,04 3,5/1,52	5,7 –	7,0 8,3	6,3 7,3	7,3 8,7
3,86 – 17,44	48 × 24 35 × 15 23 × 10 16 × 8	4,85 – – –	– – – –	5,9 – – –	– – – –
3,2 – 12,05	7/3,04 3,5/1,52	6,0 –	7,2 8,5	6,6 7,3	7,5 8,6
12,05 – 18,0	7/3,04 3,5/1,52	7,4 –	8,4 9,4	7,8 8,3	8,6 9,4
17,44 – 37,5	11 × 5,5 7,2 × 3,4	7,4 –	– –	7,9 –	– –

Для газоразрядных (ГШГР) и полупроводниковых (ГШП) генераторов шума приводятся относительные (δ) погрешности измерений; для охлаждаемых температурных или низкотемпературных (НТГШ) приводятся абсолютные погрешности в градусах Кельвина (Δ).

Более конкретизированные значения погрешностей градуировки генераторов шума приведены в табл. 3.8, по материалом [46].

Относительные погрешности, приведенные в таблицах следует понимать как составляющую $\delta_{гш}$ в формуле (3.94) для соответствующих случаев.

2) *Определение вариации потерь* $\delta_в$ *в согласующем трансформаторе.*

Под вариацией потерь понимается максимально возможное изменение активных потерь в согласующем трансформаторе (СТ) при его перестройках в заданных пределах изменения вносимого КСВН.

Вариация потерь может быть определена методом компенсации реактивности с помощью вспомогательного согласующего трансформатора, однотипного с первым. Принимается, что потери в этих трансформаторах при одинаковом рассогласовании равны. Трансформаторы ставятся последовательно один за другим между достаточно хорошо согласованными источником сигнала и приемным индикатором. Измерения проводятся следующим образом.

– Вначале при выведенном рассогласователе исследуемого СТ с помощью вспомогательного СТ добиваются максимального показания α_1 на выходном индикаторе.

– Далее рассогласователь исследуемого СТ устанавливается в положение, соответствующее значению КСВН, при котором СТ должен быть испытан.

– Вспомогательным СТ добиваются максимально возможного показания α_2.

– Вариацию потерь $\delta_в$ вычисляют по формуле:

$$\delta_в = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2\alpha_1} \cdot 100\ \%. \qquad (3.106)$$

Измерения проводятся при нескольких различных положениях рассогласователя по фазе и на нескольких частотах рабочего диапазона.

Определение вариации потерь может быть сделано непосредственно на установке для измерения $K_ш$ (рис. 3.38). При этом источником сигнала является генератором шума *1*, а индикатором – измерительный приемник ИКШ, т.е. к ИКШ добавляется лишь вспомогательный СТ *4*. Преимуществами такого способа является то, что не нужно подвергать ГШСС разборке и отпадает необходимость в дополнительной измерительной установке.

Подобно этому вариация потерь может определяться на установке для измерения СПМШ параллельно с градуировкой генератора.

Наибольшее значение вариации потерь, в соответствии с [46], не должно превышать 0,1 ÷ 0,2 дБ. Более подробно норма приведена в табл. 3.9.

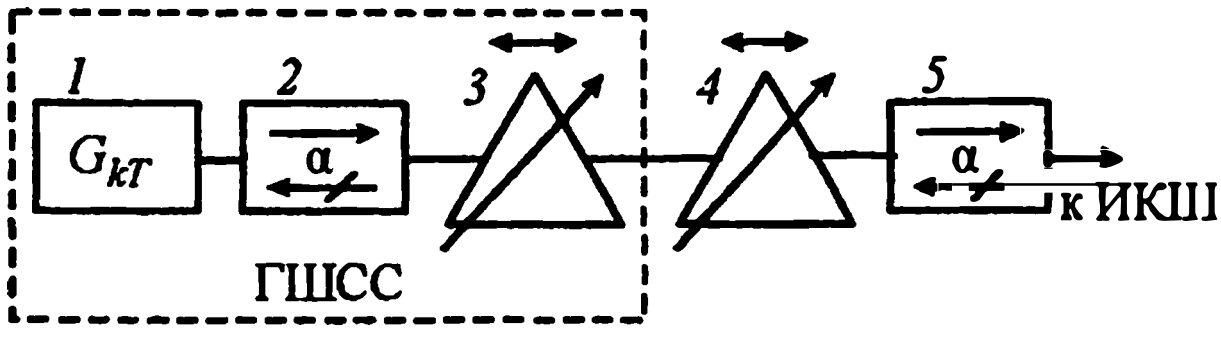


Рис. 3.38. Структурная схема установки для определения вариации потерь в согласующем трансформаторе при использовании шумового сигнала
1 – генератор шума, *2*, *5* – развязывающее устройство, *3* – исследуемый согласующий трансформатор, *4* – вспомогательный согласующий трансформатор

Таблица 3.9

Допустимые значения вариации потерь в согласующих трансформаторах

№	Диапазон частот, ГГц	Волноводные СТ, дБ	Коаксиальные СТ, дБ
1	3,86 – 12,42	0,10	–
2	12,42 – 37,50	0,15	–
3	0,18 – 4,00	–	0,10
4	4,00 – 12,42	–	0,15
5	12,42 – 17,85	–	0,20

3) *Погрешность измерения отношений сигналов, вносимая СВЧ измерительным блоком в автоматическом режиме работы* ($\delta_{иб}$).

Величина $\delta_{иб}$ представляет собой остаточную погрешность измерения отношений после введения поправочного коэффициента $\alpha_{попр}$, полученного путем сравнения результатов измерения $K_ш$ исследуемых ИКШ в автоматическом режиме и контрольным методом. В нее не включается случайная составляющая погрешности, которая определяется по отдельной методике.

Погрешность может быть выражена как

$$\delta_{иб,\%} = \pm 1{,}96\sqrt{\left(\frac{\delta_{конт}}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\alpha}}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{инд}}{1{,}73}\right)^2}, \qquad (3.107)$$

где $\delta_{конт}$ – погрешность измерения контрольным (неавтоматическим) методом,

$\delta\alpha$ – погрешность определения поправочного коэффициента $\alpha_{попр}$ (погрешность сравнения),

$\delta_{инд}$ – погрешность индикаторного прибора.

Поправочный коэффициент

$$\alpha_{попр} = \frac{K_{шк}}{K_ш}, \qquad (3.108)$$

где $K_ш$ – коэффициент шума, полученный при автоматическом режиме измерений,

$K_{шк}$ – коэффициент шума, полученный при контрольном методе измерений.

В качестве контрольных могут быть использованы: метод двух отчетов, метод постоянного уровня, нулевой метод и др., в которых отсутствуют погрешности, связанные с автоматизированным режимом работы ИКШ. Эти

погрешности могут быть связаны с изменением мощности ГШ в импульсном режиме, неидеальностью формы модуляции, случайными наводками и др.

В большинстве случаев контрольный режим осуществляется непосредственно на проверяемом ИКШ при соответственно измененном порядке измерений. Так как решается задача сравнения коэффициентов шума, то, как указывалось, контрольные измерения носят относительный характер, поэтому их погрешность уменьшается и описывается формулами (3.101, 3.104).

Рассмотрим подробнее погрешность $\delta_{конт}$ для контрольного метода двух отсчетов. Погрешность в основном определяется влиянием нелинейности измерительного канала приемника и неточности низкочастотных делителей при переключении шкал. Случайная составляющая погрешности может быть отнесена к погрешности сравнения δ_{α} .

$$\delta_{конт,\,\%} = \pm 1{,}96\sqrt{\left(\frac{\delta_{дел}}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{нел}}{1{,}73}\right)^2}, \qquad (3.109)$$

где $\delta_{дел}$ – неисключенная составляющая погрешности при проверке коэффициентов деления низкочастотных делителей,

$\delta_{нел}$ – неисключенная составляющая погрешности при проверке линейности.

а) Проверка *низкочастотного делителя* может проводиться методом замещения по образцовому аттенюатору (например, типа АСО-3М [3, 60]) на частоте модуляции измерительного приемника.

Низкочастотное опорное напряжение с выхода "б" приемника *2* (рис 3.39) подается через образцовый ослабитель *1* на вход низкочастотного аттенюатора приемника.

При включении исходного предела аттенюатора приемника с помощью цифрового вольтметра *3* точно фиксируется установившееся показание.

Включается контролируемый предел аттенюатора приемника, ослабление аттенюатора *1* изменяется встречно на величину, соответствующую номинальному значению изменения ослабления контролируемого аттенюатора

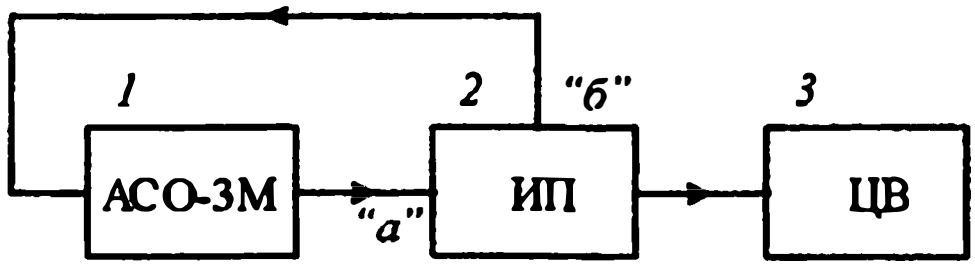


Рис. 3.39. Структурная схема установки для поверки низкочастотного делителя измерительного приемника

1 – образцовый ступенчатый ослабитель, *2* – исследуемый измерительный приемник ("*а*" – вход приемника на частоте модуляции, "*б*" – выход низкочастотного опорного напряжения), *3* – цифровой вольтметр

и проводить отсчет по цифровому вольтметру *3*. Погрешность контролируемой ступени ослабления находится как

$$\delta_{дел} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1} \cdot 100\,\%, \qquad (3.110)$$

где α_1 и α_2 – показания цифрового индикатора соответственно при первом и втором отсчетах.

В паспорт приемника при необходимости вводится поправка, соответствующая $\delta_{дел}$. В автоматизированных измерителях поправка вводится в память микропроцессора автоматически.

б) Погрешность приемника за счет *нелинейности* (начиная со входа УПЧ) определяется по образцовому аттенюатору промежуточной частоты [60, 88]. Могут быть использованы, например, образцовые аттенюаторы типа А692.129 на частоту 60 МГц и типа ХШ2.243.142 на частоту 5 МГц.

Структурная схема поверочной установки показана на рис. 3.40. Генератор промежуточной частоты *1* амплитудно модулируется импульсами опор-

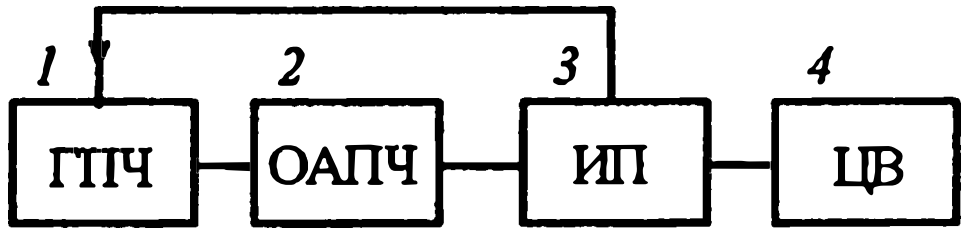


Рис. 3.40. Структурная схема для проверки линейности
1 – генератор промежуточной частоты, *2* – образцовый ослабитель промежуточный частоты, *3* – исследуемый измерительный приемник, *4* – цифровой вольтметр

ного напряжения исследуемого приемника. Сигналы с выхода образцового аттенюатора *2* подаются на вход УПЧ приемника *3*.

Нелинейность определяется по участкам при ступенчатом изменении входных сигналов на 5 дБ в пределах каждой шкалы низкочастотного аттенюатора приемника.

При целочисленном показании $\alpha_{1,\,дБ}$ на шкале ОАПЧ и выбранном пределе НЧ аттенюатора приемника путем регулировки коэффициента усиления приемника устанавливается показание 10 В на цифровом вольтметре *4*. Затем с помощью регулировки ОАПЧ показание на вольтметре делается равным 3,16 В (т.е. уменьшается на 5 дБ) и отсчитывается показание $\alpha_{2,\,дБ}$ на шкале ОАПЧ. Нелинейность на выбранном интервале рассчитывается как

$$\delta_{нел,\,дБ} = \alpha_{2,\,дБ} - \alpha_{1,\,дБ} - 5\,дБ. \qquad (3.111)$$

или

$$\delta_{\text{нел},\%} = 10^{0.1\cdot\delta_{\text{нел, дБ}}}. \qquad (3.112)$$

Для повышения точности измерения повторяются несколько раз, а результат усредняется.

Аналогичным образом определяется нелинейность при работе на других шкалах аттенюатора приемника.

Испытания должны проводится, начиная с максимально допустимого по ТУ уровня сигналов на входе УПЧ приемника. По результатам измерений может быть введена поправка на нелинейность.

В автоматизированных измерителях поправка на нелинейность вводится в память микропроцессора.

в) Погрешность сравнения с контрольным методом δ_α.

При сравнении определяется коэффициент $\alpha_{\text{попр}}$, вводимый в качестве поправочного в формулу (3.93). Для уменьшения погрешности из-за индикаторного прибора часто используется цифровой электронный вольтметр повышенной точности. Погрешность сравнения δ_α в основном определяется случайной составляющей из-за разброса измерений.

Эта случайная составляющая погрешности находится путем статистической обработки результатов многократного измерения поправочного коэффициента. При этом определяется среднее значение коэффициента α:

$$\bar{\alpha}_{\text{попр}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\alpha_{\text{попр}\,i}, \qquad (3.113)$$

где α_i – результат одиночного измерения,
n – число измерений.
Погрешность вычисляется по формуле:

$$\delta_\alpha = \frac{3n}{\sum_{i=1}^{n}\alpha_{\text{попр}\,i}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\alpha^2_{\text{попр}\,i} - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}\alpha_{\text{попр}\,i}\right)^2}{n-1}}\cdot 100\%, \qquad (3.114)$$

где $\alpha_{\text{попр}\,i}$ – поправочный коэффициент, полученный при i-м измерении,
$i = 1, 2, \ldots n$ (n – число измерений).
Для уменьшения погрешности δ_α следует увеличить число измерений до 5–10.

г) Погрешность за счет *индикаторного прибора* $\delta_{инд}$ определяется классом точности этого прибора.

При использовании цифровых индикаторов погрешность обычно пренебрежимо мала, она рассчитывается по формуле

$$\delta_{инд.\%} = \left(K_1 + K_2 \frac{U_{пр}}{U_x} \right) \%, \qquad (3.115)$$

U_x – измеряемое значение напряжения, $U_{пр}$ – предел шкалы,
K_1 и K_2 – константы, указываемые для конкретного типа прибора.

