

Ю. М. Туляков



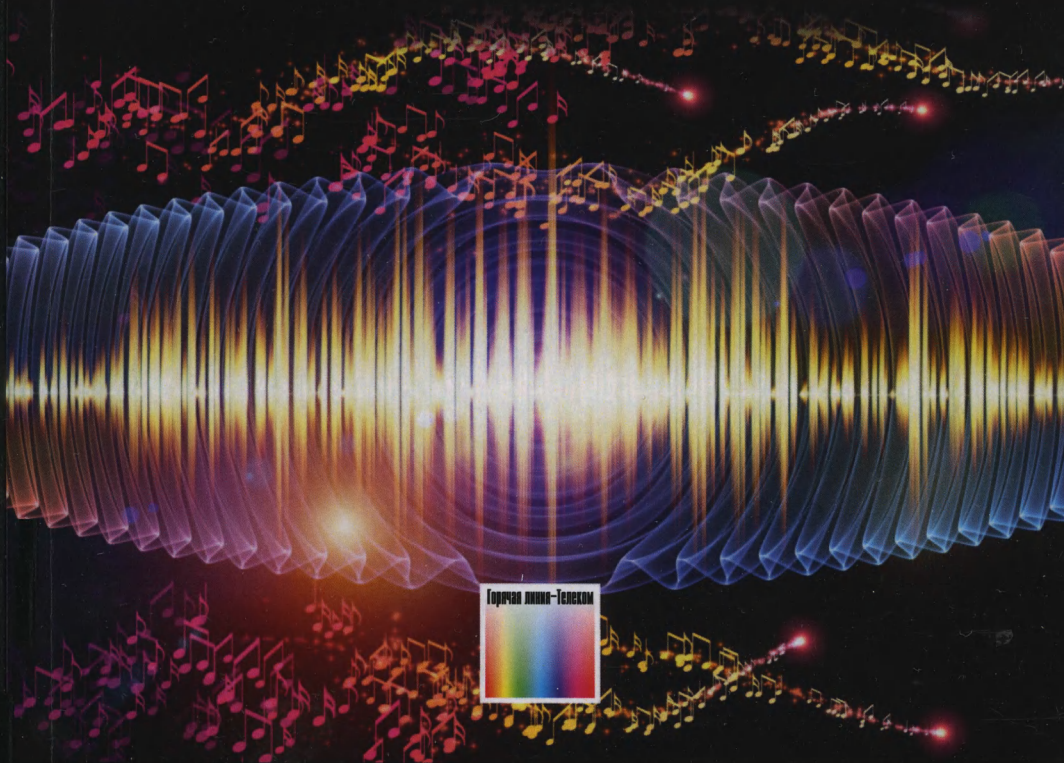
dB



# ДЕЦИБЕЛАХ

О ДЕЦИБЕЛАХ

Ю. М. Туляков



Горюхи-Телеком

**Ю. М. Туляков**

# **О ДЕЦИБЕЛАХ**

*Рекомендовано в качестве учебного и справочного пособия  
для студентов вузов, обучающихся по УГС  
11.00.00. – «Электроника, радиотехника и системы связи»  
квалификации (степени) бакалавр, магистр, специалист.*

*Ученые Советы:*

*Волго-Вятский филиал ордена Трудового Красного Знамени  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Московский технический  
университет связи и информатики»,  
протокол № 9 от 07.09.2017 г.*

*Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Нижегородский  
государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева»,  
протокол № 6 от 29.01.2019 г.*

**Москва  
Горячая линия – Телеком  
2023**

УДК 621.3.081.4

ББК 32.842

Т82

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор *В. Н. Гордиенко*; доктор физ.-мат. наук, профессор *В. И. Есипенко*; кандидат техн. наук, доцент *С. С. Зельманов*.

**Туляков Ю. М.**

**Т82** О децибелах. Справочное пособие. – М.: Горячая линия – Телеком, 2023. – 106 с: ил. – (Массовая радиобиблиотека; Вып. 1291).

**ISBN 978-5-9912-0810-9.**

Рассмотрены понятия абсолютных величин, относительных и абсолютных уровней, на основе которых определяется единица их оценки – децибел. Особое внимание уделено применению децибелов в области инфокоммуникаций, в том числе в электросвязи и акустике, и обоснованию принципов их обозначений (индексации). Материал изложен в доступной для понимания форме с пояснениями в виде примеров значений и расчетов по приводимым соотношениям. Приведены таблицы наиболее полезных в практике значений децибелов и их соотношений с другими часто используемыми величинами.

Для широкого круга читателей, оперирующих понятием децибела, будет полезно в качестве учебного пособия для учащихся колледжей и студентов вузов, обучающихся по соответствующим направлениям подготовки.

**ББК 32.842**

Адрес издательства в Интернет [WWW.TECHBOOK.RU](http://WWW.TECHBOOK.RU)

Массовая радиобиблиотека. Выпуск 1291

*Справочное издание*

**Туляков Юрий Михайлович**

**О ДЕЦИБЕЛАХ**

Справочное пособие

Редактор Ю. Н. Чернышов

Компьютерная верстка Ю. Н. Чернышова

Обложка художника В. Г. Ситникова

Печать цифровая. Подписано в печать 17.07.2019. Формат 60×88/16. Уч. изд. л. 6,63.

Тираж 500 экз. (5-й завод – 50 экз.) Изд. №190810

ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком»

**ISBN 978-5-9912-0810-9**

© Ю. М. Туляков, 2019, 2023

© Издательство «Горячая линия – Телеком», 2023

# Предисловие

*Децибел* — единица, которой оперируют специалисты отраслях связи, энергетики, теле- и инфокоммуникационного оборудования, исследователи в области акустики и многих других направлений науки и техники.

Казалось бы, эта единица является общеизвестной. Однако многообразие ее использования и особенно в технике связи показывает, что не всегда есть ее понимание в различии абсолютных значений оцениваемой величины, абсолютного и относительного ее уровней, и особенно в связи с вводимыми для современной техники многовариантными индексациями обозначений децибелов.

В данном учебно-справочном пособии рассматриваются не только основные положения для определения значений *децибелов*, но и разъясняются особенности использования абсолютных значений оцениваемой величины, абсолютного и относительного ее уровней с характеристикой вводимых для них обозначений. При этом основной акцент делается применительно к системам связи и их электрическим сигналам.

# 1 Классификация и характеристики величины сигналов

---

Одним из параметров сигналов является его величина (размер, уровень). Поскольку сигналы бывают различных видов и их величина может характеризоваться различными единицами измерений, то и определение величины сигналов должно осуществляться с учетом этих различий. Поэтому определение величины сигнала должно проводиться для конкретного вида сигналов.

Проведем анализ и классификацию видов сигналов для характеристик, определяющих их величину, и возможных изменений этой величины в устройствах и трактах передачи техники связи. Результаты такой оценки сигналов позволяют определить уровневое сравнение одного сигнала с другим.

Передача информации в системах связи в большинстве случаев осуществляется с помощью электрических сигналов. *Сигнал* — это электрическое колебание, отображающее передаваемое сообщение. В зависимости от условий распространения и требований к помехоустойчивости сигналов в канале связи, определяется *величина* (размер) *сигнала*, которая может характеризоваться его *мощностью* («энергетической» величиной)  $P$ , или *напряжением*  $U$ , или *током*  $I$  («силовыми» величинами).

Эти величины в свою очередь должны конкретизироваться для заданного вида сигналов.

## Виды сигналов

В системах связи используются следующие виды сигналов.

*Сигналы первичного преобразования* сообщения в электрические колебания. Они могут быть *аналоговыми* (например, при преобразовании звука с помощью микрофона в электрический сигнал) или *дискретными* (например, при преобразовании в электрические сигналы набираемого текста на компьютере).

*Модулированные сигналы*, в которых используется сигнал несущей частоты с изменением (по закону модулирующего сигнала) или амплитуды (при амплитудной модуляции — АМ), или частоты (при частотной модуляции — ЧМ), или фазы (при фазовой модуляции — ФМ), или совместное использование этих видов модуляции. Эти сигналы также могут быть *аналоговыми* и *дискретными* в соответствии с видом модулирующих (первичных) сигналов. Из дискретно модулированных сигналов следует выделить *сигналы цифровой модуляции* (когда несущее колебание модулируется цифровым битовым потоком).

Такое многообразие видов сигналов, как отмечалось выше, должно соответствующим образом учитываться при определении величин  $P$ ,  $U$  и  $I$ .

### Определение величины сигналов

Сигналы в системах связи можно рассматривать как электрические колебания произвольной случайной формы или в виде суммы гармонических составляющих, определяемых спектром сигнала. Сигнал в заданный момент времени  $t_i$  будет определяться значениями напряжения и тока в этот момент —  $u(t_i)$  и  $i(t_i)$ . Гармонический сигнал характеризуется изменениями во времени  $t$  напряжения и тока по синусоидальному закону:

$$u(t) = U_m \sin \omega t \text{ и } i(t) = I_m \sin \omega t,$$

где  $U_m$  и  $I_m$  — амплитуды напряжения и тока;  $\omega = 2\pi f$  — частота.

*Среднеквадратичное значение* переменного напряжения за период  $T$  будет определяться выражением

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{U_m^2}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 U_m \quad (1.1)$$

и аналогично для тока

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m. \quad (1.1')$$

Эти величины характеризуют *действующие*, или *эффективные* значения напряжений и токов.

При определении мощности сигналов необходимо учитывать не только их вид — являются ли они чисто *синусоидальными* или *несинусоидальными*, т. е. с произвольной формой (со спек-

тром из множества гармоник), но также и характер нагрузки — *активный, реактивный или комплексный*. И оценка должна производиться комплексными величинами (переменными), учитывающими амплитуду, частоту и фазу сигнала.

Для обоих видов этих сигналов *мгновенная мощность* в заданный момент времени  $t_i$  будет определяться для мгновенных значений напряжения и тока в виде

$$P_{\text{мгн}}(t_i) = u(t_i)i(t_i). \quad (1.2)$$

Заметим, что используемое обозначение мощности  $P$  отличается от обозначения, которое представляется в зарубежной литературе в виде символа  $W$ .

### Мощность гармонических сигналов

Для гармонических сигналов при активной нагрузке можно определить *среднюю мощность* за период сигнала  $T$ :

$$\begin{aligned} P_{\text{акт}} &= \frac{1}{T} \int_0^T P_{\text{мгн}}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin \omega t I_m \sin \omega t dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T U_m I_m \sin^2 \omega t dt = \frac{U_m I_m}{2} = UI. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Эта мощность является *активной* и измеряется в Дж/с или в соответствии с производными единицами системы измерений (СИ) — в ваттах (Вт).

Если нагрузка кроме активной составляющей содержит также реактивные составляющие (с наличием емкостей и индуктивностей), то для гармонических сигналов должен учитываться коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , характеризующий разницу фаз  $\varphi$  между током и напряжением, и в этом случае *мощность* будет *комплексная*, измеряемая в вольт-амперах (ВА) и определяемая комплексной величиной

$$\underline{P}_s = P_s e^{j\varphi} = P_{\text{акт}} + jP_{\text{реакт}} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = UI e^{j\varphi}, \quad (1.4)$$

где  $P_s = UI$  — модуль этой комплексной величины, который равен *полной* (кажущейся) *мощности*, определяемой соотношением

$$P_s = \sqrt{P_{\text{акт}}^2 + P_{\text{реакт}}^2}; \quad (1.5)$$

$U$  и  $I$  — действующие значения напряжения и тока;  $P_{\text{акт}} = UI \times \cos \varphi$  — активная составляющая (*активная мощность*), развиваемая в резистивных нагрузках (поглощаемая электрической цепью) и измеряемая, как указывалось выше, в ваттах. Эту мощность, согласно (1.3), также можно характеризовать как *среднюю мощность*  $P_{\text{ср}} = P_{\text{акт}}$ ;  $P_{\text{реакт}} = UI \sin \varphi$  — *реактивная составляющая* (реактивная мощность), возвращаемая электрической цепью обратно в источник и измеряемая в  $\text{ВАР}$  — вольтампер реактивная.

Заметим, что использованные здесь обозначения мощностей  $P_s$ ,  $P_{\text{акт}}$  и  $P_{\text{реакт}}$  отличаются от обозначений, часто используемых в технической литературе и представляемых соответственно символами  $\tilde{S}$ ,  $P$  и  $Q$ .

### Мощность сигналов, обладающих спектрами с множеством гармонических составляющих

Выше приведены соотношения для гармонических сигналов. При сигналах со спектрами с множеством гармонических составляющих необходимо учитывать изменения величины спектральных составляющих в полосе частот спектра сигнала, определяемого на основе представления его в виде ряда Фурье.

Оценку этим спектральным составляющим можно дать с помощью спектральной функции [1]:

$$\underline{U}(jn\omega) = \int_0^T u(t)e^{-jn\omega t} dt, \quad (1.6)$$

где  $\omega = 2\pi f$  — частота первой гармоники;  $u(t)$  — изменение сигнала во времени.

Выражение для  $n$ -й комплексной амплитуды будет иметь вид

$$\underline{A}_n = \frac{2}{T} U(jn\omega) \quad (1.7)$$

с модулем комплексной амплитуды

$$A_n = \frac{2}{T} U(n\omega).$$

Эти выражения позволяют вычислить амплитуды гармонических составляющих спектра сигнала, учитывая при этом, что спектральная функция в показательной форме  $\underline{U}(jn\omega) = U(n\omega)e^{-j\psi(n\omega)}$  содержит информацию о модуле спектральной



функции (огibaющей амплитудного спектра сигнала)  $U(n\omega)$  и фазе спектральной функции (огibaющая фазового спектра сигнала)  $\psi(n\omega)$ .

Одним из вариантов оценки таких сигналов является определение среднеквадратичного значения переменного напряжения или тока, которое наиболее точно описывают энергию и мощность таких сигналов. Для расчета среднеквадратичного значения напряжения определяют все мгновенные значения напряжений сигнала  $u(t_1), u(t_2), \dots, u(t_i), \dots, u(t_n)$  за достаточно большой необходимый промежуток времени и усредняют эти  $n$  значений в виде

$$U_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u^2(t_i)}. \quad (1.8)$$

Аналогичным образом определяется *среднеквадратичное значение тока*  $I_{\text{ср.кв}}$ .

Зная эти среднеквадратичные значения, можно определить для заданной нагрузки (обычно это активная нагрузка  $R$ ) *среднюю (активную) мощность*

$$P_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср.кв}}^2}{R} \text{ или } P_{\text{ср}} = I_{\text{ср.кв}}^2 R. \quad (1.9)$$

Другим вариантом оценки таких сигналов с наличием множества спектральных составляющих является метод измерения отдельных составляющих с использованием узкополосных фильтров по отдельным полосам спектра. По выделенным (отфильтрованным) сигналам определяется спектральная плотность мощности сигнала, после интегрирования по частоте которой определяется *полная мощность сигнала*. Безусловно, этот вариант измерения имеет больше исследовательский характер, чем практический. На практике обычно измеряется *средняя (активная) мощность* [см. (1.3) и (1.9)]. Для этого используются измерители с постоянной времени интегрирования, достаточной для получения достоверных результатов измерения.

На основании выше изложенного можно заключить следующее. При оценке величины сигналов необходимо учитывать как наличие реактивностей в цепи прохождения (нагрузки) сигналов, так и их спектральные составляющие, которые должны особен-

но учитываться для модулированных сигналов. К наиболее часто используемым видам оценки величины сигналов можно отнести *эффективные (среднеквадратичные или действующие)* значения напряжений и токов и *активную мощность*, которую в большинстве случаев можно рассматривают как *среднюю мощность*, измеряемую в Вт, не исключая также использование *полной мощности*, измеряемой в ВА.

### Абсолютные величины электрических сигналов

Выше было показано, что величина сигналов может определяться их мощностью, напряжением и током. Все рассмотренные варианты этих величин могут использоваться на практике в соответствии с видом сигналов и типом нагрузки. Однако, как указывалось выше, наибольшее применение для оценки сигналов в системах связи нашли средняя активная мощность  $P = P_{\text{ср}}$ , измеряемая в Вт, мВт, ..., и определяющие ее эффективные (среднеквадратичные или действующие) величины напряжения и тока:  $U$  или  $U_{\text{срkv}}$  и  $I$  или  $I_{\text{срkv}}$ , определяемые по (1.1), (1.1'), (1.8), (1.9) и измеряемые соответственно в вольтах, милливольт, ... (В, мВ,...) и в амперах, миллиамперах, ... (А, мА,...). Поэтому при дальнейшей оценке акцент будет сделан именно на эти виды величин.

Особо следует заметить, что вследствие малых значений мощностей сигналов, передаваемых по линиям (каналам) связи, наиболее практически используемыми в технике связи являются величины мощности, измеряемые в милливаттах (мВт).

При этом необходимо подчеркнуть, что указанные единицы измерений  $P$ ,  $U$  и  $I$  являются *абсолютными* и характеризуют их физическую сущность. Например:  $P = 2$  мВт — абсолютная величина мощности,  $U = 5$  мВ — абсолютная величина напряжения. (Напомним, что мощность — это энергетическая величина, а напряжение — силовая величина сигналов.)

## 2 Понятия относительной величины, уровня и единицы «децибел»

---

Оценка сигналов может производиться не только абсолютными, но и относительными величинами (ОВ) в виде значений отношения исследуемой величины  $F_i$  к величине, принятой в качестве «опорной»  $F_{оп}$ :

$$ОВ = F_i / F_{оп}. \quad (2.1)$$

В качестве  $F_{оп}$  могут указываться «эталонные» величины или величины  $F_n$ , к которым нормируется величина  $F_i$  (в технике связи наиболее часто  $F_i$  и  $F_{оп}$  — это абсолютные величины).

Например, если за опорную величину принято напряжение  $U_{оп} = 2 \text{ В} = F_{оп}$ , а оцениваемая величина — напряжение  $U_i = 0,25 \text{ В} = F_i$ , то  $ОВ = F_i / F_{оп} = U_i / U_{оп} = 0,25 / 2 = 0,125$ .

Относительные величины находят широкое применение при определении параметров систем связи, например для сопоставления величины сигналов на выходе и входе канала (линии или устройств) связи при определении коэффициентов передачи, затухания или усиления сигналов и возможных их изменений в заданной полосе частот.

Очевидно, что ОВ имеет линейную взаимосвязь с  $F_i$  и диапазон ее значений может представляться в линейном масштабе. Однако на практике часто удобнее пользоваться *логарифмической шкалой*, логарифмируя значения ОВ, т. е. используя величину

$$\log ОВ = \log(F_i / F_{оп}). \quad (2.2)$$

Относительные величины, выраженные в логарифмической форме, называются *уровнями*.

Целесообразность такого логарифмирования [2, 3] объясняется следующими причинами.

*Первая причина* связана с преимуществами логарифмичес-

кой шкалы в тех случаях, когда диапазон значений величины  $F_i$  весьма широк и может различаться на много порядков. Достаточно привести пример с изменением величины радиосигналов при удалении от базовой станции в сотовой связи. Подобные примеры имеют место и в проводной связи с затуханием величины сигналов, и для ряда параметров других устройств систем связи, акустики и т. п. Удобно также использование логарифмического масштаба при графическом отображении таких широкодиапазонных величин.

*Вторая причина* определяется возможностью исключить операции умножения оцениваемых величин (с заменой на суммирование) и деления (с заменой на вычитание). В качестве примера можно привести случай определения параметров (например, коэффициента передачи или амплитудно-частотной характеристики) для последовательного включения различных электротехнических устройств не перемножением параметров каждого из устройств, а их сложением в логарифмическом масштабе (подобно таким примерам будут рассматриваться ниже).

*Третьей причиной* применения логарифмической величины можно считать ощущения человеческим ухом *увеличения громкости звука в зависимости от мощности звука* (телефония должна изначально учитывать эту зависимость) [4]. Согласно психофизическому закону Вебера–Фехнера «Если увеличивать раздражение (уха) в геометрической прогрессии (т. е. в одинаковое число раз), то ощущение этого раздражения возрастает в арифметической прогрессии (т. е. на одинаковую величину)». Именно логарифмическая функция обладает такими свойствами.

Важной особенностью использования указанного логарифмирования (2.2) является величина с нулевым значением, которая получается при  $F_i = F_{\text{оп}}$ :

$$\log(F_i/F_{\text{оп}}) = \log(F_{\text{оп}}/F_{\text{оп}}) = \log 1 = 0.$$

Это по сути дела есть значение, в сравнении с которым оцениваются другие определяемые величины. Иными словами, это «нулевое» значение можно рассматривать как «нулевой уровень», относительно которого оцениваются другие значения в виде соответствующих им *уровней*.

Если при логарифмировании используется *десятичный логарифм*, а именно

$$\log_{10}(F_i/F_{\text{оп}}) = \lg(F_i/F_{\text{оп}}),$$

то такая единица определения уровня называется *бел* (русское обозначение: *Б*; международное: *В*). Это название принято в честь известного ученого-изобретателя Александра Грейма Белла.

Напомним, что логарифмом числа  $x$  по основанию  $a$  называют показатель степени  $y$ , в которую нужно возвести  $a$ , чтобы получить число  $x$ :

$$\log_a x = y. \quad (2.3)$$

В показательной форме это можно представить в виде

$$a^y = x. \quad (2.4)$$

*Основные свойства логарифмов:*

$$\log_a(AB) = \log_a A + \log_a B;$$

$$\log_a(A/B) = \log_a A - \log_a B;$$

$$\log_a(A^m) = m \log_a A.$$

На рис. 1 показан график функции десятичного логарифма (по основанию  $a = 10$  и обозначением  $\log_{10} x = \lg x = y$ ).

В табл. 1 приводятся практически важные значения десятичных логарифмов.

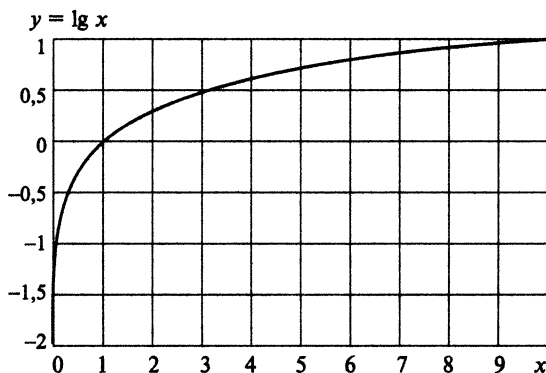


Рис. 1. График функции десятичного логарифма

Таблица 1

Некоторые значения десятичных логарифмов

$x$	0,001	0,01	0,1	0,2	0,25	0,5	1	2	4	5	10	100	1000
$\lg x$	-3	-2	-1	-0,7	-0,6	-0,3	0	0,3	0,6	0,7	1	2	3

[Следует обратить внимание на значение  $x = 2$  (увеличение в 2 раза), для которого  $\lg 2 = 0,3$ .]

Удобно также пользоваться указанными выше свойствами логарифмов, учитывая, что  $\lg 1 = 0$ ;  $\lg 2 = 0,3$ ;  $\lg 10 = 1$ ;  $\lg 100 = 2$  и т. д. и  $\lg(1/2) = -0,3$ ;  $\lg 0,1 = -1$ ,  $\lg 0,01 = -2$  и т. д.

Например:

$$\lg 4 = \lg 2^2 = 2 \lg 2 = 2 \cdot 0,3 = 0,6;$$

$$\lg 5 = \lg(10/2) = \lg 10 - \lg 2 = 1 - 0,3 = 0,7;$$

$$\lg 8 = \lg 2^3 = 3 \lg 2 = 3 \cdot 0,3 = 0,9;$$

$$\lg 0,5 = \lg(1/2) = \lg 1 - \lg 2 = 0 - 0,3 = -0,3.$$

При необходимости, когда требуется определить значение десятичного логарифма с точностью до определенного десятичного знака для заданной величины  $x$ , можно воспользоваться известными правилами определения характеристики и мантиссы логарифма.

*Характеристика* определяет целую часть логарифма и соответствует числу знаков числа  $x$  до запятой, уменьшенному на единицу.

*Мантисса* определяет значение дробной части логарифма — за запятой справа. Значение мантиссы отыскивается по таблицам десятичных логарифмов (см., например, [5]).

Рассмотрим случай для  $x > 1$ . Например: для  $\lg 4670$  характеристика заданного 4-разрядного числа  $x$  равна  $4 - 1 = 3$ , а мантисса из таблиц логарифмов равна 6693, и в результате получим  $\lg 4670 = 3,6693$ . Другой пример:  $\lg 467000 = 5,6693$ .

Если определяется логарифм для величины  $x < 1$ , то характеристика отрицательна и равна по абсолютной величине числу нулей слева, включая нуль целых, а мантисса определяется аналогично — по таблицам логарифмов. Например:  $\lg 0,0467 = -2,6693$ .

**Замечание.** Следует отметить, что все эти вычисления логарифмов могут быть упрощены (заменены) путем использова-

ния специальных компьютерных программ — калькуляторов, размещенных, например, в сети Интернет.

В области связи и других направлениях науки и техники наибольшее применение нашла единица, имеющая десятикратное увеличение значений «бел» — «децибел» (русское обозначение: дБ и международное: dB):

$$10 \lg(F_i/F_{\text{оп}}), \text{ дБ.} \quad (2.5)$$

Такое 10-ти («деци») кратное увеличение значений логарифма выбрано из условия удобства использования значений этих единиц. Это легко поясняется на примере с часто встречающимися значениями под логарифмом. Например, значение  $\lg 2 = 0,301$  является дробным и неудобным для применения. Удобнее использовать 10-кратное увеличение таких значений, т.е.  $10 \lg 2 = 10 \cdot 0,301 \approx 3 \text{ дБ}$ .

На основании (2.5), используя указанную выше взаимосвязь логарифмических и показательных функций (2.3) и (2.4) в виде

$$F_i/F_{\text{оп}} = 10^{\text{дБ}/10} = 10^{0,1 \text{ дБ}}, \quad (2.6)$$

нетрудно определить, что 1 дБ соответствует значению соотношения  $F_i/F_{\text{оп}} = 10^{0,1 \text{ дБ}} = 1,259$  раза, а для  $-1 \text{ дБ}$  величина  $F_i/F_{\text{оп}} = 10^{0,1(-1 \text{ дБ})} = 1/1,259 = 0,794$  раза.

Следует дополнительно отметить, хотя и очевидное, но практически удобное для ориентировочного представления о величине  $F_i$ , что при значениях  $F_i < F_{\text{оп}}$  децибелы будут иметь отрицательное значение. Для наглядности приведем два примера: при  $F_i = 1$  и  $F_{\text{оп}} = 4$  получим  $10 \lg(1/4) = 10 \cdot (-0,6) = -6 \text{ дБ}$ , а при  $F_i = 16$  и  $F_{\text{оп}} = 4$  значение  $10 \lg(16/4) = 10 \cdot 0,6 = +6 \text{ дБ}$ .

### Историческая версия введения единиц бел и децибел

Распространение децибела берёт начало от методов, используемых для количественной оценки потери (ослабления) сигнала в телеграфных и телефонных линиях [3, 6]. Единицей потерь изначально была миля стандартного (типового для применения в качестве таких линий) кабеля *m.s.c.* (от англ. *mile of standard cable*). 1 *m.s.c.* соответствовала потерям мощности сигнала с частотой 800 Гц в кабеле длиной в 1 милю (примерно 1,6 км), имеющем конкретные значения волнового сопротивления и распреде-

ленной емкости. Такая величина потерь была близка к наименьшей различимой средним слушателем разнице двух сигналов по громкости.

Однако мия такого кабеля была частотно-зависимой, и она не могла быть полноценной единицей оценки отношения мощностей.

В 1924 году компания «Белл телефон» получила положительный ответ на новое определение единицы среди членов Международного телеграфного союза в Европе: вместо *m.s.c.* предложена единица передачи *TU* (от англ. *transmission unit*). Единица передачи определялась так, что численное выражение в этих единицах соответствовало десяти десятичным логарифмам отношения измеренной мощности к исходной мощности. Удобство такого определения было в приблизительном соответствии старой и новой единиц ( $1 \text{ m.s.c.} \approx 0,95 \text{ TU}$ ).

