

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 519.675:621.391

© В. А. Матросов

НОМОГРАММА ДЛЯ ОЦЕНОЧНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ ОСНОВНЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕРХМАЛЫХ СИГНАЛОВ

Приводится расчет номограммы и схема номограммы для оценочных инженерных расчетов основных метрологических параметров средств измерения сверхмалых сигналов. С ее помощью, исходя из уравнений, связывающих основные параметры измерительного средства с минимальным энергетическим пределом обнаружения сигнала, можно определить следующие шесть основных взаимосвязанных параметров: минимальное входное напряжение, минимальный входной ток, минимальная отбираемая от источника сигнала мощность, входное сопротивление прибора, его точность и быстродействие. Номограмма разработана применительно к комнатной температуре ($T = 20^\circ\text{C} = 293\text{K}$) эксплуатации средств измерения сверхмалых сигналов и достигнутого современного технологического уровня.

Из работ [1, 2] известна номограмма для определения основных характеристик средств измерения, построенная на основе уравнения по определению энергетического предела обнаружения сверхмалых сигналов:

$$C = \gamma^2 Pt,$$

где: γ — погрешность в относительных единицах; P — потребляемая мощность по входу, Вт; t — время установления (быстродействие), с; $C \cong 3,5 \cdot 10^{-20}$ Дж — энергетический предел при комнатной температуре ($T = 293\text{K}$); он не может быть уменьшен теоретически из-за термодинамических шумов.

Указанная номограмма удобна для следующих целей:

– определение степени приближения того или иного разработанного средства измерения (СИ) к современному технологическому уровню или к теоретически возможному, при котором $C \cong 3,5 \cdot 10^{-20}$ Дж при $T = 293\text{K}$;

– определение возможности варьирования параметрами P , γ и t .

Однако в инженерной практике при прикидочных расчетах, например при составлении ТЗ на новые разработки, требуется определить большее число параметров, чем три, причем, исходя не из теоретически возможного энергетического предела обнаружения сверхмалого сигнала, а из достигнутого технологического уровня ($C \cong 10^{-18}$ Дж для приборов измерения сверхмалых сигналов).

Дополнительно к названным трем параметрам необходимо определять: $U_{ax\min}$ — минимальное входное напряжение, В; $I_{ax\min}$ — минимальный входной ток, А; $R_{ax\max}$ — максимальное входное сопротивление измерительного прибора, Ом.

Номограмму, связывающую шесть взаимосвя-

занных параметров, можно разработать, пользуясь теорией номографии [3].

Составим систему уравнений, в которую вошли бы все шесть определяемых параметров:

$$C = \gamma^2 Pt, \quad (1)$$

$$C = \gamma^2 U_{ax} I_{ax} t, \quad (2)$$

$$C = \gamma^2 U_{ax}^2 \frac{1}{R_{ax}} t, \quad (3)$$

$$C = \gamma^2 I_{ax}^2 R_{ax} t, \quad (4)$$

$$P = U_{ax} I_{ax}, \quad (5)$$

$$P = U_{ax}^2 \frac{1}{R_{ax}}, \quad (6)$$

$$P = I_{ax}^2 R_{ax}, \quad (7)$$

где $C \cong 10^{-18}$ Дж ("const" для современного технологического уровня).

Сначала определим номограмму с тремя параллельными шкалами, когда аргументами являются: U_{ax} и I_{ax} .

$$P = U_{ax} I_{ax}.$$

Логарифмируя уравнение (5), получим:

$$\lg P = \lg U_{ax} + \lg I_{ax}. \quad (8)$$

Выберем длины шкал (см. Рис.) $l_U = l_I = 70$ мм от точки отсчета до базовой линии, тогда для случая, когда U_{ax} может меняться в интервале от 10^{-9} В до 10^{-2} В, I_{ax} — от 10^{-18} А до 10^{-7} А, эти длины могут быть представлены выражениями (9–12).

Номограмма
для прикидочных инженерных расчетов
основных параметров СИ сверхмалых сигналов

Расчетные формулы:

$$C = \gamma^2 P t$$

$$C = \gamma^2 U_{\text{вх}} I_{\text{вх}} t$$

$$C = \gamma^2 U_{\text{вх}}^2 \frac{1}{R_{\text{вх}}} t$$

$$C = \gamma^2 I_{\text{вх}}^2 R_{\text{вх}} t$$

$$P = \frac{C}{\gamma^2 t}$$

$$P = U_{\text{вх}} I_{\text{вх}}$$

$$P = U_{\text{вх}}^2 \frac{1}{R_{\text{вх}}}$$

$$P = I_{\text{вх}}^2 R_{\text{вх}}$$

Ключи
к диаграмме:

$$\gamma - P - t$$

$$U_{\text{вх}} - P - I_{\text{вх}}$$

$$U_{\text{вх}} - P - R_{\text{вх}}$$

$$I_{\text{вх}} - P - R_{\text{вх}}$$

где: $C \approx 10^{-18}$ Дж (при $T=20^\circ\text{C} \approx 293$ К для современного технологического уровня)

