

УДК 621.372.512

# Коэффициент передачи четырехполюсника по нормированному напряжению

В статье проведен анализ впервые введенного коэффициента передачи по нормированному напряжению. Указанный коэффициент предлагается использовать для расчета и измерения коэффициента передачи четырехполюсника, когда на его входе измеряется мощность, а на выходе – напряжение сигнала. Такая задача имеет место в радиоприемных устройствах, состоящих из усилителей мощности, трансформаторов сопротивлений и усилителей напряжения. Приводится аналитическое выражение для расчета общего коэффициента усиления радиоприемного устройства.



**И.Е. БУЙВАЛОВ,**  
главный конструктор УП «Завод СВТ»

Коэффициент усиления антенны выражается через отношение энергетических величин, таких как мощность или плотность потока мощности [1], и является на этом основании ее энергетической характеристикой, через которую при расчете радиоприемного устройства (РПРУ) определяется мощность сигнала на входе радиоприемного устройства (РПРУ). В то же время оконечное устройство радиоприемника обычно «потребляет» напряжение. Возникает вопрос, насколько необходимо усилить мощность сигнала на входе РПРУ, чтобы обеспечить заданный уровень напряжения на выходе? Для характеристики передаточных свойств четырехполюсника (ЧП), как известно, существуют коэффициенты передачи по мощности или напряжению. Но каким коэффициентом пользоваться, когда на входе ЧП измеряется мощность, а на выходе – напряжение сигнала?

Идея состоит в следующем. Если мысленно с помощью идеального трансформатора сопротивлений выходное сопротивление антенны (генератора сигналов) преобразовать к 1 Ом, то мощность сигнала на выходе трансформатора при этом не изменится, а напряжение, которое называется

нормированным [2], будет численно равно корню квадратному из мощности.

Выполнив такой переход, далее можно использовать коэффициент передачи по напряжению  $K_U$ , учитывая при этом в общем коэффициенте передачи ЧП коэффициент трансформации виртуального трансформатора сопротивлений  $n_b$ :

$$K_{U_n} = 20 \lg(n_b) + K_U,$$

где  $K_{U_n}$  – коэффициент передачи по нормированному напряжению [2].

Рассмотренный выше прием, по сути, является методом замещения, который, по легенде, впервые применил Архимед для измерения объема золота, ушедшего на изготовление короны царя Гиерона. Для этого он, как известно, погрузил корону в воду и измерил объем вытесненной ею воды. Подобно тому, как объему золотой короны был поставлен в соответствие объем воды с плотностью, равной 1, в нашем случае мощности на реальном сопротивлении ставится в соответствие мощность на сопротивлении 1 Ом. Масса золота, требуемая для изготовления короны, равна произведению измеренного

объема воды на плотность золота, а квадрат действующего напряжения сигнала на реальном сопротивлении равен измеренной мощности, помноженной на величину этого сопротивления.

В соответствии с выражением, записанным выше, на рис. 1 представлена эквивалентная схема системы передачи сигнала, где напряжение на входе усилителя напряжения (УН) равно

$$U_{\text{вх}} = U'_{\text{вх}} n_{\text{в}},$$

где  $n_{\text{в}} = U_{\text{вх}} / U'_{\text{вх}} = \sqrt{R_{\text{вх}} / 1 \text{ Ом}}$  – коэффициент трансформации виртуального трансформатора сопротивлений;

$U'_{\text{вх}}$  – нормированное напряжение на входе УН;

$R_{\text{вх}}$  – входное сопротивление УН;

$K_U$  – коэффициент передачи по напряжению УН.

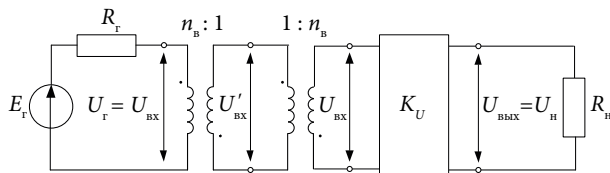


Рисунок 1 – Эквивалентная схема системы передачи сигнала

$E_t$  – ЭДС источника сигнала,  
 $R_t$  – внутреннее сопротивление источника сигнала,  
 $R_n$  – сопротивление нагрузки УН.