В 1928 году компания «Белл телефон» переименовала единицу передачи *TU* в *децибел*, который стал одной десятой вновь определённой единицы логарифмического отношения мощностей, получившей наименование *бел* в честь учёного Александра Белла [7].



### 3 Уровни сигналов, выраженные в децибелах

---

На основании выше изложенного об относительных величинах и их логарифмическом представлении для уровней сигналов, выраженных в децибелах, используя (2.2) и (2.5), в общем виде можно записать

$$10 \lg(F_i/F_{\text{оп}}) = 10 \lg(F_{\text{а.с}}/F_{\text{а.оп.с}}), \text{ дБ}, \quad (3.1)$$

где  $F_{\text{а.с}}$  — абсолютная величина оцениваемого сигнала;  $F_{\text{а.оп.с}}$  — абсолютная величина опорного сигнала (величина сигнала нормирования).

Таким образом, децибел — это относительная величина сравнения уровней двух различных величин сигналов в логарифмическом виде, т.е. это единица сравнения. Обычно *уровни* обозначаются символом  $p$  с индексом (см. например [8, 9]), определяющим вид измеряемой величины: (по мощности —  $p_m$ ; по напряжению —  $p_n$ ; по току —  $p_t$ ). (В отдельных литературных источниках (например, в [10]) уровни могут обозначаться символом  $L$  от англ. Level.)

С учетом этого можно записать для уровня основной при измерениях величины — мощности:

$$p_m = 10 \lg(P_i/P_{\text{оп}}), \text{ дБ}, \quad (3.2)$$

где  $P_i$  — сравниваемая (исследуемая, измеряемая) величина мощности;  $P_{\text{оп}}$  — опорная величина (величина нормирования) мощности.

В качестве примера представим случаи при регистрации изменения мощности: при ее увеличении в  $P_i/P_{\text{оп}} = 2$  раза и уменьшении в  $P_i/P_{\text{оп}} = 1/2$  раза. Соответственно получим:  $p_m = 10 \lg 2 = +3$  дБ (например, это может характеризовать усиление сигнала) и  $p_m = 10 \lg(1/2) = -3$  дБ (например, характеризует ослабление сигнала).

Знак «+» показывает о превышении мощности  $P_i$  опорной величины  $P_{\text{оп}}$ , а знак «-» свидетельствует о том, что значение  $P_i$  меньше  $P_{\text{оп}}$ .

Для уровней напряжения и тока следует учесть следующее. Поскольку между мощностью  $P$ , напряжением  $U$ , током  $I$  и сопротивлением нагрузки  $R$  согласно закону Джоуля–Ленца существует взаимосвязь  $P = UI = U^2/R = I^2R$ , то при оценке относительной величины  $P_i/P_{\text{оп}}$  необходимо учитывать возможное различие сопротивлений нагрузки, на которых выделяются мощности  $P_i$  и  $P_{\text{оп}}$  в следующем виде:

$$\frac{P_i}{P_{\text{оп}}} = \frac{U_i^2/R_i}{U_{\text{оп}}^2/R_{\text{оп}}} = \frac{I_i^2 R_i}{I_{\text{оп}}^2 R_{\text{оп}}}, \quad (3.3)$$

где  $R_i$  — сопротивление, на котором определяется напряжение  $U_i$  или ток  $I_i$  для  $P_i$ , а  $R_{\text{оп}}$  — сопротивление, на котором было определено опорное напряжение  $U_{\text{оп}}$  или ток  $I_{\text{оп}}$ .

Это соотношение характеризует общий случай, учитывающий возможное расхождение величин  $R_i$  и  $R_{\text{оп}}$ . Необходимость учета такого расхождения можно подтвердить примером с оценкой коэффициента усиления усилителя, имеющего различные выходное и входное сопротивления.

В децибелах для такого общего случая уровни будут определяться из соотношения

$$p_m = 10 \lg \left( \frac{P_i}{P_{\text{оп}}} \right) = 10 \lg \left( \frac{U_i^2/R_i}{U_{\text{оп}}^2/R_{\text{оп}}} \right) = 10 \lg \left( \frac{I_i^2 R_i}{I_{\text{оп}}^2 R_{\text{оп}}} \right), \text{ дБ}; \quad (3.4)$$

- для уровня напряжения

$$\begin{aligned} p_n &= 10 \lg \left( \frac{U_i^2/R_i}{U_{\text{оп}}^2/R_{\text{оп}}} \right) = 10 \lg \left( \frac{U_i^2/U_{\text{оп}}^2}{R_{\text{оп}}/R_i} \right) = \\ &= 20 \lg \left( \frac{U_i}{U_{\text{оп}}} \right) - 10 \lg \left( \frac{R_i}{R_{\text{оп}}} \right), \text{ дБ}; \end{aligned} \quad (3.5)$$

- для уровня тока

$$p_t = 10 \lg \left( \frac{I_i^2 R_i}{I_{\text{оп}}^2 R_{\text{оп}}} \right) = 20 \lg \left( \frac{I_i}{I_{\text{оп}}} \right) + 10 \lg \left( \frac{R_i}{R_{\text{оп}}} \right), \text{ дБ}. \quad (3.6)$$

Если вместо активных сопротивлений  $R_i$  и  $R_{\text{оп}}$  имеют место комплексные сопротивления, то при оценке уровней учитываются соотношения их модулей, т.е. соответственно  $|Z_i|$  и  $|Z_{\text{оп}}|$ , и

выражения (3.4)–(3.6) преобразуются к следующему виду:

$$p_m = 10 \lg \left( \frac{P_i}{P_{оп}} \right) = 10 \lg \left( \frac{U_i^2 / |Z_i|}{U_{оп}^2 / |Z_{оп}|} \right) = 10 \lg \left( \frac{I_i^2 |Z_i|}{I_{оп}^2 |Z_{оп}|} \right), \text{ дБ}; \quad (3.4')$$

$$p_n = 20 \lg \left( \frac{U_i}{U_{оп}} \right) - 10 \lg \left| \frac{Z_i}{Z_{оп}} \right|, \text{ дБ}; \quad (3.5')$$

$$p_t = 20 \lg \left( \frac{I_i}{I_{оп}} \right) + 10 \lg \left| \frac{Z_i}{Z_{оп}} \right|, \text{ дБ}. \quad (3.6')$$

В частном (но весьма распространенном) случае при одинаковой величине нагрузки ( $R = R_i = R_{оп}$ ) для оцениваемой величины  $U_i$  или  $I_i$  и для опорной величины  $U_{оп}$  или  $I_{оп}$ , учитывая, что  $10 \lg(R/R) = 10 \lg 1 = 0$ , на основании выражений (3.5) и (3.6) можно получить следующие соотношения:

- для уровня напряжения

$$p_n = 20 \lg(U_i/U_{оп}), \text{ дБ}; \quad (3.7)$$

- для уровня тока

$$p_t = 20 \lg(I_i/I_{оп}), \text{ дБ}. \quad (3.8)$$

Заметим, что на практике в основном используется уровни  $p_m$ ,  $p_n$  и реже  $p_t$ .

В связи с различием децибелов для мощности («энергетической величины») и для напряжений и токов («силовых величин»), целесообразно использовать соответствующую индексацию для обозначений децибелов: дБм, дБн и дВт.

Приведем примеры расчета уровня мощности для  $P_i = 3$  Вт при  $P_{оп} = 2$  Вт и уровней напряжения для  $U_{i=1} = 8$  В и  $U_{i=2} = 1$  В при  $U_{оп} = 2$  В.

Согласно (3.2), для уровня мощности получим

$$p_m = 10 \lg(3/2) = 10 \lg 1,5 = 1,76 \text{ дБм};$$

на основании (3.7) уровни напряжений определяются так:

$$p_{n1} = 20 \lg(8/2) = 20 \lg 4 = 12 \text{ дБн};$$

$$p_{n2} = 20 \lg(1/2) = 20 \lg 0,5 = -6 \text{ дБн}.$$

На основании выше сделанных выводов о видах знаков («+» или «-») значений децибелов дополнительно можно отметить их практическую полезность как наглядных признаков превышения

или занижение оцениваемой величины относительно опорной величины.

### Переход от дБ к «разам»

Используя известную и указанную выше взаимосвязь логарифмических и показательных функций (2.6), выражения (3.2), (3.7) и (3.8) могут быть преобразованы для вычисления по дБ отношений величин «в размах» к следующему виду:

- для мощности:

$$P_i/P_{\text{оп}} = 10^{p_M/10} = 10^{0,1p_M} = 10^{0,1 \text{ дБм}}; \quad (3.9)$$

- для напряжения и тока соответственно:

$$U_i/U_{\text{оп}} = 10^{0,05p_U} = 10^{0,05 \text{ дБн}}, \quad (3.10)$$

$$I_i/I_{\text{оп}} = 10^{0,05p_I} = 10^{0,05 \text{ дБт}}. \quad (3.11)$$

Например, при заданном уровне напряжения  $p_U = 6 \text{ дБн}$  определяется отношение величин

$$U_i/U_{\text{оп}} = 10^{0,05 \cdot 6 \text{ дБн}} = 10^{0,3} = 2 \text{ раза.}$$

Номограммы перевода децибелов в разы отношений приводятся в приложении 3.

### Переход от дБ к процентам

Иногда требуется сопоставить значения децибелов с процентами сравниваемых величин. Нетрудно вывести соотношения для такого сопоставления. Пусть задано отношение мощностей в процентах

$$(P_i/P_{\text{оп}})\% = (P_i/P_{\text{оп}}) \cdot 100 \%,$$

откуда

$$(P_i/P_{\text{оп}}) = (P_i/P_{\text{оп}})\%/100 \text{ разы.}$$

Согласно (3.2) определим

$$\begin{aligned} p_M &= 10 \lg(P_i/P_{\text{оп}}) = 10 \lg[(P_i/P_{\text{оп}})\%/100] = \\ &= 10 \lg(P_i/P_{\text{оп}})\% - 10 \lg(1/100) = 10 \lg(P_i/P_{\text{оп}})\% - 20 \text{ дБм.} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Для отношений напряжений  $(U_i/U_{\text{оп}})\% = (U_i/U_{\text{оп}}) \cdot 100 \%$  согласно (3.7) получим

$$p_U = 20 \lg(U_i/U_{\text{оп}}) = 20 \lg[(U_i/U_{\text{оп}})\%/100] =$$

$$= 20 \lg(U_i/U_{\text{оп}})\% - 40 \text{ дБн.} \quad (3.13)$$

Подобно (3.13) определяется такая взаимосвязь для отношений токов.

Для пересчета децибелов в проценты, воспользовавшись выражениями (3.9) и (3.10), можно получить следующие формулы:

$$(P_i/P_{\text{оп}})\% = 10^{0,1(p_{\text{м}}+20)}, \%, \quad (3.14)$$

$$(U_i/U_{\text{оп}})\% = 10^{0,05(p_{\text{н}}+40)}, \%, \quad (3.15)$$

В табл. 2 приводятся наиболее часто встречающиеся значения перевода децибелов в проценты. Промежуточные значения можно найти по номограммам [11], приводимым в приложении 3.

Таблица 2

Перевод децибелов в проценты

%	100	50	10	1	0,1
$p_{\text{м}}$	0	-3	-10	-20	-30
$p_{\text{н}}$ или $p_{\text{т}}$	0	-6	-20	-40	-60

### Определение абсолютных величин по децибелам

Выражения (3.9), (3.10) и (3.11) могут быть преобразованы к виду, позволяющему при заданных опорных величинах по децибелам определять абсолютную величину:

- для мощности

$$P_i = P_{\text{оп}} \cdot 10^{0,1p_{\text{м}}} = P_{\text{оп}} \cdot 10^{0,1 \text{ дБм}}. \quad (3.16)$$

(Например, при  $P_{\text{оп}} = 2 \text{ мВт}$  и уровне  $p_{\text{м}} = 10 \text{ дБм}$  определим  $P_i = 2 \cdot 10^{0,1 \cdot 10 \text{ дБм}} = 2 \cdot 10 = 20 \text{ мВт}$ .)

- для напряжения

$$U_i = U_{\text{оп}} \cdot 10^{0,05p_{\text{н}}} = U_{\text{оп}} \cdot 10^{0,05 \text{ дБн}}, \quad (3.17)$$

- для тока

$$I_i = I_{\text{оп}} \cdot 10^{0,05p_{\text{т}}} = I_{\text{оп}} \cdot 10^{0,05 \text{ дБт}}. \quad (3.18)$$

(Например, при  $U_{\text{оп}} = 3 \text{ мВ}$  и уровне  $p_{\text{н}} = -6 \text{ дБн}$  рассчитаем  $U_i = 3 \cdot 10^{0,05(-6 \text{ дБн})} = 3 \cdot 10^{-0,3} \approx 1,5 \text{ мВ}$ .)

**Замечание.** При определении напряжений и токов необходимо учитывать регистрировались ли напряжение или ток на

одинаковом сопротивлении, или же для решаемой задачи различие значений сопротивлений не важно. Выражения (3.12) и (3.13) получены для условия равенства этих сопротивлений ( $R_i = R_{оп}$ ). Если эти сопротивления не равны и к тому же имеют комплексный характер, то необходима коррекция этих выражений с учетом соотношений (3.5) и (3.10) или (3.5') и (3.6').

(Значения пересчета децибелов в отношения напряжений, токов и мощностей в размах и процентах приводятся в приложениях 1,2 и 3.)

### Практически удобные значения и действия в расчетах с децибелами

В разделе 2 указывались значения десятичных логарифмов, которые облегчают их расчеты. Использование этих значений применительно к децибелам позволяет упростить операции с децибелами до такого уровня, что они, при некотором навыке, могут выполняться «в уме». Для этого следует применять следующие соотношения децибелов и разов:

- децибелы по мощности:
  - 1 дБм  $\rightarrow$  1,25 раза;
  - 3 дБм  $\rightarrow$  2 раза;
  - 10 дБм  $\rightarrow$  10 раз;
  - 20 дБм  $\rightarrow$  10 раз;
- децибелы по напряжению:
  - 1 дБн = (1/2) дБм  $\rightarrow$  1,12 раза;
  - 2 дБн  $\rightarrow$  1,25 раза;
  - 6 дБн  $\rightarrow$  2 раза.

Отсюда, раскладывая «более сложные значения» на «составные», получаем:

- децибелы по мощности:
  - 6 дБм = 3 дБм + 3 дБм  $\rightarrow 2 \cdot 2 = 4$  раза;
  - 9 дБм = 3 дБм + 3 дБм + 3 дБм  $\rightarrow 2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$  раз;
  - 12 дБм = 4  $\cdot$  3 дБм  $\rightarrow 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 16$  раз и т. п.,
- а также:
  - 7 дБм = 10 дБм - 3 дБм  $\rightarrow 10/2 = 5$  раз;
  - 13 дБ = 10 дБ + 3 дБ  $\rightarrow 10 \cdot 2 = 20$  раз;
  - 20 дБ = 10 дБ + 10 дБ  $\rightarrow 10 \cdot 10 = 100$  раз;
  - 30 дБ = 20 дБ + 10 дБ  $\rightarrow 100 \cdot 10 = 1000$  раз и т. п.;

- децибелы по напряжению:

$$12 \text{ дБн} = 6 \text{ дБн} + 6 \text{ дБн} \rightarrow 2 \cdot 2 = 4 \text{ раза};$$

$$18 \text{ дБн} = 6 \text{ дБн} + 6 \text{ дБн} + 6 \text{ дБн} \rightarrow 2 \cdot 2 \cdot 2 = 8 \text{ раз};$$

$$24 \text{ дБн} = 4 \cdot (3 \text{ дБн}) \rightarrow 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 16 \text{ раз и т. п.,}$$

а также:

$$14 \text{ дБн} = 20 \text{ дБн} - 6 \text{ дБн} \rightarrow 10/2 = 5 \text{ раз};$$

$$26 \text{ дБн} = 20 \text{ дБн} + 6 \text{ дБн} \rightarrow 10 \cdot 2 = 20 \text{ раз};$$

$$40 \text{ дБн} = 20 \text{ дБн} + 20 \text{ дБн} \rightarrow 10 \cdot 10 = 100 \text{ раз};$$

$$60 \text{ дБ} = 40 \text{ дБн} + 20 \text{ дБн} \rightarrow 100 \cdot 10 = 1000 \text{ раз и т. п.}$$

Из этих соотношений видно, как сложение (или вычитание) «удобных» значений децибелов соответствует умножению (или делению) самих отношений.

Если заданные значения децибелов отрицательные, то они соответствуют обратным значениям соотношений. Например, при уменьшении мощности, составляющим  $-13 \text{ дБм}$ , что соответствует  $-(10 \text{ дБм} + 3 \text{ дБм})$ , это уменьшение составит в  $10 \cdot 2 = 20$  раз, или доля уменьшенной мощности относительно исходной составит  $1/20 = 0,05$ .

## 4 Основные уровневые характеристики передачи сигналов по каналам связи

---

Для определения изменений величины сигналов при прохождении через канал электрической связи (передачи) дадим оценку характеристикам такого канала. *Канал передачи* — это совокупность технических средств и среды распространения электрического сигнала, и его можно представить в виде каскадного соединения различных четырехполюсников (участков), осуществляющих фильтрацию, преобразование сигналов, их усиление и коррекцию. Прохождение сигналов через эти четырехполюсники можно характеризовать их коэффициентами передачи  $K_i(j\omega)$  (рис. 2).

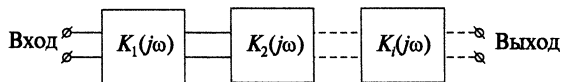


Рис. 2. Представление канала передачи в виде каскадного соединения четырехполюсников

При известных *модулях* коэффициентов передачи  $K(\omega)$  по напряжению для заданной частоты (или полосы частот)  $K_1(\omega) = U_{\text{вых } k1}/U_{\text{вх } k1}$ ,  $K_2(\omega) = U_{\text{вых } k2}/U_{\text{вх } k2}$ , ...,  $K_i(\omega) = U_{\text{вых } ki}/U_{\text{вх } ki}$  результирующий коэффициент передачи сигналов будет определяться следующим образом:

$$K_{\text{рез}}(\omega) = K_1(\omega)K_2(\omega) \cdots K_i(\omega). \quad (4.1)$$

В децибелах это может быть представлено в виде

$$K_{\text{рез}}(\omega)_{\text{дБ}} = 20 \lg K_1(\omega) + 20 \lg K_2(\omega) + \dots + 20 \lg K_i(\omega). \quad (4.2)$$

Например, для трехкаскадной схемы при  $K_1(\omega) = 0,5$ ;  $K_2(\omega) = 10$ ;  $K_3(\omega) = 1$  с результирующим коэффициентом



$K_{\text{рез}}(\omega) = 0,5 \cdot 10 \cdot 1 = 5$  раз, получим в децибелах

$$K_{\text{рез}}(\omega)_{\text{дБ}} = 20 \lg 0,5 + 20 \lg 10 + 20 \lg 1 = -6 + 20 + 0 = +14 \text{ дБн.}$$

Полезно указать, если, например,  $K_{\text{рез}}(\omega)$  уменьшится в 2 раза и его величина будет  $5/2 = 2,5$ , то в децибелах это изменение представится разницей в  $20 \lg 2 = 6$  дБ, т. е.  $K_{\text{рез}}(\omega)_{\text{дБ}} = 14 - 6 = 8$  дБн. Такая разница оценки в размах и децибелах является одной из немаловажных особенностей использования децибелов.

Для определения величины сигнала при прохождении каждого из таких четырехполюсников необходимо учитывать не только величину сигнала на их входах, но и частотно-фазовую зависимость коэффициента передачи, и характеристики входного и выходного сопротивлений. Обобщенную схему четырехполюсника для такой оценки можно представить в виде рис. 3. Эта схема может использоваться для оценки всего канала передачи как эквивалентного четырехполюсника [8], определяемого из условия каскадного включения всех четырехполюсников (см. рис. 2) как составных участков канала (линии) связи. Такой эквивалентный четырехполюсник позволяет определить качество и величину передачи сигналов для всего канала связи.

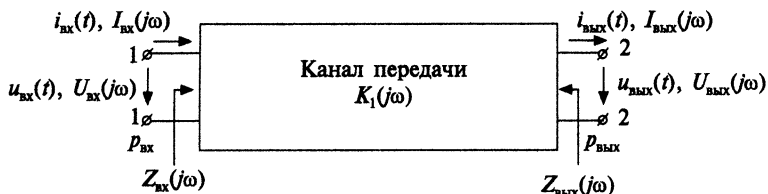


Рис. 3. Канал передачи в виде четырехполюсника

На рис. 3 показаны следующие обозначения: 1-1 и 2-2 — входные и выходные полюсы (или зажимы) соответственно;  $I_{\text{вх}}(j\omega)$  и  $I_{\text{вых}}(j\omega)$  — комплексные входной и выходной токи;  $U_{\text{вх}}(j\omega)$  и  $U_{\text{вых}}(j\omega)$  — комплексные входное и выходное напряжения;  $Z_{\text{вх}}(j\omega)$  и  $Z_{\text{вых}}(j\omega)$  — комплексные входное и выходное сопротивления, которые соответственно определяются характеристическими сопротивлениями четырехполюсника со стороны входа и выхода и подключенными нагрузками ко входу и выходу. Как правило, эти величины активные и равные, т. е.

$$Z_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} = Z_{\text{вых}} = R_{\text{вых}};$$

$K(j\omega) = U_{\text{вых}}(j\omega)/U_{\text{вх}}(j\omega) = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$  — комплексный коэффициент передачи по напряжению;  $\varphi(\omega)$  — функция фазового сдвига между выходным и входным сигналами. Если берется отношение выходного тока к входному, то говорят о коэффициенте передачи по току;  $u_{\text{вх}}(t)$  и  $u_{\text{вых}}(t)$ ,  $i_{\text{вх}}(t)$  и  $i_{\text{вых}}(t)$  — мгновенные значения соответственно напряжения и токи входного и выходного сигналов.

Каналы передачи работают с реальными нагрузками  $Z_{\text{н1}}(j\omega)$  и  $Z_{\text{н2}}(j\omega)$ , подключаемыми соответственно к зажимам (полюсам) 1–1 и 2–2.

При прохождении сигналов через такой канал, представляющий из себя каскадное соединение (см. рис. 2) четырехполюсников (участков канала), могут иметь место потери энергии (ослабление сигнала) в пассивных четырехполюсниках или ее увеличение (усиление сигнала) в активных (см. пример расчета  $K_{\text{рез}}(\omega)$ ). Дадим оценку указанным изменениям сигнала при его прохождении через эти четырехполюсники, используя схему на рис. 3.

При подключении источника сигнала с внутренним сопротивлением  $Z_i(j\omega) = Z_{\text{н1}}(j\omega)$  к входу 1–1 и нагрузки с сопротивлением  $Z_{\text{н2}}(j\omega)$  к входу 2–2 необходимо учитывать согласование (равенство) этих сопротивлений соответствующим характеристическим сопротивлениям четырехполюсника соответственно со стороны его входа и выхода. При отсутствии хотя бы одного из этих согласований передача сигналов через четырехполюсник должны оцениваться рабочими затуханием и усилением сигналов.

*Рабочее затухание* четырехполюсника для мощности сигнала определяется соотношением

$$A_{\text{мр}} = 10 \lg(P_{\text{ист.с}}/P_{\text{н}}) = p_{\text{м ист.с}} - p_{\text{мн}}, \text{ дБм}, \quad (4.3)$$

где  $P_{\text{ист.с}}$  и  $p_{\text{м ист.с}}$  — соответственно абсолютная величина и уровень полной (кажущейся) мощности, которую отдал бы источник сигнала согласованной с ним нагрузке  $Z_i(j\omega) = Z_{\text{н2}}(j\omega)$  (т. е. при подключении источника сигнала «напрямую» к нагрузке, а не через четырехполюсник);  $P_{\text{н}}$  и  $p_{\text{мн}}$  — соответственно абсолютная величина и уровень полной (кажущейся) мощности, выделяющейся в нагрузке участка линии (канала) в реальных условиях включения. При таком определении затухания учитывается

возможная несогласованность на входе и выходе четырехполюсника.

Рабочее усиление мощности сигнала четырехполюсника будет определяться соотношением

$$S_M = 10 \lg(P_H/P_{\text{ист.с}}) = p_{MH} - p_{M \text{ ист.с}}, \text{ дБм}, \quad (4.4)$$

где  $P_H, P_{\text{ист.с}}, p_{MH}$  и  $p_{M \text{ ист.с}}$  имеют тот же смысл, что и в выражении (4.3).

На практике стараются выполнить условия согласования четырехполюсника. Обычно это достигается за счет подключения к зажимам 1-1 и 2-2 с сопротивлениями четырехполюсника  $Z_{\text{вх}}(\omega) = R_{\text{вх}}$  и  $Z_{\text{вых}}(\omega) = R_{\text{вых}}$  источника сигналов с активным внутренним сопротивлением и активного сопротивления нагрузки, соответствующих номинальным значениям  $R_{\text{вх}}$  и  $R_{\text{вых}}$  соответственно. При этом условия рабочие затухания (ослабления) и усиление четырехполюсников можно считать характеристическими (собственными), которые, не учитывая отражения, будут определяться в виде:

- затухание по мощности

$$A_M = 10 \lg(P_{\text{вх}}/P_{\text{вых}}) = p_{M \text{ вх}} - p_{M \text{ вых}}, \text{ дБм}; \quad (4.5)$$

- затухание по напряжению

$$A_H = 20 \lg(U_{\text{вх}}/U_{\text{вых}}) = p_{H \text{ вх}} - p_{H \text{ вых}}, \text{ дБн}; \quad (4.6)$$

- усиление по мощности

$$S_M = 10 \lg(P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}) = p_{M \text{ вых}} - p_{M \text{ вх}}, \text{ дБм}, \quad (4.7)$$

где  $P_{\text{вх}}$  и  $P_{\text{вых}}$ ,  $p_{M \text{ вх}}$  и  $p_{M \text{ вых}}$  — соответственно мощности сигнала и их уровни на входе и выходе;  $U_{\text{вх}}$ ,  $U_{\text{вых}}$ ,  $p_{H \text{ вх}}$  и  $p_{H \text{ вых}}$  — соответственно напряжения и их уровни на входе и выходе.

При таких условиях, суммируя затухания (усиление) отдельных устройств (участков), образующих канал, и при известных уровнях сигнала на входе и выходе канала ( $p_{\text{вх}}$  и  $p_{\text{вых}}$ ) один из основных параметров — *остаточное затухание для всего канала* будет определяться формулой

$$A_K = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}} = \sum_{i=1}^k A_i - \sum_{j=1}^l S_j, \text{ дБ}, \quad (4.8)$$

где  $A_i$  — затухание  $i$ -го и  $S_j$  — усиление  $j$ -го четырехполюсников (участков), составляющих канал передачи. (Иногда для канала вместо  $A_k$  используется обозначение  $A_r$ .)

С целью уточнения единиц измерений по мощности или напряжению в это выражение может вводиться их индексация. Для мощности — это  $A_{км}, p_{вхм}, p_{выхм}, A_{им}, S_{им}$ , дБм.

При оценке затуханий сигнала в линии связи необходимо учитывать возможные виды затуханий. Это так называемое *собственное затухание* (attenuation), которое характерно для однородной линии. При известном затухании на единице длины участка линии (погонном затухании)  $A_{м/\ell}$  и оцениваемой длины линии  $\ell$  оно может определяться путем перемножения этих величин:  $A_{м\ell\ell}$ .

В линиях с множеством последовательно включенных строительных длин линии (кабеля), наличием стыков строительных длин кабелей или дефектов кабелей из-за отклонений в процессе их производства, монтажа и эксплуатации необходимо учитывать эти неоднородности. Оценка таких линий с неоднородностями осуществляется с помощью *вносимого затухания*  $A_{вн}$  (Insertion Loss — IL). В отличие от собственного затухания, вносимое затухание не связано жесткой зависимостью с ее длиной. Степень связи определяется степенью однородности конкретной линии.

