

**В.И. Васильев¹, В.И. Алексеенков², А.К. Балыко¹,
А.В. Верещагин², А.Ф. Рукавицын², М.А.Ушаков²**

¹ ФГУП "Научно-производственное предприятие "Исток"

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

Определение шумовых параметров транзистора методом эквивалентных схем на основе измерения S-матрицы и выходной мощности шума.

Представлен новый метод определения шумовых параметров транзистора, основанный на простых измерениях, не имеющий ограничений по используемым моделям, не требующий дополнительной дорогой аппаратуры и удобный для применения, как в сантиметровом, так и в миллиметровом диапазоне длин волн. Метод основан на определении полной эквивалентной схемы транзистора, включающей шумовые источники на основе измерения S-параметров транзистора и выходной мощности шума.

Ключевые слова: шумовые измерения, шумовые параметры, выходная шумовая мощность

Введение

Проектирование малозумящих СВЧ устройств на основе транзисторов требует знание их S-матрицы и 4-х шумовых параметров - минимума коэффициента шума F_{\min} , шумового сопротивления R_n и оптимального коэффициента отражения источника Γ_{opt} . Прямое измерение S-матрицы транзистора можно выполнить с помощью векторных анализаторов цепей и зондовых станций до 100 ГГц.[1-2]. Прямое измерение 4-х шумовых параметров не представляется возможным. Когда F_{\min} относительно велик и имеется высококачественный трансформатор импеданса с низкими потерями, можно измерить F_{\min} с определённой ошибкой.

Для определения шумовых параметров измеряют коэффициент шума как минимум в 4-х точках при импедансах, реализуемых трансформатором с последующим решением системы уравнений различными методами. Хотя этот метод может дать точные результаты при достоверных измерениях, он имеет следующие ограничения:

1. Измерения требуют много времени.
2. Высокая стоимость качественных широкополосных трансформаторов импеданса.
3. Не всегда трансформаторы импеданса могут реализовать требуемый коэффициент отражения, что необходимо на низких частотах.
4. Высокая чувствительность к ошибкам измерения, возникающих из – за люфта в трансформаторе и при высоких значениях Γ_{opt} (0.8 и выше).

Другой метод основан на использовании эквивалентной схемы транзистора для получения дополнительной информации, упрощающей измерения. В этом методе шумовые параметры транзистора получают определением внутренней шумовой корреляционной матрицы $[C^{INT}]$: $[C_{11}, C_{22}, \text{Re}(C_{12}), \text{Im}(C_{12})]$

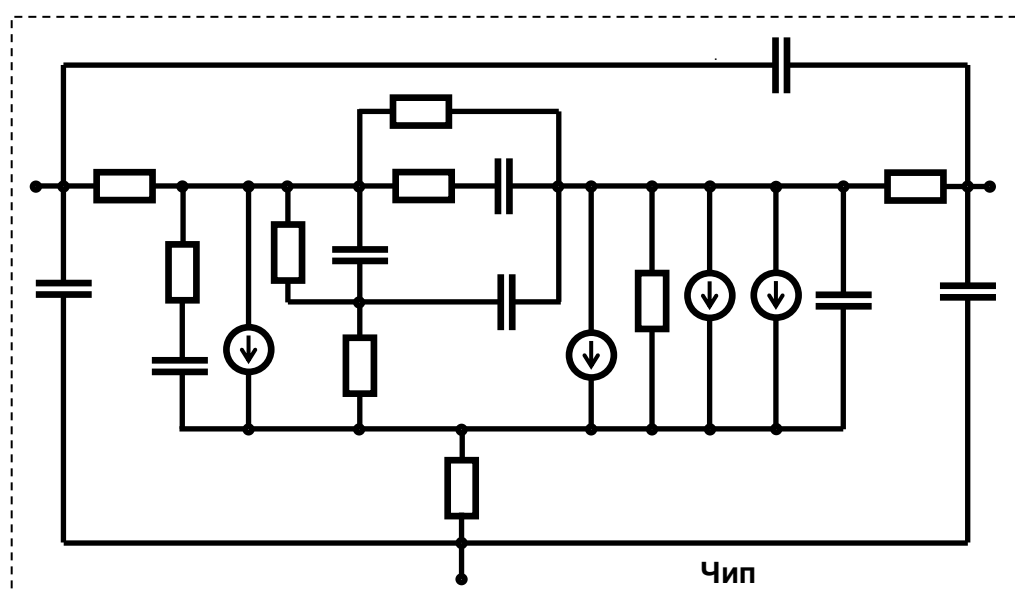
Все существующие методы измерения основаны на измерении коэффициента шума объекта тем или иным способом [3-8].