При использовании аналоговых приборов отсчеты в первой трети шкалы не проводятся. При этом максимальная погрешность измерения абсолютных значений напряжений не превышает утроенного значения классности прибора. Однако следует учесть, что в связи с применяемой методикой выходной прибор ИКШ используется лишь для относительных отсчетов, поэтому погрешность уменьшается. При этом в первую очередь важна линейность отсчетов по прибору.

Определение нелинейности стрелочного прибора может быть проведено путем сравнения с цифровым прибором.

Часто в ИКШ параллельно используются цифровые и аналоговые индикаторы: по аналоговому проводится настройка, по цифровому – окончательный отсчет. Погрешность в этом случае определяется цифровым прибором.

После нахождения составляющих погрешностей по п.п. а, б, в, г рассчитывается общая погрешность измерения отношений $\delta_{иб}$ по формуле (3.107).

4) *Определение случайной составляющей погрешности измерения* $K_ш$.

Случайная составляющая погрешности измерения $\delta_{сл}$ определяется путем многократного измерения $K_ш$ какого-либо стабильного СВЧ усилителя с помощью исследуемого ИКШ по стандартной методике и дальнейшей статистической обработки полученных результатов.

$$\delta_{сл} = \frac{3n}{\sum_{i=1}^{n} K_{ш\,i}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} K_{ш\,i}^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} K_{ш\,i} \right)^2}{n-1}} \cdot 100\,\%, \qquad (3.116)$$

где $K_{ш\,i}$ – значение $K_ш$ полученное при i-м измерении,
$i = 1, 2, \ldots n$ (n – число измерений).

Величина случайной погрешности зависит от постоянной времени в индикаторной части ИКШ и принятых методов измерений $K_ш$: либо путем оди-

ночных отсчетов, либо путем определения средних значений $K_{ш}$ по серии отсчетов. Выражение (3.116) представляет погрешность при одном отсчете и при номинальной постоянной времени $\tau_н$ (обычно принимается $\tau_н = 1$ с.).

Для уменьшения случайной погрешности постоянную времени иногда увеличивают или проводят измерения с усреднением по сериям.

Случайная погрешность при постоянной времени τ, отличной от номинальной, равна:

$$\delta_\tau = \frac{\delta_{сл}}{\sqrt{\tau/\tau_н}}, \qquad (3.117)$$

где $\delta_{сл}$ – погрешность одиночного измерения при номинальной постоянной времени, в соответствии с формулой (3.116).

При измерении путем усреднения серии из n отсчетов определяется величина

$$K_{ш\,ср} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} K_{ш\,i}. \qquad (3.118)$$

Случайная погрешность при этом

$$\delta_{сл\,п} = \frac{\delta_{сл}}{\sqrt{n}}. \qquad (3.119)$$

Если перед каждым измерением $K_{ш}$ ГШСС присоединяется ко входу усилителя заново, то случайная погрешность включает также погрешность $\delta_н$ за счет невоспроизводимости потерь при соединении фланцев.

Величина случайной погрешности непосредственно связана с коэффициентом шума приемной части ИКШ (рис 3.36), поэтому в некоторых случаях контролируется не случайная составляющая погрешности, а коэффициент шума.

5) *Погрешность измерения стандартного $K_{ш}$, вызванная отличием температуры T поглощающих элементов тракта ГШСС от нормальной T_0.*

Эта погрешность определяется по формуле:

$$\boxed{\delta'_т = \frac{T - T_0}{T_0 \cdot K_{ш}} \cdot 100\,\%.} \qquad (3.120)$$

Она зависит от величины измеряемого $K_{ш}$. На рис. 3.41 показана зависимость $\delta'_т$ от T/T_0 при различных значения измеряемого $K_{ш}$.

Погрешность $\delta'_т$ обычно учитывается лишь при малых значения $K_{ш}$ в пределах 1,1–3,0 [66].

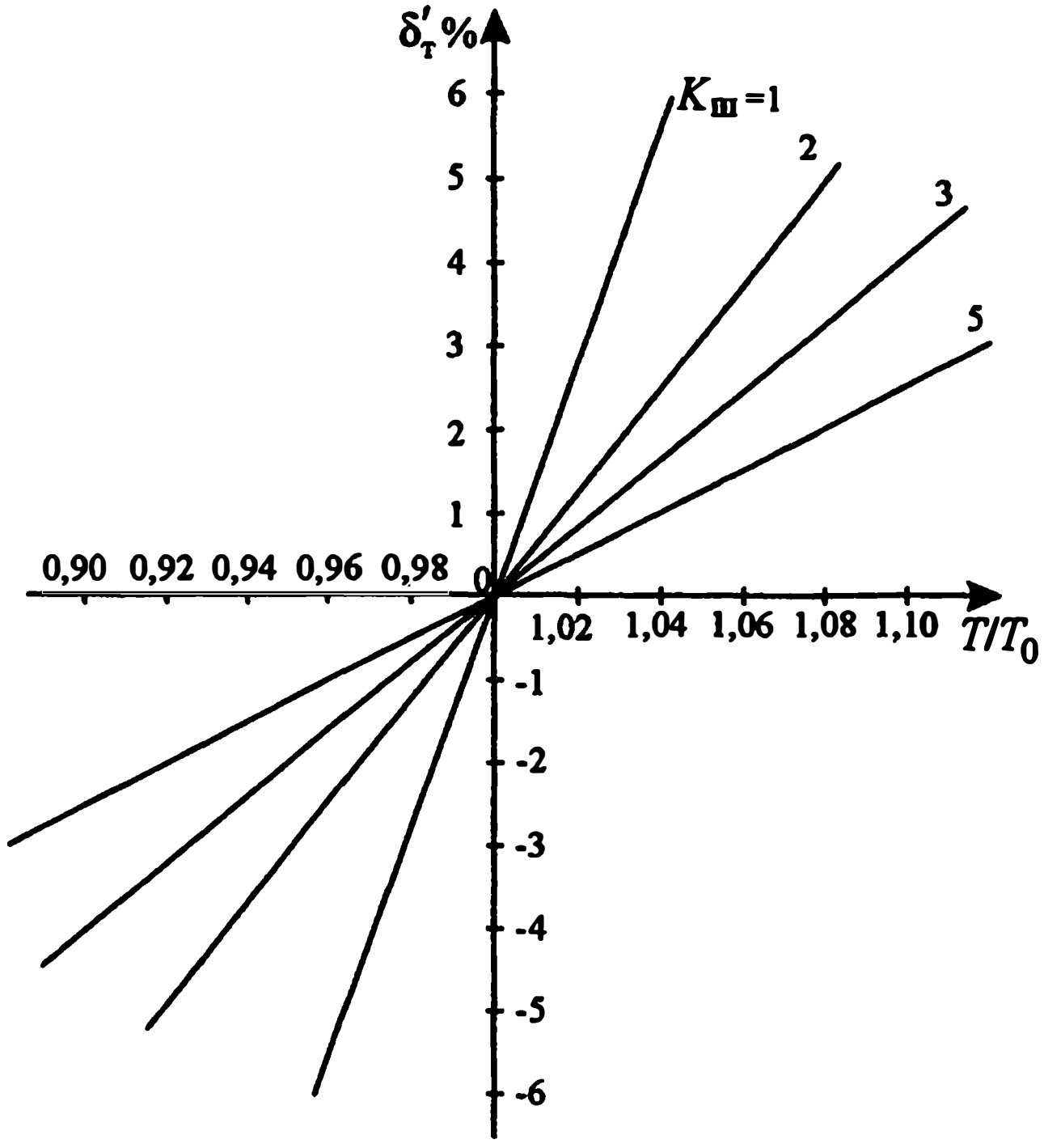


Рис. 3.41. Зависимость составляющей погрешности $\delta'_т$ от относительной температуры T/T_0 при различных $K_ш$

Погрешность $\delta'_т$ имеет систематический характер и в большинстве случаев в лабораторных условиях – положительную величину ($K_ш$ завышается). Часто это связано с нагревом газоразрядного источника шума.

Для уменьшения влияния погрешности в измеренное значение $K_{ш\ изм}$ может быть введена поправка

$$\Delta K_{шт} = -(T_{попр} - T_0)/T_0 , \qquad (3.121)$$

где $T_{попр}$ – температура поглощающих элементов ГШСС, найденная экспериментальным путем или путем расчета.

После этого в общую формулу (3.94) для погрешности измерения $K_ш$ подставляется неисключенный остаток температурной погрешности $\delta_т$, имеющий случайный характер.

6) *Частотная погрешность δ_f при измерении $K_ш$.*

Частотная погрешность, как указывалось в подразделе 3.3.3, определяется двумя факторами: погрешностью установки рабочей частоты ИКШ и ко-

нечной величиной разрешающей способности по частоте. На величину частотной погрешности непосредственно влияет частотная изрезанность характеристик исследуемого прибора, которая количественно определяется параметрами частотной изрезанности, введенными в подразделе 3.3.3. Погрешность рассчитывается по формуле:

$$\delta_f = \sqrt{\delta_{f_1}^2 + \delta_{f_2}^2}\,, \tag{3.122}$$

где

$$\delta_{f_1} = \beta_{f_{кш}} \cdot \delta_{f_{нкш}} \tag{3.123}$$

– погрешность за счет неточной установки частоты, определяемая техническими характеристика гетеродина (подраздел 3.3.3),

$\beta_{f_{кш}}$ – коэффициент частотной изрезанности характеристики $K_ш$,

$\delta_{f_{нкш}}$ – относительная погрешность установки рабочей частоты ИКШ,

$$\delta_{f_2} = \frac{1}{4} \cdot \beta_{f_{кш}} \cdot \beta_{f_{ку}} \cdot \psi_f^2\,, \tag{3.124}$$

$\beta_{f_{ку}}$ – коэффициент частотной изрезанности характеристики $K_у$,

ψ_f – относительная разрешающая способность ИКШ по частоте.

Может быть также найдена составляющая частотной погрешности, возникающая из-за неравномерности частотной характеристики СПМШ ГШСС [15]. Однако в силу малой изрезанности этой характеристики соответствующая погрешность обычно очень мала.

Частотная погрешность δ_f может быть существенной при измерении $K_ш$ очень узкополосных усилителей, а также двухканальных приемных устройств с высокой промежуточной частотой. В большинстве других случаев этой составляющей погрешности пренебрегают.

7) *Погрешность $\delta_{ку}$ в измерении $K_ш$, связанная с неточностью определения $K_у$.*

Определяемое значение $K_ш$, в соответствии с (2.49), составляет:

$$K_ш = K_{ш\,изм} + 1/K_у \tag{3.125}$$

(при $\alpha_{попр} = 1$).

Проделаем преобразования, позволяющие найти аналитическую связь между погрешностью определения $K_у$ и связанную с этим погрешность определения $K_ш$. В соответствии с (3.125), дифференциал

$$dK_{ш} = d\left(\frac{1}{K_y}\right) = -\frac{1}{K_y^2}\cdot dK_y, \qquad (3.126)$$

$$\frac{dK_{ш}}{K_{ш}} = \frac{d\left(\frac{1}{K_y}\right)}{K_{ш\,изм} + \frac{1}{K_y}} = \frac{-dK_y}{K_y^2\left(K_{ш\,изм} + \frac{1}{K_y}\right)} = \frac{-dK_y}{K_y\left(1 + K_{ш\,изм}\cdot K_y\right)}. \qquad (3.127)$$

Считая, что $K_{ш\,изм} \approx K_{ш}$,

$$\frac{dK_y}{K_y} \approx \delta K_y \qquad (3.128)$$

и

$$\frac{dK_{ш}}{K_{ш}} \approx \delta K_{ш}, \qquad (3.129)$$

для анализируемой составляющей относительной погрешности получим следующее выражение:

$$\left|\delta_{K_y}\right| = \frac{1}{1 + K_{ш}\cdot K_y}\cdot \delta K_y. \qquad (3.130)$$

Таким образом, погрешность в измерении $K_{ш}$, определяемая погрешностью в определении K_y, рассчитывается по формуле (3.130).

На рис. 3.42 показаны зависимости величины этой погрешности от произведения $K_{ш}\cdot K_y$ при различных погрешностях измерения K_y, позволяющие оценить, при каких условиях следует учитывать рассматриваемую составляющую погрешности. Как видно, погрешность оказывается заметной при малых значения K_y и большой погрешности его определения. Погрешность δK_y при измерениях по методу двух ГШ [69, с.15]рассчитывается в соответствии с [69, с.74]. Ее характерная величина ± (1–2)дБ.

В большинстве случаев погрешностью δ_{K_y} пренебрегают, однако это должно быть обосновано с использованием формулы (3.130).

3.5.2.3 Пример расчета погрешности измерения $K_{ш}$

Необходимо рассчитать погрешность измерения минимального $K_{ш}$ СВЧ усилителя с заданными параметрами с помощью ИКШ, работающего по методу линейной шкалы.

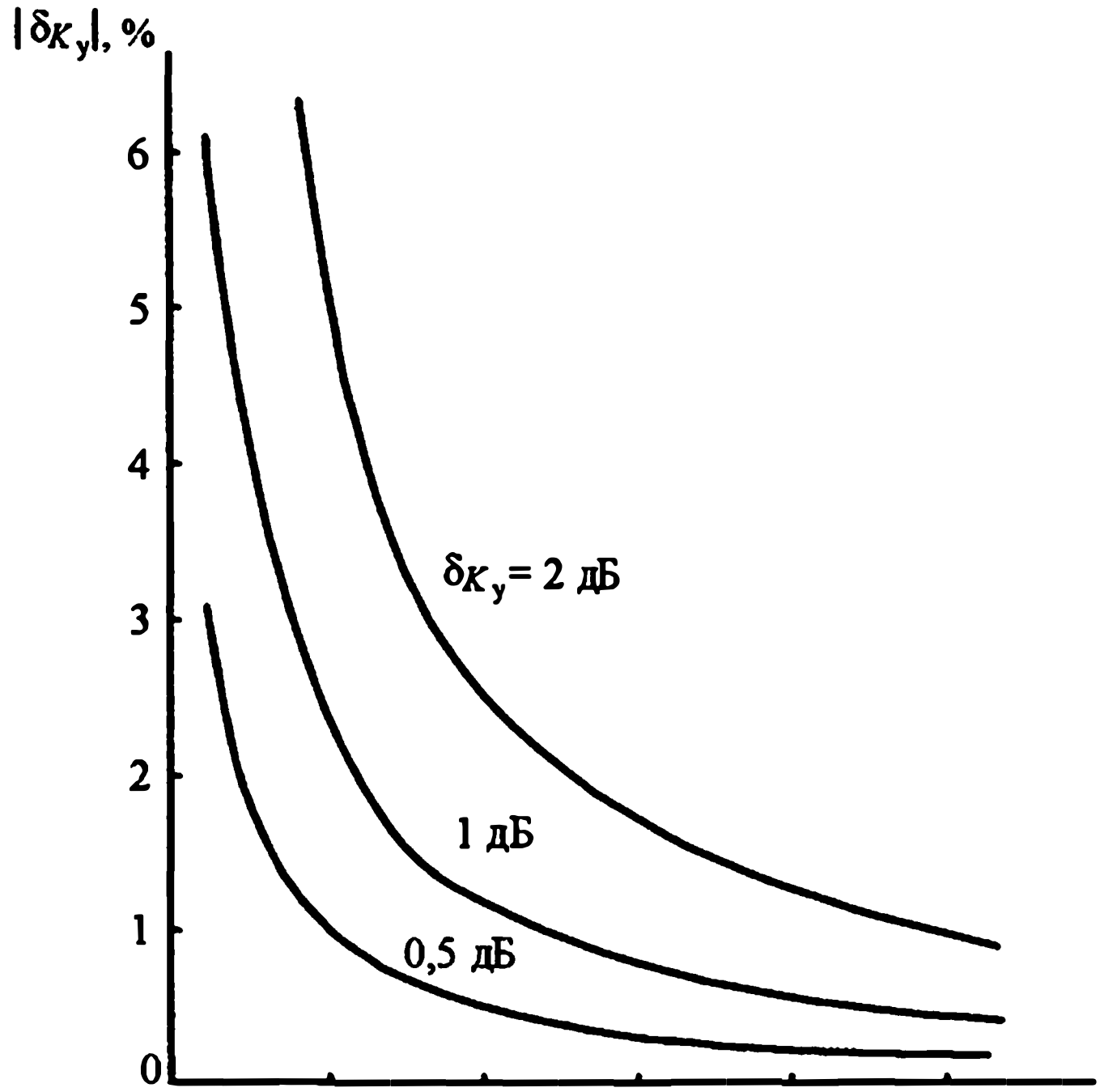


Рис. 3.42. Зависимость погрешности $\delta_{K_у}$ от произведения $K_ш$ $K_у$ при различных значения погрешности $\delta_{K_у}$

Задано:

А – параметры СВЧ усилителя.