Другим видом затуханий является затухание за счет возвратных потерь  $A_{в.п}$  (Return Loss — RL), которое обусловлено неоднородностями, вызывающими затухания из-за отражения сигналов при несогласованности в линии. Этот параметр можно также назвать *затуханием отражения* или *затуханием несогласованности*.

Остаточное затухание обычно измеряется на определенной для каждого канала *измерительной частоте*. Для наглядного представления об уровнях сигнала в канале связи строятся *диаграммы изменения уровней сигналов* (примеры построения таких диаграмм представлены в разделе 6).

К характеристикам прохождения сигналов в канале связи относится величина  $P_{\text{сиг. max}}/P_{\text{сиг. min}}$  (отношение допустимых максимальной (пиковой) мощности к минимальной мощности сигнала), которая характеризует *динамический диапазон сигналов*. При известных максимальных и минимальных уровнях сигнала

(соответственно  $p_{\text{сиг. max}}$  и  $p_{\text{сиг. min}}$ ) динамический диапазон определяется так:

$$D_c = 10 \lg(P_{\text{сиг. max}}/P_{\text{сиг. min}}) = p_{\text{сиг. max}} - p_{\text{сиг. min}}, \text{ дБм.} \quad (4.9)$$

При выборе параметров канала в ряде случаев необходимо учитывать *пик-фактор* сигналов

$$Q_c = 10 \lg(P_{\text{сиг. max}}/P_{\text{сиг. ср}}) = p_{\text{сиг. max}} - p_{\text{сиг. ср}}, \text{ дБм,} \quad (4.10)$$

где  $P_{\text{сиг. ср}}$  и  $p_{\text{сиг. ср}}$  — соответственно средняя мощность и средний уровень сигнала.

Также с помощью децибелов может оцениваться *параметр помехоустойчивости* передачи сигналов через отношение мощности сигнала к мощности помехи:

$$\rho_{\text{дБ}} = 10 \lg(P_{\text{сиг}}/P_{\text{пом}}) = p_{\text{сиг}} - p_{\text{пом}}, \text{ дБм.} \quad (4.11)$$

где  $P_{\text{сиг}}$  и  $P_{\text{пом}}$  — мощности сигнала и помехи в канале связи, а  $p_{\text{сиг}}$  и  $p_{\text{пом}}$  — соответственно уровни сигнала и помехи.

Подытоживая рассмотренное использование децибелов для уровневой оценки характеристик передачи сигналов, необходимо дополнительно указать о возможном подразделении уровней на *абсолютные, относительные и измерительные*. Рассмотрим сущность и особенности такого подразделения уровней.

## 5 Абсолютные уровни

---

Кроме обычного применения децибелов для определения отношений двух величин децибелы можно использовать для измерения *абсолютных значений* физической величины. Для этого достаточно *условиться*, какое значение будет иметь опорная физическая величина  $F_{\text{оп}}$ , для которой уровень будет *нулевым* ( $10 \lg(F_{\text{оп}}/F_{\text{оп}}) = 0$ ). Зная уровень измеряемой физической величины  $p = 10 \lg(F_{\text{изм}}/F_{\text{оп}})$ , можно определить ее абсолютное значение  $F_{\text{изм}}$  по аналогии, как это указывалось выше. Так, для мощности, используя выражение (3.16), определим

$$F_{\text{изм}} = F_{\text{оп}} \cdot 10^{0,1p} = F_{\text{оп}} \cdot 10^{0,1 \text{ дБ}}. \quad (3.16')$$

В технике связи международным соглашением было принято для измерения мощностей, напряжений и токов в логарифмических единицах одинаковое для всех стран начало отсчета, которое было названо *абсолютным нулевым уровнем* (аналогично принятию уровня моря для отсчета географических высот). В качестве исходного уровня был установлен абсолютный уровень по мощности. За мощность, соответствующую нулевому отсчету в логарифмических единицах, была взята мощность  $P_0 = P_{\text{оп}}$  в один милливольтампер (мВА) для полных (кажущихся) мощностей и один милливатт (мВт) для активных мощностей. Выбор этой величины обусловлен значениями мощностей сигналов, передаваемых по каналам (линиям) связи, и тем самым возможностью математически удобно связать её с общепринятыми в технике связи единицами.

Таким образом, *абсолютный уровень по мощности* будет определяться как

$$p_{\text{м0}} = 10 \lg(P_i/P_{\text{оп}}) = 10 \lg(P_i/P_0) = 10 \lg(P_i/1 \text{ мВт}), \text{ дБм0}. \quad (5.1)$$

Здесь, чтобы различать абсолютный уровень от других уровней, введена индексация («ноль») в обозначения уровня и децибела ( $p_{м0}$  и  $дБм0$ ).

Например, для мощности  $P_i = 8$  мВт абсолютный уровень определится как

$$p_{м0} = 10 \lg(8 \text{ мВт}/1 \text{ мВт}) = 9 \text{ дБм0}.$$

Производные от уровня по мощности (абсолютный нулевой уровень по напряжению  $U_0$  и абсолютный нулевой уровень по току  $I_0$ ) определяются для активного сопротивления нагрузки  $R_0 = 600$  Ом (используемого для такой оценки как «историческая величина» для соединительных линий с волновым сопротивлением 600 Ом) по известной формуле

$$P_0 = |U_0^2/Z| = U_0^2/R_0 = |I_0^2 Z| = I_0^2 R_0. \quad (5.2)$$

Расчеты показывают, что

$$U_0 = \sqrt{P_0 R_0} = \sqrt{1 \cdot 10^{-3} \cdot 600} \approx 0,775 \text{ В};$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{P_0}{R_0}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3}}{600}} = \sqrt{1,67 \cdot 10^{-6}} \approx 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 1,29 \text{ мА}.$$

На основании этого *абсолютные уровни* определяются:

- по напряжению

$$p_{н0} = 20 \lg(U_i/U_{оп}) = 20 \lg(U_i/U_0) = 20 \lg(U_i/0,775 \text{ В}), \text{ дБн0}; \quad (5.3)$$

- по току

$$p_{т0} = 20 \lg(I_i/I_{оп}) = 20 \lg(I_i/I_0) = 20 \lg(I_i/1,29 \text{ мА}), \text{ дБт0}. \quad (5.4)$$

Здесь так же, как и для мощности, введена индексация «ноль» в обозначения абсолютных уровней ( $p_{н0}$  и  $p_{т0}$ ) и децибелов (дБн0 и дБт0).

Например, для напряжений  $U_i = 3,1$  В и 0,3875 В абсолютные уровни соответственно определяются так:

$$p_{н0} = 20 \lg(3,1 \text{ В}/0,775 \text{ В}) = 20 \lg 4 = 12 \text{ дБн0};$$

$$p_{н0} = 20 \lg(0,3875 \text{ В}/0,775 \text{ В}) = 20 \lg(1/2) = -6 \text{ дБн0}.$$

Таким образом, значения  $P_0 = 1$  мВт,  $U_0 = 0,775$  В и  $I_0 =$

$= 1,29$  мА определяют абсолютный нулевой уровень по мощности, напряжению и току, и благодаря этим принятым значениям возможно определение не только абсолютных уровней измеряемых мощностей, напряжений и токов, но и их абсолютных величин.

**Замечание.** В инфокоммуникациях могут оцениваться уровни для сопротивлений цепей, отличных от 600 Ом. Используя соотношение (5.2), можно рассчитать значения абсолютных нулевых уровней напряжения и токов, определяемых из мощности 1 мВт для других величин номинального активного сопротивления. Результаты расчетов и на основании данных приводимых в [2] для таких практически важных значений сопротивлений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Перевод децибелов в проценты

Номинальное сопротивление цепи, Ом	Напряжение, В	Ток, мА
50	0,2236	4,472
75	0,2739	3,652
100	0,3162	3,162
135	0,3674	2,722
150	0,3873	2,582
170	0,4123	2,425
600	0,7746	1,2916
1400	1,183	0,8454

Эти различия учитываются в измерителях уровня за счет наличия в них двух шкал: одной, проградуированной в абсолютных уровнях напряжения для 600-омной цепи (нулю соответствует 0,775 В), другой — для 135-омной (нулю соответствует 0,367 В) или же одной для 135-омной и второй для 75-омной (нулю соответствует 0,274 В).

### Определение абсолютных величин по абсолютным уровням

Поскольку принятые значения  $P_0$ ,  $U_0$  и  $I_0$  являются опорными для абсолютных уровней, то по абсолютным уровням возможно вычисление абсолютных величин сигналов. Учитывая комментарии к выражению (3.16') и используя соотношения (3.16), (3.17) и (3.18), можно получить следующие выражения для вычисления абсолютных величин:



- для мощности

$$P = P_{\text{оп}} \cdot 10^{0,1p_m} = P_0 \cdot 10^{0,1p_{m0}} = 1 \cdot 10^{0,1p_{m0}}, \text{ мВт}; \quad (5.5)$$

- для напряжения

$$U = U_{\text{оп}} \cdot 10^{0,05p_{n0}} = U_0 \cdot 10^{0,05p_{n0}} = 0,775 \cdot 10^{0,05p_{n0}}, \text{ В}; \quad (5.6)$$

- для тока

$$I = I_{\text{оп}} \cdot 10^{0,05p_t} = I_0 \cdot 10^{0,05p_{t0}} = 1,29 \cdot 10^{0,05p_{t0}}, \text{ мА}. \quad (5.7)$$

Например, для абсолютного уровня мощности  $p_{m0} = 3$  дБм0 абсолютная величина мощности составит

$$P = P_0 \cdot 10^{0,1p_{m0}} = 1 \cdot 10^{0,1 \cdot 3} = 2 \text{ мВт};$$

для абсолютного уровня напряжения  $p_{n0} = 6$  дБм0 абсолютная величина напряжения составит

$$U = U_0 \cdot 10^{0,05p_{n0}} = 0,775 \cdot 10^{0,05 \cdot 6} = 1,55 \text{ В}.$$

(В приложении 4 приводятся значения пересчета децибелов (абсолютных уровней) в единицы напряжения, тока и мощности при стандартных нулевом уровне 1 мВт и сопротивлении нагрузки 600 Ом.)

## 6 Относительный уровень и особенности его применения в технике связи

---

Будем считать, что *относительный уровень* в линии связи определяется для исследуемой точки «X» относительно величины сигнала для заданной точки, которую часто называют *ТНОУ* — точка нулевого относительного уровня. На рис. 4 показаны такие возможные точки для оценки мощности сигнала  $P$ .

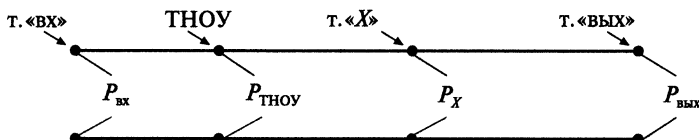


Рис. 4. Линия с точками оценки мощностей сигнала

Суть определения *относительного уровня* сводится к следующему:

- задана известная величина мощности  $P_{\text{ТНОУ}}$  в ТНОУ;
- определяется величина  $P_X$  в исследуемой точке;
- рассчитывается относительная величина  $P_X/P_{\text{ТНОУ}}$  и в логарифмическом виде определяется относительный уровень:

$$10 \lg(P_X/P_{\text{ТНОУ}}) = p_{\text{отн.м}} \text{ или } p_{\text{ом}}. \quad (6.1)$$

Здесь введены обозначения  $p_{\text{отн.м}}$ , где индекс «отн» означает, что это относительный уровень, а «м» — по мощности, и равнозначное упрощенное обозначение  $p_{\text{ом}}$  с индексом «о» (о — это буква), который характеризует относительность уровня, и стоящим перед индексом «м», обозначающим уровень по мощности. (Не путать с индексами для абсолютного уровня, когда там ставится «0» (цифра ноль, а не буква «о») не слева от индекса «м», а справа:  $p_{\text{м0}}$ .)

Аналогичные обозначения и для *относительного уровня напряжения*:

$$p_{\text{он}} = p_{\text{отн.н}} = 20 \lg(U_X/U_{\text{ТНОУ}}). \quad (6.1')$$

Комментарии к ТНОУ — точке нулевого относительного уровня, т. е. относительно которого оцениваются все другие уровни в других точках: эта точка является определяющей для коррекции канала в части амплитудно-частотной характеристики и в том числе для сравнения сигнала с уровнем помех в канале.

### Взаимосвязь относительного уровня с абсолютным уровнем

Пусть задан *абсолютный уровень мощности*  $p_{\text{ТНОУ } 0}$  в точке (например, в конкретном месте линии связи) нулевого относительного уровня (ТНОУ), т. е. относительно которого оцениваются все другие уровни в других точках, и *относительный уровень* (относительно ТНОУ)  $p_{X_{\text{ом}}}$  в точке «X». Требуется определить *абсолютный уровень*  $p_{X_{\text{м0}}}$  в точке «X».

*Абсолютный уровень в ТНОУ* определяется как  $p_{\text{ТНОУ } 0} = 10 \lg(P_{\text{ТНОУ}}/P_0)$ , а *относительный уровень* в точке «X» соответствует  $p_{X_{\text{ом}}} = 10 \lg(P_X/P_{\text{ТНОУ}})$ . В точке «X» к абсолютному уровню ТНОУ  $p_{\text{ТНОУ } 0}$  добавляется еще абсолютный уровень  $p_{X_{\text{м0}}}$  для точки «X», а разница между ними будет определять *относительный уровень*  $p_{X_{\text{ом}}}$  в точке «X». Таким образом,

$$p_{X_{\text{ом}}} = p_{X_{\text{м0}}} - p_{\text{ТНОУ } 0}. \quad (6.2)$$

Это можно легко доказать:

$$\begin{aligned} p_{X_{\text{ом}}} &= 10 \lg(P_X/P_{\text{ТНОУ}}) = 10 \lg(P_X/P_0) - 10 \lg(P_{\text{ТНОУ}}/P_0) = \\ &= 10 \lg[(P_X/P_0)/(P_{\text{ТНОУ}}/P_0)] = p_{X_{\text{м0}}} - p_{\text{ТНОУ } 0}. \end{aligned}$$

**Пример.** Если в ТНОУ абсолютный уровень  $p_{\text{ТНОУ } 0} = 5$  дБ, а в точке «X» абсолютный уровень  $p_{X_{\text{м0}}} = 2$  дБ, то уровень в этой точке относительно уровня в ТНОУ будет составлять  $p_{X_{\text{ом}}} = p_{X_{\text{м0}}} - p_{\text{ТНОУ } 0} = 2 - 5 = -3$  дБ (т. е. сигнал в точке «X» изменился (уменьшился) относительно сигнала в ТНОУ на 3 дБ).

Соотношение (6.2) может быть преобразовано или для определения *абсолютного уровня* в ТНОУ (приведенного к ТНОУ):

$$p_{\text{ТНОУ } 0} = p_{X_{\text{м0}}} - p_{X_{\text{ом}}} \quad (6.2')$$

или для определения *абсолютного уровня* в точке «X»:

$$P_{X_{M0}} = P_{\text{тноу } M0} + P_{X_{OM}}. \quad (6.3)$$

При необходимости, зная значение абсолютного уровня  $P_{X_{M0}}$ , можно определить *абсолютную величину* мощности  $P_X$ . Используя (5.5), получим

$$P_X = P_0 \cdot 10^{0,1P_{X_{M0}}} = 1 \cdot 10^{0,1P_{X_{M0}}}, \text{ мВт.}$$

Из изложенного следует, что в логарифмическом виде (в дБ) задачи рассмотренного вида решаются достаточно просто. Однако следует заметить, что при решениях этих задач необходимо учитывать возможное рассогласование нагрузки (см. пример, рассматриваемый ниже).

**Пример** расчета с использованием относительного и абсолютного уровней.

Задано [9]:

- 1) телефонная линия (канал тональной частоты);
- 2) мощность в точке относительного нулевого уровня

$$P_{\text{тноу}} = 32 \cdot 10^{-3} \text{ мВт} = 32 \text{ мкВт} = 32 \text{ мкВт}_0.$$

Здесь к единице измерения добавляется цифра «0» для учета того, что это исходное значение является абсолютной величиной, с которой будут сравниваться значения в исследуемых точках «X» (см. рис. 4);

3) нагрузочное сопротивление в заданной точке «X»  $R_X = 2075 \text{ Ом}$ ;

4) относительный уровень мощности в этой точке «X»  $P_{X_{OM}} = 1 \text{ дБом}$ .

Требуется рассчитать:

1) абсолютные уровни в точке «X»:

- для мощности  $P_{X_{M0}}$ ;
- для напряжения  $P_{X_{H0}}$ ;

2) действующие значения в точке «X»:

- напряжения  $U_x$ ;
- мощности  $P_x$ .

**Решение.**

Для иллюстрации решения можно воспользоваться рис. 4.

1. Расчет абсолютно уровня мощности в точке «X»  $P_{X_{M0}}$ .

При известном относительном уровне мощности  $p_{X_{\text{ом}}}$  абсолютный уровень (относительно  $P_0 = 1$  мВт) будет определяться по соотношению (6.3):

$$p_{X_{\text{м0}}} = p_{X_{\text{ом}}} + p_{\text{тн0у м0}}.$$

а) Отсюда следует, что для расчета необходимо знать абсолютный уровень мощности в ТН0У:

$$p_{\text{тн0у м0}} = 10 \lg(P_{\text{тн0у}}/P_0) = 10 \lg(P_{\text{тн0у}}/1 \text{ Вт}) = 10 \lg(32 \cdot 10^{-3}/1) = \\ = 10 \lg(3,2 \cdot 10^{-2}) = 10 \lg(3,2) + 10 \lg(10^{-2}) = 10 \cdot 0,5 - 20 = -15 \text{ дБм0}.$$

б) Подставив этот результат и значение  $p_{X_{\text{ом}}}$  в (6.3), определим абсолютный уровень мощности:

$$p_{X_{\text{м0}}} = p_{X_{\text{ом}}} + p_{\text{тн0у м0}} = 1 + (-15) = -14 \text{ дБ}_{X_{\text{м0}}}.$$

2. Расчет абсолютного уровня напряжения в точке «X»  $p_{X_{\text{н0}}}$ .

Нельзя сделать расчет  $p_{X_{\text{н0}}}$  путем использования простейших взаимосвязей абсолютных уровней для мощности и напряжения, поскольку эти взаимосвязи определены для «идеальной нагрузки», т.е. с  $R_{\text{н}} = R_0 = 600$  Ом. Поэтому необходимо учесть реальную заданную нагрузку  $R_{\text{н}} = R_X = 2075$  Ом в точке «X». Отсутствие согласования нагрузки вызывает *затухание* сигнала за счет возвратных потерь (пояснения см. в разделе 4).

Такое рассогласование нагрузки можно учесть, используя соотношения (3.4') и (3.5') применительно для оценки абсолютных уровней мощности и напряжения:

$$p_{X_{\text{м0}}} = 10 \lg \left( \frac{P_x}{P_0} \right) = 10 \lg \left( \frac{U_x^2 / |Z_x|}{U_0^2 / |Z_0|} \right) = \\ = 20 \lg \frac{U_x}{U_0} - 10 \lg \left| \frac{Z_x}{Z_0} \right| = p_{X_{\text{н0}}} - 10 \lg \left| \frac{Z_x}{Z_0} \right|, \quad (6.4)$$

где  $p_{X_{\text{н0}}}$  — абсолютный уровень напряжения в точке «X».

Отсюда получаем

$$p_{X_{\text{н0}}} = p_{X_{\text{м0}}} + 10 \lg \left| \frac{Z_x}{Z_0} \right|. \quad (6.5)$$

Поскольку задано чисто активное сопротивление  $R_X = Z_X = 2075$  Ом и известно, что  $Z_0 = R_{\text{н}} = R_0 = 600$  Ом, то можно

записать и рассчитать

$$p_{X_{\text{н0}}} = p_{X_{\text{м0}}} + 10 \lg(R_X/R_0) = -14 + 10 \lg(2075/600) = \\ = -14 + 10 \lg 3,46 = -14 + 5,4 = -8,6 \text{ дБ}_{X_{\text{н0}}}.$$

3. Расчет действующих значений (абсолютных величин).

а) Согласно (5.5) действующее значение (абсолютная величина) мощности для точки «X»

$$P_X = P_0 \cdot 10^{0,1p_{X_{\text{м0}}}} = 1 \cdot 10^{0,1(-14 \text{ дБ})} = 1 \cdot 10^{-1,4} = 0,0398 \text{ мВт}.$$

б) Действующее значение напряжение (абсолютная величина) определяется по соотношению (5.6):

$$U_X = U_0 \cdot 10^{0,05p_{X_{\text{н0}}}} = 0,775 \cdot 10^{0,05(-8,6 \text{ дБ}_{X_{\text{н0}}})} = \\ = 0,775 \cdot 10^{-0,43} = 0,288 \text{ В} = 288 \text{ мВ}.$$

### Уровневая оценка сигнала в линии с усилителями (диаграмма уровней сигналов)

В линиях связи сигнал претерпевает затухания, поэтому для сохранения заданной помехоустойчивости (чтобы отношение сигнал/помеха  $P_{\text{сиг}}/P_{\text{пом}} = \rho$  не было меньше заданной величины) приходится через определенные участки линии усиливать эти сигналы. Для этого включаются специальные усилители с усилением мощности сигнала  $S_{\text{м}}$  (см. пример на рис. 5,а). Изменение величины сигнала по длине линии с такими усилителями можно представить в виде *диаграммы уровней сигнала* [8, 9], например, по мощности  $p_{\text{м}}$  (см. рис. 5,б), где показаны  $p_{\text{сиг min м0}}$  — минимальный уровень сигнала,  $p_{\text{пом м0}}$  — уровень помехи и величина помехозащищенности для минимального уровня сигнала, которая, согласно (4.11), определяется как

$$A_{\text{пз}} = \rho_{\text{дБ}} = 10 \lg \rho = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{сиг. min}}}{P_{\text{пом}}} \right) = p_{\text{сиг min м0}} - p_{\text{пом м0}}, \text{ дБм.} \quad (4.11')$$

Заметим, что наклон линии от входа линии до входа усилителя (или от выхода одного усилителя до входа следующего усилителя) характеризует величину затухания сигнала в линии. И величина затухания для каждого из участков линии будет определяться разницей уровней сигнала на входе и конце участка линии. На рис. 5 в качестве примера указаны эти уровни для

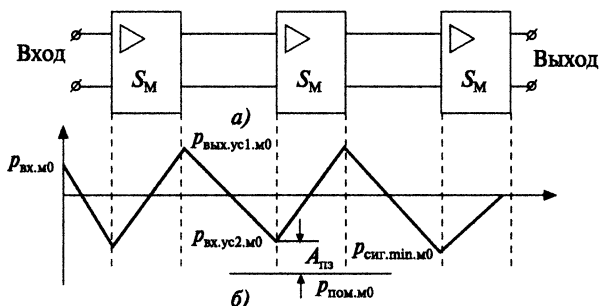


Рис. 5. Линия связи с тремя усилителями и диаграмма уровней сигналов

второго участка (слева)  $p_{вых.ус.1м0}$  для выхода первого и  $p_{вх.ус.2м0}$  для входа второго усилителей, для которых затухание определится как

$$A_{м1} = p_{вых.ус.1м0} - p_{вх.ус.2м0}, \text{ дБм.} \quad (6.6)$$

Следует заметить, что величину  $(p_{вх.ус.2м0} - p_{вых.ус.1м0})$  можно рассматривать, основываясь на ее сопоставлении с величиной выражения (6.2), как *уровень сигнала  $p_{ом}$  относительно уровня  $p_{м0вых.ус.1}$* , т. е.

$$p_{вх.ус.2м0} - p_{вых.ус.1м0} = p_{ом}, \text{ дБм.}$$

Для восстановления уровня сигнала необходимо его усиление. Для заданного уровня сигнала  $p_{вых.ус.2м0}$  на входе следующего участка, например, до такого же уровня, что и для предыдущего участка (см. рис. 5), т. е. чтобы  $p_{вых.ус.2м0} = p_{вых.ус.1м0}$ , потребуется усиление

$$S_{м1} = p_{вых.ус.2м0} - p_{сиг.мин.м0} = p_{вых.ус.2м0} - p_{вх.ус.2м0}. \quad (6.7)$$

После определения затуханий и усиления на всех участках канала (линии) можно определить *остаточное рабочее затухание* канала  $A_{км}$ . Согласно (4.8) для приведенного примера с тремя участками (см. рис. 5) его величина будет рассчитываться по соотношению

$$A_{км} = p_{вх.м} - p_{вых.м} = \sum_{i=1}^3 A_{им} - \sum_{j=1}^3 S_{jm}, \text{ дБм.} \quad (4.8')$$

Минимальный уровень сигнала определяется из соотношения для помехозащищенности (4.11):

$$p_{\text{сиг min м0}} = p_{\text{пом м0}} + A_{\text{пз}}. \quad (6.8)$$

Вышеприведенные соотношения (6.6), (6.7), (4.8') и (6.8) характеризуют уровни сигналов и их изменения по мощности. При необходимости эти соотношения могут быть преобразованы для оценки уровней по напряжению с учетом взаимосвязи децибелов для напряжений и децибелов для мощностей (3.4') и (3.7).

Пример расчета уровней сигнала в линии с усилителем.

Задано [9]:

1) волоконно-оптическая кабельная линия, состоящая из 2-х участков  $\ell_1 = \ell_2$  с усилителем (рис. 6,а);

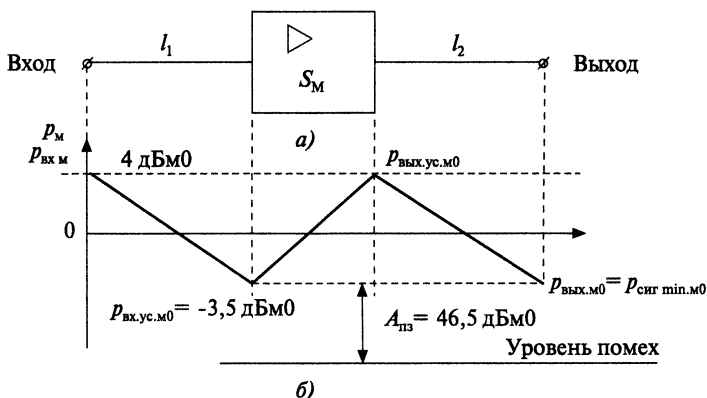


Рис. 6. Линия связи с двумя участками, одним усилителем и диаграмма уровней сигналов

2) абсолютный уровень мощности на входе линии  $p_{\text{вх.м0}} = 4 \text{ дБм0}$ ;

3) длина каждого кабельного участка линии  $\ell = \ell_1 = \ell_2 = 50 \text{ км}$ ;

4) величина затухания на единице длины участка линии (погонного затухания) задана в виде коэффициента затухания  $A_{\text{м}/\ell} = 0,15 \text{ дБм/км}$ ;

5) мощность помехи (оптической), приведенной ко входу усилителя,  $P_{\text{пом}} = 10000 \text{ пВт} = 10^{-5} \text{ мВт}$ .

Требуется построить диаграмму уровней сигнала и рассчитать помехозащищенность линейного тракта.



Для этого необходимо определить следующее:

- 1) затухание уровня сигнала  $A_{\ell_m}$  для каждого из участков;
- 2) уровень сигнала на концах каждого из участков линии (на входе усилителя  $p_{\text{вх.ус м0}} = p_{\text{сиг min м0}}$  и на выходе линии  $p_{\text{вых м0}} = p_{\text{сиг min м0}}$ );
- 3) необходимое усиление сигнала в усилителе  $S_m$ ;
- 4) отношение сигнал/помеха  $P_{\text{сиг}}/P_{\text{пом}} = \rho$ ;
- 5) величину помехозащищенности для минимального сигнала (на входе усилителя и на выходе (конце) линии)  $A_{\text{пз}} = \rho_{\text{дБ}}$ ;
- 6) построить диаграмму уровней.