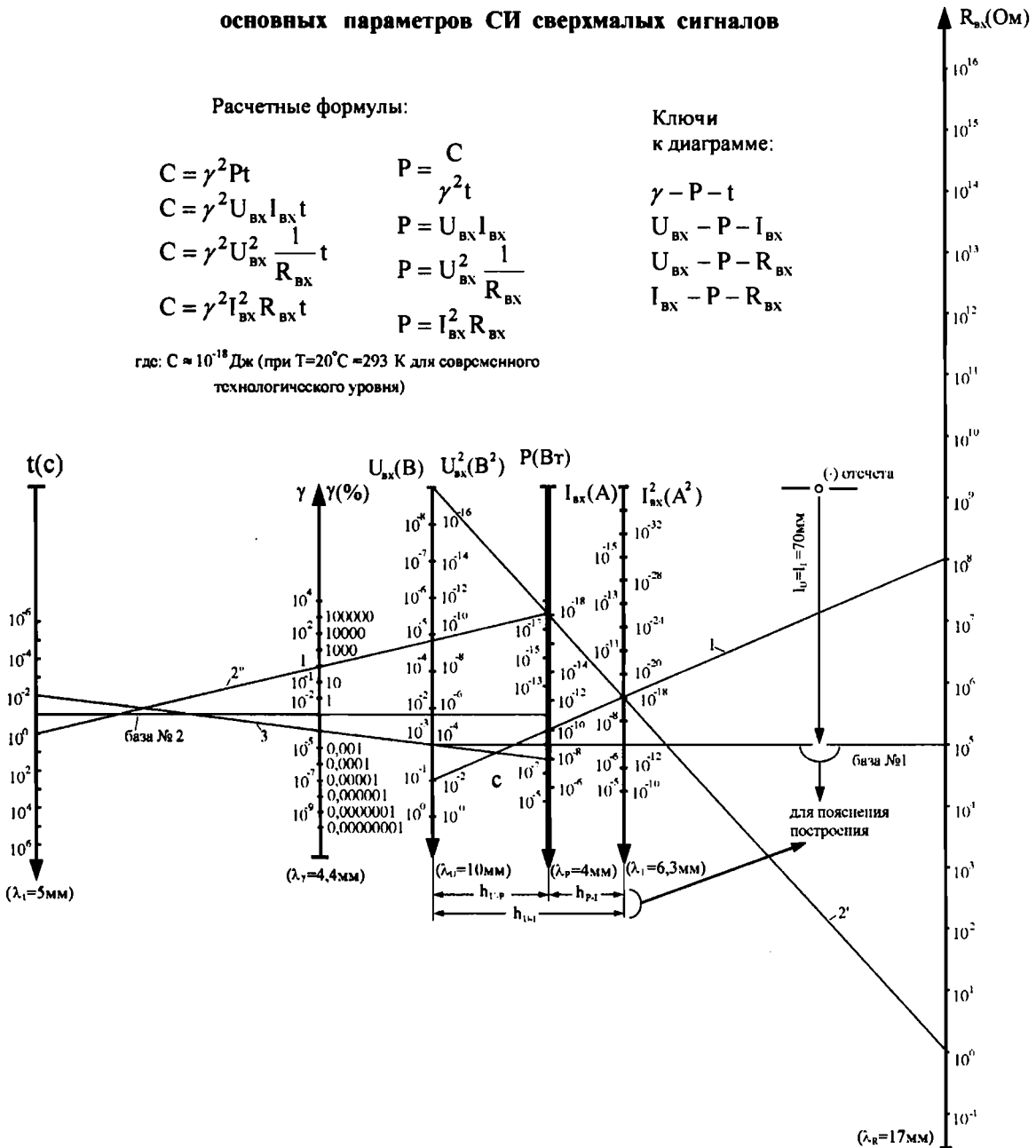


Рис. Вид номограммы с тремя примерами графической оценки параметров средства измерения (СИ).

Пример 1: линия 1 — $U_{\text{вх}}=10^{-1}$ В; $U_{\text{вх}}^2=10^{-2}$ В²; $I_{\text{вх}}=10^{-9}$ А; $P=10^{-10}$ Вт; $R_{\text{вх}}=10^8$ Ом.