1. **Диапазон частот усилителя** — **2–4 ГГц**
2. **Пределы значений $K_ш$** — **2–50**
3. **Пределы изменения $K_у$ усилителя** — **15–25 дБ**
4. **Коэффициенты частотной изрезанности:**
   - **по $K_ш$** $\beta_{f_{Kш}}$ — **не более 1,5**
   - **по $K_у$** $\beta_{f_{Kу}}$ — **не более 3**
5. **КСВН входа усилителя** — **не более 2**
6. **КСВН выхода усилителя** — **не более 2**
7. **Крутизна изменения $K_ш$ усилителя в зависимости от рассогласования на входе** $\beta_{K_ш}$ — **не более 1,6**
8. **Тип СВЧ тракта** — **коаксиал 7/3,04 мм**

Б – параметры ИКШ.

1. Диапазон рабочих частот	2–4 ГГц
2. Разрешающая способность по частоте	Δf = 12 МГц
3. Погрешность установки рабочий частоты	$\Delta f_{икш}$ = 0,05 %
4. Пределы изменения физической температуры выходного сопротивления ГШСС	(20 ± 20)° С
5. Погрешность измерения $K_у$	± 1,5(± 40 %) дБ
6. Тип и класс выходного индикатора:	
– аналоговый	1,5 %
– цифровой	0,3 %
7. ГШСС ИКШ содержит согласующий трансформатор с максимальным КСВН	3
имеется возможность установки заданного выходного КСВН в пределах	1–3
8. Паразитная модуляция КСВН $\delta\sigma_{гш}$	0,05
9. Относительная СПМШ ГШСС	50

Определение погрешности

Погрешность рассчитывается по формуле (3.94)

$$\delta K_{ш,\%} = \pm 1{,}96\left[\left(\frac{\delta_{гш}}{3}\right)^2 + \left(\frac{\delta_в}{2{,}45}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{иб}}{1{,}73}\right)^2 + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{\delta_{сл}}{3}\right)^2 + \left(\frac{\delta_т}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_f}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{ку}}{1{,}73}\right)^2\right]^{1/2}.$$

Проведем численную оценку составляющих погрешностей.

Погрешность градуировки ГШСС $\delta_{гш}$ указывается в паспорте на градуировку ГШСС.

В соответствии с [61], для заданного диапазона частот в коаксиальном канале 7/3,04 мм и при ОСПМШ, равной 50, эта составляющая $\delta_{гшсс} \le 5\,\%$. Вариация потерь в согласующем трансформаторе, в соответствии с результатами испытаний при поверке, $\delta_в < 2{,}3\,\%$.

Погрешность измерения отношений $\delta_{иб}$ определяется по формуле (3.107)

$$\delta_{иб} = \pm 1{,}96\sqrt{\left(\frac{\delta_{дел}}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{нел}}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_\alpha}{1{,}73}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{инд}}{1{,}73}\right)^2}.$$

Составляющие $\delta_{дел}$, $\delta_{нел}$, δ_{α}, входящие в формулу, определяются экспериментально при поверке ИКШ в соответствии с подразделом (3.5):

$$\delta_{дел} < 1\%, \quad \delta_{нел} < 2\%, \quad \delta_{\alpha} < 2\%.$$

При этом $\delta_{иб} < 3{,}8\%$.

Случайная погрешность $\delta_{сл}$ определяется экспериментально при поверке установки в соответствии с разделом 3.5.2. Ее величина составила

$$\delta_{сл} < 3\%.$$

Температурная погрешность (без введения поправки)

$$\delta'_{т} = \frac{T - T_{о}}{T_{о} \cdot K_{ш}} \cdot 100\%.$$

Она вычисляется для наименьшего $K_{ш}$ СВЧ усилителя ($K_{ш} = 2$) при $T = T_{мин}$ = =270 К и при $T = T_{макс} = 310$ К. При этом $\delta'_{т} = \pm 3\%$.

Частотная погрешность

$$\delta_{f} = \sqrt{\delta_{f_1}^2 + \delta_{f_2}^2}.$$

При $\Delta f = 12$ МГц, $f_{мин} = 2000$ МГц, $\delta_{fикш} = 0{,}05$, $\beta_{fку} = 3$, $\beta_{fкш} = 1{,}5$.

$$\psi_{f} = \frac{\Delta f \cdot 100\%}{f_{мин}} = 0{,}6\%,$$

$$\delta_{f_1} = \beta_{f_{кш}} \cdot \delta_{f_{икш}} = 1{,}5 \cdot 0{,}05 = 0{,}08 \approx 0{,}1\%.$$

$$\delta_{f_2} = \frac{1}{4} \cdot \psi_{f}^2 \cdot \beta_{f_{кш}} \cdot \beta_{f_{ку}} = \frac{1}{4}\left(0{,}6 10^{-4}\right)^2 \cdot 3 \cdot 1{,}5 \approx 0{,}01\%.$$

Как видно, частотной погрешностью в целом при этом можно пренебречь:

$$\delta_{f} \approx 0.$$

Погрешность $K_{ш}$, связанная с неточностью измерения $K_{у}$ при $K_{у\ мин}$ = 30(15 дБ) и при $\delta K_{у} = 40\%$:

$$\delta K_{у} = \frac{1}{1 + K_{ш} K_{у}} \cdot \delta K_{у} = \frac{1}{1+60} 40\% = 0{,}7\%$$

Учитывая малость этой составляющей по сравнение с другими, ею можно пренебречь: $\delta_{K_{у}} \approx 0$.

Оценим погрешность, из-за паразитной модуляции КСВН (см. табл. 3.1,

$\delta K_{\text{у пму}} = \beta_{\text{кш}} \cdot (\delta\sigma_{\text{гш}})^2 = 1{,}6(0{,}05)^2 < 0{,}5\%$, т.е пренебрежимо мала.

Суммарная аппаратурная погрешность ИКШ при найденных величинах составляющих, в соответствии с формулой (3.94), равна:

$$\delta K_{\text{ш}}(\%) = \pm 8{,}4\%(\pm 0{,}26\text{дБ}).$$

Полученное значение погрешности укладывается в рамки норм (±(0,4–0,45) дБ), устанавливаемых [68, 69] для ИКШ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема достоверного определения чувствительности приемных электронных СВЧ устройств не теряет актуальности уже несколько десятилетий. Ее значение определяется все более широким применением электронных СВЧ приборов в современной науке, технике, биологии, медицине и других областях. Как традиционные, так и вновь развивающиеся методы активной и пассивной радиолокации со сложной обработкой приходящих сигналов в своей основе опираются на использование электронного прибора с малой величиной собственного шума. Лампы бегущей волны и транзисторные усилители, параметрические и квантово-механические усилители различных типов с предельно низкими шумами – все эти приборы определяют чувствительность приемных систем, в состав которых они входят, и требуют оценки как в процессе разработки и выпуска, так и в условиях эксплуатации.

Как уже отмечалось, использование прибора в реальной СВЧ системе, где имеет место рассогласование, причем часто непредсказуемое, вызывает необходимость контроля усилительного прибора не только по одиночному параметру ($K_ш$ или $T_у$) в условиях стандартного согласования, но и по другим параметрам, определяющим его критичность к изменению собственного шума в условиях, отличных от условий испытаний при выпуске. Для решения этой задачи следует применять систему из 4-х шумовых параметров, характеризующих усилитель при произвольном рассогласовании. Если вопрос оценки усилителя при стандартном согласовании можно считать в основном решенным и практически обеспеченным методикой и аппаратурой, то для технического и юридического внедрения испытаний по системе шумовых параметров остается большое открытое поле деятельности. В частности, для создания нагрузок с заданным импедансом, что необходимо при измерения системы параметров, требуется разработка аттестуемых электрически управля-

емых согласующих устройств с малыми потерями и большими значениями вносимых коэффициентов отражения. Это становится особенно актуальным в связи с широким использованием в настоящее время полупроводниковых усилителей, обычно сильно рассогласованных по отношению к СВЧ линии передачи.

Особое значение имеет развитие техники шумовых измерений в миллиметровом диапазоне длин волн. Освоение этого диапазона и использование его для систем связи, в медицинской практике, для систем наведения и в других областях требует развития соответствующих методов и аппаратуры для контроля чувствительности миллиметровых приемных устройств. К настоящему времени в этом диапазоне в основном лишь создана база для аттестации шумовых источников по СПМШ. Остаются до конца нерешенными задачи создания измерительных генераторов шума во всех волноводных каналах миллиметрового диапазона и устройств согласования с малыми потерями, не изменяющимися при перестройках.

Остается важной проблема повышения быстродействия измерения шумовых сигналов при условии сохранения малой величины флуктуационной составляющей погрешности. Актуальность этой проблемы возрастает в связи с применением встроенных систем для оперативного контроля чувствительности и панорамных установок для наблюдения частотных характеристик СПМШ, коэффициента шума и шумовой температуры. Известный шаг в направлении повышения быстродействия, как указывалось ранее, сделан при использовании так называемого "идеального интегратора" и метода практически мгновенного локального сравнения исследуемого и образцового шума. Интенсивное развитие исследований по цифровой обработке сигналов позволяет надеяться на дальнейший прогресс в решении этой проблемы.

По-видимому, требует внимания задача оптимального совмещения цифровых и аналоговых методов при шумовых измерениях. Особое значение имеет этот вопрос в процессе настройки исследуемого объекта (усилитель, приемник и т.д.) на наилучшую чувствительность, когда оператор добивается направленного изменения показаний индикатора. В этом случае наиболее удобно наблюдать процесс в реальном масштабе времени по принципу "больше-меньше". Это позволяет осуществить аналоговая шкала. Цифровой отсчет изменяющейся и флуктуирующей величины здесь явно проигрывает. В то же время после настройки объекта результат измерений наиболее точно может быть отсчитан (или зафиксирован в памяти) цифровыми методами. Таким образом, совмещение возможностей двух видов индикации должно закладываться в аппаратуру для контроля чувствительности по шумовым сигналам.

Многие современные ИКШ автоматизированы и снабжены внутренним микропроцессором для управления измерительным процессом и обработкой

результатов. Это обеспечивает сервис при измерениях и повышает точность. Однако, с другой стороны, такие системы значительно ограничивают инициативу оператора и не позволяют ему в необходимых случаях вмешаться в измерительный процесс, что часто бывает нужно, например, при исследовательских работах или при неблагоприятных результатах измерений. Использование внешней ЭВМ [115, 174] по сравнению со встроенным микропроцессором дает возможность гибкого изменения программы (пакет программ) и более широкие возможности при измерении, обработке сигналов и представлении результатов. Направление создания измерительной аппаратуры с внешней стандартной ЭВМ, по-видимому, находится в стадии дальнейшего развития.

Перспективным является направление работ по применению для шумовых измерений коррелометров и преобразователей Фурье [46]. Это означает переход от аналоговых методов анализа цепей к цифровым и использование программных решений вместо схемных.