**Решение.**

1. Затухание уровня сигнала по мощности для участков линии  $\ell = \ell_1 = \ell_2$  определяется как

$$A_{\ell_m} = A_m/\ell = 0,15 \cdot 50 = 7,5 \text{ дБм.}$$

2. Уровень сигнала на входе усилителя, соответствующий для заданного случая уровням на концах обоих участков линии и в том числе на конце всей линии, с учетом (6.6) определится по формуле

$$p_{\text{вх.ус м0}} = p_{\text{вых м0}} = p_{\text{сиг min м0}} = p_{\text{вх м0}} - A_{\ell_m} = 4 - 7,5 = -3,5 \text{ дБм0.}$$

3. Необходимое усиление усилителя (6.7) определяем из условия, что длина обоих участков линии одинаковая:  $\ell_1 = \ell_2$ . В этом случае требуемый уровень на выходе усилителя должен быть такой же, как на входе линии, и требуемое усиление определится как  $S_m = A_{\ell_m} = 7,5 \text{ дБм.}$

4. Отношения сигнал/помеха на входе усилителя и на выходе всей линии (2-го участка с  $\ell_2$ ) из-за указанных выше условий равны и будут определяться с учетом того, что уровень сигнала в этих местах линейного трата минимален. Учитывая также, что в этом отношении используются абсолютные величины, можем рассчитать:

$$\rho = \frac{P_{\text{сиг}}}{P_{\text{пом}}} = \frac{P_0 \cdot 10^{0,1p_{\text{вх.ус м0}}}}{10000 \cdot 10^{-12}} = \frac{1 \cdot 10^{-0,1(-3,5)}}{1 \cdot 10^{-5}} = \frac{0,447 \text{ мВт}}{10^{-5} \text{ мВт}} = 44700.$$

5. Величина помехозащищенности определяется отношением сигнал/помеха, выраженным в дБ:

$$A_{\text{пз}} = \rho_{\text{дБ}} = 10 \lg(P_{\text{сиг}}/P_{\text{пом}}) = 10 \lg 44700 = 46,5 \text{ дБм.}$$

6. На основании полученных результатов строится диаграмма уровней, вид которой показан на рис. 6,б.

[В приложении 13 представлена методика и примеры определения коэффициента (фактора) шума.]

### Диаграммы уровней сигналов в радиосистемах

В радиосистемах для оценки прохождения радиосигналов от радиопередатчика до радиоприемного устройства так же, как и в системах электросвязи, используются диаграммы уровней сигнала. При этом особый интерес представляет уровень радиосигналов  $p_{\text{вх.р.пр}}$  на входе радиоприемника, который сопоставляется с минимально допустимым (пороговым) уровнем (чувствительностью) приемника  $p_{\text{вх.р.пр min доп}}$ . Поскольку пороговый уровень определяется требованиями помехоустойчивости для заданной вероятности ошибки приема, то должно выполняться условие

$$p_{\text{вх.р.пр}} \geq p_{\text{вх.р.пр min доп}}.$$

Как правило, эти уровни оцениваются в абсолютных уровнях по мощности [для опорной величины мощности  $P_{\text{оп}} = P_0 = 1$  мВт (см. (5.1)] и для сигнала на входе радиоприемника можно ввести обозначение:  $p_{\text{вх.рпр м0}}$ . Обычно диаграмма уровней по трассе распространения радиоволн имеет вид «спадающей» линии от уровня радиоизлучения передатчика  $p_{\text{вых.рпер м0}}$ , до уровня  $p_{\text{вх.рпр м0}}$  (если на этой трассе не используются радиоретрансляторы).

В качестве примера можно привести типовые значения диаграммы уровней для сотовой радиотелефонной связи на трассе базовая станция (БС) — абонентская станция (АС — сотовый телефон). Исходной величиной сигнала можно считать излучаемую мощность  $P_{\text{вых.рпер}}$  радиопередатчика БС. Например,  $P_{\text{вых.рпер}} = 50 \text{ Вт} = 50 \cdot 10^3 \text{ мВт}$ , что соответствует абсолютному уровню мощности

$$p_{\text{вых.рпер.м0}} = 10 \lg(50 \cdot 10^3/1) = 47 \text{ дБм0}.$$

При построении диаграммы уровней сигналов определяющими являются характеристики распространения радиоволн. Рассмотрим особенности этих характеристик для наиболее популярных (в том числе в подвижной наземной связи) радиоволн диапазонов очень высоких частот (ОВЧ) и ультравысоких частот

(УВЧ). В соответствии с разработанными моделями распространения этих волн (например, модели Окамуры или Окамуры-Хата) затухание (ослабление) уровня электромагнитного поля  $A_{\text{рп}}$  в зависимости от расстояния  $R_{\text{рп}}$  до радиопередатчика оценивается в логарифмическом виде с коэффициентами («показателями экспоненты потерь»)  $n$ , зависящими от условий распространения радиоволн (открытая местность, пригород, город и т. д.). В общем виде [12] это можно представить выражением

$$A_{\text{рп}} = n \cdot 10 \lg R_{\text{рп}} + K_{\text{сдв}}, \text{ дБм}, \quad (6.9)$$

где  $K_{\text{сдв}}$  — «параметр сдвига», зависящий от радиочастоты, высот подвеса передающей и приемной антенн.

Из этого выражения следует, что при использовании оценки в децибелах значение коэффициента  $n$  перед логарифмом может отличаться от ранее упомянутых значений 1 и 2.

Знание величины затухания уровня электромагнитного поля  $A_{\text{рп}}$  и уровня радиоизлучения передатчика  $p_{\text{вых.рперм0}}$  позволяют определить изменение уровня радиосигнала в сотовой связи в зависимости от расстояния  $R_{\text{рп}}$  между БС и АС в виде

$$p_{\text{вх.рпрм0}} = p_{\text{вых.рперм0}} - A_{\text{рп}} = p_{\text{вых.рперм0}} - n \cdot 10 \lg R_{\text{рп}} + K_{\text{сдв}}, \text{ дБм}. \quad (6.10)$$

Из этого выражения следует, что уровень сигнала линейно определяется величиной  $n \cdot 10 \lg R_{\text{рп}}$ , что позволяет при использовании такой величины представить диаграмму уровней в виде линейной зависимости.

Реальные значения параметров техники сотовой связи стандарта GSM [4] показывают, что при уровне шума  $p_{\text{вх.рпрм0}} = -113$  дБм на входе приемного устройства АС допустимые уровни радиосигналов, необходимые для удовлетворительной работы сотовой связи, могут меняться в значительных пределах: примерно от  $-35$  дБм до  $-111$  дБм. На рис. 7 в условном виде показаны зависимости уровней сигналов (диаграмма уровней) для различного качества работы связи от величины, характеризующей расстояние ВС-АС в виде  $n \cdot 10 \lg R_{\text{рп}}$ .

На этом рисунке приводятся два вида зависимости уровней радиосигнала: 1 — более интенсивно спадающий от расстояния ВС-АС и 2 — менее спадающий (с меньшим наклоном) от этого

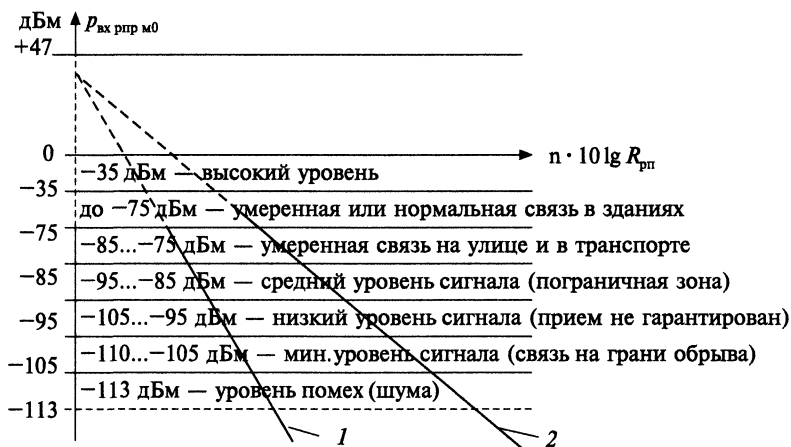


Рис. 7. Зависимости уровней радиосигналов (диаграммы уровней) от расстояния до базовой станции (радиопередатчика)

расстояния. Такое расхождение иллюстрирует изменение уровня сигнала при различных величинах затухания уровня сигнала  $A_{рп}$ , возникающих, например, из-за различных условий распространения радиоволн (условно: зависимость 1 — для городских условий распространения радиоволн с большим затуханием, зависимость 2 — для пригородных зон действия системы).

Необходимо уточнить, что представленные графики затухания уровня радиосигналов, как упоминалось выше, показывают весьма ориентировочные, но наглядные изменения уровня радиосигналов, касающиеся скорее их среднего (медианного) уровня. Реальные уровни радиосигналов могут отличаться от средних значений вследствие их пространственно-временных флуктуаций, которые характеризуются законами распределения этих случайных изменений с соответствующими им дисперсиями, учитываемыми при оценке надежности связи в зоне действия радиосистемы [13].

Следует заметить, обращаясь к истории отечественной радиотехники, в нашей стране могли применяться измерения уровня радиосигналов относительно величины напряженности электрической составляющей электромагнитного поля, например относительно опорного значения  $E_{оп} = 1$  мкВ/м. Уровень сигнала

$E_{\text{сиг}}$  в этом случае определялся в виде

$$p_{\text{сиг}} = p_{\text{мкВ/м}} = 20 \lg(E_{\text{сиг}}/E_{\text{оп}}), \text{ дВмкВ/м.}$$

(В приложении 14 приводится ряд дополнительных примеров применения децибелов для оценки параметров систем подвижной наземной связи.)

## 7 Измерительный уровень

Измерительным уровнем называют [8, 9] абсолютный уровень в исследуемой точке канала (например, канала тональных частот) в условиях, когда к его входу подключен измерительный генератор гармонических сигналов. Его характеристики определяются специалистами связи, и теоретически они могут быть различными. На практике часто используют измерительный генератор со следующими параметрами: ЭДС  $E = 1,55$  В (действующее значение), внутреннее сопротивление  $R_r = 600$  Ом, частота измерения  $f_{изм} = 1020$  Гц. Такой генератор называют «нормальным». На рис. 8 приведена схема подключения такого генератора к линии с входным сопротивлением  $R_{вх} = 600$  Ом (т.е. согласованным с сопротивлением генератора  $R_r$ ).

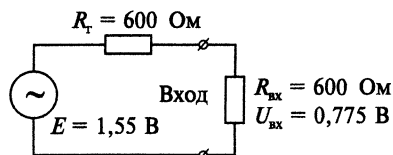


Рис. 8. Пример использования схемы для определения измерительного уровня

В этом случае напряжение на входе линии будет составлять

$$U_{вх} = \frac{E}{R_r + R_{вх}} R_{вх} = \frac{1,55}{600 + 600} \cdot 600 = 0,775 \text{ В.}$$

Видно, что это значение соответствует абсолютному значению стандартно принятой величины  $U_0$ , для которой абсолютный уровень напряжения будет *нулевым*:

$$p_{вхн} = 20 \lg(0,775/0,775) = 0 \text{ дБн0.}$$

Мощность на входе линии

$$P_{вх} = U_{вх}^2 / R_{вх} = (0,775)^2 / 600 = 1 \text{ мВт,}$$

что соответствует нулевому абсолютному уровню мощности

$$p_{\text{вх м}} = 10 \lg(P_{\text{вх}}/P_0) = 10 \lg(1/1) = 0 \text{ дБм0.}$$

Отсюда следует, что измерительный уровень численно соответствует относительному в любой точке канала, если к его входу подключен «нормальный» генератор. Или, проще говоря, полученные измерения в заданных точках канала для сигналов «нормального» генератора, подключенного ко входу канала с «нулевыми» уровнями входных сигналов, позволяют определить их *абсолютные уровни*. По этим уровням можно рассчитать *относительные уровни* для практически используемых величин сигналов, отличных от величины сигналов «нормального» генератора.

### Об измерителях уровней

Ориентируясь на специфику систем связи, можно отметить, что приборы для измерения уровней передачи сигналов называются [8] *указателями уровней* и представляют собой обычные вольтметры, измерительная шкала и регуляторы которых отградуированы в уровнях по мощности или напряжению. Чтобы не произошла ошибка, на указателях уровней указывают напряжение, которому соответствует нулевая отметка шкалы, или сопротивление  $R$ , на котором выделяется мощность, соответствующая 1 мВт. Распространение получили широкополосные и избирательные указатели уровней, отградуированные для  $R = R_0 = 600 \text{ Ом}$  и  $U_{\text{оп}} = U_0 = 0,775 \text{ В}$ ,  $R = 150 \text{ Ом}$  и  $U_{\text{оп}} = 0,387 \text{ В}$ ,  $R = 75 \text{ Ом}$  и  $U_{\text{оп}} = 0,274 \text{ В}$ . При такой градуировке значения уровней напряжения совпадают со значениями абсолютных уровней мощности.

Дополнительно можно заметить, что градуировка, как упоминалось выше в разделе 5, может быть в виде двух шкал, соответствующих двум значениям сопротивлений исследуемой цепи.

## 8 Примеры применения децибелов

---

Выше были рассмотрены принципы оценки *абсолютных* уровней относительно абсолютных «общепринятых» значений  $P_0$ ,  $U_0$  и  $I_0$  [см. (5.1), (5.3) и (5.4)]. Эти принципы могут быть распространены также для оценки уровней относительно других величин (т. е. для оценки *неабсолютных уровней*). В частности, для определения относительных уровней в децибелах в качестве опорных значений могут использоваться напряжения, токи и мощности не только для активной, но и для комплексной нагрузок (1.4), а также мгновенные значения этих величин (1.2).

В технике электрической и радиосвязи использование децибелов относительно величин, не соответствующих «общепринятым», находит широкое применение. Рассмотрим часто встречающиеся примеры такого использования децибелов.

### Оценка частотных искажений амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) устройств и в том числе линий связи

АЧХ — это зависимость модуля комплексного коэффициента передачи от частоты, т. е. коэффициента передачи  $K(f)$  устройства (линии), зависящего от частот спектра  $f$  сигнала, проходящего через это устройство и определяемого как  $K(f) = U_{\text{вых}}(f)/U_{\text{вх}}(f)$ . Поскольку этот коэффициент характеризует передачу по напряжению, то для уточнения можно ввести его индексацию в виде  $K(f) = K_n(f)$ .

Типовой вид такой АЧХ представлен на рис. 9,а.

Идеальная АЧХ представляется прямой линией на отрезке заданного интервала частот сигнала от нижней частоты  $f_n$  до верхней частоты  $f_v$  с коэффициентами передачи равными коэффициенту передачи для средней частоты  $f_{\text{ср}}$ , т. е.  $K_n(f_n) = K_n(f_v) = K_n(f_{\text{ср}})$ .



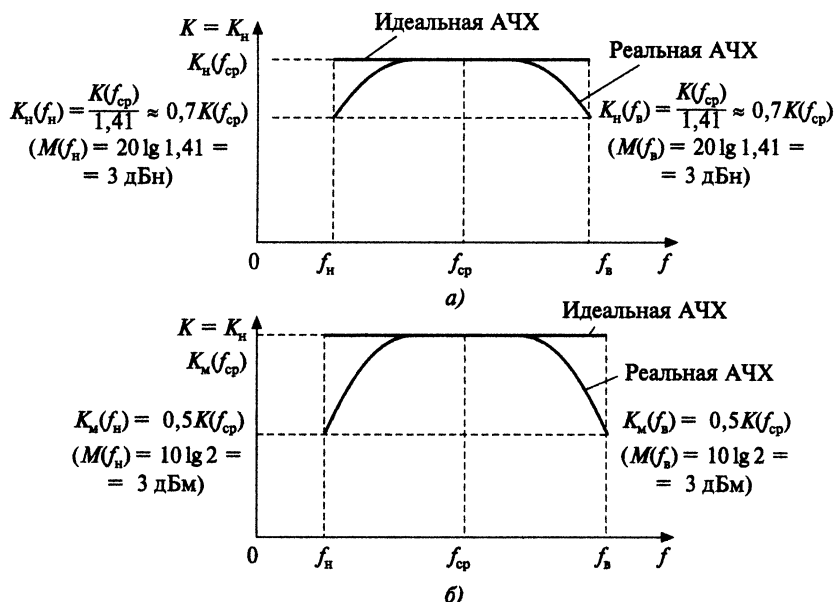


Рис. 9. Примеры амплитудно-частотных характеристик (АЧХ):  
 а — для коэффициентов передачи по напряжению; б — для коэффициентов передачи по мощности

Реальная характеристика имеет, как правило (для рассматриваемого примера), «завалы» в областях нижней и верхней частот (см. рис. 9, а). Такие отклонения АЧХ от идеальной характеризуются частотными искажениями  $M(f)$ , которые обычно определяются для  $f_n$  и  $f_b$  путем соотношения коэффициентов передачи на этих частотах с коэффициентом передачи на средних частотах ( $f_{cp}$ ) в виде:

- для нижних частот  $M(f_n) = 20 \lg[K_n(f_{cp})/K_n(f_n)]$ , дБ или, точнее, дБн;
- для верхних частот  $M(f_b) = 20 \lg[K_n(f_{cp})/K_n(f_b)]$ , дБ или дБн.

Учитывая, что эта оценка производится для коэффициентов передачи по напряжению, здесь приводится вариант уточненной индексации децибелов — дБн.

Из этих соотношений видно, что такая оценка (в виде децибелов) является *относительной* с сопоставлением коэффициентов  $K(f_n)$  и  $K(f_b)$  с величиной  $K(f_{cp})$ .

Для значений, указанных в примере на рис. 9,а, можно под-  
считать:

$$M(f_n) = 20 \lg \left[ \frac{K_n(f_{cp})}{K_n(f_{cp}) \cdot 0,7} \right] = M(f_v) = 20 \lg \left[ \frac{K_n(f_{cp})}{K_n(f_{cp}) \cdot 0,7} \right] = \\ = 20 \lg 1,41 \approx 3 \text{ дБн.}$$

Практически полезно сравнить рассмотренную характеристику с подобной АЧХ для коэффициентов передачи по мощности  $K_m(f) = P_{\text{вых}}(f)/P_{\text{вх}}(f)$ , которая показана на рис. 9,б. При одинаковых значениях частотных искажений, выраженных в децибелах, но не для напряжения, а для мощности расчет их будет отличаться значениями отношений сравниваемых коэффициентов передачи:

$$M(f_n) = 10 \lg \left[ \frac{K_m(f_{cp})}{K_m(f_{cp}) \cdot 0,5} \right] = M(f_v) = 10 \lg \left[ \frac{K_m(f_{cp})}{K_m(f_{cp}) \cdot 0,5} \right] = \\ = 10 \lg 2 \approx 3 \text{ дБм.}$$

Представленные принципы оценки АЧХ можно рассматривать как относительные, на основе которых могут определяться полоса частот пропускания для заданной величины частотных искажений (в приведенных примерах — для  $M(f) = 3 \text{ дБн}$ ) и исследоваться различные частотно-избирательные цепи и, в том числе, фильтры.

(Амплитудно-частотные характеристики в логарифмическом масштабе с использованием децибелов рассматриваются в приложении 12.)

### **Оценка частотной фильтрации сигналов в относительных величинах, выраженных в децибелах**

Использование оценки частотной фильтрации сигналов рассмотрим на типовом примере избирательности частотно разнесенных каналов связи.

На рис. 10 показаны частотные полосы каналов связи  $\Delta f_{k1}$ ,  $\Delta f_{k2}$ ,  $\Delta f_{k3}$  с условно средними (несущими) частотами  $f_0$  и АЧХ фильтра селекции (полосового фильтра — ПФ), настроенного на несущую частоту  $f_{02}$  выделяемого (отфильтровываемого) канала и соседние каналы со средними частотами  $f_{01}$  и  $f_{03}$ .

Ослабление соседних каналов (избирательность по соседним

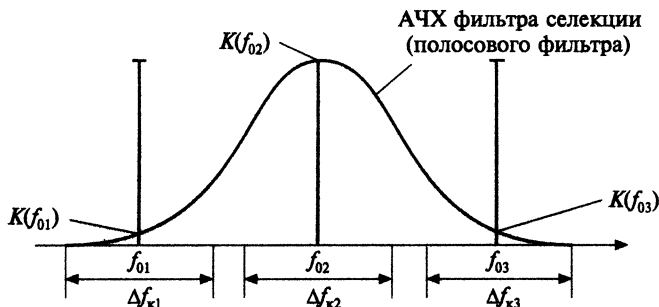


Рис. 10. Частотная фильтрация сигналов частотно разнесенных каналов

каналам)  $A_{изб}$  оценивается отношением коэффициента передачи по напряжению ПФ на частоте настройки (резонансной частоте)  $K(f_{02}) = U_{вых}(f_{02})/U_{вх}(f_{02})$  к коэффициентам передачи ПФ на средних частотах соседних (слева и справа) каналов ( $K(f_{01}) = U_{вых}(f_{01})/U_{вх}(f_{01})$  и  $K(f_{03}) = U_{вых}(f_{03})/U_{вх}(f_{03})$ ), выраженных в децибелах:

- для канала «слева»  $A_{изб1} = 20 \lg[K(f_{02})/K(f_{01})]$ , дБн;
- для канала «справа»  $A_{изб3} = 20 \lg[K(f_{02})/K(f_{03})]$ , дБн.

### Децибелы для учета допусков остаточного затухания канала при возможных изменениях его АЧХ

В процессе эксплуатации *остаточное затухание канала передачи* (4.7) (например, телефонного канала) из-за различных дестабилизирующих факторов может изменяться. Эти изменения должны укладываться в допустимые нормы, при которых работа канала будет соответствовать заданным требованиям качества. Поэтому остаточное затухание канала (ОЗК) увязывается с его полосой пропускания [8].

Полоса частот канала, в пределах которой ОЗК отличается от номинального не более чем на некоторую величину  $\Delta A_k$ , называется *эффективно передаваемой полосой частот*. В пределах этой полосы частот нормируются *допустимые отклонения остаточного затухания*  $\Delta A_k$  от номинального значения для определенной частоты  $f_0$ . Наиболее распространенным способом представления такого нормирования является использования *шаблонов* допустимых отклонений ОЗК. Пример вида такого шаблона [8] представлен на рис. 11.

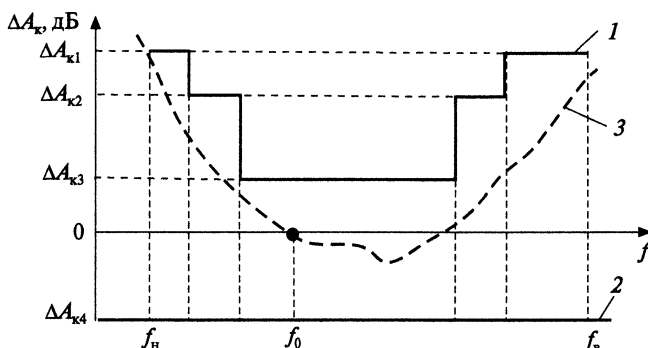


Рис. 11. Учет допусков остаточного затухания канала при возможных изменениях его АЧХ

На этом рисунке приняты следующие обозначения:  $f_0$  — частота, на которой определяется номинальное значение ОЗК;  $f_n$  и  $f_v$  — нижняя и верхняя граничные частоты эффективно передаваемой полосы частот;  $\Delta A_{k1}$ ,  $\Delta A_{k2}$ ,  $\Delta A_{k3}$ ,  $\Delta A_{k4}$  — уровни допустимых отклонений ОЗК для определенных диапазонов частот; 1, 2 — границы («сверху» и «снизу») допустимых отклонений ОЗК; 3 — вид измеренной частотной характеристики ОЗК.

Отклонения ОЗК от номинального определяются по соотношению

$$\Delta A_k = A_k(f) - A_k(f_0), \text{ дБ}, \quad (8.1)$$

где  $f$  — текущая частота и  $f_0$  — частота определения номинального значения ОЗК.

В табл. 4 качестве примера приводятся наиболее характерные допустимые значения отклонения ОЗК для канала тональной частоты.

Таблица 4  
Допустимые значения отклонения ОЗК для канала тональной частоты

$f$ , кГц	0,3	0,4	0,6	$f_0 = 1,02$	2,4	3,0	3,4
$\Delta A_k$ , дБ «сверху»	+8,7	+4,3	+2,2	+2,2	+2,2	+4,3	+8,7
$\Delta A_k$ , дБ «снизу»	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2

**Замечание.** С целью уточнения  $\Delta A_k$  и его значений целесообразно приводить индексацию обозначений и децибелов соответствия их мощности или напряжению.

### Оценка с помощью децибелов динамического диапазона и нелинейных искажений сигналов в канале передачи

Величина сигнала в канале передачи ограничивается допустимыми максимальными и минимальными уровнями сигнала  $p_{\text{мах доп}}$  и  $p_{\text{мин доп}}$  (или величинами напряжения сигнала  $U_{\text{мах доп}}$  и  $U_{\text{мин доп}}$ ). При превышении максимально допустимой величины сигналы подвергаются *нелинейным искажениям* (см. ниже) недопустимого значения. При сигналах меньше допустимой минимальной величины, например соизмеримой с величиной шумов самого канала  $p_{\text{ш}}$  или  $U_{\text{ш}}$ , может нарушиться требование к заданному соотношению *сигнал/помеха (шум)*.

Величины  $U_{\text{мах доп}}$  и  $U_{\text{мин доп}}$  или  $p_{\text{мах доп}}$  и  $p_{\text{мин доп}}$  определяются по *амплитудной характеристике канала*, а именно по зависимости  $U_{\text{вых}} = F_{\text{н}}(U_{\text{вх}})$  (рис. 12,а) или по зависимости для уровней  $p_{\text{вых}} = F_{\text{р}}(p_{\text{вх}})$  (рис. 12,б).

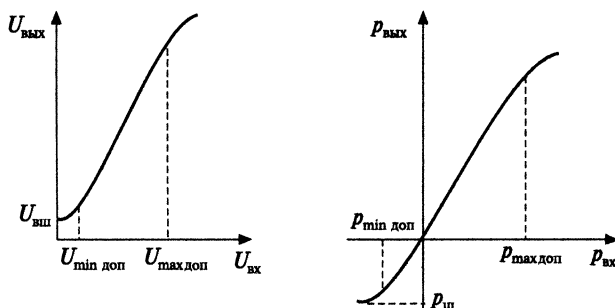


Рис. 12. Амплитудные характеристики

Согласно (4.9) динамический диапазон для канала передачи будет определяться по напряжению:

$$D_{\text{к}} = 20 \lg(U_{\text{мах доп}}/U_{\text{мин доп}}) = p_{\text{мах доп н}} - p_{\text{мин доп н}}, \text{ дБн},$$

или по мощности сигнала:

$$D_{\text{к}} = 10 \lg(P_{\text{мах доп}}/P_{\text{мин доп}}) = p_{\text{мах доп м}} - p_{\text{мин доп м}}, \text{ дБм};$$

В качестве примера можно привести следующие значения: для телефонного канала  $D_{\text{к}} \approx 31$  дБн; для звукового вещания  $D_{\text{к}} \geq 40$  дБн; для высококачественной передачи сигналов (напри-

мер, для высокого класса усилителей передачи звуковых сигналов)  $D_k \geq 60$  дБн.

(Замечание: при оценках динамического диапазона отдельных устройств в системах связи вместо обозначения  $D$  может использоваться обозначение  $H$ .)

Другим не менее важным параметром передачи сигналов являются *нелинейные искажения* сигналов, которые характеризуют искажения формы сигнала на выходе канала по сравнению с формой сигнала на входе канала (устройства) передачи. Эти искажения обусловлены нелинейной зависимостью передаточных характеристик устройств (и в том числе усилительных устройств), образующих канал связи. Как отмечалось выше, при определении динамического диапазона они особенно проявляются при уровнях сигнала  $p > p_{\text{max доп}}$ .