Предлагается новый метод для определения всех параметров транзистора, основанный на схеме – измерение S-параметров/выходной шумовой мощности – оптимизация полной модели транзистора (шумовая модель – R,P,C) до совпадения измеренных и рассчитанных значений – расчет 4-х шумовых параметров/(S-параметров).

Главная идея в таком подходе состоит в том, чтобы реализовать принцип – рассчитываем то, что можно легко измерить напрямую на любых рабочих частотах., Данный подход имеет следующие преимущества:

1. Выходную шумовую мощность можно измерять не только шумовыми приемниками, но и селективными вольтметрами (на низких частотах), или измерителями параметров антенн типа ПК7, анализаторами спектра, либо другими радиометрическими приёмниками до диапазона миллиметровых волн.
2. Нет необходимости в дорогостоящих управляемых согласующих трансформаторах на входе и выходе транзистора.
3. Возможность измерения на частотах ниже 1 ГГц, что является нерешенной проблемой для стандартных методов измерения.
4. Метод позволяет легко полностью автоматизировать процесс измерения необходимых параметров.
5. Включение сильно рассогласованной с подводящей 50 омной линией 10 и 250 - омной нагрузки в качестве шумового генератора позволяет достаточно просто получить на входе транзистора необходимое многообразие сопротивлений.
6. Эквивалентная схема позволяет рассчитать шумовые и S – параметры вне диапазона измерения. Дает возможность анализа влияния паразитных элементов корпуса и монтажа, легкость получения всех шумовых и S- параметров в любых схемах включения (ОЗ, ОИ, ОС)

Используемая модель.



В нашей работе используется так называемая R, P, C модель (шумовые коэффициенты R, P и C частотно и взаимно независимы), Эквивалентная схема чипа транзистора представлена на рис 1.Здесь

$$Y_m = g_m \exp(-jf / f_\alpha), \quad \overline{I_g^2} = 4kT \frac{\omega^2 C_i^2}{g_m} R, \quad \overline{I_d^2} = 4kT g_m P, \quad jC = \frac{\overline{I_g^* I_d}}{(\overline{I_g^2 I_d^2})^{1/2}}$$

Для моделирования и расчётов совместно используются Y_{ik} матрица проводимостей и $Y_{C,ik}$ корреляционная матрица.

Базой для всех расчетов является программа MESFET2, основанная на комплексе программ, разработанных в СКБ ИРЭ РАН и ИКИ РАН для моделирования и расчетов СВЧ радиометрических приёмников РЕЛИКТ-1 и РЕЛИКТ-2 [9].

При моделировании полевого транзистора сначала формируется Y матрица активной области транзистора, включающей элементы $R_{dg}, R_f, C_f, C_i, R_i, C_{fi}, Y_m, I_g, I_d$. Затем определяются элементы корреляционной матрицы Y_C :

$$Y_{C11} = \omega^2 C_i^2 R / g_m, \quad Y_{C22} = g_m P, \quad Y_{C21} = -jC \sqrt{Y_{C11} Y_{C22}}, \quad Y_{C12} = Y_{C21}^*$$

Измерения.

Схема измерительной установки показана на рис. 2:

LS1 –нагрузка 50 ом (генератор шума от HP8970).

LS2 –вторая нагрузка 10 ом, **LS3** – третья нагрузка 250 ом

K1 и K2 – контактные устройства с адаптером питания транзистора.