Как известно, увеличение количества радиосредств и "теснота" в эфире привели к возникновению проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) [108], одним из следствий существования которой явилась опасность снижения чувствительности приемных устройств из-за влияния мешающих источников сигналов. Для оценки этого влияния оказалось необходимым ввести дополнительные характеристики и параметры приемных устройств СВЧ диапазона, такие, как двухсигнальный коэффициент шума, коэффициент блокирования и др. [4–6]. Это направление разработки специальных характеристик чувствительности, методов и аппаратуры для их измерения в связи с все бóльшим уплотнением эфира, в том числе и в диапазоне СВЧ, очевидно, также требует своего дальнейшего развития.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$C = 3 \cdot 10^{10}$ см/с – скорость света
$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана
$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж · С – постоянная Планка
$T_0 = 293{,}16$ К – нормальная температура
$p(f)$ – фактор Планка
$E(t)$ – ЭДС
$I(t)$ – ток
$U(t)$ – напряжение
t – время
f – частота
Δf – полоса частот
λ – длина волны
φ, ψ – фаза
l – длина линии передачи
ρ – волновое сопротивление линии передачи
$\Gamma = |\Gamma| e^{j\psi}$ – коэффициент отражения
α – коэффициент потерь
$\beta = 2\pi/\lambda$ – фазовая постоянная
$Z = R + jX$ – комплексное сопротивление
R – активное сопротивление
X – реактивное сопротивление
$y = G + jв$ – комплексная проводимость
G – активная проводимость
b – реактивная проводимость
σ – коэффициент стоячей волны КСВН
d – коэффициент передачи ($d \leq 1$)

N – коэффициент потерь ($N \geq 1$)
A – коэффициент несогласованности ($A \leq 1$)
n, θ – число, отношение
τ – постоянная времени, время измерений
$\tau_{кор}$ – время корреляции
Δ – символ абсолютной погрешности
δ – символ относительной погрешности
T – абсолютная температура
$T_ш$ – шумовая температура
$T_у$ – шумовая температура усилителя
$t = T_ш / T_0$ – относительная шумовая температура
$t_у = T_у / T_0$ – относительная шумовая температура усилителя
$t' = t - 1$ – избыточная относительная температура
$t_{пр}$ – шумовое отношение преобразователя
P – мощность
$P_ш$ – мощность шума
$P_{пор}$ – пороговая чувствительность
$p_ш = P_ш / \Delta f$ – спектральная плотность мощности (СПМШ), Вт/Гц
$p_{шо}$ – СПМШ теплового излучателя при температуре T_0
$p'_ш = p_ш / kT_0$ – относительная СПМШ
$G = p'_ш - 1$ – избыточная относительная СПМШ
$K_ш$ – коэффициент шума
$K_у$ – коэффициент усиления
$K_{шо}$ – стандартный $K_ш$ при температуре входной нагрузки T_0
$K_{шz}$ – $K_ш$ при заданном сопротивлении z на входе
$K_{шρ}$ – $K_ш$ при волновом сопротивлении ρ на входе
$K_{ш*}$ – $K_ш$ при комплексно-сопряженном согласовании на входе
$K_{ш\,мин}$ – минимальный (оптимальный) $K_ш$
$K_{ш|Γ|}$ – максимальный $K_ш$ при заданном $|\Gamma|$ (предельный)
$K_{ш\,инт}$ – интегральный $K_ш$
$K_{шΣ}$ – суммарный $K_ш$ при каскадном соединении
$K_{шр}$ – реальный $K_ш$ при нагрузке на входе, находящейся при реальной температуре $T_р$
$K_{ш\,пр}$ – $K_ш$ преобразователя
$K_{ш\,норм}$ – нормированный $K_{ш\,пр}$ при $K_ш$ УПЧ, равном 1,5 дБ
$K_{ш\,ип}$ – $K_ш$ измерительного приемника
S – матрица рассеяния, элемент матрицы
a – волна сигнала в направления к четырехполюснику
$в$ – волна сигнала в направлении от четырехполюсника
$a_ш$ – волна шума в направлении к четырехполюснику

$в_ш$ – волна шума в направлении от четырехполюсника
$\gamma_{кор}$ – коэффициент корреляции рассеяния между волнами $а_ш$ и $в_ш$
γ_{IE} – коэффициент корреляции между током и напряжением
A_0, B_0, C_0, $Д_0$ – элементы [$АВСД$] – матрицы
C –коэффициент увеличения шума усилителя
m – коэффициент переменной составляющей шума усилителя
M – шумовое число
$Д$ – дальность действия радиолокационной станции
ψ_f – относительная разрешающая способность приемника по частоте
$\beta_{кш}$ – крутизна изменения $K_ш$ при рассогласовании
$K_{ку}$ – коэффициент определяемый типом радиометрического измерительного устройства
α_0, α_1, α_2 – показания приемника
A_T, B_T, C_T – коэффициенты при расчете погрешности измерения $T_у$ при отсутствии потерь
A_{TN}, B_{TN}, C_{TN}, β_N, γ_N – коэффициенты при расчете погрешности измерения $T_у$ в случае наличия потерь
$а_{зер}$ – относительная чувствительность приемника по зеркальному каналу
$\beta_{f(G)}$, $\beta_{f(кш)}$, $\beta_{f(ку)}$ – параметры частотной изрезанности соответственно СПМШ, $K_ш$ и $K_у$
Y – отношение мощностей при измерении $K_ш$ методом «Y-фактора»
Q – модуляционный выигрыш в чувствительности
$а_{попр}$ – поправочный коэффициент при паспортизации ИКШ
v_j – потенциал ионизация газа
p_0 – давление газа
$R_{тр}$ – радиус разрядной трубки
ГШ – генератор шума
ГШСС – генератор шумового стандартного сигнала
ИКШ– измеритель коэффициента шума
УПЧ– усилитель промежуточной частоты
ПУПЧ – предварительный усилитель промежуточной частоты

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

ГЕНЕРАТОРЫ ШУМА.

1. Генераторы шума простые.

1.1. Генераторы шума простые коаксиальные.

1.1.1. Газоразрядные ГШ простые коаксиальные.

1.1.2. Полупроводниковые ГШ простые коаксиальные:

а) в канале 7/3,04 мм,

б) в канале 3,5/1,52 мм.

1.2. Генераторы шума простые волноводные.

1.3. Генераторы шума, рекомендуемые [61].

2. Генераторы шума составные.

2.1. Генераторы шума составные коаксиальные.

2.1.1. Газоразрядные ГШ составные коаксиальные.

2.1.1-а. Газоразрядные составные ГШ на основе коаксиальных патронов.

2.1.1-б. Газоразрядные составные ГШ на основе волноводных патронов с волноводно-коаксиальными переходами.

2.1.2. Полупроводниковые ГШ составные коаксиальные

2.1.2-а. ГШ с регулировкой выходного сопротивления одним согласующим трансформатором

2.1.2-б. ГШ с регулировкой выходного сопротивления двумя согласующими трансформаторами

2.2. Генераторы шума составные волноводные

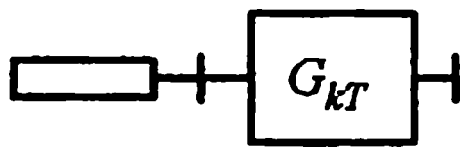
2.2.1. Волноводные ГШ с регулировкой выходного сопротивления

2.2.2. Волноводные ГШ без регулировки выходного сопротивления

3. Газоразрядные лампы, используемые в генераторах шума

1. ГЕНЕРАТОРЫ ШУМА ПРОСТЫЕ

Структурная схема ГШ



1.1. ГЕНЕРАТОРЫ ШУМА ПРОСТЫЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ

1.1.1. Газоразрядные ГШ простые коаксиальные

Таблица 1

Диапазон частот, ГГц	Выходной канал, мм	СПМШ, kT_0	КСВНх, не более	КСВНг, не более	Тип лампы
0,7–4,0	7/3,04	50–70	1,5 на частотах от 0,7 до 3,2 ГГц	1,5 на частотах от 0,7 до 3,2 ГГц	ГШ 11
3,2–12,05	7/3,04	50–70	1,5	1,5	ГШ 11

КСВНх – КСВН выключенного ГШ (“холодного”)

КСВНг – КСВН включенного ГШ (“горячего”)

1.1.2. Полупроводниковые ГШ простые коаксиальные

Таблица 2

а) в канале 7/3,04 мм.

№	Диапазон частот, ГГц	Тип, литер	СПМШ, дБ	Неравномерность СПМШ, дБ	КСВН, не более	Ток ГШ, мА
1	0,01–1,20	М41-307-1	15	1,0	1,3	10–30
2	– " –	М41-308-1	18	1,0	1,3	– " –
3	– " –	М41-309-1	27	3,0	–	– " –
4	1,00–8,15	М41-307-2	15	1,0	1,3	– " –
5	– " –	М41-308-2	18	1,0	1,3	– " –
6	– " –	М41-309-2	27	3,0	1,3	– " –
7	8,00–12,00	М41-307-3	15	1,0	1,3	– " –
8	– " –	М41-308-3	18	1,0	1,3	– " –
9	– " –	М41-309-3	27	3,0	–	– " –
10	8,00–17,85	М41-307-4	15	1,5	1,4	– " –
11	– " –	М41-308-4	18	1,5	1,4	– " –
12	– " –	М41-309-4	27	4,0	–	– " –
13	1,00–12,00	М41-307-5	15	1,5	1,3	– " –
14	– " –	М41-308-5	18	1,5	1,3	– " –
15	– " –	М41-309-5	27	4,0	–	– " –
16	1,00–17,85	М41-307-6	15	1,5	1,4	– " –
17	– " –	М41-308-6	18	1,5	1,4	– " –
18	– " –	М41-309-6	27	4,0	–	– " –

ПРИМЕЧАНИЕ: Имеется аналогичный комплект ГШ с повышенными требованиями при приемке. Обозначение этих ГШ М41-313, М41-314, М41-315 с соответствующими литерами.

Таблица 3

б) в канале 3,5/1,52 мм.

№	Диапазон частот, ГГц	Тип, литер	СПМШ, дБ	Неравномерность СПМШ, дБ	КСВН, не более	Ток ГШ, мА
1	2	3	4	5	6	7
1	0,01–1,20	М41-310-1	15	1	1,3	10–30
2	– " –	М41-311-1	18	1	1,3	– " –
3	– " –	М41-312-1	27	3	–	– " –

Таблица 3 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
4	1,00–8,15	М41-310-2	15	1	1,4	–"–
5	–"–	М41-311-2	18	1	1,4	–"–
6	–"–	М41-312-2	27	3	–	–"–
7	8,00–12,00	М41-310-3	15	1	1,4	–"–
8	–"–	М41-311-3	18	1	1,4	–"–
9	–"–	М41-312-3	27	3	–	–"–
10	11,70–17,85	М41-310-4	15	1,5	1,5	–"–
11	–"–	М41-311-4	18	1,5	1,5	–"–
12	–"–	М41-312-4	27	4	–	–"–
13	1,00–12,00	М41-310-5	15	1	1,4	–"–
14	–"–	М41-311-5	18	1	1,4	–"–
15	–"–	М41-312-5	27	3	–	–"–
16	1,00–17,85	М41-310-6	15	1,5	1,5	–"–
17	–"–	М41-311-6	18	1,5	1,5	–"–
18	–"–	М41-312-6	27	4	–	–"–

ПРИМЕЧАНИЕ: Генераторы шума с повышенными требованиями при приемке обозначаются М41 -316, М41-317, М41-318 с соответствующими литерами.

1.2. ГЕНЕРАТОРЫ ШУМА ПРОСТЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ

(Все приведенные генераторы – газоразрядные.)

№	Диапазон частот, ГГц	Сечение волновода, мм	СПМШ, kT_0	КСВНх, не более	КСВНг, не более	Тип лампы
1	3,86–5,96	48×24	50 –70	1,4	1,4	ГШ–10
2	5,85–8,15	35×15	–"–	–"–	–"–	ГШ–10
3	6,58–10,02	28,5×12,6	–"–	–"–	–"–	ГШ–11
4	8,15–12,42	23×10	–"–	–"–	–"–	ГШ–11
5	11,03–16,80	17×8	–"–	–"–	–"–	ГШ–11
6	11,72–17,85	16×8	–"–	–"–	–"–	ГШ–11

1.3. ГЕНЕРАТОРЫ ШУМА, РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СООТВЕТСТВИИ С [61]

№	Диапазон частот, ГГц	Тип генератора	Примечание
1	0,002–0,60	Я8Х-280	диодный
2	0,484–3,20	Я5Х-268	газоразрядный
3	3,200–12,05	Я5Х-269	– " –
4	12,050–17,44	Я5Х-270	– " –
5	17,440–25,86	Я5Х-271	– " –
6	25,860–37,50	Я5Х-272	– " –

*Генераторы разработаны Каунасским научно–исследовательским институтом радиоизмерительной техники (КНИИРИТ).

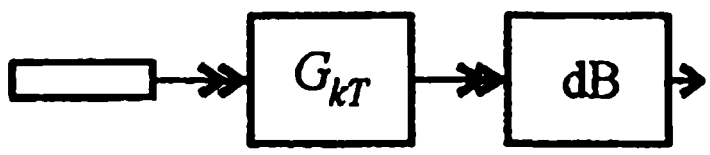
2. ГЕНЕРАТОРЫ ШУМА СОСТАВНЫЕ

2.1. ГЕНЕРАТОРЫ ШУМА СОСТАВНЫЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ

2.1.1. Газоразрядные ГШ составные коаксиальные

2.1.1-а. Газоразрядные составные ГШ на основе коаксиальных патронов

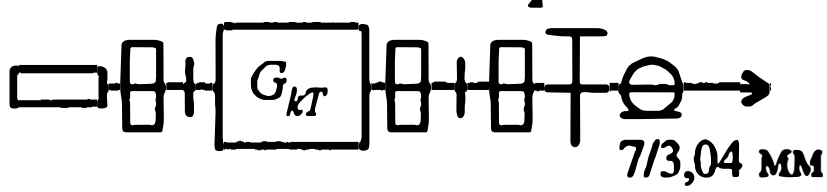
Структурная схема ГШ:



№	Диапазон частот, ГГц	Выходной канал, мм	СПМШ, kT_0	КСВН, не более	Тип лампы
1	0,7–3,2	7/3,04	10–20	1,40	ГШ-11
2	3,2–12,0	7/3,04	10–20	1,40	ГШ-11
3	1,1–1,8	7/3,04	10–20	1,15	ГШ-11

2.1.1-б. Газоразрядные составные ГШ на основе волноводных патронов с волноводно-коаксиальными переходами

Структурная схема ГШ:

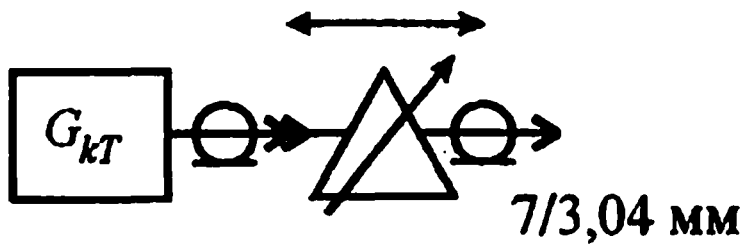


№	Диапазон частот, ГГц	Сечение волновода, мм	СПМШ, kT_0	КСВНх, не более	КСВНг, не более	Тип лампы
1	3,86–5,96	24 × 48	50–66	1,5	1,5	ГШ-10
2	5,35–8,15	35 × 15	– " –	– " –	– " –	ГШ-10
3	11,03–16,80	17 × 8	– " –	– " –	– " –	ГШ-11
4	8,15–12,42	23 × 10	– " –	– " –	– " –	ГШ-11
5	11,72–17,85	16 ×8	– " –	– " –	– " –	ГШ-11

2.1.2. Полупроводниковые ГШ составные коаксиальные

2.1.2-а. ГШ с регулировкой выходного сопротивления одним согласующим трансформатором

Структурная схема ГШ:

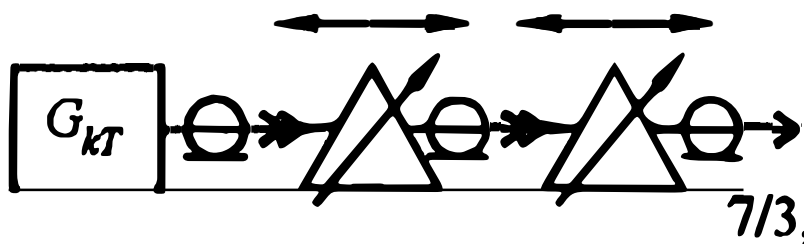


№	Диапазон частот, ГГц	СПМШ, дБ	Пределы регулировки КСВН	Вариация потерь согласующего трансформатора, дБ, не более	Тип ГШ
1	1–2	18	1–3	0,2	М41.311-2
2	2–4	18	1–3	– " –	М41.311-2
3	3–7	18	1–3	– " –	М41.311-2
4	6–10	18	1–3	– " –	М41.311-3
5	8–12	18	1–3	– " –	М41.311-3
6	11–17	18	1–3	– " –	М41.311-4

Характеристики элементов, входящих в состав перечисленных ГШ, приведены в подразделе 1.1.2 Приложения 1 и в Приложении 3.