Оценка величины нелинейных искажений осуществляется при подаче на вход канала (устройства) гармонического сигнала  $U_1$  с частотой  $f_1$  из эффективно передаваемой полосы частот (обычно на средней частоте этой полосы). В результате возникающих нелинейных искажений при прохождении сигнала через канал на выходе появляются гармоники с частотами  $2f_1, 3f_1, \dots, nf_1$ . Суммируя энергетику этих гармоник в сопоставлении с величиной основной гармоникой  $f_1$  сигнала на выходе, определяются нелинейные искажения в виде *коэффициента гармоник*:

$$K_{\Gamma} = K_{\text{ни}} = \frac{\sqrt{U_{2\Gamma}^2 + U_{3\Gamma}^2 + \dots + U_{n\Gamma}^2}}{U_{1\Gamma}}, \quad (8.2)$$

где  $K_{\text{ни}}$  — коэффициент нелинейных искажений — обозначение, которое может использоваться вместо  $K_{\Gamma}$ ;  $U_{1\Gamma}$  — действующее значение напряжения первой (основной) гармоники с частотой  $f_1$  измерительного сигнала;  $U_{2\Gamma}, U_{3\Gamma}, \dots, U_{n\Gamma}$  — действующие значения напряжения второй, третьей и  $n$ -й гармоник сигнала.

Обычно эта величина оценивается в процентах. Например, для телефонного канала тональной частоты при измерениях на частоте  $f_1 = 1020$  Гц коэффициент гармоник должен быть  $K_{\text{ни}} \leq 1,5$  %.

Однако в технике телекоммуникационных систем находит также применение понятие *затухание нелинейности*

$$A_n = 20 \lg(1/K_{\text{ни}}), \text{ дБн.} \quad (8.3)$$

Для значения, указанного применительно к телефонному каналу, можно определить

$$A_n \geq 20 \lg(1/0,015) \approx 36,5 \text{ дБн.}$$

Существует также практика, особенно в технике многоканальных систем, оценки *затухания нелинейности по гармоникам*

$$A_{нг} = 20 \lg(U_{1г}/U_{нг}) = p_{1г} - p_{нг}, \text{ дБн,} \quad (8.4)$$

где  $n = 2, 3, \dots$ ;  $p_{1г}$  — абсолютный уровень первой гармоники;  $p_{нг}$  — абсолютный уровень  $n$ -й гармоники измеряемого сигнала.

(Дополнительные сведения к параметрам канала тональной частоты и типовых сетевых трактов, а также кабельных линий, где используется единица децибел, приводятся в приложениях 10 и 11.)

### Использование децибелов при оценке и распределении характеристик каскадов в многокаскадных устройствах (системах)

Если устройство является многокаскадным, например вида, представленного на рис. 2, то использование логарифмических единиц измерения характеристик устройства позволяет удобным образом производить их покаскадное распределение. Например, если разрабатывается многокаскадный усилитель, то при заданных входных и выходных параметрах усилителя (входной и выходной мощностях сигнала  $P_{вх}$  и  $P_{вых}$ , искажения АЧХ  $M(f_n)$  и  $M(f_v)$ ), подсчитав требуемое усиление  $S_m = 10 \lg(P_{вых}/P_{вх})$ , дБм, можно оценить число каскадов и распределить по каскадам значения искажения АЧХ. Причем это делается путем вычитания или сложения их значений, выраженных в децибелах.

Другой пример [14] — определение уровней сигнала в радиоприемном тракте. Представим систему, состоящую из приемной антенны, сигнал с которой уровнем  $p_{сиг.а} = -4,5 \text{ дБм0}$  (абсолютный уровень, т. е. относительно 1 мВт) подается на малошумящий усилитель с усилением  $S_{1уc} = 40 \text{ дБ}$ , затем через кабель длиной 300 м с потерями  $A_{каб} = 48 \text{ дБ}$  сигнал подается на второй усилитель с усилением  $S_{уc2} = 20 \text{ дБ}$ . За усилителем подключается полосовой фильтр с потерями  $A_{пф} = 2,8 \text{ дБ}$ , после которого следует аттенуатор, ослабляющий сигнал на  $A_{атт} = 10 \text{ дБ}$ .

Для таких параметров уровень сигнала на выходе такой системы определится как

$$\begin{aligned} p_{\text{сиг.вых}} &= p_{\text{сиг.а}} + S_{\text{ус1}} - A_{\text{каб}} + S_{\text{ус2}} - A_{\text{пф}} - A_{\text{атт}} = \\ &= -4,5 + 40 - 48 + 20 - 2,8 - 10 = -5,3 \text{ дБм0}. \end{aligned}$$

**Уровни, выраженные в децибелах относительно величин, не соответствующих общепринятым значениям нулевого уровня**

Если оцениваются уровни относительно абсолютных величин, не соответствующих принятым величинам для нулевого уровня ( $P_{\text{оп}} \neq P_0 = 1 \text{ мВт}$ ,  $U_{\text{оп}} \neq U_0 = 0,775 \text{ В}$ ,  $I_{\text{оп}} \neq I_0 = 1,29 \text{ мА}$ ), то к децибелам добавляется индекс этой абсолютной величины. Например, если в качестве сравниваемой (опорной) величины принято значение  $U_{\text{оп}} = 1 \text{ мкВ}$ , то

$$p_n = 20 \lg(U_i/U_{\text{оп}}) = 20 \lg(U_i/1 \text{ мкВ}), \text{ дБмкВ},$$

и, если  $P_{\text{оп}} = 1 \text{ Вт}$ , то

$$p_m = 10 \lg(P_i/P_{\text{оп}}) = 10 \lg(P_i/1 \text{ Вт}), \text{ дБВт}.$$

Аналогично определяются и обозначаются децибелы для других величин: дБВ; дБмкВт; дБмкА и т. п.) Подобным образом могут использоваться децибелы и их обозначения не только для мощностей, напряжений и токов, а также и других абсолютных величин. Например, как упоминалось выше в разделе 6, такой вариант обозначений использовался для децибелов относительно напряженности электрической составляющей электромагнитного поля  $1 \text{ мкВ/м}$  в виде дБмкВ/м.

### **Применение децибелов в вероятностных и статистических оценках**

Часто при исследовании случайных процессов требуется на основании статистических результатов определить вероятностные характеристики распределения значений этих результатов. Одной из основных таких характеристик является закон распределения вероятностей для значений  $x$  случайной величины [15]. Причем одним из видов представления этого закона является плотность распределения вероятностей  $w(x)$ .

Наиболее часто на практике встречается нормальный закон распределения. Плотность распределения вероятностей значе-



ний  $x$  непрерывной случайной величины для того закона представляется в следующем виде:

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[ -\frac{(x-M)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (8.5)$$

где  $M$  — математическое ожидание (среднее ожидаемое значение) случайной величины;  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение.

График плотности распределения («гауссовской» кривой) для параметров  $M = 0$  и  $\sigma = 2$  построен на рис. 13.

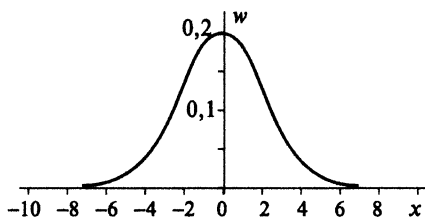


Рис. 13. График плотности распределения вероятностей нормального закона

Напомним, что значения вероятности определяются *интегральной функцией распределения*  $F_\xi(x)$ , выражающей для каждого  $x$  вероятность  $P$  того, что случайная величина  $\xi$  примет значение, меньшее  $x$ :

$$F_\xi(x) = P(\xi < x) = P(-\infty < \xi < x).$$

Интегральное представление функции распределения нормально распределенной случайной величины  $\xi$  выглядит следующим образом:

$$F_\xi(x) = \int_{-\infty}^x w(\lambda) d\lambda = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp \left[ -\frac{(\lambda - M)^2}{2\sigma^2} \right] d\lambda, \quad (8.6)$$

где  $x$  представляется здесь как аргумент, который может принимать все действительные значения нормально распределенной случайной величины.

Часто в результате обработки статистических исследований получается закон распределения, отличный от «нормального», и плотность распределения вероятностей может иметь, например, вид, показанный на рис. 14,а.

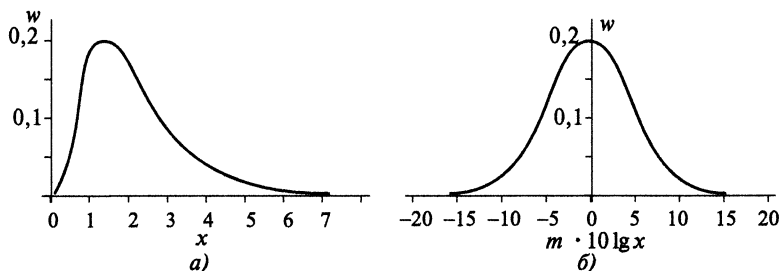


Рис. 14. Получение плотности распределения с нормальным законом распределения за счет логарифмирования значений  $x$

Для преобразования такого вида к «нормальному» значения  $x$  можно представить в логарифмическом виде, например как  $m \cdot 10 \lg x$ , где  $m$  может принимать различные значения 0,1; 0,5; 1; 2 и т.д., которые наилучшим образом позволяют «нормализовать» плотность распределения (т.е. наибольшим образом приблизиться к гауссовской кривой, см. рис. 14,б). Например, при оценке флуктуаций уровня радиосигналов подвижной связи, производимой относительно напряженности  $E$ , измеряемой в мкВ/м, вместо этих единиц используются значения  $E_{\text{дБ}} = 20 \lg x$ , дБмкВ/м, для которых распределение может подчиняться «нормальному закону». В этом случае плотность распределения вероятностей для значений уровня сигнала, выраженного в дБ, будет описываться нормальным законом

$$w(E_{\text{дБ}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{дБ}}} \exp \left[ -\frac{(E_{\text{дБ}} - M_{E_{\text{дБ}}})^2}{2\sigma_{\text{дБ}}^2} \right], \quad (8.7)$$

где  $M_{E_{\text{дБ}}}$  и  $\sigma_{\text{дБ}}$  — соответственно математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение сигнала, выраженные в дБ, и вероятность будет характеризоваться для уровней сигнала в дБ (на рис. 14,б на оси абсцисс должны указываться значения  $E_{\text{дБ}}$ ).

По этой плотности на основании (8.6) определяется интегральная функция распределения. Заметим, что для величины  $x$  (см. рис. 14,а) закон распределения будет логарифмически-нормальным.

На практике приходится оценивать вероятность различий (отношений) абсолютных значений величин радиосигналов. Например, при оценке затуханий величины радиосигнала  $A_{\text{зат.рс}}$ , проникающего с улицы  $E_{\text{ул}}$  в различные помещения зданий  $E_{\text{зд}}$ ,

вероятность для значений отношения  $E_{ул}/E_{зд}$  хорошо согласуется с нормальным законом для  $A_{зат.рс дБ} = 20 \lg(E_{ул}/E_{зд})$ , дБмкВ/м [13], а распределение для  $E_{ул}/E_{зд}$  можно рассматривать как логарифмически-нормальное.

Если полученный после указанных преобразований нормальный закон для прологарифмированных значений случайной величины частично отличается от нормального, то после оценки через разного рода критерии «нормальности» указываются (строятся) доверительные интервалы. Внутри этих интервалов располагается кривая функции распределения. Доверительные интервалы строятся в тех же координатах, что и сама логарифмически-нормальная функция распределения.

### Децибелы для оценки уровня звука

В современных условиях с насыщенной величиной окружающих нас звуков часто используется термин «децибелы уровня звука». Причем суть этого термина не всегда истолковывается соответствующим образом (или совсем не истолковывается). Для разъяснения этой сути рассмотрим оценку уровня звука с позиций относительных уровней.

Приведем основные определения и характеристики звука [16, 17].

Понятие звука можно рассматривать в двух смыслах: в широком смысле — это упругие колебания и волны, распространяющиеся в газообразных, жидких и твердых веществах; в узком смысле — как явление, субъективно воспринимаемое органами слуха человека и животных.

*Громкостью звука* называют интенсивность (силу) слуховых ощущений.

*Громкость звука* определяется *интенсивностью звука*  $J$ ;  $J$  — *плотность потока энергии*, переносимой звуковой волной и зависящей от *величины изменения звукового давления*  $\Delta P_{зв}$ ;  $\Delta P_{зв}$  характеризует изменения давления в среде, которые возникают при прохождении звуковой волны. То есть оно представляет избыточное давление в среде по отношению к постоянному давлению, существующему там до появления звуковых волн. Единицей измерения звукового давления является паскаль (Па).

(Заметим, что  $J$  — это энергетическая величина, а  $\Delta P_{зв}$  — это силовая величина, которая отличается от обозначения мощности

электрических сигналов —  $P$ , где она является энергетической величиной.)

Между  $J$  и  $\Delta P_{зв}$  существует связь

$$J = \Delta P_{зв}^2 / k_{зв}, \quad (8.8)$$

где  $k_{зв}$  — коэффициент, определяемый плотностью среды и скоростью звука в ней.

Минимальные значения звукового давления  $\Delta P_{зв0} = 3 \times 10^{-5}$  Па ( $\approx 2 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст.) и интенсивности звука  $J_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>, при которых у человека (для уха среднего человека) на частоте 1 кГц возникают слуховые ощущения, называются *порогом слышимости*. (По общепринятой договоренности частота 1 кГц и величины  $\Delta P_{зв0}$  и  $J_0$  приняты за *опорные*.)

Значения  $\Delta P_{зв0}$  и  $J_0$  используются для относительной (уровневой) оценки (нормирования) других возможных значений  $\Delta P_{зв}$  и  $J$ .

*Уровень интенсивности в децибелах* относительно  $\Delta P_{зв0}$  и  $J_0$  будет определяться так:

$$\begin{aligned} p_{зв} &= 10 \lg(J/J_0) = 10 \lg \left( \frac{\Delta P_{зв}^2 / k_{зв}}{\Delta P_{зв0}^2 / k_{зв}} \right) = 10 \lg \left( \frac{\Delta P_{зв}^2}{\Delta P_{зв0}^2} \right) = \\ &= 20 \lg(\Delta P_{зв} / \Delta P_{зв0}), \text{ дБ или дБ0,} \end{aligned}$$

или в итоговом виде

$$p_{зв} = 10 \lg(J/J_0) = 20 \lg(\Delta P_{зв} / \Delta P_{зв0}), \text{ дБ.} \quad (8.9)$$

Отсюда следует, что *нулевой уровень* соответствует  $p_{зв0} = 10 \lg(J_0/J_0) = 20 \lg(\Delta P_{зв0} / \Delta P_{зв0}) = 0$  дБ или дБ0.

В качестве иллюстрации приведем пример расчета уровня для интенсивности  $J = 10^{-7}$  Вт/м<sup>2</sup>:

$$p_{зв} = 10 \lg(J/J_0) = 10 \lg(10^{-7}/10^{-12}) = 10 \lg 10^5 = 50 \text{ дБ или дБ0.}$$

Примеры звуков, их интенсивность и уровень интенсивности приводятся [16, 17] в табл. 5. В этой таблице следует отметить важные для человека значения, соответствующие «порогу болевого ощущения» при интенсивности звука  $J = J_{\text{пор.б}} = 10$  Вт/м<sup>2</sup>, соответствующей уровню  $p_{зв.\text{пор.б.}} = 130$  дБ и звуковому давлению  $\Delta P_{зв.\text{пор.б.}} = 100$  Па ( $\approx 1$  мм рт.ст.).

Сопоставление интенсивностей, соответствующих порогам

Таблица 5

## Интенсивность и уровень интенсивности звуков

Действующий звук	Интенсивность звука $J$ , Вт/м <sup>2</sup>	Уровень интенсивности $p_{эв}$ , дБ
Порог слышимости	$10^{-12}$	0
Шепот	$10^{-9}$	30
Негромкая музыка	$10^{-8}$	40
Разговорная речь на расстоянии 1 м	$10^{-7}$	50
Шумная улица	$10^{-5}$	70
Шум мотора грузового автомобиля	$10^{-5}$	70
Крик	$10^{-4}$	80
Шум в поезде, метро	$10^{-3}$	90
Пневматический молот	$10^{-1}$	110
Реактивный двигатель, удар грома	$10^0 = 1$	120
Порог болевого ощущения	$10^1$	130

слышимости и болевого ощущения ( $J_0/J_0 = 1$  и  $J_{\text{пор.б.}}/J_0 = 10^{13}$ ), показывает весьма значительную разницу (на порядки) их значений, которая позволяет заключить, что использование на практике логарифмической шкалы для *уровня интенсивности звука можно считать вполне оправданной и целесообразной*. Подтверждением этому также является психофизический закон Вебера–Фехнера, о котором говорилось в разд. 2.

Приведенный выше логарифмический закон верен, разумеется, не только для звуков частоты 1000 Гц, которая, как упоминалось выше, принята за опорную, а также и для других частот со своими другими интенсивностями у порога слышимости. Так, например, при частоте около 100 Гц она равна  $10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>, то есть в  $10^4$  раз больше, чем  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> для частоты 1000 Гц. Это означает, что если громкость какого-то звука на частоте 1000 Гц оценивается, например, в 80 дБ, то на частоте 100 Гц равногромкий звук должен оцениваться лишь в 40 дБ. Детальную связь между частотой, громкостью и уровнем интенсивности обычно представляют графически с помощью *кривых равной громкости* (см. приложение 9.3 или [16, 18]). Эти кривые демонстрируют зависимость *уровня интенсивности* от частоты звука при заданной громкости звука. Кроме этого, при детальной оценке громкости звука необходимо также учитывать количество источников звуков (см. приложение 9.2).

При всех этих особенностях желательно, чтобы ощущение громкости характеризовалось однозначно и равногромкие (на

слух) звуки оценивались одним и тем же числом, независимо от тона звука. Можно ввести следующее определение: громкость оцениваемого звука равна уровню интенсивности звука (дБ) на частоте 1 кГц, вызывающего у «среднего» человека такое же ощущение громкости, что и оцениваемый звук. Для такой оценки вводится специальная единица уровня громкости — *фон* (международное обозначение — phon).

1 фон численно равен уровню звукового давления и интенсивности звука в 1 дБ, создаваемого синусоидальным тоном частотой 1 кГц такой же громкости, как и измеряемый звук. Принятие здесь величины 1 дБ можно обосновать следующим: во-первых, она соответствует единицам измерения уровней и, во-вторых [19], разность громкостей в 1 дБ — это наименьшая разность в громкости, которую может уловить человеческое ухо.

Очевидно, что для звуков частоты 1000 Гц шкалы децибелов и фонов совпадают. Для других частот это не так. Если какой-либо звук интенсивностью  $J_f$  вызывает на слух такое же ощущение, как звук частоты 1000 Гц, то громкость этого звука в фонах будет выражаться соотношением

$$p_{зв.f} = 10 \lg(J_f/J_0) \text{ дБ}_{\text{о пор.сл.1000 Гц}} = \text{фон}, \quad (8.10)$$

где  $J_0$  — это, как указывалось выше, интенсивность звука порога слышимости при частоте 1000 Гц.

Таким образом, уровень звука с частотой  $f$ , не равной 1000 Гц, определяется его интенсивностью, нормируемой к интенсивности порога слышимости при частоте 1000 Гц и выраженный в логарифмическом виде.

Например, для вышеуказанных значений звука с  $f = 100$  Гц и интенсивностью  $J_f = 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup> можем определить

$$p_{зв.f} = 10 \lg(J_f/J_0) = 10 \lg(10^{-8}/10^{-12}) = 40 \text{ фон}.$$

В табл. 6 приводится пример [20] зависимости уровня громкости от частоты при уровне интенсивности звука с частотой 1000 Гц, равным 60 фон.

Кроме интенсивности звука  $J$  и «фоновой» оценка громкости звука может даваться с помощью единиц «сон» (от лат. sonus — звук). Оценка сонами позволяет учесть взаимосвязь (возможное расхождение) интенсивности звука с психологической оцен-

Таблица 6

Допустимые значения отклонения ОЗК для канала тональной частоты

Частота, Гц	50	100	200	500	1 000	2 000	5 000	10 000
Громкость ( $p_{зв.f}$ ), фон	10	30	47	57	60	64	59	49

кой громкости звука, дополнительно учитывающей частотные и динамические свойства уха. 1 сон соответствует громкости чистого тона частотой 1000 Гц с уровнем 40 дБ.

(Дополнительные сведения по оценке параметров звука, звукового шума и их аналогий с электрическими параметрами приводятся в приложении 9.)

Резюмируя рассмотренную оценку характеристик звука, следует отметить, что такая оценка наглядно иллюстрирует многообразие использования децибелов и возможную их взаимосвязь с другими видами сравнения величин в логарифмическом виде.

### Представление двоичных чисел в децибелах

Современные телеинфокоммуникационные системы базируются на цифровых технологиях. При определении форматов цифровых (двоичных) сигналов в таких системах приходится оперировать с числами двоичного исчисления, определять их по десятичным числам и наоборот, а в ряде случаев и оценивать их значения с помощью относительных величин через децибелы.

Возможное применение таких действий можно рассмотреть на примере «основополагающего» принципа преобразования аналоговых сигналов в цифровые. Суть этого преобразования в том, что после дискретизации аналоговых сигналов по времени и по уровню величины получившихся их «отсчеты» заменяются номерами разрешенных (заданных) уровней, соответствующим этим отсчетам. Номера этих уровней представляются в двоичной форме счисления и отправляются для дальнейшей обработки или передачи в виде двоичных сигналов.

Использование двоичной формы исчисления для этих номеров во взаимосвязи с самими значениями (например, для напряжений  $U_i$ ) уровней позволяют привести к удобному виду расчета этих уровней с помощью децибелов. Для этого при заданном шаге квантования уровней (по напряжению  $\Delta U$ ) величина напряжения  $U_i$  для конкретного уровня с номером  $i$  будет определяться как  $U_i = \Delta U \cdot i$ . Или уровень этого напряжения относительно

шага квантования составит

$$p_i = 20 \lg(U_i/\Delta U) = 20 \lg(\Delta U \cdot i/\Delta U) = 20 \lg i.$$

Здесь  $i$  в десятичной форме счисления. Для определения соответствия этого номера с его видом в двоичной форме можно воспользоваться таблицей пересчета степеней числа 2 в децибелы, приводимой в приложении 8.



## 9 Обобщение вариантов обозначения уровней и их децибелов

---

Выше было показано, что при использовании децибелов в качестве единиц оценки различных физических величин, их уровней и разного рода параметров необходимо пояснять в сравнении с какими величинами (в частности, с энергетическими или силовыми) и их значениями производится такая оценка. Отсутствие таких пояснений может привести к неточностям подобных оценок (что можно иногда обнаружить в технической литературе).

Возникновение возможной неточности из-за некорректности указания (обозначения) величины децибелов можно рассмотреть на примере определения частотных искажений по АЧХ, представленных выше на рис. 9,а и б. Эти две характеристики соответствуют зависимости от частоты: одна для коэффициентов передачи по напряжению  $K_n$  и другая — по мощности  $K_m$ . Считая, что значения  $K_n$  и  $K_m$  в области средних частот одинаковые, сопоставим эти АЧХ, представив их в одной системе координат на рис. 15.

Видно, что при одинаковых значениях частотных искажений  $M(f_n)$  и  $M(f_v)$ , равных 3 дБ, для характеристик по напряжению и по мощности имеется различие, которое при переходе к разам составляет  $2/(1,41) = 1,42$  раза.

Поэтому для подобного рода оценок необходимы обязательные пояснения к оцениваемым величинам, например, как это сделано вначале перед представлением АЧХ для коэффициента передачи по напряжению.

Дополнительным, а в ряде случаев и достаточным, средством такого рода корректности использования децибелов можно считать применение индексации децибелов и соответственно оцениваемых ими уровней. В рассмотренном примере с АЧХ это указание значений децибелов по напряжению (дБн) или по

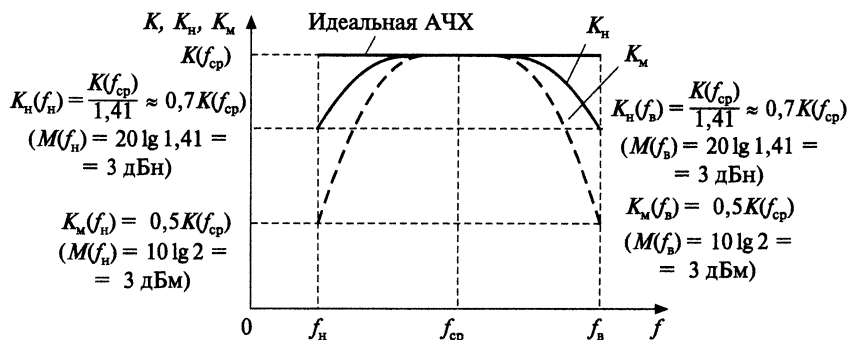


Рис. 15. Сравнение АЧХ для коэффициентов передачи по напряжению  $K_N$  и по мощности  $K_M$

мощности (дБм). На рис. 15 такая индексация сделана для величин частотных искажений  $M(f_n)$  и  $M(f_b)$  при оценках АЧХ для коэффициентов передачи по напряжению ( $M(f_n) = M(f_b) = 20 \lg 1,41 = 3$  дБн) и для коэффициентов передачи по мощности ( $M(f_n) = M(f_b) = 10 \lg 2 = 3$  дБм).

Подобные уточнения желательны и при оценке с помощью децибелов других величин и параметров. Величина подобного рода расхождений значений оцениваемых относительных величин (например,  $ОВ_1$  и  $ОВ_2$ ) при различном варианте определения их децибелов с одинаковым значением децибелов  $Y$ , например  $10 \lg ОВ_1 = 20 \lg ОВ_2 = Y$ , будет определяться из выражений  $ОВ_1 = 10^{Y/10} = 10^{0,1Y} \neq ОВ_2 = 10^{Y/20} = 10^{0,05Y}$ . Учитывая, что эти выражения имеют «степенной» характер, расхождения значений величин  $ОВ_1$  и  $ОВ_2$  могут составлять не только в разы, но в десятки и более раз. (Это наглядно иллюстрируется в приложение №3 номограммами перевода децибелов в разы.)

Для исключения таких расхождений, основываясь на приводимых выше описаниях децибелов, дадим общие рекомендации к возможным вариантам индексации децибелов и оцениваемых ими уровней.

Анализируя рассмотренные примеры применения децибелов, можно сделать заключение, что обозначения уровней и их децибелов могут быть трех вариантов:

- подробное обозначение с указанием единиц измерений, относительно которых определяется уровень, и мест (точек), где производится оценка сигнала;

- обозначение с указанием только единиц измерений, относительно которых определяется уровень;
- обозначение с указанием специально используемых единиц измерений, относительно которых определяется уровень.

Представим эти варианты обозначений в обобщенном систематизированном виде.

**Подробное обозначение уровня с указанием единиц измерений величин, относительно которых определяется уровень, и мест (точек) оценки сигнала**

В общем виде [21, 22] для сравниваемых величин  $F_i$  и  $F_{оп}$  можно записать

$$p_{xabc} = n \cdot 10 \lg(F_i/F_{оп}), \text{ дБ } dgy, \quad (9.1)$$

где  $p$  — обозначение уровня, измеряемого в децибелах;  $n$  — коэффициент, зависящий от особенностей оценки уровня (см. примеры в разделе 6) и единиц измерения сравниваемых уровней (например, для мощности  $n = 1$ , для напряжения и тока  $n = 2$ );  $x$  — индекс, который может использоваться для обозначения места (точки, узла), где оценивается уровень;  $a$  — индекс для обозначения относительности уровня к опорной величине (величине нормирования)  $F_{оп}$ , отличной от общепринятых для нулевого уровня величин, например для мощности  $P_{оп} \neq P_0 = 1 \text{ мВт}$  (вводится обозначение в виде буквы «о»). Если это абсолютный уровень (при  $P_{оп} = P_0$ ), то индекс «о» не используется;  $b$  — индекс обозначения оцениваемой величины — по мощности («м»), по напряжению («н») и по току («т»);  $c$  — индекс, который вводится в виде цифры «0» для абсолютного уровня (т.е. для общепринятых для нулевого уровня величин, например для мощности  $P_{оп} = P_0 = 1 \text{ мВт}$ ).

