

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7
Раздел 1. Теория: кратко о главном	9
1.1. Понятие уровня сигнала	9
1.2. Понятие эталонного сигнала	11
1.3. Соотношение между уровнями по мощности и напряжению	12
1.4. Источник эталонного сигнала — эталонный генератор уровня	13
1.5. Согласованная и несогласованная схема соединения цепей	14
1.6. Абсолютные уровни	16
1.7. Относительные уровни	17
1.8. Измерительные уровни	17
1.9. Диаграмма уровней	19
1.10. Часто задаваемые вопросы	19
1.10.1. Почему сопротивление эталонного генератора равно 600 Ом?	19
1.10.2. Почему выбрана эталонная мощность, равная 1 мВт?	20
1.10.3. Есть ли другие значения мощности, напряжения или тока, относительно которых вычисляются уровни сигналов?	20
1.10.4. Используются ли в электросвязи другие основания логарифмов?	21
1.10.5. Почему в технике широко используется логарифмическая мера	22
Общие соображения	23
Версия 1 — «Физиологическая»	24
Версия 2 — «Высшей математики».	24
Версия 3 — «Элементарной математики» или «Здравого смысла».	25
Версия 4 — «Физическая»	25
1.10.6. Как используется дополнительная информация в обозначениях дБ.	26



Контрольные вопросы и упражнения	26
Раздел 2. Практика: как вычислять уровни в уме?	28
2.1. Целые степени десяти	28
2.2. Децибелы целых чисел.	29
2.3. Обратный пересчет децибелов в разы.	30
2.4. Как можно трактовать результаты вычислений в дБ?	32
Контрольные вопросы и упражнения	33
Раздел 3. Лабораторный практикум: измерения уровней.	34
3.1. Общие замечания	34
3.2. Схема измерений.	34
Упражнение 1. Демонстрация абсолютных уровней на различных частотах	36
Упражнение 2. Демонстрация абсолютных уровней на различных нагрузках	38
Упражнение 3. Определение выходного сопротивления источника сигнала	47
Раздел 4. Прикладные аспекты: примеры использования логарифмической меры в электросвязи	49
4.1. Логарифмические шкалы	49
4.1.1. Логарифмический масштаб	49
4.1.2. Логарифмическая бумага.	51
4.1.3. Логарифмическая линейка	52
4.2. Диаграммы Боде	53
4.2.1. Основы подхода к построению диаграмм Боде.	53
4.2.2. Использование принципа построения диаграмм Боде для шаблонов технических требований	59
4.3. Типы шумов, их спектры и уровни мощности	62
4.3.1. Белый шум. Чему равен уровень мощности теплового шума?	62
4.3.2. Расчет шумов в каналах волоконно-оптических линий связи	65
4.3.3. Цветные шумы	67
4.4. Псофометрический уровень шума и псофометрический коэффициент.	70
4.5. Динамический диапазон	73
4.5.1. Что такое динамический диапазон сигнала и канала?	73

4.5.2. Сжатие и расширение динамического диапазона — компандирование	75
4.5.2.1. Назначение и пример	75
4.5.2.2. Количественные показатели	79
4.5.2.3. Оптимальная компрессия сигналов при ИКМ кодировании.	81
4.5.2.4. Принципы реализации компандирования	87
4.5.2.5. Примеры	91
4.6. Помехозащищенность = отношение сигнал / шум (помеха).	95
4.6.1. Определение защищенности сигнала	96
4.6.2. Оценивание коэффициента ошибок по степени защищенности	97
4.6.3. Оценивание продолжительности измерений коэффициента ошибок	98
4.6.4. Отношение сигнал/шум в одном оптическом канале.	101
4.6.5. Защищенность основного сигнала — dBc.	102
4.6.5.1. Отношение мощности несущего сигнала к общей мощности шумов.	103
4.6.5.2. Отношение мощности несущего сигнала к спектральной плотности шума (C/N)	104
4.6.5.3. Отношение мощности сигнала к фазовым шумам	104
4.6.6. Отношение энергии бит/шум = E_b/N_0	105
4.6.7. Коэффициент качества (добротности) антенны	106
4.7. Коэффициент шума усилителя приема	108
4.8. Абсолютный уровень электромагнитного поля	112
4.9. Коэффициент усиления антенны по мощности в дБ	112
4.10. Чему равен уровень мощности импульсной последовательности?	114
4.11. Логарифм в оценке пропускной способности канала	119
4.11.1. Практические примеры	120
4.11.2. Роль защищенности γ и полосы пропускания Δf в контексте пропускной способности канала	120
4.12. Затухание отражения	125
4.13. Акустика	126
4.14. Примеры построения диаграмм уровней	128