2.1.2-б. ГШ с регулировкой выходного сопротивления двумя согласующими трансформаторами

Структурная схема ГШ:



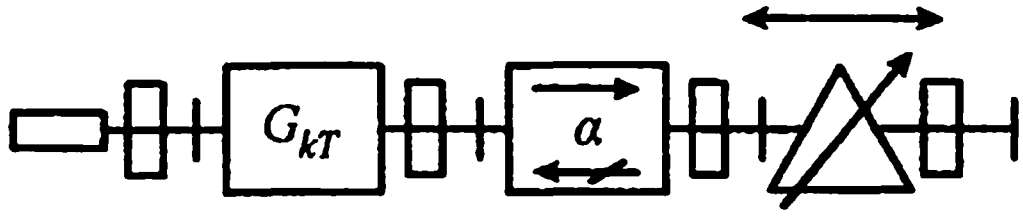
№	Диапазон частот, ГГц	СПМШ, дБ	Пределы регулировки КСВН	Тип ГШ
1	1 –2	18	1–3	М41.311-2
2	2–4	18	1–3	М41.311-2
3	3 –7	18	1–3	М41.311-2
4	6–10	18	1–3	М41.311-3
5	8 –12	18	1–3	М41.311-3
6	11 –17	18	1–3	М41.311-4

Характеристики элементов, входящих в состав перечисленных ГШ, приведены в подразделе 1.1.2 Приложения 1 и в Приложении 3.

2.2. ГЕНЕРАТОРЫ ШУМА СОСТАВНЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ

2.2.1. Волноводные ГШ с регулировкой выходного сопротивления

Структурная схема ГШ:

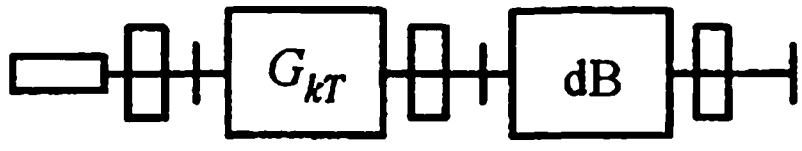


№	Диапазон частот, ГГц	Сечение волновода, мм	СПМШ, kT_0	Пределы регулировки КСВН	Вариация потерь в согласующем трансформаторе, дБ, не более	Тип лампы
1	3,86–5,96	48×24	45–55	1–2	0,15	ГШ 10
2	5,35–8,15	35×15	–"–	–"–	–"–	ГШ 1 (ГШ 10)
3	6,58–10,02	28,5×12,6	–"–	–"–	–"–	ГШ 2 (ГШ 11)
4	8,15–12,42	23×10	–"–	–"–	–"–	ГШ 11
5	–"–*	–"–	10–20	–"–	–"–	–"–
6	11,03–16,80	17×8	45–55	–"–	–"–	–"–
7	11,72–17,85*	16×8	10–20	–"–	–"–	–"–

*Развязка в виде ослабителя 6 дБ.

2.2.2. Волноводные ГШ без регулировки выходного сопротивления

Структурная схема ГШ:



№	Диапазон частот, ГГц	Сечение волновода, мм	СПМШ, kT_0	КСВН, не более	Тип ГШ
1	3,86–5,96	48×24	10–20	1,15	ГШ 10
2	5,35–8,15	35×15	10–20	1,15	–"–
3	6,58–10,02	12,6×28,5	10–20	1,15	ГШ 11
4	8,15–12,42	23×10	10–20	1,15	–"–
5	11,03–16,80	17×8	10–20	1,15	–"–
6	11,72–17,85	16×8	10–20	1,15	–"–

3. ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАМПЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ГЕНЕРАТОРАХ ШУМА

№	Тип	Диаметр, мм	Наполнение	$I_а$, мА	$U_а$, В	$U_н$, В	$I_{н\,max}$, А	СПМШ, kT_0	Примечание
1	ГШ-6	2,3	неон	60	170–215	6,3	0,40–0,55	61	
2	ГШ-6А	2,3	аргон	100	–	6,3	0,40–0,55	–	
3	ГШ-5	3,6	неон	70	210	6,3	0,5	63	
4	ГШ-5А	3,6	аргон	110	–	6,3	0,5	–	
5	ГШ-2	7,0	неон	150	200–300	11,5	1,09–1,40	65	Заменяется ГШ-11
6	ГШ-11	7,0	–"–	150	260–310	6,3	1,07–1,22	62	
7	ГШ-1	10,0	–"–	150	200–300	11,5	1,1	62	Заменяется ГШ-10
8	ГШ-10	10,0	–"–	150	260–310	6,3	1,07–1,22	62	

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ВЫХОДНЫЕ СВЧ ТРАКТЫ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ $K_ш$, $K_у$, $P_{гш}$

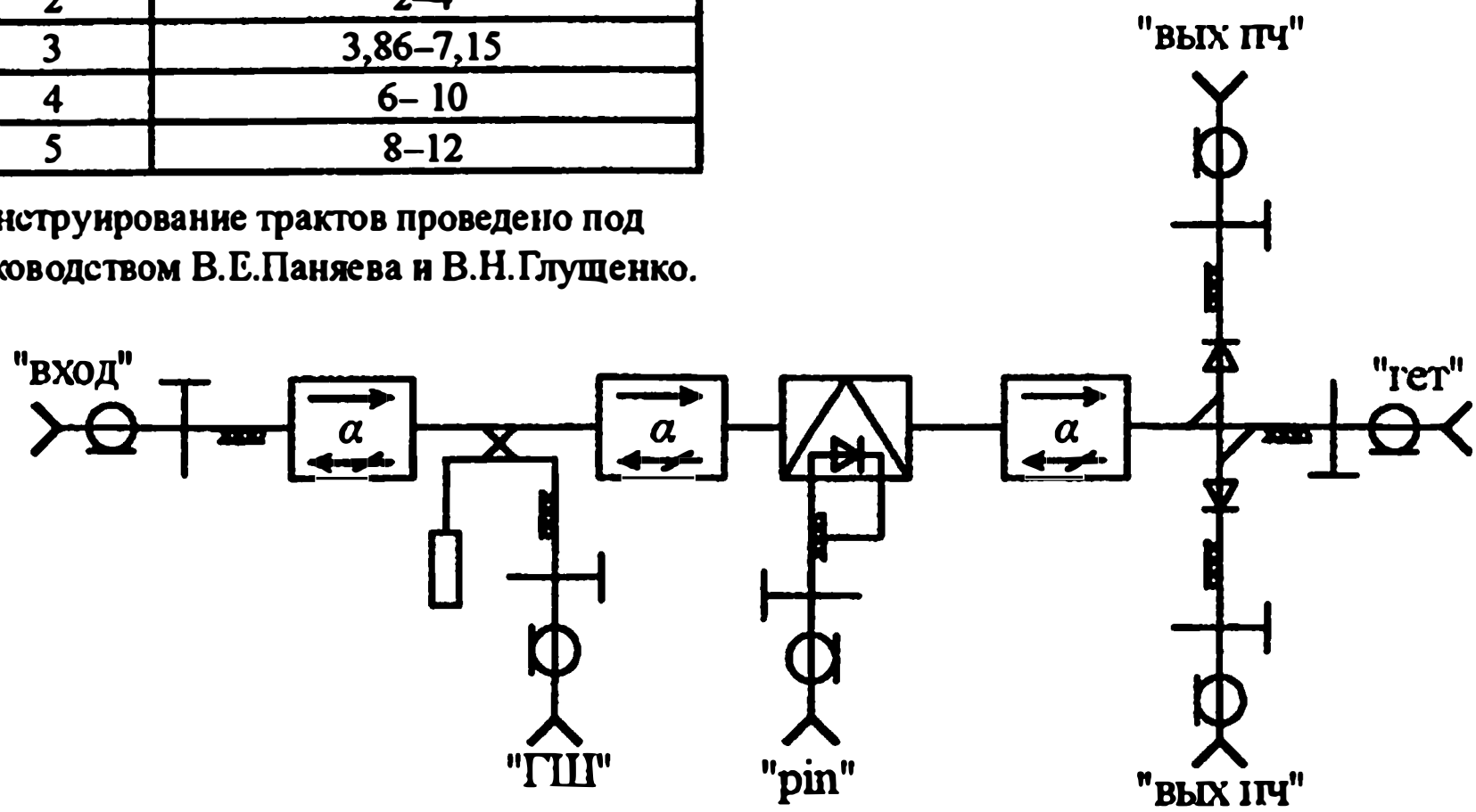
Тракты выполнены на основе микрополосковых СВЧ элементов. Входы и выходы тракта – коаксиальные.

1. СВЧ ТРАКТЫ С ПИНМОДУЛАТОРОМ, ВКЛЮЧЕННЫМ ПОСЛЕ ВТОРОГО ГШ

№ тракта	Диапазон частот, ГГц
1	1–2
2	2–4
3	3,86–7,15
4	6– 10
5	8–12

Конструирование трактов проведено под руководством В.Е.Паняева и В.Н.Глущенко.

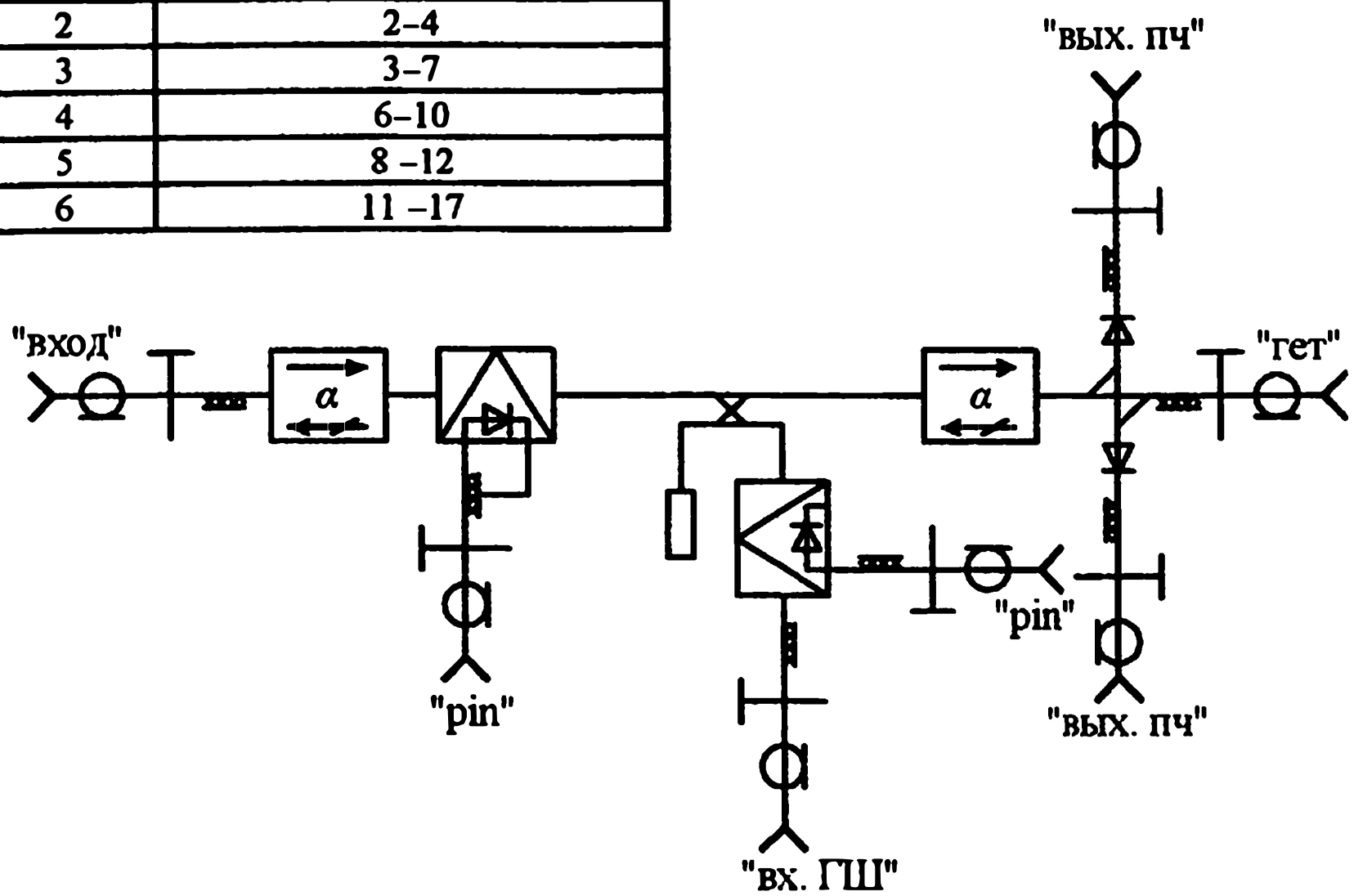
Структурная схема СВЧ тракта.



2. СВЧ ТРАКТЫ С ПИНМОДУЛЯТОРАМИ, ВКЛЮЧЕННЫМИ ПОСЛЕ УСИЛИТЕЛЯ И ПОСЛЕ ВТОРОГО ГШ

№ тракта	Диапазон частот, ГГц
1	1–2
2	2–4
3	3–7
4	6–10
5	8 –12
6	11 –17

Структурная схема СВЧ тракта.



ПРИЛОЖЕНИЕ 3.