Индексы для обозначения децибелов:

$d$  — индекс, который может использоваться для обозначения места (точки, узла), где оценивается уровень (этот индекс тождественен индексу  $x$ );

$g$  — индекс обозначения оцениваемой величины — по мощности («м»), по напряжению («н») и по току («т») (этот индекс тождественен индексу  $b$ );

$y$  — индекс, который вводится в виде цифры «0» для абсолютного уровня, т. е. для стандартно принимаемых величин — для мощности  $P_{\text{оп}} = P_0 = 1$  мВт, для напряжения  $U_{\text{оп}} = U_0 = 0,775$  В и тока  $I_{\text{оп}} = I_0 = 1,29$  мА (этот индекс тождественен индексу  $c$ ).

*Пример обозначений для абсолютного уровня мощности в точке «X»:*  $p_{\text{хм0}}$  дВхм0.

*Пример обозначений для относительного уровня мощности в точке «X»:*  $p_{\text{хом}}$  дВхом.

**Обозначение с указанием только единиц измерений величин, относительно которых определяется уровень**

В этом случае исключается индекс « $x$ » и обозначения представляются в упрощенном виде:

- пример обозначений для *абсолютного* уровня мощности:  $p_{\text{м0}}$  дБм0;
- пример обозначений для *относительного* уровня мощности:  $p_{\text{ом}}$  дБом.

**Обозначение неабсолютных уровней с указанием единиц измерений величин, относительно которых определяются эти уровни в децибелах**

На основании примеров, рассмотренных в разделе 8 для уровней относительно абсолютных величин, отличных от общепринятых для нулевого уровня  $P_0$ ,  $U_0$  и  $I_0$ , форму записи в общем виде можно представить как  $p$  или  $p_z$  дБ $z$ , где  $z$  — индекс, обозначающий единицу измерения абсолютной величины, к которой нормируется оцениваемая величина.

Например, при величинах нормирования (опорных величинах) 1 Вт или 1 мкВ/м и соответствующих индексах  $z = \text{Вт}$  или  $z = \text{мкВ/м}$ .

Такой вид обозначений благодаря указанию в обозначении децибелов опорной величины, относительно которой определяется уровень, позволяет наглядно различить, какой конкретно из физических величин дается оценка.

**Замечание.** К приведенному выше описанию возможных видов обозначений уровней и децибелов следует дополнительно, как это отмечалось выше, указать, что во всех этих обозначениях

уровня вместо символа  $p$  может использоваться символ  $L$  (особенно это касается зарубежной литературы). При таком ином обозначении индексация уровней, указанная в (9.1), тождественно сохраняет свою правомерность:  $p_{\text{хавс}} \equiv L_{\text{хавс}}$ , как и индексация децибелов. При всем этом, конечно, необходимо учитывать также другие расхождения и аналогии отечественных и зарубежных (международных) обозначений, природа которых, в основном, объясняется различием в используемых языках представления рассмотренных выше величин.

### **Сопоставление рассмотренных обозначений с аналогами обозначений уровней и децибелов, которые могут использоваться в технической литературе**

Представленные выше варианты условных обозначений (индексации) уровней и децибелов могут отличаться от обозначений, которые могут указываться в технической литературе. Проведем сравнение рассмотренных обозначений с обозначениями, используемыми специалистами в области инфокоммуникаций и измерительной техники РФ [2, 8], обозначениями в ранее принятых ГОСТах [10] и международными аналогами [3, 14]. Данное сравнение представлено в табл. 7.

Безусловно приведенный перечень сравниваемых уровней и децибелов является ограниченно выборочным. (Например, в радиотехнике эти единицы широко используются для оценки уровня шума, выигрыша усиления антенн по сравнению с изотропным излучателем и т. д.) Однако это сравнение позволяет все же увидеть общие принципы формирования обозначений уровней и децибелов.

### **Упрощающая дополнительная рекомендация к обозначениям децибелов**

Кроме рассмотренных вариантов формирования обозначений можно также дать упрощающую рекомендацию использования *условных* обозначений. Поскольку с помощью децибелов могут оцениваться множество физических величин, то за основу можно рекомендовать вариант обозначений, рассмотренный выше в разделе «Обозначения неабсолютных уровней с указанием единиц измерений величин, относительно которых определяют

Обозначения (индексация) уровней и децибелов

Таблица 7

Вид уровня	Определение и обозначение уровня по ГОСТ [10]	Определение и рекомендуемое обозначение уровня*)	Обозначение единицы (децибела) уровня		Пояснения
			международное	русское	
Абсолютный уровень сигнала по мощности	$L_1 = 10 \lg P_x$	$p_m$ или $p_{m0} = 10 \lg(P_i/P_0) = 10 \lg(P_i/1 \text{ мВт}),$ (5.1)	dBm	дБм	Уровень, определяемый для опорной мощности $P_0 = 1 \text{ мВт}$ или 1 мВА. Мощность $P_x \equiv P_i$ обычно определяется на номинальной нагрузке [3] (для профессиональной техники обычно 10 кОм для частот менее 10 МГц, для радио-частотной техники — 50 Ом или 75 Ом) Уровень $p_{m0}$ , определяемый для опорной мощности $P_0 = 1 \text{ мВт}$ на нагрузке 600 Ом
Абсолютный уровень сигнала по напряжению *)	$L_2 = 20 \lg \frac{U_x}{0,7746}$	$p_n$ или $p_{n0} = 20 \lg(U_i/U_0) = 20 \lg(U_i/0,775 \text{ В}),$ (5.3)	dBu	дБн или дБн0	Уровень напряжения $U_x \equiv U_i$ , определяемый для опорного напряжения $U_0 \approx 0,775 \text{ В}$ , соответствующего мощности 1 мВт на нагрузке 600 Ом
Относительный уровень сигнала по мощности	$L_3 = 10 \lg \frac{P_x}{P_0}$	$p_{отн.м}$ или $p_{отм} = 10 \lg(P_x/P_{\text{ТНОУ}}),$ (6.1)	dBr	дБом или дБо	Уровень мощности $P_x$ в точке X, определяемый относительно мощности $P_0 \equiv P_{\text{ТНОУ}}$ в точке нулевого относительного уровня (ТНОУ), которая принята для сравнения и к которой отнесены все другие уровни
Относительный уровень сигнала по напряжению		$p_{отн.н}$ или $p_{он} = 20 \lg(U_i/U_{оп})$ (3.7)	dBu	дБон	Относительный уровень сигнала по напряжению $U_x \equiv U_i$ , для которого $U_0 \equiv U_{оп}$ является напряжением в точке, которая принята для сравнения (например, в ТНОУ) и к которой отнесены все другие уровни

Окончание табл. 7

Абсолютный уровень сигнала по мощности, приведенный к точке с нулевым относительным уровнем (ТНОУ) по мощности	$L_5 =$ $= L_1 - L_3 =$ $= 10 \lg P_x -$ $- 10 \lg (P_x / P_0)$	$P_{\text{тноу}0} =$ $= P_{X0} - P_{X\text{ом}} =$ $= 10 \lg (P_x / P_0) -$ $- 10 \lg (P_x / P_{\text{тноу}}),$ (6.2')	dBm0	ΔBm0 ***)	Уровень опорной мощности в ТНОУ, который является «абсолютным уровнем мощности относительно 1 мВт в точке цепи (линии) передачи с нулевым уровнем», определяемым разностью абсолютного уровня $L_1 \equiv P_{X0}$ и относительного уровня $L_3 \equiv P_{X\text{ом}}$ сигнала по мощности в исследуемой точке цепи X
--	---	---	------	-----------	--

\*) Согласно рассмотренному выше (формулы из разделов 5 и 6).

\*\*) Рекомендация из ГОСТ [10]: «Значение абсолютного уровня по напряжению совпадает со значением абсолютного уровня по мощности в данной точке при полном сопротивлении  $Z_x$ , равном активному сопротивлению 600 Ом. При других полных сопротивлениях  $Z_x$  значение уровня по мощности может быть найдено из значения уровня по напряжению в данной точке путем прибавления к нему поправки, равной  $10 \lg(600/Z_x)$ . Примечание. Во всех случаях, где допускается меньшая точность, значение напряжения  $U_0$  может быть принято равным 0,775 В». (Подробные пояснения по определению уровня по напряжению для случаев  $|Z_x| = R_0 = 600$  Ом и  $|Z_x| \neq R_0 = 600$  Ом даны в разделах 5 и 6.)

\*\*\*). Поскольку рассматриваемый уровень является абсолютным и обозначение его единиц ΔBm0 совпадает с вышеуказанным обозначением для абсолютного уровня по мощности, то особенность его применения к ТНОУ должно поясняться при решении задач с относительными уровнями.

ся эти уровни в децибелах». Такие *условные* обозначения «конкретизируют» единицы измерения, относительно которых определяются децибелы (т. е. *явно указывается опорный уровень*), путем добавления к обозначению «дБ» индекса общепринятого обозначения измеряемой физической величины. Например, при величине 10 дБ относительно опорной величины 1 мкВ, запись этой величины будет представляться в виде 10 дБмкВ. Для международного аналога она будет соответствовать 10 dB $\mu$ V.

Использование такого вида обозначений позволяет не только их упростить (унифицировать), но и избежать путаницы, указывая конкретно, относительно каких физических величин дается уровневая оценка с помощью децибелов.

О подобном роде использования обозначений указывается в Межгосударственном стандарте о единицах физических величин [23], основанном на международном стандарте МЭК 27-3 [24], где говорится: «При необходимости указать исходную величину, ее значение помещают в скобках за обозначением логарифмической величины, например для уровня звукового давления:  $L_p$  (re 20  $\mu$ Pa) = 20 dB;  $L_p$  (исх. 20 мкПа) = 20 дБ (re — начальные буквы слова *reference*, т. е. *исходный*). При краткой форме записи значение исходной величины указывают в скобках за значением уровня, например 20 dB (re 20  $\mu$ Pa) или 20 дБ (исх. 20 мкПа)». Однако на практике и в современной технической литературе, когда сравнение производится с общепринятыми единицами измерения физических величин, в основном используются вышеуказанные обозначения без скобок с комментариями, а просто дБ с указанием опорной величины.

Конкретные примеры с такими практически используемыми обозначениями в сравнении с международными аналогами [3, 24] для отдельных часто встречающихся величин в радио- и электросвязи представлены в табл. 8.

Дополнительно можно привести [3, 24] еще ряд часто используемых обозначений децибелов: дБв (международное: dBq) для определения абсолютного уровня напряжения шума относительно напряжения 0,775 В; dBFS (от англ. *full scale* — «полная шкала») используется при определении шкалы уровней (по мощности или напряжению) аналого-цифрового преобразования; дБи (международное dB $i$ ) — изотропный децибел, используемый



Таблица 8

## Примеры обозначений уровней

Вид уровня	Определение и возможное отечественное и международное обозначение	Обозначение единицы (децибела) уровня		Пояснения
		международное	русское	
Уровень по мощности относительно 1 Вт	$p_M \equiv L_M \equiv L_W = 10 \lg(P_i/P_{оп}) = 10 \lg(P_i/1 \text{ Вт})$	dBW	дБВт	Опорная величина мощности $P_{оп} = 1 \text{ Вт}$
Уровень по мощности относительно 1 мкВт	$p_M \equiv L_M \equiv L_W = 10 \lg(P_i/P_{оп}) = 10 \lg(P_i/1 \text{ мкВт})$	dBμW	дБмкВт	Опорная величина мощности $P_{оп} = 1 \text{ мкВт}$
Уровень по напряжению относительно 1 мкВ	$p_U \equiv L_U \equiv L_u = 20 \lg(U_i/U_{оп}) = 20 \lg(U_i/1 \text{ мкВ})$	dBμV	дБмкВ	Опорная величина напряжения $U_{оп} = 1 \text{ мкВ}$
Уровень по напряжению относительно 1 В	$p_U \equiv L_U \equiv L_u = 20 \lg(U_i/U_{оп}) = 20 \lg(U_i/1 \text{ В})$	dBV	дБВ	Опорная величина напряжения $U_{оп} = 1 \text{ В}$
Уровень по току относительно 1 А	$p_I \equiv L_I \equiv L_I = 20 \lg(I_i/I_{оп}) = 20 \lg(I_i/1 \text{ А})$	dBA	дБА	Опорная величина тока $I_{оп} = 1 \text{ А}$
Уровень по току относительно 1 мА	$p_I \equiv L_I \equiv L_I = 20 \lg(I_i/I_{оп}) = 20 \lg(I_i/1 \text{ мА})$	dBmA	дБмА	Опорная величина тока $I_{оп} = 1 \text{ мА}$
Уровень напряженности электрической составляющей электромагнитного поля относительно 1 мкВ/м	$p_{эмв} \equiv p_E \equiv L_E = 20 \lg(E_i/E_{оп}) = 20 \lg(E_i/1 \frac{\text{мкВ}}{\text{м}})$	dBμV/m	дБмкВ/м	Уровень напряженности электрической составляющей электромагнитного поля $E_i$ , определяемый для опорной величины напряженности поля $E_{оп} = 1 \text{ мкВ/м}$
Уровень звукового давления относительно 1 Па	$p_{эв} \equiv L_{эв} \equiv L_p = 20 \lg \left( \frac{\Delta P_{эв1}}{\Delta P_{эв0}} \right) = 20 \lg \left( \frac{\Delta P_{эв1}}{1 \text{ Па}} \right)$	dBPa	дБПа	Опорная величина звукового давления $\Delta P_{эв0} = 1 \text{ Па}$

для оценки коэффициента направленного действия или коэффициента усиления измеряемой антенны относительно изотропной антенны, которая равномерно излучает энергию по всем направлениям; дБд (международное: dBd) — при оценке направленности или усиления антенны относительно полуволнового диполя.

Подводя итог проведенному сравнению возможных обозначений, можно заключить, что обозначения уровней и децибелов могут быть различных видов и возможных их комбинаций.

Однако, как показывает рассмотрение последних источников технической литературы в области теле- и инфокоммуникаций (см. например [8] и [9]), из-за большей наглядности (поясняющей индексации) предпочтение отдается обозначениям, представленным в разделах 5 и 6. Принятие таких единых обозначений за основу позволило бы избежать разночтений в разного рода публикациях, особенно в области связи.

## 10 Децибелы и неперы

---

В технике связи, особенно в проводной телефонии, в ряде случаев может использоваться для оценки уровня сигнала логарифмическая единица *непер*. (Единица названа в честь Джона Непера, который ввёл в математику понятие логарифма.) Таким образом, *непер* (русское обозначение: *Нп*; международное: *Нр*), как бел и децибел, является единицей логарифмической шкалы. Разница между ними в том, что при оценках в белах и децибелах используется десятичный логарифм отношения физических одноименных величин, а при оценках в неперах применяется натуральный логарифм (по основанию  $e = 2,71828$ ) отношения этих величин. И для оценки с помощью неперов в общем виде можно записать

$$N = \log_e(F_i/F_{\text{оп}}) = \ln(F_i/F_{\text{оп}}), \text{ Нп.} \quad (10.1)$$

Отсюда легко определить, что изменение величины на 1 непер означает её изменение в  $e \approx 2,718$  раз.

Следует заметить, что при сопоставлении децибелов и неперов необходимо учитывать величины оцениваемых соотношений. Непер исходно ориентирован на оценку силовых величин (например, напряжений или токов), в отличие от децибел с изначальной оценкой энергетических величин (например, мощности), т. е. с помощью неперов дается оценка для соотношений  $F_i$  и  $F_{\text{оп}}$ , определяемых для силовых величин в децибелах как  $20 \lg(F_i/F_{\text{оп}})$ . Поэтому 1 непер будет определять изменение этих величин в  $e \approx 2,718$  раз. А для соотношений энергетических величин, определяемых в децибелах как  $10 \lg(F_i/F_{\text{оп}})$  (например, для мощностей сигнала), 1 непер будет определять изменение этих величин в  $e^2 = 7,39$  раз. Обозначив для напряжений и токов  $F_i = F_{\text{нт}}$  и  $F_{\text{оп}} = F_{\text{опнт}}$ , а для мощности  $F_i = F_{\text{м}}$  и  $F_{\text{оп}} = F_{\text{опм}}$ , для неперов можно записать следующие соотношения:

- для напряжений и токов

$$N_{\text{нт}} = \ln(F_{\text{нт}}/F_{\text{опнт}}), \text{ Нп}; \quad (10.2)$$

- для мощности

$$N_{\text{м}} = \frac{1}{2} \ln(F_{\text{м}}/F_{\text{опм}}), \text{ Нп}; \quad (10.3)$$

Для различия этих двух видов неперов может использоваться их индексация, подобная выше указанной для децибелов.

Используя известные соотношения для логарифмов с разными основаниями, можно определить пересчет неперов в децибелы и наоборот:

- для силовых величин, например напряжения:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Нп} &= 20 \log_{10} e = 20 \lg e \approx 8,686 \text{ дБн}; \\ 1 \text{ дБн} &= 1/(20 \lg e) \approx 0,115 \text{ Нп}; \end{aligned} \quad (10.4)$$

- для энергетических величин, например мощности:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Нп} &= 10 \lg e \approx 4,343 \text{ дБм}; \\ 1 \text{ дБм} &= 1/(10 \lg e) \approx 0,23 \text{ Нп}. \end{aligned} \quad (10.5)$$

Пример для отношения напряжений  $U_2/U_1 = F_i/F_{\text{оп}} = 2$ :

$$\begin{aligned} \ln(U_2/U_1) &= \ln 2 \approx 0,693 \text{ Нп}; \\ 20 \lg(U_2/U_1) &= 20 \lg 2 \approx 6 \text{ дБн}. \end{aligned}$$

Проверка путем пересчета по (10.4) неперов в децибелы:

$$0,693 \text{ Нп} \cdot 8,686 \approx 6 \text{ дБн}$$

и пересчета децибелов в неперы:

$$6 \text{ дБн} \cdot 0,115 \approx 0,693 \text{ Нп}.$$

(Значения пересчета неперов в отношения напряжений, токов и мощностей, неперов в децибелы и децибелы в неперы приводятся в приложениях 5, 6 и 7.)

Сравнивая децибелы и неперы по масштабности их практического использования, следует отметить, что неперы находили и могут находить свое применение и в телефонии, и в акустике, и многих других направлений техники и исследований. Однако, не умаляя их значимость, следует отметить, что более ши-

рокое использование в настоящее время получили децибелы, которым и посвящена настоящая работа. Возможно, объяснению этому можно дать числовыми значениями неперов — наличием для практически значимых величин уровней неудобных дробных значений (и часто меньше единицы) по сравнению с децибелами. Дополнительно можно заметить [2], что децибел был принят в качестве основной логарифмической единицы по решению международных организаций в 1971 г. До этого в качестве логарифмической единицы использовались неперы.

Безусловно, при необходимости показанная взаимосвязь децибелов и неперов позволяет рассмотренные выше особенности децибелов и их обозначений методически трансформировать на оценки уровней с использованием неперов.

## Заключение

Вышерассмотренные варианты представления децибелов отражают их применение, пожалуй, для наиболее значимых в практике случаев из областей радио-, электросвязи, инфокоммуникаций и акустики. Безусловно, существует множество других случаев использования децибелов. Тем не менее рассмотренные принципы их применения и обозначения позволяют специалистам в той или иной области науки и техники использовать их по своему назначению.

Важным результатом проведенной оценки электрических сигналов является четкое определение понятий и характеристик для абсолютных значений величин сигналов, их относительных уровней и в том числе абсолютных уровней.

Практически полезным можно считать рассмотренную индексацию децибелов с указанием единиц и величин нормирования (опорных величин). Это может быть сделано или подробным образом, или в сжатой (упрощенной) форме. Такая индексация позволит избежать некорректности при определении и оценки разного рода параметров касательно их относительных и уровней величин, которую, к сожалению, можно обнаружить в отдельных изданиях технической литературы.

Возможное возникновение неточностей из-за некорректности указания (обозначения) величины децибелов рассмотрено в разделе 9, где показано, что отсутствие таких обозначений, определяющих особенности определения децибелов, может явиться причиной разных результатов расчета относительных величин, определяемых по децибелам.

Поэтому одной из целей при рассмотрении особенностей использования децибелов было разъяснение применения конкретизации их обозначений.

Дополнительно для удобства оценки уровней сигналов в приложении 1 приводятся значения децибелов для отношений мощности, напряжения и тока. В приложении 2 в наглядной форме

представлены кратные и процентные изменения мощности сигнала в зависимости от уровней мощности, выраженных в дБ. Номограммы перевода децибелов в проценты и разы отношений показаны в приложении 3. В приложении 4 даны значения пересчета децибелов абсолютных уровней в значения мощности, напряжения и тока. В приложениях 5, 6 и 7 приводятся значения пересчета неперов в отношения напряжений, токов и мощностей, неперов в децибелы и децибелов в неперы. В приложении 8 показаны значения пересчета степеней числа 2 в децибелы. Дополнительные сведения по акустике даны в приложении 9. Приложения 10 и 11 содержат дополнительные сведения о параметрах канала тональной частоты и типовых сетевых трактов, а также о кабельных линиях, где используется единица децибел. В приложении 12 определяется методика и приводятся примеры построения амплитудно-частотных характеристик в логарифмическом масштабе с использованием децибелов. В приложении 13 даются понятия определения коэффициента (фактора) шума радиоприемных устройств и усилителей в децибелах. Приложение 14 содержит сведения о видах применения децибелов для оценки ряда параметров систем подвижной наземной связи.

# Литература

1. Есипенко В.И., Зельманов С.С. Теория электрической связи: учебное пособие для студентов вузов. — Нижний Новгород: Нижегородский техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2007. — 314 с.
2. Хромой В.П. Относительные единицы измерений физических величин: Учебное пособие. — М.: МТУСИ, 2016. — 26 с.
3. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Децибел>
4. Е4-sem.ru — инженерный интернет-справочник.
5. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — М.: Наука, 1981. — 721 с.
6. Johnson Kenneth Simonds. Transmission Circuits for Telephonic Communication: Methods of Analysis and Design. — New York: D. Van Nostrand Co., 1944. — P. 10.
7. Martin W.H. DeciBel—The New Name for the Transmission Unit // Bell System Technical Journal. 1929. 8 (1).
8. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Учебник для вузов/ В.В. Крухмалев, В.Н. Гордиенко, А.Д. Мочалов и др. /Под ред. В.Н. Гордиенко и В.В. Крухмалева — М.: Горячая линия — Телеком, 2008. — 424 с.
9. Четкин С.В. Методические указания и задания на контрольную работу по дисциплине «Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей». Для студентов-заочников 3 курса (направление 11.03.02) — М. Московский технический университет связи и информатики, 2013. — 20 с.
10. ГОСТ 24204-80 «Единица децибел для измерения уровней, затуханий и усиления в технике проводной связи».
11. Зельдин Е.А. Децибелы. — М.: Энергия, 1972. — 56 с.
12. Милютин Е.Р., Василенко Г.О. Повышение точности расчета ослабления поля с помощью калибровки и цифровых карт местности // Электросвязь. 2004. № 2. С. 38–40.
13. Туляков Ю.М. Системы персонального радиовызова. — М.: Радио и связь, 1988. — 168 с.
14. Девис Дж., Карр Дж. Карманный справочник радиоинженера. Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Додека-XXI», 2002. — 544 с.
15. Туляков Ю.М., Рузанов П.А. Анализ функций, используемых в технике электро и радиосвязи для определения вероятностей случайных величин с нормальным законом распределения // Извес-



тия ЮФУ. Технические науки. Таганрог, Ростовская область. 2015. № 4. С. 107–118.

16. Цвикер Э., Фельдкеллер Р. Ухо как приёмник информации. Пер. с нем. 2 изд. — М.: Связь, 1971. — 255 с.

17. Громкость звука // Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М. Прохоров. — М.: Советская энциклопедия, 1988. Т. 1. С. 539–540.

18. ГОСТ Р ИСО 226-2009 (ISO 226:2003) Акустика. Стандартные кривые равной громкости. — М.: ФГУП Стандартинформ, 2009. — 20 с.

19. Кикоин А.К. Энергия и громкость звука // Квант. 1983. № 12. С. 28–30.

20. Медицинская и биологическая физика. Курс лекций с задачами: учеб. пособие / В.Н. Федорова, Е.В. Фаустов. — М.: Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа», 2008. — 592 с.

21. Туляков Ю.М. Характеристика сигналов по их виду, абсолютной величине, абсолютному и относительному уровням // Всероссийский научно-технический журнал «Проектирование и технология электронных средств». 2017. № 4. С. 37–43.

22. Туляков Ю.М. Классификация видов уровней сигналов и определение вариантов их обозначений // Труды III Российско-белорусской международной конференции «Современная элементная база радиоэлектроники и ее применение» им. О.В. Лосева. Н. Новгород, 2017. С. 134–159.

23. Межгосударственный стандарт «Государственная система обеспечения единства измерений». Единицы величин. Дата введения 2003-09-01.

24. Международный стандарт МЭК 27-3 «Логарифмические величины и единицы». — Женева: МЭК, 1989 (Изменение № 1, 03.2000).