4.14.1. Диаграмма уровней стыка аналогового 4-проводного канала ТЧ	129
4.14.2. Диаграмма уровней транзитного соединения 4-проводного канала ТЧ	131
4.14.3. Диаграмма уровней волоконно-оптического тракта ВОЛС	132
4.15. Идентификация фазовых шумов в сигналах синхронизации	134
4.15.1. Основная модель сигнала частотной/тактовой синхронизации	135
4.15.2. Модели шумов в сигналах синхронизации	136
4.15.3. Примеры идентификации шумов	141
Контрольные вопросы и упражнения	144
Послесловие	147
Использованная и рекомендуемая литература	149
Рекомендации МСЭ-Т	151
Дополнение 1. Определение и свойства логарифма	153
Дополнение 2. Справочные данные: термины и обозначения	154
Дополнение 3. Десятичные кратные и дольные единицы размерностей	156
Дополнение 4. Пример варианта контрольного задания.	157
Алфавитный указатель	159
Используемые аббревиатуры	163
Список условных обозначений	167

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное пособие посвящено использованию логарифмов в технических приложениях, главным образом в электросвязи, и, в частности, единицам измерения уровней сигналов. Можно сказать, что «главный герой» пособия — это *децибел* (сокращенно дБ) — логарифмическая единица, используемая для выражения отношения двух величин. Чем же он интересен для инженеров?

В электросвязи децибел определяет отношение мощностей, а также отношения токов и напряжений. Практическая ценность децибела вытекает из его логарифмической природы, которая позволяет выразить огромный динамический диапазон мощностей, не используя чрезмерно большие или чрезвычайно малые числа. Логарифмическое представление позволяет заменить операции умножения и деления более простыми действиями сложения и вычитания. Размерность в дБ получают путём взятия логарифма от отношения двух величин. По существу, децибел стал основной единицей измерения, выражающей относительное усиление или ослабление сигнала, а также отношение между сигналами и шумом. Уже несколько десятилетий эти единицы измерения активно применяются инженерами во всем мире.

Среди связистов всегда считалось «хорошим тоном» легко оперировать понятиями уровней сигнала, выполняя «в уме» математические действия с децибелами. Причем здесь важен не столько точный расчет, сколько умение быстро, «на ходу» давать правильные оценки уровней сигнала.

Пособие состоит из 4 частей, условно названных «теория», «практика», «лабораторные работы» и «приложения». Сначала кратко изложены основные теоретические положения (только самые необходимые), затем на конкретных примерах показано, как можно легко и достаточно точно произвести необходимые вычисления. В «лабораторных работах» продемонстрировано, как выглядят сигналы и их уровни, а в «приложениях» приводятся различные примеры использования логарифмической меры в электросвязи при сравнении величин, а также при демонстрации и идентификации спектральных характеристик. В конце

пособия приведен список использованной и рекомендуемой литературы, в котором отдельно выделены нормативные документы Международного Союза Электросвязи — МСЭ-Т и МСЭ-R¹. Основная задача, которую ставили перед собой составители, — это показать читателю, что оперировать с единицами измерения уровней очень просто и удобно. Поэтому часть материала изложена в форме вопросов и ответов, большое внимание уделено практическим примерам. Пособие может использоваться при проведении практических и лабораторных занятий для студентов технических специальностей, опыт общения с которыми и стимулировал написание данной книжки.