СВЧ ЭЛЕМЕНТЫ, ВХОДЯЩИЕ В СОСТАВ ТРАКТОВ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ $K_ш$ И $K_у$

3.1. ОТВЕТВИТЕЛИ НАПРАВЛЕННЫЕ

микрополосковые и коаксиальные в каналах 7/3,04 мм и 3,5/1,52 мм

– Пределы частот, перекрываемых комплектом ответвлений, ГГц ..... 1,07 – 17,75
– Коэффициент перекрытия по частоте (отношение максимальной и минимальной рабочих частот) одного ответвителя, ед. ..... 1,5 – 2,0
– Направленность, дБ не менее ..... 16,0 – 20,0
– Переходное ослабление, дБ 10,0
– Частотная зависимость переходного ослабления, дБ, не более 1,5

3.2. МОДУЛЯТОРЫ СВЧ МОЩНОСТИ
микрополосковые и коаксиальные в каналах 7/3,04 мм и 3,5/1,52 мм

– Пределы частот, перекрываемых комплектом модуляторов, ГГц 1,0–17,75
– Коэффициент перекрытия по частоте одного модулятора, ед. 1,5–12,0
– Максимальное ослабление, дБ, не менее ..... 25–30 (возможно 50–60)
– Минимальное ослабление, дБ, не более 1,5–3,5
– КСВН, не более 1,4–2,5

3.3. ВЕНТИЛИ ФЕРРИТОВЫЕ
микрополосковые и коаксиальные в каналах 7/3,04 мм и 3,5/1,52 мм

– Пределы частоты, перекрываемых комплектом вентилей, ГГц 2,5–17,75
– Коэффициент перекрытия по частоте одного вентиля, ед. 1,5–3,0
– Потери прямые, дБ, не более 1,5–2,0
– Потери обратные, дБ, не менее 15,0–40,0
– КСВН входа (выхода), не более 1,45

3.4. СМЕСИТЕЛИ
балансные микрополосковые и коаксиальные в канале 7/3,04 мм

– Пределы частоты, перекрываемых комплектом смесителей, ГГц 1,0–18,0
– Коэффициент перекрытия по частоте одного смесителя, ед. 1,5–2,0
– Коэффициент шума, дБ, не более 10,0–12,0
– КСВН входов, не более 2,0–2,5
– Развязка между входами, дБ, не менее 8,0–13,0
– Отношение токов диодов, ед., не более 2,0

3.5. ТРАНСФОРМАТОРЫ СОГЛАСУЮЩИЕ
в коаксиальном канале 7/3,04 мм и в волноводных каналах с сечениями: 72 × 34 мм; 48 × 24 мм; 35 × 15 мм; 28,5 × 12,6 мм; 17 × 8 мм; 16 × 8 мм

– Пределы частот, перекрываемых комплектом согласующих трансформаторов, ГГц 1,0–17,85
– Коэффициент перекрытия по частоте одного трансформатора, ед. 1,4–2,0
– КСВН начальный, не более 1,1
– КСВН максимальный, не менее 3,0
– Изменение потерь при перестройке, дБ, не более 0,15

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ГЕНЕРАТОРЫ СВЧ, РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ГЕТЕРОДИНОВ

а) НЕАВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ СВЧ [79]

Диапазон частот, ГГц	Тип	Погрешность установки частоты, %	Максимальная мощность, мВт	Выходной разъем, мм	Габариты, мм, масса, кг
1,16–1,78	Г4-78	0,5	3	коаксиальный 4,34/10	480×120×475
1,78–2,56	Г4-79	0,5	3	– " –	– " –
2,56–4,00	Г4-80	0,5	3	– " –	– " –
4,00–5,60	Г4-81	0,5	3	– " –	– " –
5,60–7,50	Г4-82	0,5	3	– " –	– " –
7,50–10,50	Г4-83	0,5	3	– " –	– " –
8,51–12,16	Г4-109	0,1	1	волновод 23×10	530×330×340
12,16–16,61	Г4-108	0,1	1	волновод16×8	– " –
6,00–17,85	Г4-111	0,5	2–40	коаксиальный 7/3,04	490×15×353

б) МАЛОГАБАРИТНЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ СВЧ [79]

Диапазон частот, ГГц	Тип	Погрешность установки частоты, %	Максимальная мощность, мВт	Выход разъем, мм	Габариты, мм масса, кг
2,00–8,15	Г4-196	0,2	100	коаксиальный 3,5/1,52	240×120×300,6
8,15–12,00	Г4-197	0,2	50	– " –	– " –
12,00–18,00	Г4-198	0,2	25	– " –	– " –

ПРИМЕЧАНИЕ: Регулировка выходной мощности осуществляется внешним ослабителем с величиной ослабления до 120 дБ, входящим в ЗИП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аблязов В.С. Универсальный измерительный сверхвысокочастотный приемник. // Вопросы радио электроники. Сер. 1. 1960. Вып. 5. С.81–92.
2. Аблязов В.С., Швецов Б.Н. Автоматический измеритель коэффициента шума приемных СВЧ устройств // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. 1961. Вып. 12.С.57–66.
3. Абубакиров Б.А., Гудков К.Г., Нечаев Э.В. Измерение параметров радиотехнических цепей. М.: Радио в связь. 1984. С.207–212.
4. Алгазинов Э.К., Мноян В.И. Характеристики входного СВЧ усилителя, влияющие на помехозащищенность приемной системы. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1981. Вып. 2. С.3–7.
5. Алгазинов Э.К., Бобрешов А.М., Бажанов А.С., Швецов Б.Н. Исследование характеристик ЭМС входных приборов СВЧ радиоприемных устройств. // Радиотехника. 1985. №9. С.87–89.
6. Алгазинов Э.К., Нестеренко Ю.Н., Будзинский Ю.А. Характеристики помехозащищенности сводного электростатического усилителя. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1986. Вып. 9. С.17–23.
7. Алмазов-Долженко К.И. О необходимых условиях высокочастотного согласования при измерении коэффициента шума СВЧ усилителей. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. 1962. Вып. 3. С.64–86.
8. Алмазов-Долженко К.И. О причине искажения формы частотной зависимости спектральной плотности мощности шума диодного генератора на лампе 2Д7С. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. 1962. №6. С.112–118.
9. Алмазов-Долженко К.И. Волноводный согласующий трансформатор с малыми потерями. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. 1963. Вып. 11. С.78–84.

10. Алмазов-Долженко К.И. О некоторых особенностях измерения коэффициента усиления малошумящих СВЧ усилителей методом двух генераторов шума. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1969. Вып. 6. С.80–90.
11. Алмазов-Долженко К.И., Швецов Б.Н., Царьков Е.В. Устройство для контроля автоматических измерителей коэффициента шума. А.С.255379 (СССР). Бюллетень изобретений. 1969. №33. С.51.
12. Алмазов-Долженко К.И., Иосилевич Н.Н. Применение пинмодуляторов при измерении коэффициента шума СВЧ усилителей. // Электронная техника. Сер 1. Электроника СВЧ. 1970. №12. С.99–110.
13. Алмазов-Долженко К.И., Швецов Б.Н. Погрешность измерения коэффициента шума и усиления, связанная с разрешающей способностью приемника по частоте. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1972. Вып. 10. С.57–66.
14. Алмазов-Долженко К.И., Швецов Б.Н. Влияние собственных шумов автоматических измерителей коэффициентов шума и усиления на погрешность измерений. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1973. Вып. 1. С.56–61.
15. Алмазов-Долженко К.И. Нормирование параметров измерителей коэффициента шума. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1977. Вып. 12. С.109–113.
16. Алмазов-Долженко К.И., Кузнецова Н.Ф., Пузанов В.А., Пузанова С.Н., Швецов Б.Н. Генератор шума повышенной стабильности. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1978. Вып. 4. С.93–100.
17. Алмазов-Долженко К.И. К расчету параметров обобщенных узлов измерителя коэффициента шума. // Электронная техника Сер. 1. Электроника СВЧ. 1978. Вып. 9. С.55–60.
18. Алмазов-Долженко К.И., Пантыкин С.В., Швецов Б.Н. Автоматический приемник для измерения шумовых параметров электронных приборов. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1979. Вып. 4. С.58–67.
19. Алмазов-Долженко К.И., Жерновенков А.И., Кузнецова Н.Ф., Пузанов В.А., Швецов Б.Н. Исследование стабильности выходной мощности кремниевых ЛПД для генераторов шума. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1980. Вып. 4. С.38–43.
20. Алмазов-Долженко К.И. Метод сравнения шумовых сигналов с использованием микрокалькулятора "Электроника МК-64". // Электронная техника СВЧ. 1987. Вып. 6. С.47–50.
21. Алмазов-Долженко К.И., Кузнецова Н.Ф., Пузанов В.А., Славнова Г.И. Исследование газоразрядных ламп ГШ 6 и ГШ 12 в волноводном канале 2,4×1,2 мм. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1989. Вып. 1. С.36–38.

22. Алмазов-Долженко К.И., Пантыкии С.В., Чернов В.В. Измеритель коэффициента шума на основе приемника прямого усиления. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1989. Вып. 6. С.45–48.
23. Алмазов-Долженко К.И. Определение чувствительности при-смных модулей. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1989. Вып. 7. С.36–40.
24. Алмазов-Долженко К.И., Пантыкин С.В., Чернов В.В. Интегральный коэффициент шума, методы и особенности его измерения. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1990. Вып. 4. С.45–48.
25. Алмазов-Долженко К.И., Виноградов Ю.П., Пантыкин С.В., Чернов В.В. Малогабаритный приемник для шумовых измерений. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1993. Вып. 5–6. С.16–20.
26. Алмазов-Долженко К.И. О погрешности измерений эквивалентных температур шумов входа малошумящих усилителей. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1960. Вып. 11. С.68–96.
27. Алыбин В. Г., Кононенко Л. В., Мартынова Н.А., Смеляков Л.В., Шапошников А.А. Проектирование гибридно-монолитных усилителей СВЧ с распределенным усилением на полевых транзисторах с барьером Шотки. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1987. Вып. 9. С.15–20.
28. Амирян Н.А., Ефремчиков Н.С., Криворучко В.И., Куприянов П.В. Потуренко В.А. Параметры малошумящих балансных смесителей диапазона 26–120 ГГц в гибридно-интегральном исполнении. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1990. С.58–59.
29. Андреев Ю.Ф., Егоренков В.А., Жучкова А.В., Клевцов. В.В., Чеботаренко Л.А. Автоматизированный комплекс для определения СВЧ-параметров смесительных диодов. // Электронная промышленность. 1986. №3. С.68–69.
30. Астафьев Ю.Г., Круопис В.-В.И., Маяускас Г.В., Мешиотас Л.И., Сачилка В.С., Мачан Г.М. Измерители коэффициента шума. // Обмен опытом в радиотехнической промышленности. 1974. Вып. 10. С.29–32.
31. Балыко А.К., Васильев В.И., Гусельников Н.А., Левашов А.С., Манченко Л.В., Юсупова Н.И. Широкополосный малошумящий усилитель на полевых транзисторах с барьером Шотки. Радиоэлектроника. №2. 2000. С.83–88.
32. Балыко А.К., Васильев В.И., Гусельников Н.А., Мамонтов В.И., Тощов А.А., Алмазов-Долженко К.И., Пантыкин С.В., Юсупова Н.И. Определение шумовых параметров транзисторов. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 1997. Вып. 1(469). С.39–41.
33. Барейша Л.И., Мельников А.И., Спиричева Т.В., Тагер А.С., Федорова Г.М., Шапиро Г.М. Генератор шума на ЛПД. // Радиотехника и электроника. 1969. т.XIV. №1. С.104–110.

34. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа. 1983. 536с.
35. Белецкий А.Ф. Основы теории линейных электрических цепей. М.: Связь. 1967. 608с.
36. Белоусов А.П. Расчет коэффициента шума радиоприемников. М.: Оборонгиз. 1959. 135с.
37. Белоусов А.П., Каменецкий Ю.А. Коэффициент шума. М.: Радио и связь. 1981. 112с.
38. Бережной В.А., Чернушенко А.М. Криогенный тепловой генератор шума СВЧ. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1987. Вып. 1(405). С.41–42.
39. Биргер Л.А. Определение эффективной температуры шумового излучения при неравномерном нагреве нагрузки. М.: Труды ВНИИФТРИ. 1959. С.15.
40. Биргер Л.А., Швецов Б.Н., Соков И.А. Образцовая установка для градуировки генераторов шума в диапазоне СВЧ. // Измерительная техника. 1961. №1. С.37–40.
41. Биргер Л.А., Соков И.А. Образцовые тепловые генераторы шума. // Измерительная техника. 1962. №1. С.10–13.
42. Бобров В.С. Об измерении коэффициента шума и коэффициента усиления ЛБВ // Труды НИИ МРТП. 1957. Вып. 11 (47) С.147–148.
43. Бова Н.Т., Ефремов Ю.Г., Конин В.В., Невгасимый А.Ф., Солганик Б.Д. Микроэлектронные устройства СВЧ. Киев. Техника. 1984. 184с.
44. Боровицкий С.И. О погрешности измерения коэффициента шума приемно-усилительной системы. // Вопросы радиоэлектроники. Серия VI. Радиоизмерительная техника. 1961. Вып. 1. С.3–20.
45. Бразаускас Э.П. Проектирование согласующих устройств измерителей шумовых характеристик. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Каунас: Каунасский политехнический институт. 1987.
46. Буйнявичус В.-А.В., Карпицкайте В.-З.Ф., Пятрикис С.-Р.С. Статистические методы в радиоизмерениях. М.: Радио и связь. 1985. 240с.
47. Бунимович В. И. Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах. М.: Сов.радио. 1951. 350с.
48. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. М.: Изд-во стандартов. 1975. 255с.
49. Вайсблат А.В. О точности измерения малых шумовых температур. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 12. Общетехническая. 1959. Вып. 7. С.92–97.
50. Ван-дер-Зил А. Флуктуации в радиотехнике и физике. М.Л.: Госэнергоиздат. 1958. 296с.

51. Ванов О.Д., Смирнов Ю.Д., Лукашевич А.Д., Ознобишин В.В., Гончаров А.К. Высокочастотное средство восп-роизведения шумовых температур в диапазоне 230–330 К. // Метрология в радиоэлектронике. VII Всесоюзная науч-но-техническая конференция. Тезисы докладов. НПО "ВНИИФТРИ". М.: 1988. С.143.
52. Васильев В.Т. Измерение шумового отношения смесительных диодов. // Электронная техника. Сер. 11. КИА. 1969. Вып. 2. С.112–120.
53. Вдовин В.Ф., Лапкин И.В. Низкотемпературные регулируемые генераторы шума. // Метрология в радиоэлектронике. VII Всесоюзная науч-но-техническая конференция. Тезисы докладов. НПО "ВНИИФТРИ". М.: 1988. С.144.
54. Гассанов Л.С., Липатов А.А., Марков В.В., Могильченков Н.А. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи. М.: Радио и связь. 1988. 288с.
55. Генератор шума ЦЮ1.400.128. Техническое описание ЦЮ1.400.128ТО.
56. Генератор шума Я8Х-280. Паспорт ЦЮ1.400.128ПС.
57. Герценштейн М.Е., Соловей Л.Г. О шумовой матрице пассивного многополюсника. // Радиотехника и электроника. 1967. т. 12. С.923.
58. Горожданов Д.П., Пуоджюкинас А.А. О выборе соотношения частот модуляции в измерителях коэффициента шума. //Радиоэлектроника. Труды научно-технической конференции. т.7. Каунас.: 1971. С.76–81.
59. Горонина К.А., Дрягин Ю.А. Об измерении параметров смесительных диодов. Горький: АН СССР. Институт прикладной физики. Препринт. №254. 1990.
60. Горячев Ю.А. К расчету погрешности предельного аттенюатора в диапазоне частот // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиоизмерительная техника. 1974. Вып. 3. С.90–93.
61. Гос. Первичный эталон и Гос. поверочная схема для средств измерения спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне 0,002–178,3 ГГц. МИ 2171-31. Издательство комитета стандартов. 1991.
62. ГОСТ 8.086-73. Общесоюзная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 1,0 до 37,5 ГГц. М.: Издательство стандартов. 1973.
63. ГОСТ19656.0-74; ГОСТ19656.8-74; ГОСТ19656.9-79. Диоды полупроводниковые СВЧ. Методы измерения электрических параметров. М.: Изд. стандартов. 1981.
64. ГОСТ 24375-80. Радиосвязь. Термины и определения. М.: ГК СССР по стандартам. 1987.
65. ГОСТ 8475-82. Стандартный коэффициент шума и эквивалентная шумовая температура усилительных и приемных устройств. Методика выполнения измерений. М.: Изд. стандартов. 1982.