V – вентиль. **T** – транзистор на держателе

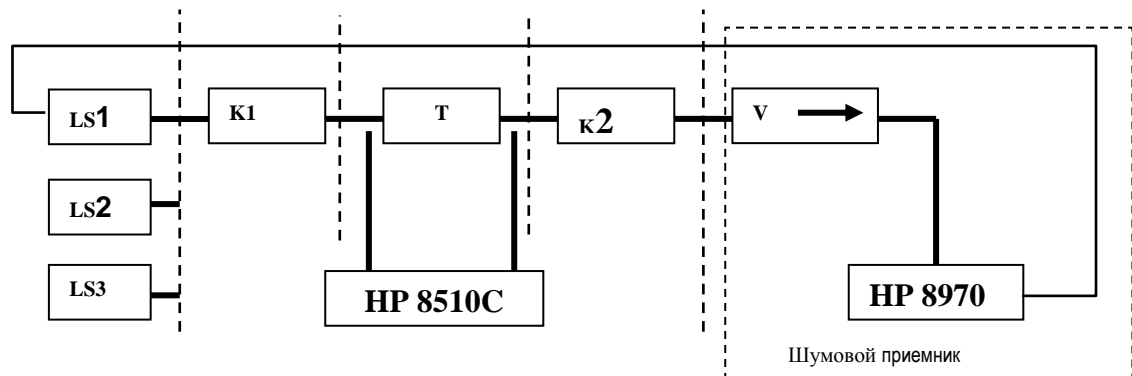


Рис 2.

Измерения проводятся в 3 этапа:

1. измерение коэффициентов отражения нагрузок LS1-LS3 в сечении 1, вентиля V в сечении 4, S – параметров контактных устройств K1 и K2 в сечении 1-2 и 3-4, а также S – параметров измеряемого транзистора в сечении 2-3. Измерение параметров контактных устройств, нагрузок, вентиля проводится один раз и используются при последующих измерениях компонентов.

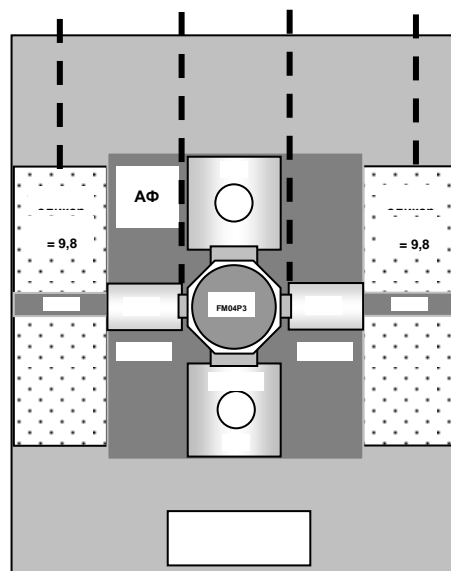
2. Проводится калибровка шумового приёмника с помощью ГШ (LS1) в сечении 4.

3. Нагрузка LS1 устанавливается в сечение 1 и измеряется шумовая температура на входе приемника в дБ относительно абсолютной температуры 290К при выключенном и включенном ГШ. Далее измеряется выходная шумовая мощность с подсоединёнными нагрузками LS2 и LS3.

Измеренные коэффициенты отражения и S-параметры СВЧ тракта переводятся в проводимости и Y-параметры, причем при переводе S – параметров в Y – параметры одновременно формируется корреляционная матрица Y_C . При формировании Y_C матрицы транзистора температура всех его сопротивлений считается равной температуре транзистора T_{TR} .

Приведём пример определения эквивалентной схемы и шумовых параметров транзистора AFM04P3-213 фирмы Alpha (Рис. 4) при $U_{си}=3В$ и $I_c=30мА$.

В нашем случае плоскость калибровки по S-параметрам 2-3 находится на расстоянии 0,9 мм от края держателя, поэтому к Y, Y_C матрице транзистора последовательно присоединяются Y, Y_C матрицы сначала МПЛ на подложке ФАФ длиной 1,6 мм, затем МПЛ на поликоре, до калибровочных плоскостей 2 и 3. После определения полной эквивалентной схемы расчет Y, Y_C матрицы осуществляется только до плоскостей монтажа транзистора А1-А2 и соответственно в этих плоскостях рассчитываются S-параметры и 4 шумовых параметра.



На рис.6 представлены результаты восстановления эквивалентной схемы.

Оптимизация элементов эквивалентной схемы проводилась по - S-параметрам (рис.6 а-г) и по выходной мощности шума (Т501) от 50-омного генератора шума при выключенном ГШ - рис.6 (д), и при включённом ГШ (Т502) - рис.6 (е).