¹По тексту при ссылке на эти документы указываются их сокращенные обозначения в квадратных скобках, например, для МСЭ-Т [G.100], [S39] (S — Supplement, т. е. дополнение к той или иной серии Рекомендаций) или [МСЭ-R V.574-4].

РАЗДЕЛ I

ТЕОРИЯ: КОРОТКО О ГЛАВНОМ

1.1. Понятие уровня сигнала

Чтобы охарактеризовать величины сигналов и помех, часто бывает удобно определить их относительно некоторой эталонной точки системы. После этого можно определить значения в любой другой точке относительно выбранной эталонной точки, если известна величина затухания или усиления между двумя точками.

Например, уровень моря является общепринятой эталонной, «нулевой» точкой при определении высот. Так, в СССР, а сейчас — в СНГ, за уровень моря принят так называемый «Балтийский футшток», установленный в Кронштадте. Определив высоты двух гор относительно уровня моря, мы можем сравнить эти высоты между собой, независимо от того, где расположены горы. Вершина горы в Колорадо, расположенная на высоте 3 700 м над уровнем моря, примерно на 1 100 метров ниже горы Монблан (4 809 м), возвышающейся над Женевским озером на границе между Францией и Италией, и на 1 639 метров выше горы Говерла, расположенной на границе Закарпатской и Ивано-Франковской областей Украины, высотой 2 061 м над уровнем моря. Самая высокая горная вершина России и Европы¹ — Эльбрус (5 642 м), расположенный на Кавказе, примерно на 833 метра выше горы Монблан.

Удобство использования только одинаковых мер, выраженных в логарифмической форме в технических описаниях, требованиях и результатах измерений, обусловило их широкое применение при обмене информацией на международном уровне.

¹ При условии проведения границы между Европой и Азией по Главному Кавказскому хребту.

Что такое децибел?

Во-первых — это число p^1 , полученное в результате логарифмирования по основанию 10 другого рационального числа P :

$$p = \log_{10} P.$$

Во-вторых — число P всегда характеризует отношение любых не равных нулю двух чисел $P = m/n$ — комплексных, целых, рациональных.

И, следовательно, **в-третьих**, p может быть положительным, отрицательным, целым или дробным числом или нулем (при $m = n \Rightarrow P = m/n = 1 \Rightarrow \log 1 = 0$).

В инженерной практике числа m и n обозначают числовые показатели физических величин, как правило, мощность или напряжение сигналов, звуковое давление, интенсивность излучения и т. д., то есть величины одной физической размерности, а их отношение, следовательно, — величина безразмерная.

Основная единица, используемая при измерениях уровней мощности в электросвязи, — это **децибел² (дБ)**, который происходит от исходной единицы — Бела, названного в честь изобретателя телефона А.Г. Белла.

Один **Бел** равен:

$$\text{Бел} = \lg (P_1 / P_2).$$

Бел — очень большая величина, поэтому на практике удобно использовать более мелкую единицу — децибел, который равен десятой части Бела:

$$p \text{ (дБ)} \cdot 10 = \text{Бел}$$

и определяется десятичным логарифмом отношения двух значений мощности:

$$p, \text{ дБ} = 10 \lg (P_1 / P_2), \quad (1.1)$$

где P_1 и P_2 — сравниваемые значения мощности.

Из выражения (1.1) можно видеть, что если $P_1 = P_2$, то отношение мощностей равно 1, а его логарифм, соответственно, ра-

¹Для обозначения уровней сигналов в русскоязычной литературе традиционно используется буква p (от немецкого regel), хотя иногда используют l (от английского level).

²Для обозначения десятичного логарифма в соответствии с Международными стандартами МЭК 60027-3 и ИСО 80000-2 используется символ **lg**.

вен 0 дБ; если $P_1 > P_2$, их отношение в дБ будет положительным, а если $P_1 < P_2$ — отрицательным.