Пример 2: линия 2 — $U_{\text{вх}}=10^{-9}$ В; $U_{\text{вх}}^2=10^{-18}$ В²; $I_{\text{вх}}=10^{-9}$ А; $I_{\text{вх}}^2=10^{-18}$ А²; $R_{\text{вх}}=1$ Ом; $P=10^{-18}$ Вт;

линия 2' — $P=10^{-18}$ Вт; $t=1$ с; $\gamma=100\%$;

Пример 3: линия 3 — $P=10^{-8}$ Вт; $\gamma=0,01\%$; $t=10^{-2}$ с

(Обозначения величин на поле номограммы соответствуют обозначениям в тексте с точностью до шрифтового исполнения)

$$l_U = \lambda_U [f(U_{ax_{max}} - U_{ax_{min}})] = \lambda_U [\lg 10^{-2} - \lg 10^{-9}] = 7\lambda_U, \quad (9)$$

$$l_I = \lambda_I [f(I_{ax_{max}} - I_{ax_{min}})] = \lambda_I [\lg 10^{-7} - \lg 10^{-18}] = 11\lambda_I, \quad (10)$$

где λ_U и λ_I — модули (логарифмический масштаб) шкал U_{ax} и I_{ax} , соответственно.

Определим их величину:

$$\lambda_U = \frac{l_U}{7} = \frac{70}{7} = 10 \text{ мм}, \quad (11)$$

$$\lambda_I = \frac{l_I}{11} = \frac{70}{11} = 6,3 \text{ мм}. \quad (12)$$

Положительный знак у модулей λ_U и λ_I говорит о том, что направление шкал U_{ax} и I_{ax} должно быть направлено в сторону увеличения значений от выбранной (·) отсчета в сторону базовой линии и совпало с предполагаемым направлением. Базовая линия (обозначим ее № 1) потребуется для привязки шкалы P и условно взята в виде горизонтали, проходящей через значения $U_{ax} = 10^2 \text{ В}$; $I_{ax} = 10^7 \text{ А}$; $P = 10^9 \text{ Вт}$, согласно уравнению (5).

Остается определить положение шкалы. Оно определится из уравнения:

$$\frac{h_{U-P}}{h_{P-I}} = \frac{\lambda_U}{\lambda_I} = \frac{10}{6,3} = 1,57.$$

Зададимся

$$h_{U-I} = h_{U-P} + h_{P-I} = 51 \text{ мм}.$$

Вообще, h_{U-I} можно взять произвольно, здесь взято расстояние в 51 мм для удобства размещения всех остальных шкал номограммы, что делается предварительными расчетами, чтобы уложиться в выбранный формат чертежа.

Тогда

$$h_{U-P} = 51 - h_{P-I} = 51 - \frac{h_{U-P}}{1,57}.$$

Отсюда

$$h_{U-P} = \frac{51}{1 + \frac{1}{1,57}} = 31 \text{ мм},$$

$$h_{P-I} = h_{U-I} + h_{U-P} = 51 - 31 = 20 \text{ мм}.$$

Модуль λ_P шкалы P находится из уравнения:

$$\lambda_P = \frac{\lambda_U \lambda_I}{\lambda_U + \lambda_I} = \frac{10 \cdot 6,3}{10 + 6,3} \cong 4 \text{ мм}.$$

Определим границы шкалы P , исходя из отбираемой для измерения мощности сигнала от датчика: 10^{-18} Вт — нижний уровень и 10^5 Вт — верхний уровень, что примерно соответствует диапазону мощностей слабых сигналов [2]. В логарифмическом масштабе шкалу разбиваем на 13 промежутков, равных $\lambda_P = 4 \text{ мм}$. Привязав значение $P = 10^9 \text{ Вт}$ к базовой линии №1, как ранее было условлено, строим ее между шкалами U_{ax} и I_{ax} на удалениях от них 31 и 20 мм соответственно. Так как λ_P имеет положительный знак, то направление шкалы P совпадает с направлениями шкал U_{ax} и I_{ax} , т.е. значение P возрастает от (·) отсчета к базовой линии.

Чтобы не менять положение построенных шкал U_{ax} , P и I_{ax} , целесообразно следующей построить шкалу R_{ax} .

Для этой цели справа от шкал U_{ax} и I_{ax} отмечаем квадраты их значений, согласно уравнениям (3, 4, 6, 7). Шкалу R_{ax} удобнее строить из уравнения (7).

Проделав аналогичные вычисления, находим:

$$\lambda_{I^2} = \frac{6,3}{2} \text{ мм}; \lambda_R = -17 \text{ мм};$$

(знак "-" говорит об обратном направлении шкалы R_{ax} относительно P)

$$h_{P-R} = -105 \text{ мм}; h_{P-I^2} = 20 \text{ мм};$$

(знак "-" у h_{P-R} говорит, что шкала R_{ax} должна находиться справа от P , а не слева, как предполагалось).

К базовой линии № 1 привязано значение $R_{ax} = 10^5 \text{ Ом}$; на рисунке горизонталь $P = I_{ax}^2 R_{ax} = (10^7 \text{ А})^2 \cdot 10^5 \text{ Ом} = 10^9 \text{ Вт}$.