66. ГОСТ 20271.7-84, ГОСТ 20.271.8-84 Изделия электронные СВЧ. Методы измерения параметров. М.: Изд. стандартов. 1984.
67. ГОСТ 18604.11-88. Транзисторы. Методы измерения коэффициента шума на СВЧ. М.: Изд. стандартов. 1988.
68. ГОСТ 25489-88. Измерители коэффициента шума. Общие технические требования и методы испытаний. М.: Изд. стандартов. 1989.
69. ГОСТ 20.271.1-91 Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров. Изд. стандартов. 1992.
70. Дементьев Е. П. Элементы общей теории и расчета шумящих линейных цепей. М: Госэнергоиздат. 1962. 211с.
71. Деречинский Л.Р. Измерение коэффициента шума приемно-усилительных устройств. // Волосы радиоэлектроники. Сер. 6. Радиоизмерительная техника. 1964. Вып. 5–6. С.85–103.
72. Дзехцер Г.Б., Орлов О.С., Темин В.С. Широкополосные электрически управляемые аттенюаторы и модуляторы на pin-диодах. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 6. Радиоизмерительная техника. 1967. Вып. 4. С.118–136.
73. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука. 1973. 416с.
74. Жалнераускас В.И., Штарайтис А.К. Особенности измерения коэффициенте шума диодных смесителей СВЧ. Каунас : Радиоизмерения. 1978. т.11. С.156.
75. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л.: Наука. 1968. 96с.
76. Измерение электрических параметров приборов сверхвысоких частот. Рекомендации МЭК. Публикация 235-2А. М.: ВНИИ "Электростандарт". 1977.
77. Измеритель коэффициента шума Х5-5А. Радиоизмерительные приборы. Каталог-проспект. 10-е изд. М.: НИИЭИРЭ. 1973.
78. Измерители коэффициента шума Х5-9÷Х5-12, Х5-14÷Х5-18, Х5-20÷Х5-22. Радиоизмерительные приборы. Каталог-проспект. М.: ЭКОС. 1982.
79. Измеритель коэффициента шума Х5-29. Каталог "Изделия промышленности средств связи". Сер. 1. Радиоизмерительные приборы. 1993. НИИ "Экос". М.: 1993.
80. ИКШ серии 21000 со свипом серии 8003. Фирма Wavtek Microwave. // Microwave & RF. August. 1991. V.30. №8. P.183–185.
81. Калашников В.С., Негурей А.В. Расчет и конструирование аттенюаторов СВЧ. М.: Связь. 1980. 67с.
82. Карлов Н.В. К вопросу о паразитной модуляции. // Радио-техника и электроника. 1956. №6. С.852–860.

83. Каталог фирмы Hewlett-Packard. 1997.
84. Кацнельсон Б.В., Ларионов А.С. Отечественные приемно-усилительные лампы и их зарубежные аналоги (справочник). М.: Энергия. 1974. С.69–71.
85. Кессель В, Джаник Д. Эталоны теплового шума: определения реализация и методы сравнения. // ТИИРЭ. 1986. т.74. №1. С.130–131.
86. Комплексированные устройства – новый тип электронных компонентов СВЧ. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1977. Вып. 2. С.128–134.
87. Королев А.Н., Зайцев С.А., Сазонов В.П. "Исток" – научно-производственный центр СВЧ-электроники России. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1993. Вып. 1(455). С.5–11.
88. Корякин Н.Д., Скулачев Д.П., Струков И.А. Экспериментальное исследование генераторов шума миллиметрового диапазона на диодах Ганна. // Измерительная техника. 1986. №2. С.46–48.
89. Корякин Н.Д. Определение яркостной температуры тепловых широкоапертурных излучателей. VII Всесоюзная научно-техническая конференция "Метрология в радиоэлектронике". Тезисы докладов. М.: 1988. С.152–153.
90. Крейнгель Н.С. Шумовые парамстры радиоприемных устройств. Л.: Энергия. 1969. 168с.
91. Кристаллические детекторы // Перевод с англ. под. ред. Е.Я. Пумпера. М.: Сов.радио. 1950. 332с.
92. Крутько А.П., Оболенский В.А. Измерение коэффициента передачи мощности в смесителях СВЧ модуляционным методом. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1981. Вып. 9. С.38–40.
93. Кузьмин А.Д. Измерение коэффициента шума приемно-усилительных устройств. М.: Госэнергоиздат. 1955. 64с.
94. Кузнецова Н.Ф. Генераторы шума измерительные. Методы поверки. РД11 8.0025-89. ОКСТУ 6344, 6345. М.: 1989.
95. Кузьмин А.Д., Соломонович А.Е. Радиоастрономические методы измерений параметров антенн. М.: Сов.радио. 1964. 184с.
96. Латников С.Ю. Измеритель отношений напряжений для испытательных установок. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1979. Вып. 12. С.21–23.
97. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах (перевод с англ.). М.Л.: Гос. Изд. Технико-теоретической литературы. 1950. 672с.
98. Лосс. Фазовое подавление паразитного зеркального канала в приемниках СВЧ. // Электроника. 1965. №14. С.22–28.
99. Махлин Р.Е. Шумовые температуры приемно-усилительных устройств и их измерения. // Военная радиоэлектроника. 1960. №9. С.28.
100. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. М.: Радиосвязь. 1990. 512с.

101. Маяускас Г. и др. Комплект приборов для измерения характеристик СВЧ устройств в диапазоне частот 3,2–37,5 ГГц. // Техника средств связи. 1986. Вып 4. С.8–11.
102. Медведев В.В., Пругло В.И., Уэдин Р.И. Методы и аппаратура для измерения параметров СВЧ смесителей. Труды ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений. 1972.
103. Мельников А.И. Расчет генератора шума на лавинно-пролетном диоде. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1969. Вып. 3. С.115–121.
104. Методические указания по расчету показателей точности измерений параметров изделий электронной техники. РД11.8.0020-88. М.: ВНИИ Электорстандарт. Изд. стандартов. 1989.
105. Механников А.И. Расчет погрешности при некоторых измерениях на СВЧ. // Измерительная техника. 1968. Вып. 7. С.36–38.
106. Мирский Г.Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. М.: Энергия. 1972. 456с.
107. Мирский Г.Я. Микропроцессоры в измерительных прибо-рах. М.: Радио и связь. 1984. 160с.
108. Михайлов А.С. Измерение параметров ЭМС РЭС. М.: Связь. 1980. 200с.
109. Намаюнас А., Тамашявичене З., Тамашавичус А., Ульбикас Ю. Генератор шума на диапазон спектра 10 МГц ÷ 10ГГц. // ПТЭ. 1992. №1. С.231.
110. Немлихер Ю.А., Струков И.А., Эткин В.С. Построение схемы СВЧ диодных преобразователей с фазовым подавлением зеркального канала. В кн. Полупроводниковые приборы в технике электросвязи. Под ред. И. Ф. Николаевского. Вып. 14. М.: Связь. 1974. С.49–58.
111. Оборудование для производства изделий электронной техники. РД11.000.005-77. М.: Электростандарт. 1985.
112. Орлов О.С. Анализ широкополосных электрически управляемых аттенюаторов (модуляторов) с pin-диодами. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 6. Радиоизмерительная техника. 1965. Вып. 5. С.83–92.
113. Основные нормы и рекомендации МККФ. Дальняя связь. М.: Связьиздат. 1948.
114. Очерки истории радиоастрономии в СССР. Сборник научных трудов АН СССР. Научный совет по проблеме "Радиоастрономия". Киев: Наукова думка. 1985. 280с.
115. Пантыкин С.В., Паняев В.Е., Швецов Б.Н. Автоматизирован-ная аппаратура для измерения параметров СВЧ четырехполюсников. // Электронная промышленность. 1982. Вып. 4. С.41–42.
116. Пантыкин С.В., Швецов Б.Н. Шумовые параметры линейных СВЧ-четырехполюсников // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1982. Вып. 9. С.50–54

117. Пантыкин С.В., Швецов Б.Н. Устройство для измерения шумовых параметров активных линейных сверхвысокочастотных четырехполюсников. Бюллетень изобретений. 1982. №27. С.224.
118. Пантыкин С.В. Аппаратура для измерения шумовых параметров СВЧ усилительных устройств. // Обзоры по электронной технике. Сер.: Электроника СВЧ. Вып. 12(1139). М.: ЦНИИ "Электроника". 1985. С.40.
119. Пантыкин С.В., Чернов В.В. Быстродействующий квадратичный детектор для измерения шумовых параметров СВЧ усилителей. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1988. Вып. 1. С.51–53.
120. Пантыкин С.В., Чернов В.В. Широкополосный генератор шума большой мощности на основе линейного транзисторного усилителя. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1988. Вып. 7. С.44–45.
121. Петросян Г.Г. Исследование температуры шумового излучения газоразрядных генераторов шума в сантиметровом диапазоне длин волн. // Измерительная техника. 1969. №4. С.91.
122. Петросян Г.Г. Зависимость электронной температуры газоразрядной плазмы от тока разряда. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1971. Вып. 5. С.10–14.
123. Петросян Г.Г., Швецова В.Е., Спектральная плотность мощности шума газоразрядных генераторов в непрерывном и импульсном режимах. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1971. Вып. 8. С.48–50.
124. Петросян Г.Г. Государственный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне 2,7–17,4 ГГц. // Измерительная техника. 1971. №7. С.53–56.
125. Петросян Г.Г. Частотная зависимость спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения газоразрядных генераторов в СВЧ диапазоне. // Исследования в области радиотехнических измерений. М.: Госстандарт. ВНИИФТРИ. 1972. С.41.
126. Петросян О.Г. Источник шумового радиоизлучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. // Исследования в области радиотехнических измерений. М.: Госстандарт. ВНИИФТРИ. 1979. Вып. 40. С.26.
127. Петросян О.Г. Аттестация волноводных мер СПМШ миллиметрового диапазона. // Измерительная техника. 1991. №3. С.40.
128. Прецизионный автоматический измеритель коэффициента шума. // Электроника. 1970. №5. С.92.
129. Прецизионный измеритель коэффициента шума, модель 117B Magnetic AB. // Электроника. 1981. №23. С.24.
130. Приборы электровакуумные СВЧ. Расчет показателей точности измерения параметров. РМ11332.708-79. М.: МЭП. 1981. 25с.

131. Проектирование радиоприемных устройств. Под общей редакцией А.П. Сиверса. М.: Сов.радио. 1976. 488с.
132. Пудовкин К.С. Метод и установка для измерения коэффици-ента шума и коэффициента усиления на сверхвысоких частотах. // Электроника. Научно-технический сборник НИИ ГКРЭ. 1959. №1. С.64–73.
133. Пузанов В.А., Пахомова А.С. Согласующий трансформатор СВЧ диапазона. А.С. №582542(13/78). Бюллетень изобретений. 1977. №44. С.146.
134. Пузанова С.Н. Зарубежные малошумящие СВЧ усилители на транзисторах, рекламированные в 1985 г. Справочные материалы по электронной технике. 1986. С.2–17.
135. Рабинович Б.Е. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 6. 1961. Вып. 4. С.3–20.
136. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия. 1978. 262с.
137. Радиоизмерительные приборы. Каталог-проспект. М.:НИИЭИР. 1973. 109с.
138. Райс. С. Теория флуктуационных шумов // Сборник статей по теории передачи электрических сигналов при наличии помех. Под ред. Н.А. Железнова. М.: Изд. иностранной литературы. 1953. С.184.
139. Раков В.И. Сличение газоразрядных генераторов шума (ГШ) по спектральной плотности мощности шумов (СПМШ) в импульсном и непрерывном режимах. // Электронная техника. Сер. 11. Контрольно-измерительная аппаратура. 1970. Вып. 3(21). С.56–66.
140. Робинсон Ф.Н.Х. Шумы и флуктуация в электронных схемах и цепях (пер. с англ.). М.: Атомиздат. 1980. 256с.
141. Рукавицин А.Ф., Соснин В.П. Транзисторный усилитель с квадратичным детектором для модуляционного радиометра. Всесоюзная конференция по радиоастрономии. Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР. Тезисы докладов. 1975.
142. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука. 1966. 404с.
143. Сачилка В.С., Горожданов Д.П. Панорамный измеритель коэффициента шума и коэффициента усиления СВЧ усилителей. // Обмен опытом в радиотехнической промышленности. 1968. Вып. 12. С.93–95.
144. Семенович В.Д., Степанков М.М. Приемник для измерения коэффициента шума электронных приборов. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1983. Вып. 11. С.41–44.
145. Сиверс А.П. Радиолокационные приемники. М.: Сов.радио. 1959. 534с.
146. Сифоров В.И. Радиоприемники сверхвысоких частот. М.: Военное издательство МО СССР. 1957. 386с.
147. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука. 1965. 512с.

148. Снегирев О.В. Предельная чувствительность широкополосных усилителей на основе сквидов.//Радиотехника и электроника. 1988. Вып. 6. С.1284–1288
149. Стандарт МЭК. Публикация 747–1, Издание первое. 1983. Полупроводниковые приборы. Дискретные приборы и интегральные схемы. Часть 1. Общие положения. Советский Комитет по участию в МЭК. 1985. С.73.
150. Стелцрид С.Т. Улучшение характеристик измерителя коэффициента шума. // PIRE (русск. пер.). 1961. №12. С.2243.
151. Степанков М.М. Осциллографирование частотной характеристики коэффициента шума ЛБВ. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. 1962. Вып. 12. С.79–88
152. Степанков М.М. Панорамный приемник для измерения шумовых параметров электронных приборов. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1983. Вып. 4. С.36–39.
153. Суходоев И.В. Шумы электрических цепей. М.: Связь. 1975. 352с.
154. Тетерич Н.М. Генераторы шума. М.: Госэнергоиздат. 1961. 183с.
155. Тетерич Н.М. Генераторы шума и измерение шумовых характеристик. М.: Энергия. 1968. 215с.
156. Троицкий В.С. Флюктуации шумов в нагруженной линии. // ЖТФ. 1955. №8. С.1426–1435.
157. Тюрин Н.И. Введение в метрологию. М.: Издательство стандартов. 1976. 304с.
158. Уэйт Д.Ф. Влияние автоматизации на измерения шумовой температуры в NBS. // ТИИЭР (пер. с англ.). 1986. Т.74. №1. С.132–134.
159. Фабрикант А.Л. Панорамное измерение АЧХ четырехполюсников с переносом частоты. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1988. Вып. 7. С.40–43.
160. Фалькович С.Е., Музыка З.Н. Чувствительность радиоприемных устройств на полупроводниковых приборах. М.: Радио и связь. 1981. 128с.
161. Хаус Г., Адлер Р. Теория линейных шумящих цепей. М.: Изд. иностранной литературы. 1963. 112с.
162. Хинрикус Х.В. Методы измерения параметров квантовых парамагнитных усилителей. М.: Изд. комитета стандартов, мер и измерительных приборов. 1968. 120с.
163. Холодилов Н.Н., Кочетков А.П. Некоторые вопросы конструирования тепловых генераторов шума. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 6. 1965. Вып. 2. С.66–77.
164. Холодилов Н.Н., Белобородова Э.А. Малоинерционный регулируемый СВЧ генератор шума. // Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника. 1990. Вып. 1. С.53–55.
165. Чейз. Прибор для измерения шумфактора. // Electroniks. 1955.