В уровнях выражаются не только величины сигналов, но и их увеличение (усиление), затухание (ослабление), степень несогласованности источника и приемника сигнала (величина отражения) и многие другие характеристики прохождения сигналов в цепях передатчиков, линий и приемников.

Децибел может использоваться для выражения отношения двух величин поля, квадрат которых в линейных системах пропорционален мощности — напряжения, тока, звукового давления, электрического поля, скорости или плотности заряда. В этом случае для получения числового значения, аналогичного отношению по мощности, логарифм отношения величин поля умножается на коэффициент 20 в предположении, что полные сопротивления одинаковы.

1.2. Понятие эталонного сигнала

Идея «опорного» или эталонного сигнала [G.100], представленная аналоговым синусоидальным сигналом или его цифровым эквивалентом, оказалась очень полезной для наглядного представления передачи сигналов вообще. Часто вместо опорного или эталонного сигнала говорят о точке «нулевого» или абсолютного уровня¹. Величины мощности и напряжения относительно нулевого уровня обозначают как дБм0 и дБн0 (хотя на практике 0 часто опускают).

Если некоторое значение P_2 принять за точку отсчета — нулевую точку P_0 или, другими словами, принять эту величину за эталонное значение, то вычисленные по выражению (1.1) уровни называют уровнями в точке относительно нулевого уровня (ТОНУ).

В проводной связи в качестве эталонного — нулевого, значения (точки нулевого уровня) принята мощность **1 мВт**. Для представления уровня мощности в некоторой точке **относительно 1 мВт** используется обозначение **дБм** (иногда дБ/мВт). Один милливатт —

¹Аналогично тому, как при измерении температуры по Цельсию за «нуль» принята температура таяния льда, и все уровни температуры измеряются относительно этого значения.

это мощность, принятая за начало отсчета P_0 , с которой сравниваются другие значения мощности, для их выражения в дБм:

$$p = 10 \lg (P / P_0), \text{ дБм (иногда дБ/мВт)}, \quad (1.2)$$

где P — мощность в некоторой точке, где выполняются измерения или проводятся вычисления.

Из выражения (1.2) можно видеть, что уровню мощности 1 мВт соответствует величина 0 дБм, уровни мощности выше 1 мВт имеют положительные значения в дБм, а уровни ниже 1 мВт — отрицательные.

1.3. Соотношение между уровнями по мощности и напряжению

Аналогичным образом определяются уровни по напряжению¹ или току:

$$p_U = 20 \lg (U / U_0), \text{ дБн}, \quad (1.3)$$

где U — напряжение в некоторой точке системы передачи, а U_0 — величина, принятая за нулевой уровень напряжения. Следует помнить, что речь идет о среднеквадратическом (эффективном) значении напряжения на сопротивлении R .

Так как напряжение и мощность связаны простыми известными соотношениями, можно представить уровни по мощности и по напряжению эталонного сигнала «нулевого» уровня.

Используя выражение (1.2) и учитывая, что $P = U^2/R$ и $P_0 = U_0^2/R_0$, получим:

$$p_M = 10 \lg (P / P_0) = 10 \lg (U^2/R / U_0^2/R_0) = 10 \lg (U^2/U_0^2) - 10 \lg (R/R_0).$$

Принимая во внимание (1.3), имеем:

$$p_M = 20 \lg (U / U_0) - 10 \lg (R / R_0) = p_U - 10 \lg (R / R_0). \quad (1.4)$$

Обычно сопротивление элементов физических цепей имеет комплексное значение Z_0 , модуль которого $|Z_0(f)|$ изменяется с частотой, в этом случае из соотношения $P_0 = U_0^2/R_0$ получим:

$$U_0(f) = \sqrt{P_0 \cdot |Z_0(f)|}, \text{ В} \quad (1.5)$$

¹Если сказанное понятно, то ответьте, пожалуйста, на вопрос: о каком напряжении сигнала идет речь (эффективном, действующем, средневыпрямленном, среднеквадратическом)? Это постоянный или переменный ток?

Таким образом, можно видеть, что соотношение между уровнями напряжения и мощностью в различных точках цепи или тракта зависит от (комплексного) сопротивления в данной точке схемы и от частоты.