Отношение напряжения на выходе УН к напряжению на входе даст коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{\text{ввых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U'_{\text{ввых}}}{U'_{\text{вх}} n_{\text{в}}} = \frac{U'_{\text{ввых}}}{\sqrt{P_{\text{вх}}} n_{\text{в}}}.$$

Отношение напряжения на выходе УН к нормированному напряжению на входе даст коэффициент усиления по нормированному напряжению:

$$K_{U_n} = K_U n_{\text{в}} = \frac{U_{\text{ввых}}}{U'_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{ввых}}}{\sqrt{P_{\text{вх}}}}.$$

Или в дБ:

$$K_{U_n} = 20 \lg(n_{\text{в}}) + K_U, \tag{1}$$

$$K_{U_n} = 20 \lg(U_{\text{ввых}} / 1 \text{ В}) - 10 \lg(P_{\text{вх}} / 1 \text{ Вт}). \tag{2}$$

*Пример.* Имеются два РПрУ с входными сопротивлениями 50 и 75 Ом и коэффициентом усиления по напряжению  $K_U = 80$  дБ. Рассчитать общие коэффициенты усиления РПрУ.

Используя формулу (1), получаем:

$$K_{U_n,1} = 10 \lg(50) + 80 = 97 \text{ дБ},$$

$$K_{U_n,2} = 10 \lg(75) + 80 = 98,75 \text{ дБ}.$$

РПрУ с большим входным сопротивлением УН имеет больший общий коэффициент усиления.

В СВЧ-диапазоне, как уже отмечалось в [2], измерение напряжения и тока становится

затруднительным, что связано с неоднозначностью измерения, обусловленной распределенным характером напряжения и тока вдоль линии передачи и соизмеримостью размеров входных цепей измерительных устройств с длиной волны. Кроме того, измерение напряжения и тока в волноводных трактах для некоторых типов волн, например  $H_{01}$  в круглом волноводе, вообще теряет практический смысл, т. к. продольная составляющая тока отсутствует, а разность потенциалов в любом сечении между противоположными точками волновода равна нулю. Поэтому на СВЧ наиболее предпочтительным и точным является измерение мощности сигнала [3]. Соответственно усиление высокочастотной (ВЧ) части, как правило, характеризуют коэффициентом передачи по мощности, а усиление низкочастотной (НЧ) части СВЧ-радиоприемника – коэффициентом передачи по напряжению. Кроме того, в СВЧ-диапазоне для получения максимальной чувствительности и отсутствия искажений сигнала необходимо обеспечить согласованный режим работы ВЧ части РПрУ. На НЧ, наоборот, предпочтительнее, чтобы сопротивление нагрузки было во много раз больше, чем выходное сопротивление источника сигнала, т. к. это условие позволяет получить выигрыш в коэффициенте усиления по напряжению 6 дБ (см. [2], пример 5).

Для системы передачи сигнала, включающей усилитель мощности (УМ), что характерно для СВЧ-диапазона, коэффициент усиления по нормированному напряжению определяется выражением (3), а соответствующая ему эквивалентная схема представлена на рис. 2.

$$K_{U_n} = K_p + 20 \lg(n_{\text{в}}) + K_U, \tag{3}$$

где  $K_p$  – коэффициент передачи по мощности УМ;

$n_{\text{в}} = \sqrt{R_{\text{вх}} / 1 \text{ Ом}}$  – коэффициент трансформации виртуального трансформатора сопротивлений;

$U'_{\text{ввых}}$  – нормированное напряжение на выходе УН;

$R_{\text{вх}}$  – входное сопротивление УН.

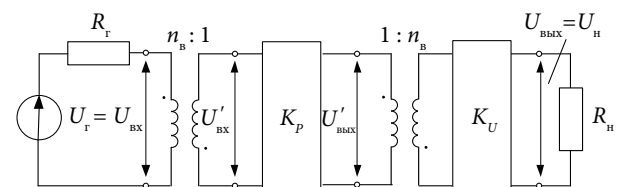


Рисунок 2 – Эквивалентная схема системы передачи сигнала

при  $K_p > 0$  дБ

**Примечание.** Видеодетектор (ВД) приемника прямого усиления и смеситель (СМ) супергетеродинного приемника, как правило, согласованы по входу, соединяют между собой ВЧ- и НЧ-части РПрУ и имеют разные входное и выходное сопротивления. На этом основании можно утверждать, что ВД и СМ выполняют роль трансформаторов сопротивлений между УМ и УН, расчет которых приведен в [2], примеры 5 и 7.