На (рис.6 ж-з) представлено сравнение измеренных и рассчитанных величин выходной шумовой мощности при наличии источника сигнала 10 Ом на входе и 250 Ом соответственно. Получено хорошее соответствие измеренных и рассчитанных параметров транзистора по его эквивалентной схеме.

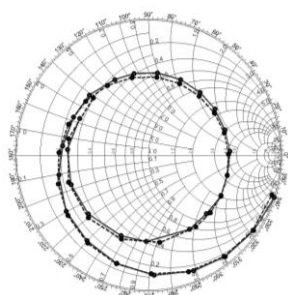


Рис. 6 (а).

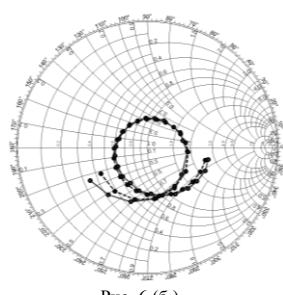


Рис. 6 (б).

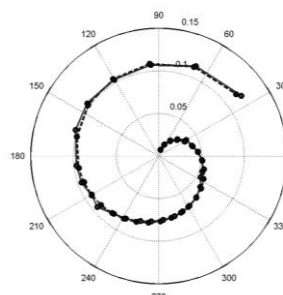


Рис. 6 (г).

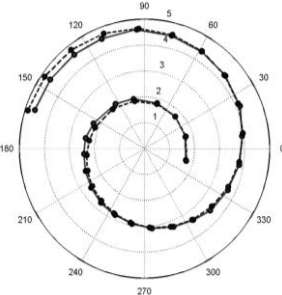


Рис. 6 (в).