166. Черепанов В.П., Коневских В.М., Львов В.Н. Газоразрядные источники шумов. М.: Сов.радио. 1968. 56с.
167. Швецов Б.Н., Алмазов-Долженко К.И. Измеритель мощности сверхвысокочастотного диапазона. // Авторское свидетельство на изобретение №115-831 от 29 ноября 1956г.
168. Швецов Б.Н.. Аблязов В.С. Автоматическое устройство радиометрического типа для измерения коэффициента шума усилителей и приемников СВЧ диапазона волн при их настройке. Авторское свидетельство № 133930. 23 мая 1961.
169. Швецов Б.Н., Швецова В.Е., Паршин Ф.С. Исследование газоразрядных генераторов шума в модулированном режиме работы. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1971. Вып. 9. С.57.
170. Швецов Б.Н., Алмазов-Долженко К.И., Паняев В.Е., Пантыкин С.В. Автоматизированные измерения флуктуационной чувствительности радиометров с оценкой достоверности результатов. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1990. Вып. 2. С.33–36.
171. Юрчук Э.Ф., Петросян О.Г., Абрамова О.С. Криогенные генераторы шума миллиметрового диапазона. // Исследования в области радиотехнический измерений. М.: Госстандарт. ВНИИФТРИ. 1988 С.146–155.
172. Angelov, Haimov S. Computer-Aidid Microwave Noise Measurements. // Microw.J. July. 1986. P.143–146.
173. Automatic Noise Figure Meter HP8970B, Test & Measurement Catalog. HP. 1997. P.300.
174. Antonio Lazaro, Lluis Pradell, Member IEEE, Juan M. O`Callagan. FET Noise-Parameter Determination Using a Novel Technique Based on 50 Ω Noise-Figure Measurements. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. V.47. №3. March 1999. P.315–323.
175. Buchholz F.-Im. Kalibrieren von Rauschgeneratoren mit hoher Präzision. // Microwellen & HF Magazin. 1991. V.17. №1.
176. Denson C., Halford J. Plasma Noise Sourses of Improved Accuracy. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques.Sept.1968. V. MTT-16. №9.P.655–683.
177. Dicke R.H. Измерение теплового излучения на СВЧ. Rev. Sc. Instr. 1946. 17. №7. P.268–275.
178. Friis H.T. Noise Figures of Radio Receivers. Proc. IRE. 1944. V.32 №7. N.Y. P.419–422.
179. Green P.W., Pastory W.E. Noise-Gain Analyzer sets 2075 Measurements Accyracy Standard. Microwave & R.F. 1983. V.22. №9. P.123,127–128.
180. Harris I.A. Dependence of Receiver Noise Temperature Measurement on Source impedance. // Electron Letters. 1966. 2. №4. P.130–131.

181. Haus H. Representation of Noise in Linear Twoports // Proc. IRE. 1966. №1. P.69.
182. HP 346 A/B/C Noise Source (Including Options 001, 002 and 004), Operating and Scrvice Manual. Test & Measurement Catalog. HP. 1993.
183. IRE Standards on Methods of Measuring Noise in linear Twoports. 1959. Pros. IRE. 1960. V.48. №1. P.60–68.
184. Jack Browne Test syst. Cange Noise to 26,5 GHz. // Microwave & R.F. Sept. 1987. V.26. №9. P.230–232.
185. Mamola G., Sannio M. Considerations on the Measurement of linear Twoports Noise Parametrs. Alta Frequenza. 1973. V.42. №10.
186. Maxwell E., Leon B.J. Absolute Measurement of Receiver Noise Figures at IHF. // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. April 1956. №2. P.81.
187. Microwave J. 1972. V.15 №8. P.21, 32.
188. Microwave J. 1983. V.26. №12. P.47.
189. Millimeter-wave Products. Каталог фирме Hughes. 1987. P.94–95.
190. Motohisa Kanda. An improved Solid-State Noise Source. // IEEE on MTT. 1976. MTT24. №10. P.990–995.
191. Mumford W.W. A Broad-Band Microwave Noise Source. // Bell. Syst. Techn J. 1949. V.28.XII. P.608–618.
192. Mumford W.W., Elmer H., Scheibe. Noise Performance Factors in Communication Systems. Massachusetts: Horizon Hause-Microwave. Inc. Dedham. 1968.
193. Noise-Gain Analyzer 2075. // Microwave J. Aug. 1983. V.26. №8. P.142–143.
194. Noise Figure Measurement System HP8970 S/V. 8971 c. Test & Measurement Catalog. HP. 1997. P.301.
195. Noise Sources HP346 A/B/C, R/Q347B. Test & Measurement Catalog. HP. 1997. P.302.
196. North D.O. //RCA Rev. 6. 1942. P.332.
197. Nyquist H. Phys.Rev. 1928. 32. P.110–113
198. Pitfalls can be avoided in Noise Measurement. // MSN. March. 1979. V. 9. №3. P.88–90.
199. Rothe H., Dahlke W. Theory of Noise Fourpoles // Proc. IRE. 1956. 44. №6. P.811.
200. Singer A., Ulrich R., Naess E. Thermal Calibrators in Millimeter-wave Radiometry a Word of Caution. // Proc. IEEE. 1967. 55. №6. P.96.
201. Test 83 preview. // New Electron. Nov. 1983. P.63.
202. William E. Pastory. A. Review of Noise Figure Instumentation. // Microwave J. April. 1983. P.113–122.

Замеченные опечатки

Стр.	Напечатано	Следует читать
67	[2, 108]	[2, 168]
86÷96	[147]	[26]
100, 175	[203]	[202]
127	[130]	[150]
133	[82]	[13]
187÷191	[46]	[94]
194	[88]	[81]

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора 3

Предисловие 5

1. ПАРАМЕТРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ШУМОВЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СВЧ УСИЛИТЕЛЬНЫХ И ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ 8

1.1. Эквивалентные схемы и параметры источников сигналов 8

1.1.1. Эквивалентные источники ЭДС и тока 8

1.1.2. Номинальная мощность. Коэффициент несогласованности 8

1.2. Формула найквиста для тепловых шумов 12

1.3. Спектральная плотность мощности шума и шумовая температура источника 15

1.4 Шумовое сопротивление 17

1.5 Отношение сигнал/шум, коэффициент шума, шумовая температура четырехполюсника 18

1.5.1 Отношение сигнал/шум 18

1.5.2 Определение коэффициента шума Нормальные условия 19

1.6 Шумовая температура усилителя 23

1.7 Разновидности коэффициента шума 24

1.7.1 Коэффициент шума при различных температурах входной нагрузки 24

1.7.2 Коэффициент шума при различной полосе частот 25

1.7.3 Коэффициент шума при различных условиях согласования в СВЧ тракте 27

1.8 Системы шумовых параметров усилителей 30
1.8.1 Назначение систем шумовых параметров 30
1.8.2 Эквивалентные схемы шумящих четырехполюсников 30
1.8.3. Шумовые параметры четырехполюсников по стандарту IRI ... 32
1.8.4. Волновое представление шумящих четырехполюсников 33
1.8.5. Система шумовых параметров на основе $K_ш$ при комплексно-сопряженном согласовании 35
1.8.6. Система шумовых параметров на основе оптимального (минимального) коэффициента шума 37
1.9 Коэффициент шума каскадно соединенных четырехполюсников. Шумовая мера 42
1.10 Коэффициент шума преобразователя 43
1.11 Шумовая полоса пропускания 47
1.12 Параметр "чувствительность" и его разновидности 48

2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА, КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ И ШУМОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ 51
2.1. Некоторые особенности измерения параметров шумовых сигналов 51
2.2 Методы двойного и *n*-кратного превышения 55
2.3 Метод постоянного уровня 59
2.4 Измерение коэффициента шума с применением модуляционного метода 61
2.4.1. Метод *n*-кратного превышения при модуляции шума СВЧ модулятором ("метод двух отсчетов") 61
2.4.2 Метод *n*-кратного превышения при модуляции в УПЧ ("метод трех отсчетов") 62
2.4.3 Нулевой модуляционный метод измерения $K_ш$ с применением образцового ослабителя промежуточной частоты 64
а) *Метод модуляции в УПЧ* ("*нулевой метод трех отсчетов*"). 64
б) *Метод модуляции в СВЧ тракте* ("*нулевой метод двух отсчетов*"). 66
2.5 Измерение коэффициента шума методом линейной шкалы 67
2.6 Сопоставление метода "линейной шкалы" и метода "Y-фактора" 70

2.7 Методика измерения системы шумовых параметров СВЧ усилителя 72
2.8 Методика измерения интегрального коэффициента шума 75
2.9 Измерение коэффициента шума преобразователей и приемных модулей 77
2.9.1 Условия измерений 77
2.9.2 Измерение коэффициента шума 78
2.9.3 Измерение коэффициента передачи 82
2.9.4 Панорамный метод измерения параметров преобразователей 83
Выводы (к подразделу 2.9) 85
2.10 Измерение шумовой температуры усилительных и приемных устройств 85
2.10.1 Метод нахождения T_y, основанный на измерении отношения мощностей при подключении ко входу двух шумовых источников 86
2.10.2 Метод измерения шумовой температуры путем поочередной модуляции источника шума и исследуемого устройства 91
2.10.3 Нулевой модуляционный метод измерения шумовой температуры усилителя 94
2.11 Измерение коэффициента усиления методом двух генераторов шума 97
2.12 Автоматизация измерений коэффициента шума 100
Выводы 101

3. АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ УСИЛИТЕЛЬНЫХ И ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ 103
3.1. Обобщенная структурная схема ИКШ, ее параметры и расчет 103
3.1.1 Параметры ГШСС 105
3.1.2 Параметры СВЧ измерительного приемника 106
3.1.3 Расчет обобщенной структурной схемы ИКШ 107
3.2 Генераторы шумового стандартного сигнала 113
3.2.1 Структурные схемы ГШСС 113
3.2.2. Виды источников шума 117
3.2.2.1 Газоразрядные генераторы шума 118

3.3.2.2 Полупроводниковые генераторы шума 121
3.2.2.3 Диодные вакуумные источники шума 122
3.2.2.4 Температурные источники шума 125
3.2.2.5 Источники шума на основе усилителей 128

3.3 Измерительные приемники 130
3.3.1 Структурные схемы приемников 130
3.3.2. Требования к СВЧ модуляторам ИКШ 136
3.3.3 Разрешающая способность приемника по частоте 141
3.3.4 Влияние собственных шумов измерителей коэффициентов шума и усиления на погрешность измерений 149
3.3.5 Требования к приемной части ИКШ прямого усиления 154
3.4 Некоторые модели измерителей коэффициента шума 157
3.4.1 Прибор "ИКШ" 157
3.4.2 Измерительные приемники ИП-3, ИП-5 158
3.4.3 Измерительный приемник ИПМ-1 161
3.4.4 Автоматизированный измеритель параметров СВЧ четырехполюсников с ЭВМ 165
3.4.5 Панорамные ИКШ серии "Х5-" 166
3.4.6 Измерители характеристик шума Х5-51 (Х5-51/1, Х5-51/2, Х5-51/3) 170
3.4.7 Приемники с аналоговым измерителем отношений для панорамных ИКШ 171
3.4.8 Зарубежные ИКШ 175
3.4.8.1 Измеритель коэффициента шума Ailtech 2075 175
3.4.8.2 Измеритель коэффициента шума HP 8970 177

3.5 Поверка ИКШ 178
3.5.1 Погрешность измерения коэффициента шума 178
3.5.2 Методы поверки измерителей коэффициента шума 184
3.5.2.1 Цель и содержание поверки 184
3.5.2.2 Определение метрологических характеристик ИКШ, работающего по методу линейной шкалы 185
3.5.2.3 Пример расчета погрешности измерения $K_ш$ 200

Заключение 205

Список принятых обозначений 208

Приложения

Приложение 1. Генераторы шума. 211
Приложение 2. Выходные СВЧ тракты измерителей $K_ш$, $K_у$, $P_{гш}$ 218

Приложение 3. СВЧ элементы, входящие в состав трактов измерителей $K_ш$ и $K_ш$ 219
Приложение 4. Генераторы СВЧ, рекомендуемые для использования в качестве гетеродинов 221

Литература 222

Научное издание

Алмазов-Долженко К.И.

КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА И ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ НА СВЧ

merkader

09/2011

«Научный мир»
119890. Москва, Знаменка, 11/11
Тел./факс (007) (095) 291-2847.
E-mail: naumir@ben.irex.ru.
Internet: http:\\ben.irex.ru\N_M\n_m.htm
ЛР № 030671 от 09.12.95 г.
Гигиеническое заключение
№ 77.99.6.953.П.3619.6.99 от 29.06.1999 г.

Подписано к печати 22.06.2000.
Формат 60×90/16
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 15
Тираж 500 экз. Заказ 71
Издание отпечатано в типографии
ООО “Галлея-Принт”
Москва, 5-ая Кабельная, 2б

Алмазов-Долженко Константин Иванович родился в 1931 году в г.Харькове. В 1953 году окончил радиотехнический факультет Киевского политехнического института. С 1953 года работает в НИИ электронной техники, в последующем государственное научно-производственное предприятие "Исток" (ГНПП "Исток"), в г.Фрязино Московской области. Занимался разработкой аппаратуры для измерения шумовых параметров электронных приборов СВЧ диапазона. С 1964 года кандидат технических наук. В 1966 году ему присвоено звание старшего научного сотрудника. С 1979 года, наряду с работой в ГНПП "Исток", преподает в филиале Московского института радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА).

Круг научных интересов измерения в электронике, методы и аппаратура для исследования параметров чувствительности усилительных и приемных устройств СВЧ, КВЧ и оптического диапазонов.

Автор имеет 5 изобретений, более 40 научных публикаций, ряд учебно-методических пособий.