# Приложения

## Приложение 1. Пересчет децибелов в отношения напряжений, токов и мощностей

Децибелы положительные, отношения больше единицы			Децибелы отрицательные, отношения меньше единицы		
$дБ \geq 0$	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	$дБ \leq 0$	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
0,0	1,000	1,000	0,0	1,0000	1,0000
0,1	1,012	1,023	-0,1	0,9886	0,9772
0,2	1,023	1,047	-0,2	0,9772	0,9550
0,3	1,035	1,072	-0,3	0,9661	0,9333
0,4	1,047	1,096	-0,4	0,9550	0,9120
0,5	1,059	1,122	-0,5	0,9441	0,8913
0,6	1,072	1,148	-0,6	0,9333	0,8710
0,7	1,084	1,175	-0,7	0,9226	0,8511
0,8	1,096	1,202	-0,8	0,9120	0,8318
0,9	1,109	1,230	-0,9	0,9016	0,8128
1,0	1,122	1,259	-1,0	0,8913	0,7943
1,1	1,135	1,288	-1,1	0,8810	0,7762
1,2	1,148	1,318	-1,2	0,8710	0,7586
1,3	1,161	1,349	-1,3	0,8610	0,7413
1,4	1,175	1,380	-1,4	0,8511	0,7244
1,5	1,189	1,413	-1,5	0,8414	0,7079
1,6	1,202	1,445	-1,6	0,8318	0,6918
1,7	1,216	1,479	-1,7	0,8222	0,6761
1,8	1,230	1,514	-1,8	0,8128	0,6607
1,9	1,245	1,549	-1,9	0,8035	0,6457
2,0	1,259	1,585	-2,0	0,7943	0,6310
2,1	1,274	1,622	-2,1	0,7852	0,6166
2,2	1,288	1,660	-2,2	0,7762	0,6026
2,3	1,303	1,698	-2,3	0,7674	0,5888
2,4	1,318	1,738	-2,4	0,7586	0,5754
2,5	1,334	1,778	-2,5	0,7499	0,5623
2,6	1,349	1,820	-2,6	0,7413	0,5495
2,7	1,365	1,862	-2,7	0,7328	0,5370
2,8	1,380	1,905	-2,8	0,7244	0,5248
2,9	1,396	1,950	-2,9	0,7161	0,5129
3,0	1,413	1,995	-3,0	0,7079	0,5012
3,1	1,429	2,042	-3,1	0,6998	0,4898
3,2	1,445	2,089	-3,2	0,6918	0,4786

$\Delta B \geq 0$	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	$\Delta B \leq 0$	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
3,3	1,462	2,138	-3,3	0,6839	0,4677
3,4	1,479	2,188	-3,4	0,6761	0,4571
3,5	1,496	2,239	-3,5	0,6683	0,4467
3,6	1,514	2,291	-3,6	0,6607	0,4365
3,7	1,531	2,344	-3,7	0,6531	0,4266
3,8	1,549	2,399	-3,8	0,6457	0,4169
3,9	1,567	2,455	-3,9	0,6383	0,4074
4,0	1,585	2,512	-4,0	0,6310	0,3981
4,1	1,603	2,570	-4,1	0,6237	0,3890
4,2	1,622	2,630	-4,2	0,6166	0,3802
4,3	1,641	2,692	-4,3	0,6095	0,3715
4,4	1,660	2,754	-4,4	0,6026	0,3631
4,5	1,679	2,818	-4,5	0,5957	0,3548
4,6	1,698	2,884	-4,6	0,5888	0,3467
4,7	1,718	2,951	-4,7	0,5821	0,3388
4,8	1,738	3,020	-4,8	0,5754	0,3311
4,9	1,758	3,090	-4,9	0,5689	0,3236
5,0	1,778	3,162	-5,0	0,5623	0,3162
5,1	1,799	3,236	-5,1	0,5559	0,3090
5,2	1,820	3,311	-5,2	0,5495	0,3020
5,3	1,841	3,388	-5,3	0,5433	0,2951
5,4	1,862	3,467	-5,4	0,5370	0,2884
5,5	1,884	3,548	-5,5	0,5309	0,2818
5,6	1,905	3,631	-5,6	0,5248	0,2754
5,7	1,928	3,715	-5,7	0,5188	0,2692
5,8	1,950	3,802	-5,8	0,5129	0,2630
5,9	1,972	3,890	-5,9	0,5070	0,2570
6,0	1,995	3,981	-6,0	0,5012	0,2512
6,1	2,018	4,074	-6,1	0,4955	0,2455
6,2	2,042	4,169	-6,2	0,4898	0,2399
6,3	2,065	4,266	-6,3	0,4842	0,2344
6,4	2,089	4,365	-6,4	0,4786	0,2291
6,5	2,113	4,467	-6,5	0,4732	0,2239
6,6	2,138	4,571	-6,6	0,4677	0,2188
6,7	2,163	4,677	-6,7	0,4624	0,2138
6,8	2,188	4,786	-6,8	0,4571	0,2089
6,9	2,213	4,898	-6,9	0,4519	0,2042
7,0	2,239	5,012	-7,0	0,4467	0,1995
7,1	2,265	5,129	-7,1	0,4416	0,1950
7,2	2,291	5,248	-7,2	0,4365	0,1905
7,3	2,317	5,370	-7,3	0,4315	0,1862
7,4	2,344	5,495	-7,4	0,4266	0,1820
7,5	2,371	5,623	-7,5	0,4217	0,1778
7,6	2,399	5,754	-7,6	0,4169	0,1738
7,7	2,427	5,888	-7,7	0,4121	0,1698

$\Delta B \geq 0$	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	$\Delta B \leq 0$	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
7,8	2,455	6,026	-7,8	0,4074	0,1660
7,9	2,483	6,166	-7,9	0,4027	0,1622
8,0	2,512	6,310	-8,0	0,3981	0,1585
8,1	2,541	6,457	-8,1	0,3936	0,1549
8,2	2,570	6,607	-8,2	0,3890	0,1514
8,3	2,600	6,761	-8,3	0,3846	0,1479
8,4	2,630	6,918	-8,4	0,3802	0,1445
8,5	2,661	7,079	-8,5	0,3758	0,1413
8,6	2,692	7,244	-8,6	0,3715	0,1380
8,7	2,723	7,413	-8,7	0,3673	0,1349
8,8	2,754	7,586	-8,8	0,3631	0,1318
8,9	2,786	7,762	-8,9	0,3589	0,1288
9,0	2,818	7,943	-9,0	0,3548	0,1259
9,1	2,851	8,128	-9,1	0,3508	0,1230
9,2	2,884	8,318	-9,2	0,3467	0,1202
9,3	2,917	8,511	-9,3	0,3428	0,1175
9,4	2,951	8,710	-9,4	0,3388	0,1148
9,5	2,985	8,913	-9,5	0,3350	0,1122
9,6	3,020	9,120	-9,6	0,3311	0,1096
9,7	3,055	9,333	-9,7	0,3273	0,1072
9,8	3,090	9,550	-9,8	0,3236	0,1047
9,9	3,126	9,772	-9,9	0,3199	0,1023
10,0	3,162	10,00	-10,0	0,3162	0,1000
10,1	3,199	10,23	-10,1	0,3126	0,09772
10,2	3,236	10,47	-10,2	0,3090	0,09550
10,3	3,273	10,72	-10,3	0,3055	0,09333
10,4	3,311	10,96	-10,4	0,3020	0,09120
10,5	3,350	11,22	-10,5	0,2985	0,08913
10,6	3,388	11,48	-10,6	0,2951	0,08710
10,7	3,428	11,75	-10,7	0,2917	0,08511
10,8	3,467	12,02	-10,8	0,2884	0,08318
10,9	3,508	12,30	-10,9	0,2851	0,08128
11,0	3,548	12,59	-11,0	0,2818	0,07943
11,1	3,589	12,88	-11,1	0,2786	0,07762
11,2	3,631	13,18	-11,2	0,2754	0,07586
11,3	3,673	13,49	-11,3	0,2723	0,07413
11,4	3,715	13,80	-11,4	0,2692	0,07244
11,5	3,758	14,13	-11,5	0,2661	0,07079
11,6	3,802	14,45	-11,6	0,2630	0,06918
11,7	3,846	14,79	-11,7	0,2600	0,06761
11,8	3,890	15,14	-11,8	0,2570	0,06607
11,9	3,936	15,49	-11,9	0,2541	0,06457
12,0	3,981	15,85	-12,0	0,2512	0,06310
12,1	4,027	16,22	-12,1	0,2483	0,06106
12,2	4,074	16,60	-12,2	0,2455	0,06020
12,3	4,121	16,98	-12,3	0,2427	0,05888

$\Delta B \geq 0$	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	$\Delta B \leq 0$	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
12,4	4,169	17,38	-12,4	0,2399	0,05754
12,5	4,217	17,78	-12,5	0,2371	0,05623
12,6	4,266	18,20	-12,6	0,2344	0,05495
12,7	4,315	18,62	-12,7	0,2317	0,05370
12,8	4,365	19,05	-12,8	0,2291	0,05248
12,9	4,416	19,50	-12,9	0,2265	0,05129
13,0	4,467	19,95	-13,0	0,2239	0,05012
13,1	4,519	20,42	-13,1	0,2213	0,04898
13,2	4,571	20,89	-13,2	0,2188	0,04786
13,3	4,624	21,38	-13,3	0,2163	0,04677
13,4	4,677	21,88	-13,4	0,2138	0,04571
13,5	4,732	22,39	-13,5	0,2113	0,04467
13,6	4,786	22,91	-13,6	0,2089	0,04365
13,7	4,842	23,44	-13,7	0,2065	0,04266
13,8	4,898	23,99	-13,8	0,2042	0,04169
13,9	4,955	24,55	-13,9	0,2018	0,04074
14,0	5,012	25,12	-14,0	0,1995	0,03981
14,1	5,070	25,70	-14,1	0,1972	0,03890
14,2	5,129	26,30	-14,2	0,1950	0,03802
14,3	5,188	26,92	-14,3	0,1928	0,03715
14,4	5,248	27,54	-14,4	0,1905	0,03631
14,5	5,309	28,18	-14,5	0,1884	0,03548
14,6	5,370	28,84	-14,6	0,1862	0,03467
14,7	5,433	29,51	-14,7	0,1841	0,03388
14,8	5,495	30,20	-14,8	0,1820	0,03311
14,9	5,559	30,90	-14,9	0,1799	0,03236
15,0	5,623	31,62	-15,0	0,1778	0,03162
15,1	5,689	32,36	-15,1	0,1758	0,03090
15,2	5,754	33,11	-15,2	0,1738	0,03020
15,3	5,821	33,88	-15,3	0,1718	0,02951
15,4	5,888	34,67	-15,4	0,1698	0,02884
15,5	5,957	35,48	-15,5	0,1679	0,02818
15,6	6,026	36,31	-15,6	0,1660	0,02754
15,7	6,095	37,15	-15,7	0,1641	0,02692
15,8	6,166	38,02	-15,8	0,1622	0,02630
15,9	6,237	38,90	-15,9	0,1603	0,02570
16,0	6,310	39,81	-16,0	0,1585	0,02512
16,1	6,383	40,74	-16,1	0,1585	0,02512
16,2	6,457	41,69	-16,2	0,1567	0,02455
16,3	6,531	42,66	-16,3	0,1549	0,02399
16,4	6,607	43,65	-16,4	0,1531	0,02344
16,5	6,683	44,67	-16,5	0,1514	0,02291
16,6	6,761	45,71	-16,6	0,1479	0,02188
16,7	6,839	46,77	-16,7	0,1462	0,02138
16,8	6,918	47,86	-16,8	0,1445	0,02089
16,9	6,998	48,98	-16,9	0,1429	0,02042

дБ $\geq 0$	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	дБ $\leq 0$	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
17,0	7,079	50,12	-17,0	0,1413	0,01995
17,1	7,161	51,29	-17,1	0,1396	0,01950
17,2	7,244	52,48	-17,2	0,1380	0,01905
17,3	7,328	53,70	-17,3	0,1365	0,01862
17,4	7,413	54,95	-17,4	0,1349	0,01820
17,5	7,499	56,23	-17,5	0,1334	0,01778
17,6	7,586	57,54	-17,6	0,1318	0,01738
17,7	7,674	58,88	-17,7	0,1303	0,01698
17,8	7,762	60,26	-17,8	0,1288	0,01660
17,9	7,852	61,66	-17,9	0,1274	0,01622
18,0	7,943	63,10	-18,0	0,1259	0,01585
18,1	8,035	64,57	-18,1	0,1245	0,01549
18,2	8,128	66,07	-18,2	0,1230	0,01514
18,3	8,222	67,61	-18,3	0,1216	0,01479
18,4	8,318	69,18	-18,4	0,1202	0,01445
18,5	8,414	70,79	-18,5	0,1189	0,01413
18,6	8,511	72,44	-18,6	0,1175	0,01380
18,7	8,610	74,13	-18,7	0,1161	0,01349
18,8	8,710	75,86	-18,8	0,1148	0,01318
18,9	8,810	77,62	-18,9	0,1135	0,01288
19,0	8,913	79,43	-19,0	0,1122	0,01259
19,1	9,016	81,28	-19,1	0,1109	0,01230
19,2	9,120	83,18	-19,2	0,1096	0,01202
19,3	9,226	85,11	-19,3	0,1084	0,01175
19,4	9,333	87,10	-19,4	0,1072	0,01148
19,5	9,441	89,13	-19,5	0,1059	0,01122
19,6	9,550	91,20	-19,6	0,1047	0,01096
19,7	9,661	93,33	-19,7	0,1035	0,01072
19,8	9,772	95,50	-19,8	0,1023	0,01047
19,9	9,886	97,72	-19,9	0,1012	0,01023
20,0	10,00	100,0	-20,0	0,1000	0,01000
25,0	17,78	316,2	-25,0	0,0562	$3,162 \cdot 10^{-3}$
30,0	31,62	1000	-30,0	0,0316	0,001
35,0	56,23	3162	-35,0	0,0178	$3,162 \cdot 10^{-4}$
40,0	100,0	$10^4$	-40,0	0,0100	$10^{-4}$
45,0	177,8	$3,162 \cdot 10^4$	-45,0	0,0056	$3,162 \cdot 10^{-5}$
50,0	316,2	$10^5$	-50,0	0,0032	$10^{-5}$
55,0	562,3	$3,162 \cdot 10^6$	-55,0	0,0018	$3,162 \cdot 10^{-6}$
60,0	1 000	$10^6$	-60,0	0,0010	$10^{-6}$

## Приложение 2. Иллюстрация изменения мощности сигнала для типовых значений децибелов

*Увеличение мощности:*

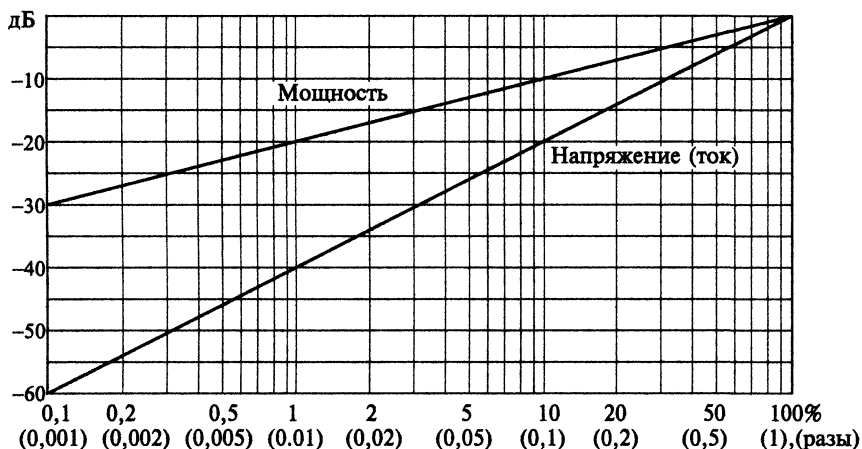
- 20 дБ = 100-кратное возрастание мощности;
- 10 дБ = 10-кратное возрастание мощности;

- 3 дБ = двукратное возрастание мощности.

*Уменьшение мощности:*

- -3 дБ = двукратная (50%-ная) потеря мощности;
- -6 дБ = 75%-ная потеря мощности;
- -10 дБ = 90%-ная потеря мощности;
- -20 дБ = 99%-ная потеря мощности;
- -30 дБ = 99,9%-ная потеря мощности;
- -40 дБ = 99,99%-ная потеря мощности.

### Приложение 3. Номограммы перевода децибелов в проценты и разы отношений



### Приложение 4. Пересчет децибелов (абсолютных уровней) в единицы напряжения, тока и мощности при стандартных нулевом уровне 1 мВт и сопротивлении нагрузки 600 Ом

дБ	U, мВ	I, мА	P, мВт	дБ	U, мВ	I, мА	P, мВт
0	774,6	1,0700	1	0	774,6	1,0700	1
0,5	0,8105	1,351	1,122	-0,5	721,2	1,2910	0,891
1,0	0,8691	1,448	1,26	-1,0	690,4	1,2020	0,794
1,5	0,9108	1,518	1,41	-1,5	641,7	1,1500	0,794
2,0	0,9752	1,625	1,58	-2,0	615,3	1,0250	0,708
2,5	1,033	1,722	1,78	-2,5	570,8	0,9515	0,631
3,0	1,094	1,825	1,99	-3,0	548,4	0,9139	0,562
3,5	1,159	1,932	2,24	-3,5	517,7	0,8630	0,501
4,0	1,228	2,046	2,51	-4,0	488,7	0,8145	0,447
4,5	1,300	2,167	2,82	-4,5	451,4	0,7525	0,398
5,0	1,377	2,295	3,16	-5,0	435,6	0,7259	0,355
5,5	1,459	2,432	3,55	-5,5	401,1	0,6686	0,316
6,0	1,546	2,576	3,98	-6,0	381,2	0,6470	0,282

дБ	$U$ , мВ	$I$ , мА	$P$ , мВт	дБ	$U$ , мВ	$I$ , мА	$P$ , мВт
6,5	1,637	2,729	4,47	-6,5	366,5	0,6109	0,251
7,0	1,732	2,887	5,01	-7,0	347,4	0,5790	0,224
7,5	1,836	3,060	5,62	-7,5	326,5	0,5443	0,199
8,0	1,946	3,243	6,31	-8,0	308,4	0,5139	0,178
8,5	2,061	3,436	7,08	-8,5	291	0,4851	0,158
9,0	2,183	3,638	7,94	-9,0	274,8	0,4581	0,141
9,5	2,312	3,854	8,91	-9,5	259,4	0,4324	0,126
10	2,449	4,082	10,0	-10	244,9	0,4082	0,112
11	2,748	4,581	12,6	-11	218,3	0,3638	0,100
12	3,083	5,139	15,8	-12	194,6	0,3243	0,0631
13	3,474	5,790	19,9	-13	173,2	0,2887	0,0501
14	3,882	6,470	25,1	-14	154,5	0,2576	0,0398
15	4,356	7,259	31,6	-15	137,7	0,2295	0,0316
16	4,887	8,145	39,8	-16	122,8	0,2046	0,0251
17	5,484	9,139	50,1	-17	109,5	0,1825	0,0199
18	6,153	10,255	63,1	-18	97,5	0,1625	0,0158
19	6,903	11,505	79,4	-19	86,9	0,1448	0,0126
20	7,746	12,909	100	-20	77,5	0,1291	0,0100

**Приложение 5. Пересчет неперов в отношения напряжений, токов и мощностей (неперы положительные, отношения больше единицы)**

Нп	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	Нп	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
0,01	1,010	1,020	1,00	2,718	7,389
0,02	1,020	1,041	1,10	3,004	9,025
0,03	1,030	1,062	1,20	3,320	11,02
0,04	1,041	1,083	1,30	3,669	13,46
0,05	1,051	1,105	1,40	4,055	16,44
0,06	1,062	1,128	1,50	4,482	20,09
0,07	1,073	1,150	1,60	4,953	24,53
0,08	1,083	1,174	1,70	5,474	29,96
0,09	1,094	1,197	1,80	6,050	36,60
0,10	1,105	1,221	1,90	6 686	44,70
0,15	1,162	1,350	2,00	7,389	54,60
0,20	1,221	1,492	2,10	8,166	66,69
0,25	1,284	1,649	2,20	9,025	81,45
0,30	1,350	1,822	2,3	9,974	99,48
0,35	1,419	2,014	2,4	11,02	121,05
0,40	1,492	2,226	2,5	12,18	148,4
0,45	1,568	2,460	2,6	13,46	181,3
0,50	1,649	2,718	2,7	14,88	221,4
0,55	1,733	3,004	2,8	16,44	270,4
0,60	1,822	3,32	2,9	18,17	330,3
0,65	1,916	3,669	3,0	20,09	403,4
0,70	2,014	4,055	3,1	22,20	492,8



Нп	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей	Нп	Отношение напряжений (токов)	Отношение мощностей
0,75	2,117	4,482	3,2	24,53	601,8
0,80	2,226	4,953	3,3	27,11	735,1
0,85	2,340	5,474	3,4	29,96	897,8
0,90	2,460	6,050	3,5	33,12	1 097
0,95	2,586	6,686	3,6	36,60	1 339
3,7	40,45	1 636	6,2	492,8	242 800
3,8	44,70	1 998	6,3	544,6	292 500
3,9	49,40	2 441	6,4	601,8	366 200
4,0	54,60	2 981	6,5	665,1	442 410
4,1	60,34	3 641	6,6	735,1	540 400
4,2	66,69	4 447	6,7	812,4	660 000
4,3	73,70	5 432	6,8	897,8	806 100
4,4	81,45	6 634	6,9	992,3	984 600
4,5	90,02	8 103	7,0	1 097	1 202 300
4,6	99,48	9 897	7,2	1 339	1 794 000
4,7	110,0	12 090	7,4	1636	2 676 000
4,8	121,5	14 770	7,6	1 998	3 993 000
4,9	134,3	18 030	7,8	2 441	5 956 000
5,0	148,4	22 030	8,0	2 981	8 886 100
5,1	164,0	26 900	8,2	3641	$13,26 \cdot 10^6$
5,2	181,3	32 860	8,4	4 447	$19,78 \cdot 10^6$
5,3	200,3	40 130	8,6	5 432	$29,50 \cdot 10^6$
5,4	221,4	49 020	8,8	6 634	$44,01 \cdot 10^6$
5,5	244,7	59870	9,0	8 103	$65,66 \cdot 10^6$
5,6	270,4	73 130	9,2	9 897	$97,95 \cdot 10^6$
5,7	298,9	89 320	9,4	12 090	$146,1 \cdot 10^6$
5,8	330,3	109 100	9,6	14 770	$218 \cdot 10^6$
5,9	365,0	133 200	9,8	18 030	$325,2 \cdot 10^6$
6,0	403,4	162 750	10,0	22 026	$485,2 \cdot 10^6$
6,1	445,9	198 800	11,0	59 874	$3585 \cdot 10^6$

### Приложение 6. Пересчет неперов в децибелы

Нп	дБ	Нп	дБ	Нп	дБ
0,1	0,869	3,5	30,4	6,9	59,9
0,2	1,74	3,6	31,3	7,0	60,8
0,3	2,61	3,7	32,1	7,1	61,7
0,4	3,47	3,8	33,0	7,2	62,5
0,5	4,34	3,9	33,9	7,3	63,4
0,6	5,21	4,0	34,7	7,4	64,3
0,7	6,08	4,1	35,6	7,5	65,1
0,8	6,95	4,2	36,5	7,6	66,0
0,9	7,81	4,3	37,3	7,7	66,9
1,0	8,69	4,4	38,2	7,8	67,8
1,1	9,55	4,5	39,1	7,9	68,6
1,2	10,4	4,6	40,0	8,0	69,5

Нп	дБ	Нп	дБ	Нп	дБ
1,3	11,3	4,7	40,8	8,1	70,4
1,4	12,2	4,8	41,7	8,2	71,2
1,5	13,0	4,9	42,6	8,3	72,1
1,6	13,9	5,0	43,4	8,4	73,0
1,7	14,8	5,1	44,3	8,5	73,8
1,8	15,6	5,2	45,2	8,6	74,7
1,9	16,5	5,3	46,2	8,7	75,6
2,0	17,4	5,4	46,9	8,8	76,4
2,1	18,2	5,5	47,8	8,9	77,3
2,2	19,1	5,6	48,6	9,0	78,2
2,3	20,0	5,7	49,5	9,1	79,0
2,4	21,0	5,8	50,4	9,2	79,9
2,5	21,7	5,9	51,2	9,3	80,8
2,6	22,6	6,0	52,1	9,4	81,6
2,7	23,5	6,1	53,0	9,5	82,5
2,8	24,3	6,2	53,9	9,6	83,4
2,9	25,2	6,3	54,7	9,7	84,3
3,0	26,1	6,4	55,6	9,8	85,1
3,1	26,9	6,5	56,5	9,9	86,0
3,2	27,8	6,6	57,3	10,0	86,9
3,3	28,7	6,7	58,2	15,0	130,29
3,4	29,5	6,8	59,1	20,0	173,71

### Приложение 7. Пересчет децибелов в неперы

дБ	Нп	дБ	Нп	дБ	Нп
1	0,115	35	4,03	69	7,94
2	0,230	36	4,14	70	8,06
3	0,345	37	4,26	71	8,17
4	0,461	38	4,37	72	8,29
5	0,576	39	4,49	73	8,40
6	0,691	40	4,61	74	8,52
7	0,806	41	4,72	75	8,63
8	0,921	42	4,84	76	8,75
9	1,04	43	4,95	77	8,87
10	1,15	44	5,07	78	8,98
11	1,27	45	5,18	79	9,10
12	1,38	46	5,30	80	9,21
13	1,50	47	5,41	81	9,33
14	1,61	48	5,53	82	9,44
15	1,73	49	5,64	83	9,56
16	1,84	50	5,76	84	9,67
17	1,96	51	5,87	85	9,79
18	2,07	52	5,99	86	9,90
19	2,19	53	6,10	87	10,0
20	2,30	54	6,22	88	10,1
21	2,42	55	6,33	89	10,2
22	2,53	56	6,45	90	10,4

дВ	Нп	дВ	Нп	дВ	Нп
23	2,65	57	6,56	91	10,5
24	2,76	58	6,68	92	10,6
25	2,88	59	6,79	93	10,7
26	2,99	60	6,91	94	10,8
27	3,11	61	7,02	95	10,9
28	3,22	62	7,14	96	11,1
29	3,34	63	7,25	97	11,2
30	3,45	64	7,37	98	11,3
31	3,57	65	7,48	99	11,4
32	3,68	66	7,60	100	11,5
33	3,80	67	7,71	110	12,7
34	3,91	68	7,83	120	13,8

### Приложение 8. Пересчет степеней числа 2 в децибелы

Степень числа 2	Значение	Децибелы [дВ]
0	1	0
1	2	6,02
2	4	12,04
3	8	18,06
4	16	24,08
5	32	30,10
6	64	36,12
7	128	42,14
8	256	48,16
9	512	54,19
10	1024	60,21
11	2 048	66,23
12	4 096	72,25
13	8 192	78,27
14	16 384	84,29
15	32 768	90,31
16	65 536	96,33
17	131 072	102,35
18	262 144	108,37
19	524 288	114,39
20	1 048 576	120,41
21	2 097 152	126,43
22	4 194 304	132,45
23	8 388 608	138,47
24	16 777 216	144,49
25	33 554 432	150,51
26	67 103 364	156,54
27	134 217 728	162,56
28	268 435 456	168,58
29	536 870 912	174,60
30	1 073 741 824	180,62
31	2 147 483 648	186,64
32	4 294 967 296	192,66

## Приложение 9. Дополнительные сведения по акустике

### 9.1. Аналогии между электрическими и акустическими параметрами

Ниже приводятся параметры электрических величин и их аналогии для акустики.

Электрический параметр	Акустический параметр
Электрическая мощность $P$	Интенсивность звука $J$
Напряжение $U$	Звуковое давление $\Delta P_{\text{зв}}$
Электрический ток $I$	Колебательная скорость $v$
Электрическое сопротивление $R$	Удельное акустическое сопротивление $\rho_c$
$I = U/R$	$\nu = \Delta P_{\text{зв}}/\rho_c$
$P = UI$	$J = \Delta P_{\text{зв}} v$
$P = U^2/R$	$J = \Delta P_{\text{зв}}^2/\rho_c$
$P = I^2 R$	$J = v^2 \rho_c$

Как следует из этой таблицы, аналогом электрической мощности являются акустическая мощность и интенсивность звука; аналогом напряжения служит звуковое давление; электрический ток соответствует колебательной скорости, а электрическое сопротивление — удельному акустическому сопротивлению [2, 11]. По аналогии с законом Ома для электрической цепи можно говорить об акустическом законе Ома. Следовательно, все, что рассматривалось выше (в основном тексте) о преобразовании в децибелы электрических величин, в равной мере относится и к акустическим явлениям.

### 9.2. Суммарный уровень звука от нескольких источников звука

Если имеется  $n$  несколько одинаковых источников звука с уровнем каждого  $p_{\text{зв}i}$  то их суммарный уровень будет

$$p_{\text{зв}} = p_{\text{зв}\Sigma} = p_{\text{зв}i} + 10 \lg n, \text{ дБ.}$$

Если уровень интенсивности одного источника звука превышает уровни остальных на 8...10 дБ и более, можно учитывать только один этот источник, а действием остальных пренебречь.

### 9.3. Стандартные кривые равной громкости чистых тонов при прослушивании в условиях свободного звукового поля

*Примечания:*

1. График порога слышимости изображен пунктирной линией.

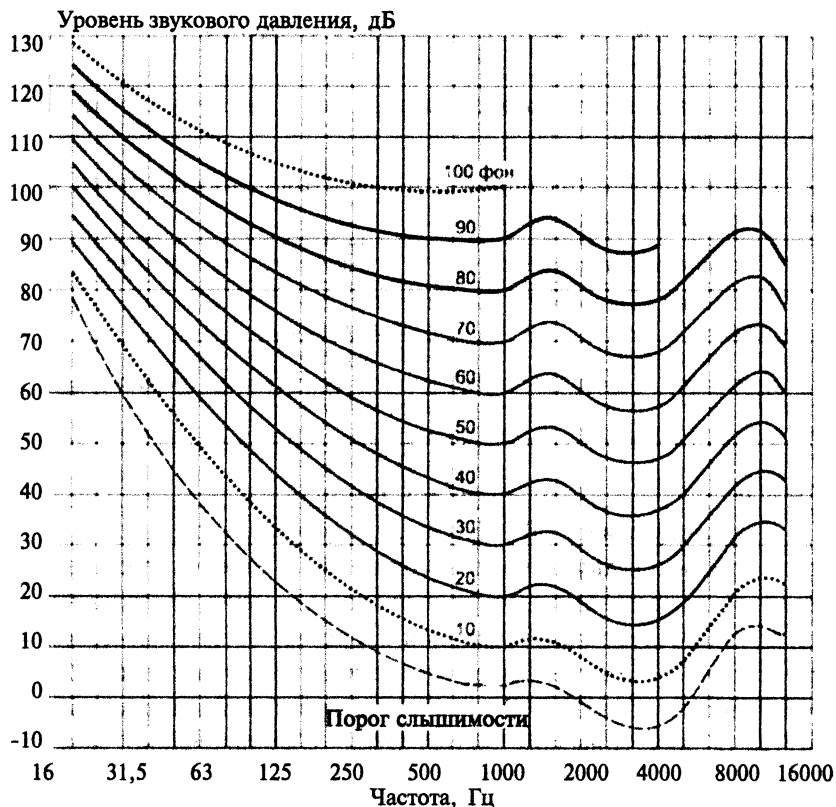


Рис. 16. Стандартные кривые равной громкости

2. Кривая с уровнем громкости 10 фон изображена точками, так как недостаточно данных в интервале от порога слышимости до 20 фон. Кривая с уровнем громкости 100 фон также изображена точками, так как для ее построения имеются данные только одной исследовательской организации.