—●— Изм
 -■- Рассч

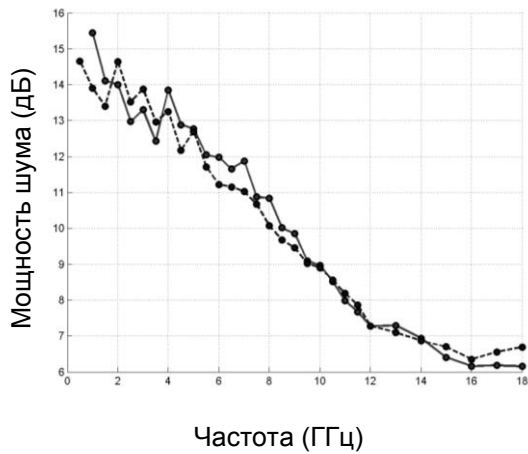


Рис. 6 (д). T501

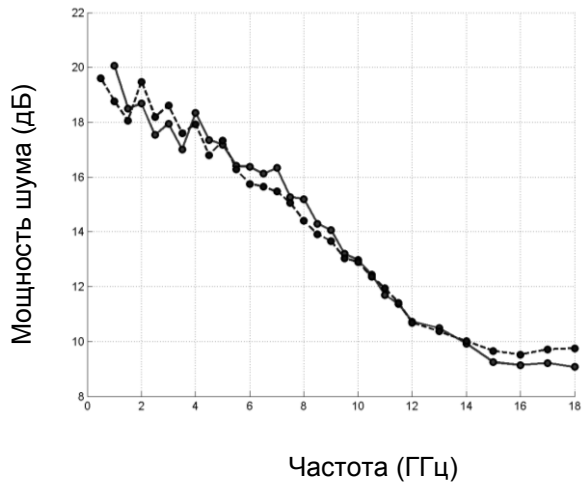


Рис. 6 (е). T502

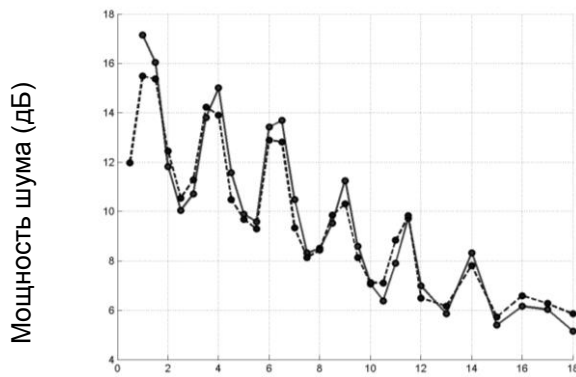


Рис. 6 (ж). T10

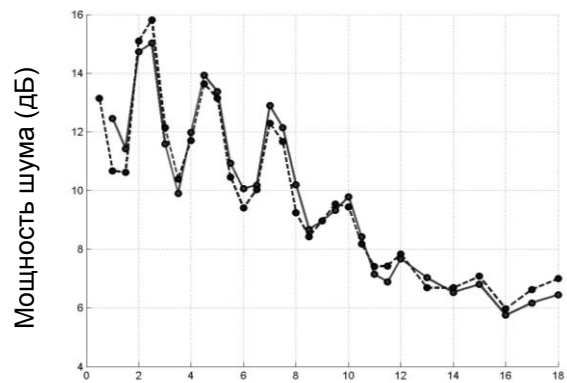


Рис. 6 (з). T250 Частота (ГГц)

После оптимизации эквивалентной схемы был проведен расчет S-параметров транзистора и 4-х шумовых параметров в плоскости A1-A2. Результаты расчета параметров транзистора с схеме с общим истоком представлены в таблице1.

Таблица 1

Частота(ГГц)	F0(Db)	Шумовые параметры		
		Ropt(Mag, Ang)		R/50
0.5000	0.3845	0.7971	8.051	0.3787
1.000	0.4212	0.7775	16.14	0.3713
3.000	0.6909	0.6342	49.85	0.2998
5.000	1.017	0.4664	88.52	0.1941
7.000	1.346	0.3290	138.0	0.1153
9.000	1.673	0.2827	-160.4	0.1255
11.00	2.000	0.3289	-105.8	0.2681
13.00	2.332	0.4005	-64.25	0.5497
15.00	2.674	0.4640	-28.15	0.9271
17.00	3.024	0.5186	7.970	1.297

Заключение

Предложен новый простой метод определения шумовых параметров транзисторов. Он основан на определении параметров эквивалентной схемы транзистора из

измерений S –матрицы и выходной мощности шума при различных импедансах источника сигнала. Получено хорошее соответствие измеренных и рассчитанных параметров транзистора, что дает основание говорить о высокой достоверности полученного результата.

Авторы выражают благодарность за полезные обсуждения и замечания по данной работе Турыгину С.Ю. и Дмитриеву С.Г.

Библиографический список

- [1] G. Dambrine, H. Happy, F. Danneville, and A. Cappy, “A new method for on wafer noise measurement”, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 41, pp. 375-381, 03, 1993.
- [2] M. Pospieszalski, “Modeling of noise parameters of MESFET’s and MODFET’s and their frequency and temperature dependence”, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 37, pp. 1340-1350, 09, 1989.
- [3] P.J. Tasker, W. Reinert, B. Hughes, J. Braunstein, and M. Schlechtweg, “Direct extraction of all four transistor noise parameters using a 50- Ω measurement system”, in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.*, 1993.
- [4] M.S. Gupta and P.T. Greiling, “Microwave noise characterization of GaAs MESFET’s, determination of extrinsic noise parameters”, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 36, pp. 745-751, 04, 1988.
- [5] A. Làzaro, L. Pradell, A. Beltràn, and J.M. O’Callaghan, “Direct extraction of all four transistor noise parameters from 50- Ω noise figure measurements”, *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 3, pp. 289-291, 1998.
- [6] P. Crozat, C. Boutex, M. Chaubet, V. Danelon, A. Sylvestre, and G. Vernet, “50- Ω noise measurements with full receiver calibration without tuner”, *Electron. Lett.*, vol. 3, pp. 261-262, 1996.
- [7] A. Lazaro, L. Pradell, and Juan M. O’Callaghan, “FET Noise – parameter determination using a novel technique based on 50-Ohm noise-figure measurements.” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol *MTT-47*, no 3, pp. 315-323, 03, 1999.
- [8] T. Vaha-Heikkila, M. Lahdes, M.Kantanen and J.Tuovinen, “On wafer noise-parameter measurements at W-band.” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol *MTT-51*, no 6, pp. 1621-1627, 06, 2003.
- [9] Алексеенков В.И. Калашников В.С. Немлихер Ю.А. и др. В кн. *Научная аппаратура для космических исследований*. М., Наука, 1986.