Диапазон R_{ax} выбран в интервале от 10^1 Ом до 10^{16} Ом , в соответствии с [2].

Оставляя шкалу P в качестве основной для номограммы (на рисунке она выделена более толстой линией) строим недостающие шкалы t и γ .

Проделав аналогичные вычисления, находим:

$$\lambda_t = 5 \text{ мм}; \lambda_\gamma = -4,4 \text{ мм};$$

(знак "-" говорит об обратном направлении шкалы γ относительно P);

$$h_{P-\gamma} = -61 \text{ мм}; h_{P-t} = 138 \text{ мм};$$

(знак "-" у $h_{P-\gamma}$ говорит о том, что шкала γ

должна находиться слева от P , а не справа, как предполагалось).

Здесь удобнее в качестве горизонтальной базовой линии (обозначена №2) взять значение $P = 10^{-11}$ Вт, $\gamma = 10^{-3}$, $t = 10^{-1}$ с, согласно уравнению (1).

Для удобства пользования номограммой шкала γ представлена как относительными значениями, так и в %, что чаще встречается на практике.

Для пользования номограммой автор рекомендует четыре ключа к ней:

$$\begin{aligned} \gamma - P - t, \\ U_{ax} - P - I_{ax}, \\ U_{ax} - P - R_{ax}, \\ I_{ax} - P - R_{ax}. \end{aligned}$$

Разработанная автором и приведенная на рисунке номограмма с достаточной для инженерных расчетов точностью позволяет быстро определять основные параметры средств измерения сверхмалых сигналов в следующих диапазонах:

- по потребляемой от источника сигнала мощности — от 10^{-18} Вт до 10^{-5} Вт;
- по входному напряжению — от 10^{-9} В до 1 В;
- по входному току — от 10^{-18} А до 10^{-5} А;
- по входному сопротивлению — от 10^{-1} Ом до 10^{16} Ом;
- по основной погрешности — от 10^{-10} до 10^3 ;
- по быстродействию — от 10^{-6} с до 10^6 с.

На рисунке приведено три примера нахождения взаимосвязанных параметров:

$$1. U_{ax} = 10^{-1} \text{В}; U_{ax}^2 = 10^{-2} \text{В}^2; I_{ax} = 10^{-9} \text{А};$$

$$I_{ax}^2 = 10^{-18} \text{А}^2; P = 10^{-10} \text{Вт}; R_{ax} = 10^8 \text{Ом};$$

$$2. 2'. U_{ax} = 10^{-9} \text{В}; U_{ax}^2 = 10^{-18} \text{В}^2; I_{ax} = 10^{-9} \text{А}; \\ I_{ax}^2 = 10^{-18} \text{А}^2; R_{ax} = 1 \text{Ом}; P = 10^{-18} \text{Вт};$$

$$2''. P = 10^{-18} \text{Вт}; t = 1 \text{с}; \gamma = 100\%;$$

$$3. P = 10^{-8} \text{Вт}; \gamma = 0,01\%; t = 10^{-2} \text{с}.$$

Из примеров видно, что, задаваясь любыми двумя параметрами на разных шкалах и пользуясь ключами к номограмме, можно во всех приведенных случаях: 1, 2', 2'', 3 — находить остальные параметры путем проведения прямых через значения известных двух параметров до пересечения со шкалами, параметры на которых мы хотим определить. Точки пересечения и укажут нам их значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Новицкий П.В.* Основы информационной теории измерительных устройств. Л.: Энергия, 1968. 248 с.
2. *Матросов В.А., Векишин Е.В., Кешек Э.В.* Комплекс приборов и систем измерения сверхмалых сигналов для физических и физико-химических исследований // Аппаратура и методы физико-химических измерений. Киев: 1984. С. 3–15. (Тр. ВНИИАП).
3. *Невский Б.А.* Справочная книга по метрографии. М.-Л.: Гостехиздат, 1951. 376 с.

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Материал поступил в редакцию 30.06.1999.

NOMOGRAM FOR ENGINEERING ESTIMATES OF MAIN METROLOGICAL PARAMETERS FOR ULTRALOW SIGNAL MEASURING TOOLS

V. A. Matrosov

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

The paper presents the method of calculation and a diagram of a nomogram which gives engineering estimates for main metrological parameters of ultraweak signal measuring tools. Based on equations relating main parameters of a measuring instrument with the minimum signal detection energy limit, this nomogram can be used to determine the following six main interrelated parameters: minimum input voltage, minimum input current, minimum power consumption, input impedance, accuracy, and speed. The nomogram is suitable for ultralow signal measuring tools operating at room temperature ($T = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$) and based on up-to-date technologies.