3. Кривые равной громкости чистых тонов [18] определялись при бинауральном прослушивании в свободном звуковом поле и фронтальном падении звука на испытуемого.

#### 9.4. Определение величины уровня звукового шума с помощью шумомеров

Звуковым шумом считается не несущий полезной информации или случайный звук, мешающий окружающим либо причиняющий им значительные неудобства. Один и тот же звук в зави-

симости от ситуации может оказаться как шумом, так и информационным сигналом или даже музыкой. Например, внезапно сработавшая ночью автомобильная сигнализация для владельца — полезная информация, но для остальных — шум, а громкий радостный детский смех звучит «музыкой» для родителей, но не для живущих по соседству.

Для измерения шумовых характеристик применяются специальные приборы, называемые шумомерами. Шумомеры позволяют определять как общие уровни интенсивностей звука при измерениях с линейной частотной характеристикой, так и уровни громкости звука при измерениях с частотными характеристиками, сходными с характеристиками человеческого уха.

Результаты измерений шумомером с частотными характеристиками, сходными с характеристиками человеческого уха (класса А) позволили установить следующие суммарные уровни звука: жилые помещения — 30 дБ, аудитории и классы учебных заведений — 40 дБ, территории жилой застройки и площадки отдыха — 45 дБ, рабочие помещения административных зданий — 50 дБ.

В зависимости от спектрального состава шума ориентировочная норма предельно допустимых уровней, дБ, определена значениями, приведенными ниже.

Диапазон частот шума	Предельно допустимые уровни (дБ)
Высокочастотный от 800 Гц и выше ....	75...85
Среднечастотный 300...800 Гц .....	85...90
Низкочастотный ниже 300 Гц .....	90...100

При отсутствии шумомера ориентировочную оценку уровней громкости различных шумов можно проводить с помощью данных, приводимых в таблице 5 основного текста.

#### **Приложение 10. Дополнение к параметрам канала тональной частоты и типовых сетевых трактов, где используется единица децибел**

Параметры и характеристики канала тональной частоты (ТЧ) и типовых сетевых трактов нормированы государственными стандартами, которые, подобно тому, как это отмечалось в основном тексте, можно разбить на несколько групп: параметры входа и выхода канала и тракта; параметры и характеристики

остаточного затухания; параметры и характеристики связанные с изменением фаз передаваемых сигналов; параметры, определяющие уровень помех [2, 10].

Параметры входа и выхода канала или тракта определяют степень согласованности входного и выходного сопротивлений с сопротивлениями внешних цепей; внутренним сопротивлением источника передаваемых сигналов и сопротивлением нагрузки тракта. Допустимое отклонение входного и выходного сопротивлений от номинального  $R_0$  определяют, нормируя значение коэффициента отражения

$$\delta \geq \left| \frac{\bar{Z}_{\text{тр}} - R_0}{\bar{Z}_{\text{тр}} + R_0} \right|$$

или затухания несогласованности

$$A_\delta \leq -20 \lg \delta \text{ дБ},$$

где  $\bar{Z}_{\text{тр}}$  — полное входное или выходное сопротивление данного канала или тракта.

Для канала ТЧ и сетевых трактов нормы на уровни сигналов на входе и выходе, а так же остаточное затухание установлены в децибелах. Так для канала ТЧ уровень входного сигнала  $p_{\text{м0вх}} \equiv L_{\text{1вх}} = -13 \text{ дБ0}$ , а уровень сигнала на выходе  $p_{\text{м0вых}} \equiv L_{\text{1вых}} = +4 \text{ дБ0}$ , остаточное затухание  $A_k = -17 \text{ дБ}$  (т.е. имеет место усиление сигнала). Входные и выходные уровни первичного, вторичного и третичного трактов равны соответственно  $p_{\text{м0вх}} \equiv L_{\text{1вх}} = -36 \text{ дБ}$  и  $p_{\text{м0вых}} \equiv L_{\text{1вых}} = -23 \text{ дБ0}$ , а остаточное затухание  $A_k = -13 \text{ дБ}$ . (Замечание: знак тождества в обозначениях уровней сигнала показывает равнозначность возможного применения указанных вариантов обозначений.)

В децибелах также нормированы допустимые *уровни шума*. Уровни шума в каналах связи могут оцениваться в двух видах: по невзвешенному (интегральному) напряжению (мощности) шума на выходе канала и по взвешенному (псифометрическому) напряжению (мощности) шума.

Невзвешанная величина шума определяется действующим значением напряжения  $U_{\text{ш.д}}$  (мощности  $P_{\text{ш}}$ ) шума в полосе канала.

Взвешенная величина шума определяется с помощью изме-

рителей — псофометров, в которых используются специальные псофометрические (взвешивающие) фильтры и квадратичные выпрямители измеряемого напряжению  $U_{\text{псоф}}$  (мощности  $P_{\text{псоф}}$ ) шума, соответствующие особенностям восприятия звука ухом человека с учетом зависимостей, приводимых на рис. 16.

Если шум представляется или аппроксимируется «белым шумом» (т. е. имеющим сплошной спектр с равномерным распределением в полосе частот канала), то пересчет величины «невзвешенного» шума во «взвешенный» может осуществляться с помощью псофометрических (весовых) коэффициентов  $K_{\text{псоф}}(f)$ , рассчитанных для различных частот  $f$  полосы пропускания канала. Пересчет действующих значений в псофометрические осуществляется для отдельных частотных составляющих напряжений помех  $U_{\text{ш.д}f}$ , т. е.  $U_{\text{псоф}f} = K_{\text{псоф}}(f)U_{\text{ш.д}f}$ , по которым определяются суммарная величина (по мощности) псофометрического напряжения  $U_{\text{псоф}}$  и псофометрическая мощность  $P_{\text{псоф}}$ .

По этим величинам определяются уровни помех (шумов) относительно величины сигнала, которые оцениваются в требуемых точках канала и особенно удобных для расчетов в точках нулевого относительного уровня (ТНОУ)  $P_{\text{с.ТНОУ}}$  в виде

$$p_{\text{шом}} \equiv L_{\text{шом}} = 10 \lg(P_{\text{ш}}/P_{\text{с.ТНОУ}}), \text{ дБом}$$

или

$$p_{\text{псоф.ом}} \equiv L_{\text{псоф.ом}} = 10 \lg(P_{\text{псоф}}/P_{\text{с.ТНОУ}}), \text{ дБом.}$$

Подобным образом определяются уровни для напряжений шумов.

Эти величины в итоге используются для определения помехозащищенности передачи сигналов. (Примеры такого вида расчетов частично рассматриваются в разделе 6.)

Допустимые нормы этих величин приводятся в Международных рекомендательных документах и соответствующих ГОСТах. В качестве примера, учитывая указанную выше взаимосвязь «невзвешенного» и «взвешенного» шума и возможность пересчета одного в другой, для оценки требований к возможному уровню шума в канале ТЧ представим величины, определяющие допустимый уровень «невзвешенного» шума: относительный уровень мощности шума, определяемый по среднему за за-



данный период времени (например, за 1 час измерений) напряжению «невзвешенного» шума для простого канала ТЧ эталонной цепи, протяженностью 2500 км, должен удовлетворять условию  $p_{\text{шом}} \leq 46$  дБом, или его мощность не должна превышать величину 25000 пВт0 в точке нулевого относительного уровня.

При протяженности канала ТЧ, не равной 2500 км, допустимую мощность шумов определяется из суммы двух слагаемых: мощности шумов линейного тракта и мощности «невзвешенного» шума, вносимого оборудованием преобразования оконечных станций.

С помощью децибелов, особенно в многоканальных системах, также оцениваются влияния на передачу сигналов других помех типа: переходные разговоры, переходное влияние между каналами, паразитная модуляция и др. Оценка дается с помощью защищенности канала ТЧ от этих помех, которая может определяться по формуле

$$A_{\text{пз}} = 20 \lg(U_c/U_{\text{п}}), \text{ дБон},$$

где  $U_c$  — значение напряжения основного сигнала в заданной точке канала;  $U_{\text{п}}$  — значение напряжения помехи в той же точке.

### Приложение 11. Оценка параметров кабелей для реализации каналов связи

В разделе 6 рассматривается пример расчета характеристик использования волоконно-оптического кабеля для реализации канала связи. Несмотря на широкое внедрение таких кабелей, металлические кабели также сохраняют достаточно широкую востребованность, и задача по оценке их параметров остается актуальной. Среди таких параметров находится *затухание несогласованности*. Как известно, нормальная передача сигнала по кабелю требует согласование сопротивлений источников и приемников сигнала с волновым сопротивлением кабеля.

*Затухание несогласованности* двух сопротивлений  $Z_1$  и  $Z_2$  определяется в децибелах по формуле

$$A_{\text{нес}} = 20 \lg \left| \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 - Z_2} \right|,$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  — сопротивления, несогласованность которых измеряется.

Другим немаловажным параметром, в значительной степени определяющим подверженность телефонной линии помехам, является *симметричность цепи относительно земли*. Асимметрия цепи для переменного тока определяется неравенством полного сопротивления проводов относительно земли. Величина асимметрии переменному току определяется по соотношению

$$\xi = \frac{|Z_1 - Z_2|}{|(Z_1 + Z_2)/2|} \cdot 100, \%,$$

где  $Z_1$  — полное сопротивление первого провода относительно земли;  $Z_2$  — полное сопротивление второго провода относительно земли.

Для оценки величины асимметрии также широко используют понятие *затухание асимметрии*, выраженное в логарифмическом виде:

$$A_\xi = 20 \lg \frac{1}{\xi} = 20 \lg \left| \frac{Z_1 + Z_2}{2(Z_1 - Z_2)} \right|, \text{ дБ.}$$

Если цепь абсолютно симметрична относительно земли, то  $Z_1 = Z_2$  и  $A_\xi = \infty$ .

Для кабельных линий затухание асимметрии на частоте 800 Гц в канале ТЧ должно быть не менее 60...65 дБ, а для канала вещания не менее 80...82 дБ на частоте 5000 Гц.

### Приложение 12. Амплитудно-частотные характеристики в логарифмическом масштабе с использованием децибелов

В разделе 8 определяются понятия амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и их применения для оценки различных устройств, где АЧХ — зависимость коэффициента передачи от частоты  $K(f) = U_{\text{вых}}(f)/U_{\text{вх}}(f)$ , графики которых были представлены в линейном масштабе. Однако в ряде случаев, причем нередко встречаемых, такие характеристики практически полезно представлять в логарифмическом масштабе, в котором указываются значения на осях координат. Пример такой АЧХ для фильтра высоких частот (ФВЧ) [11] представлен на рис. 17. По оси ординат отложены значения  $K$  в децибелах относительно максимального либо среднего его значения АЧХ, а по оси абсцисс — значения частот в соотношении с частотой  $f_0$  для значения  $K = -3$  дБ. Выбор такого  $K$  для  $f_0$  объясняется типовым

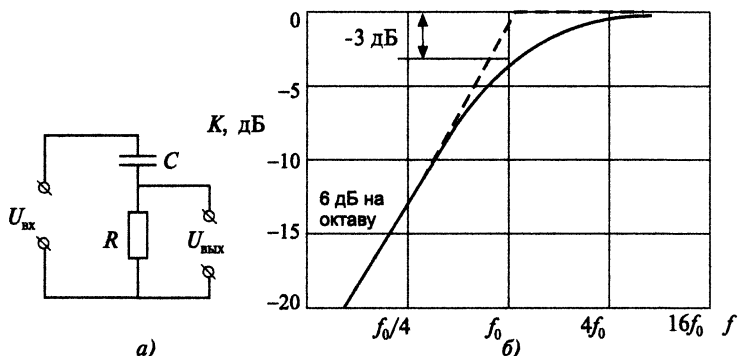


Рис. 17. ФВЧ (а), АЧХ ФВЧ (б)

значением ослабления мощности фильтруемого сигнала (см. раздел 8).

Отрезок оси частот, характеризующий рост частоты в десять раз, называют *декадой*, двукратному отношению частот соответствует *октава*. На рис. 17 отмечено, что для приводимой логарифмической АЧХ изменения (наклона) характеристики (ее фронта) соответствует 6 дБ на октаву. [Иногда применяется эквивалентное обозначение величин для декады в виде дБ/дек. Например, для 20 дБ/дек изменению частоты в 10 раз (на декаду) соответствует изменение коэффициента передачи в 10 раз (т. е. на 20 дБ по напряжению).]

Используя величину наклона характеристики к оси абсцисс (или как говорят крутизну), которая для рассматриваемого примера равна 6 дБ/окт, можно построить *асимптотическую логарифмическую АЧХ*. Аппроксимируя кривую для участка с наклоном 6 дБ/окт как прямую (отрезок) до точки ( $f = f_0$ ,  $K = -3$  дБ), где она переходит (с изломом) в прямую, параллельную оси абсцисс для  $K = 0$  дБ. Вид такой асимптотической логарифмической АЧХ показан на рис. 17 пунктирной линией. Из рисунка видно, что наибольшее расхождение в обоих представленных графиках имеет на участке около «сопрягающей» частоты. Максимальная ошибка, которая при этом вносится, равна -3 дБ. При частоте отличной в одну октаву от частоты сопряжения отклонение асимптотической характеристики от реальной (точной)  $\approx 1$  дБ, а за пределами  $\pm 2$  октавы от частоты сопряжения обе характеристики, точная и асимптотическая, практически совпадают.

Частота, при которой коэффициент передачи уменьшается на  $-3$  дБ, обычно условно считают полосой пропускания различных частотно-зависимых устройств. Для фильтров эта частота совпадает с частотой среза.

На основе асимптотической логарифмической АЧХ (ее данных) можно в достаточно хорошем приближении восстановить реальную характеристику. Для этого, используя значения крутизны (дБ/окт), координаты точки для  $f = f_0$  со значением  $K = -3$  дБ, относительные значения частоты, для которых соответствует значение  $K = -1$  дБ (дополнительно требуемая для построения величина частоты), строится отрезок прямой линии для заданной крутизны до точки для  $K = -3$  дБ, затем эта точка через точку для  $K = -1$  дБ соединяется плавной кривой асимптотически приближаясь к плоской вершине (к прямой параллельной оси абсцисс) для  $K = 0$  дБ.

Удобство использования асимптотической логарифмической АЧХ можно отметить для оценок устройств, содержащих несколько частотно зависимых каскадов, при определении для них сквозной частотной характеристики. Сквозная логарифмическая АЧХ будет определяться алгебраической суммой частотных характеристик отдельных каскадов. Так, при последовательном включении двух схем с их частотными характеристиками вида, показанного на рис. 17, получим для сквозной логарифмической АЧХ крутизны фронта  $6 \cdot 2 = 12$  дБ/окт ( $20 \cdot 2 = 40$  дБ/дек), трех —  $18$  дБ/окт ( $60$  дБ/дек).

Рассмотренные примеры касались в основном логарифмических АЧХ для ФВЧ. На практике полезно иметь представления о виде таких частотных характеристик для устройств с ослаблением (фильтрацией) сигнала как в области низких, так и высоких частот, т. е. с некоторой заданной полосой частот пропускания. Такие АЧХ могут определять частотные свойства не только каких-либо разного рода четырехполюсников (полосовых фильтров, усилителей и т. п.), но и, например, всего канала связи или его отдельных участков. Пример вида такой асимптотической логарифмической АЧХ представлен на рис. 18, где указаны относительные нижняя частота  $f_n/f$  и верхняя частота  $f_v/f$ , определяющие полосу пропускания, и условные значения крутизны фронтов характеристики.

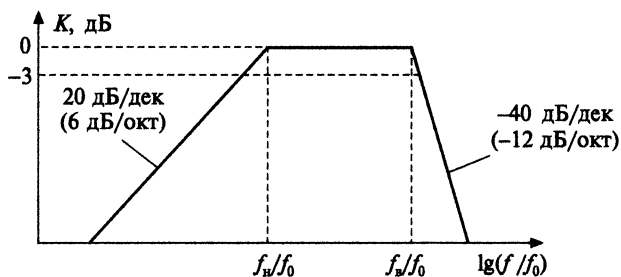


Рис. 18. Пример вида асимптотической логарифмической АЧХ с полосой пропускания

### Приложение 13. Децибелы при определении коэффициента (фактора) шума радиоприемных устройств и усилителей

В разделах 4 и 6 рассматривалась оценка помехоустойчивости и помехозащищенности через отношение сигнал/помеха (шум). Для подобной оценки также может использоваться величина уровня шума относительно величины сигнала (т.е. обратная величина отношения сигнал/шум)

$$p_{ш/см} = 10 \lg(P_{ш}/P_c), \text{ дБм или } p_{ш/сн} = 20 \lg(U_{ш}/U_c), \text{ дБн,}$$

где  $P_c$  и  $U_c$  — соответственно мощность и напряжение сигнала;  $P_{ш}$  и  $U_{ш}$  — соответственно мощность и напряжение шума.

Очевидно, что значения этих уровней для традиционных способов передачи должны быть меньше нуля (например,  $p_{ш/см} = -20$  дБм).

Подобным образом осуществляется оценка «уровня фона», который возникает в аппаратуре из-за возможных наводок и недостаточной фильтрации питающего ее источника при формировании им постоянного напряжения из сети переменного тока (как правило, частота фона может составлять 50, 100, 150 и 200 Гц). Т.е. для такой оценки уровня фона можно записать

$$p_{ф/см} = 10 \lg(P_{ф}/P_c), \text{ дБм или } p_{ф/сн} = 20 \lg(U_{ф}/U_c), \text{ дБн,}$$

где  $P_c$  и  $U_c$  — то же, что для вышеприведенной формулы;  $P_{ф}$  и  $U_{ф}$  — соответственно мощность и напряжение фона.

В качестве примера можно привести значения  $p_{ф/сн}$ , которые определяются требованиями, например, к звуковоспроизводящей аппаратуре различных классов:  $-50$ ,  $-46$ ,  $-40$  дБн.

Другим немаловажным параметром оценки шумов является *коэффициент (фактор) шума*  $F_{\text{ш}}$ . С помощью него учитываются шумы, вносимые аппаратурой, через которую проходят (обрабатываются) сигналы. Этот коэффициент описывает уменьшение соотношения «сигнал/шум» по мере прохождения сигнала через какие-либо устройства, например через приемное устройство или его отдельный каскад (усилитель, смеситель).

Факт такого изменения величины «сигнал/шум» определяется «фактором шума» (в ряде случаев, называемым *коэффициентом шума*) в виде

$$F_{\text{ш}} = (P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}/(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вых}},$$

где  $(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}$  — соотношение мощностей «сигнал/шум» на входе устройства;  $(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вых}}$  — соотношение мощностей «сигнал/шум» на выходе устройства.

Поскольку все электронные устройства «шумят» и, соответственно, добавляют некоторое количество шума (в том числе наводки, фон) к сигналу, величина  $F_{\text{ш}}$  всегда больше единицы.

Хотя величина  $F_{\text{ш}}$  исторически называлась коэффициентом шума, современный термин «*коэффициент шума*» обычно подразумевает логарифмический масштаб величины  $F_{\text{ш}}$ , измеряемый в децибелах и равный

$$F_{\text{ш дБ}} = 10 \lg F_{\text{ш}} = 10 \lg [(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}/(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вых}}], \text{ дБм.}$$

(В зарубежной специальной литературе, публикуемой ведущими производителями измерителей, коэффициент шума  $F_{\text{ш дБ}}$  обозначается как  $NF$ .)

Необходимо учитывать, что при прохождении сигналов через усилитель наряду с усилением сигналов не только добавляются шумы, но и усиливаются шумы, которые имели место на входе усилителя. При коэффициенте усиления по мощности  $K_{\text{м}}$  коэффициент шума может определяться как

$$\begin{aligned} F_{\text{ш дБ}} &= 10 \lg \left[ \frac{(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}}{(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вых}}} \right] = 10 \lg \left[ \frac{(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}}{K_{\text{м}}(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вх}} + P_{\text{ш ус}}} \right] = \\ &= 10 \lg \left[ \frac{1/K_{\text{м}}}{P_{\text{ш вых}}/P_{\text{ш вх}}} \right], \end{aligned}$$

где  $P_{\text{ш ус}}$  — мощность шумов, добавляемых усилителем,  $P_{\text{ш вых}}$  —

мощность шумов, измеренная на выходе, в которую входит  $P_{ш\text{ ус}}$ ;  $P_{ш\text{ вх}}$  — мощность шумов на входе или известная, или рассчитанная, или измеренная.

Если усилитель состоит из нескольких каскадов, со своими значениями  $F_{ш\text{ дБ}}$  и  $K_m$ , то может производиться покаскадная оценка  $F_{ш\text{ дБ}}$  с последующим определением этой величины для всего усилителя.

Учитывая возможность такой покаскадной оценки и на основании представленного выражения для определения  $F_{ш\text{ дБ}}$  усилителей, можно сделать вывод. Поскольку усиление входных шумов и «добавок» шумов, особенно от входных каскадов усилителя, которые последующими каскадами дополнительно усиливаются, то с целью уменьшения шумов целесообразно делать входные каскады по возможности малошумящими (с меньшими значениями  $F_{ш\text{ дБ}}$ ) и с большим коэффициентом усиления.

Для представления о шумовых характеристиках одного из основных элементов усилителей — транзисторов приведем примеры значений их коэффициентов шума  $F_{ш\text{ дБ}}$  — для малошумящих транзисторов: 1,5...4 дБм для транзисторов массового применения: 5...15 дБм.

#### Приложение 14. Децибелы для оценки параметров систем подвижной наземной связи

Кроме указанных в разделе 6 уровней излучаемых базовыми станциями (ВС) радиосигналов, выраженных в децибелах для различного качества их приема мобильными (абонентскими) станциями (АС), децибелы также применяются для множества других параметров подвижной наземной связи, и в том числе наиболее популярной - сотовой связи. Прежде чем давать оценку таким параметрам отметим ряд особенностей работы сотовой связи (СС).

Современные системы СС позволяют адаптивно изменять уровни радиосигналов. Величина уровней радиосигналов, передаваемых ВС, может автоматически изменяться в направлении к АС в зависимости от трафика ВС и уровня принимаемого радиосигнала от АС. Например, при уменьшении сигнала от АС уровень сигналов от ВС может увеличиваться. Это может достигаться, например, за счет автоматической переориентации диаграммы направленности «смарт» («умных») антенн ВС. Подобным

образом ведут себя и АС — при слабом сигнале БС, уровень сигнала АС увеличивается, только не за счет изменения параметров ее антенны, а за счет мощности радиопередатчика в АС. Вот поэтому, давая оценку уровням радиосигналов, передаваемых АС, можно говорить не о конкретных величинах, а об интервалах их значений. В настоящее время широко используются системы 2G (GSM), 3G и 4G (LTE) поколений их развития и требуемые величины уровней радиосигналов от АС для каждой из этих систем различаются. Обобщенно для всех этих видов систем (с частотами из диапазона 900...2700 МГц) можно привести примерные интервалы адаптивно меняющихся значений уровней радиосигналов, передаваемых АС: от  $-10$  дБм ( $0,1$  мВт) до  $33$  дБм ( $2$  Вт). Заметим, одной из задач развития сотовой связи — это уменьшение требуемой мощности АС (из-за стремления к уменьшению влияния радиоизлучения на человека-пользователя АС и снижению потребления источника питания АС). Поэтому указанные наибольшие значения уровней сигналов относятся к ранним системам 2G.

Помимо использования децибелов для оценки уровней радиосигналов в СС они также используются при расчетах трактов передачи сигналов от радиопередатчика до его антенны и при приеме — от антенны до радиоприемного устройства БС, как это показано в разделе 8. Децибелами также классифицируются мощности радиопередатчиков БС, например для GSM1800 (диапазона  $1800$  МГц) 1-й класс соответствует  $1$  Вт ( $30$  дБм), 3-й класс —  $4$  Вт ( $36$  дБм) и т. п. Они также используются для оценки и расчета допустимых величин ширины полосы радиочастот и внеполосных излучений для различных видов модуляции. В качестве примера ниже приводятся требования к параметрам спектра для радиоэлектронных средств стандартов GSM:

Ширина спектра, кГц	Ослабление
200 .....	$-3$ дБ
400 .....	$-30$ дБ
800 .....	$-60$ дБ

Практически уже общепринятым стало использование децибелов для отношения сигнал/помеха (шум) при определении вероятности ошибки приема радиосигналов.

Все выше перечисленное есть частица того, где в радиосвязи,



радиотелевещании и электрической связи применяется единица децибел, что свидетельствует об актуальности применения таких единиц в современных системах различного вида связи.

# Оглавление

Предисловие .....	3
1. Классификация и характеристики величины сигналов .....	3
2. Понятия относительной величины, уровня и единицы «децибел» .....	10
3. Уровни сигналов, выраженные в децибелах .....	16
4. Основные уровневые характеристики передачи сигналов по каналам связи .....	23
5. Абсолютные уровни .....	29
6. Относительный уровень и особенности его применения в технике связи .....	33
7. Измерительный уровень .....	45
8. Примеры применения децибелов .....	47
9. Обобщение вариантов обозначения уровней и их децибелов .....	64
10. Децибелы и неперы .....	74
Заключение .....	77
Литература .....	79
Приложение 1. Пересчет децибелов в отношения мощностей, токов и напряжений .....	81
Приложение 2. Иллюстрация изменения мощности сигнала для типовых значений децибел .....	85
Приложение 3. Номограммы перевода децибелов в проценты отношений .....	86
Приложение 4. Пересчет децибелов (абсолютных уровней) в единицы напряжения, тока и мощности при стандартных нулевом уровне 1 мВт и сопротивлении нагрузки 600 Ом ...	86
Приложение 5. Пересчет неперов в отношения напряжений, токов и мощностей (неперы положительные, отношения больше единицы) .....	87
Приложение 6. Пересчет неперов в децибелы .....	88

Приложение 7. Пересчет децибелов в неперы .....	89
Приложение 8. Пересчет степеней числа 2 в децибелы .....	90
Приложение 9. Дополнительные сведения по акустике .....	91
Приложение 10. Дополнение к параметрам канала тональ- ной частоты и типовых сетевых трактов, где используется единица децибел .....	93
Приложение 11. Оценка параметров кабелей для реализации каналов связи .....	96
Приложение 12. Амплитудно-частотные характеристики в логарифмическом масштабе с использованием децибелов ...	97
Приложение 13. Децибелы при определении коэффициента (фактора) шума радиоприемных устройств и усилителей ...	100
Приложение 14. Децибелы для оценки параметров систем подвижной наземной связи .....	102



### **ТУЛЯКОВ ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ**

доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, действительный член Международной академии информатизации.

Удостоен звания «МАСТЕР СВЯЗИ».

Автор более ста семидесяти научных и учебно-методических работ, одной монографии и трех патентов. Основное направление научной деятельности – исследования в области подвижной наземной радиосвязи.

Рассмотрены понятия абсолютных величин, относительных и абсолютных уровней, на основе которых определяется единица их оценки – децибел. Особое внимание уделено применению децибелов в области инфокоммуникаций, в том числе в электро-связи и акустике, и обоснованию принципов их обозначений (индексации). Материал изложен в доступной для понимания форме с пояснениями в виде примеров значений и расчетов по приводимым соотношениям. Приведены таблицы наиболее полезных в практике значений децибелов и их соотношений с другими часто используемыми величинами.

Для широкого круга читателей, оперирующих понятием децибела, будет полезно в качестве учебного пособия для учащихся колледжей и студентов вузов, обучающихся по соответствующим направлениям подготовки.

Сайт издательства:

**www.techbook.ru**

ISBN 978-5-9912-0810-9



9 785991 208109