При проведении контроля функционирования РЛС о работоспособности РПрУ судят по его коэффициенту шума и максимальному коэффициенту усиления. Оценивают коэффициент усиления РПрУ обычно качественно, по яркости шума на индикаторах обнаружения. Введение коэффициента передачи по нормированному напряжению позволяет находить общий коэффициент усиления линейной части РПрУ с помощью того же генератора шума (ГШ), который применяется для определения коэффициента шума и входит в состав РПрУ. Для этого достаточно измерить приращение напряжения на выходе линейной части при включенном ГШ, а затем рассчитать коэффициент шума  $NF_{\text{РПрУ}}$  и общий коэффициент усиления РПрУ  $K_{\text{Ун}}$  по формулам (4), (5):

$$NF_{\text{РПрУ}} = ENR + 10 \lg \left( \frac{\overline{U_1^2}}{1 \text{ В}^2} \right) - 10 \lg \left( \frac{\overline{U_2^2} - \overline{U_1^2}}{1 \text{ В}^2} \right), \quad (4)$$

$$K_{\text{Ун}} = 10 \lg \left( \frac{\overline{U_2^2} - \overline{U_1^2}}{1 \text{ В}^2} \right) - ENR - 10 \lg \left( \frac{P_{\text{о.ш.р.}}}{1 \text{ Вт}} \right), \quad (5)$$

где величина  $ENR$  (excess noise ratio) – избыточный коэффициент шума, производители источников шума нормируют ее в дБ;

$\overline{U_2^2}$ ,  $\overline{U_1^2}$  – среднее значение квадрата напряжения шума на выходе линейной части РПрУ при включенном и выключенном ГШ соответственно;

$P_{\text{о.ш.р.}} = kT_0 \Delta f_{\text{ш}}$  – номинальная мощность теплового шума, отдаваемая активным сопротивлением в согласованную нагрузку;

$k = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К° – постоянная Больцмана;

$T_0 = 290$  К – стандартная температура;

$\Delta f_{\text{ш}}$  – шумовая полоса РПрУ.

### Выводы.

1. Если чувствительность задается величиной напряжения на входе РПрУ, что характерно для низкочастотных диапазонов, то общий коэффициент усиления рассчитывается по формуле (1) через коэффициент усиления по напряжению и входное сопротивление УН.

2. Если чувствительность задается уровнем мощности на входе РПрУ, общий коэффициент усиления РПрУ рассчитывается по формуле (3) через коэффициенты усиления по мощности, напряжению и коэффициент трансформации виртуального трансформатора сопротивлений.

3. Формулой (2) удобно пользоваться на практике при измерении общего коэффициента усиления РПрУ через уровень мощности входного сигнала и уровень напряжения на выходе. При этом не требуется знать входное сопротивление УН – оно уже учтено в измеряемом выходном напряжении.

4. Коэффициент передачи по нормированному напряжению определяет общий коэффициент усиления РПрУ любого диапазона частот на том основании, что входной величиной РПрУ всегда является мощность принимаемого сигнала, которая обусловлена коэффициентом усиления антенны.

5. Из выражений (1, 3) следует вывод: из двух РПрУ большее общее усиление имеет то, у которого при равных коэффициентах усиления по мощности и по напряжению больше коэффициент трансформации виртуального трансформатора  $n_{\text{в}}$  или, соответственно, больше входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  УН.

6. Кроме характеристики передаточных свойств СВЧ-видеодетекторов и смесителей [2], коэффициент передачи по нормированному напряжению может быть использован в оптоэлектронике для характеристики передаточных свойств фотоприемников.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Антенные системы радиоэлектронных средств: учебник / Г.В. Хохлов [и др.]; под общ. ред. Г.В. Хохлова. – М.: Воениздат, 1978. – 368 с.
2. Буйвалов, И.Е. Методика расчета общего коэффициента усиления СВЧ радиоприемного устройства/ И.Е. Буйвалов // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 3 (56) – С. 49–57.
3. Измерение мощности на СВЧ: серия «Радиоэлектронные измерительные приборы» / М.И. Билько [и др.]; – М.: Сов. Радио, 1976. – 168 с.

*In the article the term "transmission coefficient by normalized voltage" is analyzed. This coefficient is proposed to be used for calculating and measuring the transmission coefficient in a four-terminal network, when on its input measures the power, and at the output – the voltage of the signal. Such a task takes place in radio receivers consisting of power amplifiers, resistance transformers and voltage amplifiers.*

*An analytical expression is given for calculating the overall gain of the radio receiving device.*

Получено 26.06.2018.