1.4. Источник эталонного сигнала — эталонный генератор уровня

Исторически сложилось так, что уровни передачи устанавливались для телефонных каналов тональной частоты (ТЧ), предназначенных для передачи речи.


Обычно для каналов тональной частоты в телефонии и системах передачи используется эталонный генератор с активным внутренним сопротивлением $|Z_0(f)| = R_0 = 600 \text{ Ом}$. В аналоговой части телефонных сетей (в канале ТЧ) опорный сигнал имеет частоту $F_0 = 1020^1 \text{ Гц}$. Мощность следует выразить в мВА, но традиционно МСЭ² использует обозначение мВт.

Используя выражение (1.5), находим величину напряжения U_0 , В на опорной частоте:

$$U_0(f = 1020 \text{ Гц}) = \sqrt{0,001 \cdot 600} = \sqrt{0,6} = 0,774597 = 0,775 \text{ В.}$$

Аналогично находим ток эталонного генератора: $I_0 = 1,29 \text{ мА}$. (Выполните вычисления самостоятельно).

Таким образом, эталонный генератор имеет следующие «эталонные» параметры:

	$\begin{aligned} P_0 &= 1 \text{ мВт}, \\ U_0 &= 0,775 \text{ В}, \\ I_0 &= 1,29 \text{ мА}, \\ R_0 &= 600 \text{ Ом}, \\ F_0 &= 1020 \text{ Гц}. \end{aligned}$
---	--

¹ До внедрения цифровых методов передачи в канале тональной частоты использовалась частота 800 Гц.

² МСЭ — Международный Союз Электросвязи, орган, координирующий работу международных сетей электросвязи.

Приведенные выше значения приняты за **нулевые или абсолютные** величины, относительно которых вычисляются «абсолютные» уровни. Осциллограмму эталонного сигнала «нулевого» уровня можно наблюдать на рис. 3.2. Следует отметить, что указанная опорная частота имеет значение только для канала ТЧ, а **в общем случае абсолютные уровни вычисляются на любой частоте сигнала** (см. рис. 3.4, 3.5).

Эквивалентная схема эталонного генератора представлена на рис. 1.1. Значения внутреннего сопротивления R_0 , напряжения U_0 , тока I_0 , мощности P_0 и частоты F_0 представлены выше. Как уже отмечалось, приведенное выше значение частоты верно только для канала ТЧ, в других случаях частота измерительного сигнала, а также входные сопротивления генераторов и звеньев цепи могут принимать другие значения. Рассмотрим эти случаи подробнее.

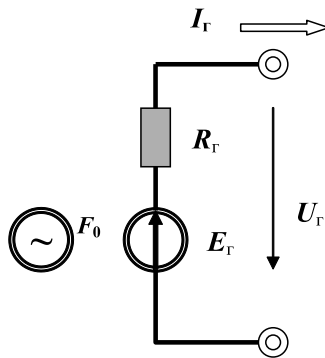


Рис. 1.1. Эквивалентная схема эталонной цепи генератора

1.5. Согласованная и несогласованная схема соединения цепей

На рис. 1.2 показано подключение генератора эталонного сигнала к нагрузке. Нетрудно показать, что максимальная мощность, передаваемая источником в нагрузку, достигается при $R_r = R_n$. Такой режим подключения называется «согласованным». В случае эталонного генератора $R_r = R_0 = R_n$ и как следует из (1.4), уровень по напряжению равен уровню по мощности: $p_U = p$.

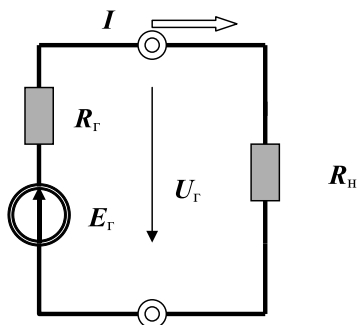


Рис. 1.2. Подключение эталонного генератора на нагрузку

При несогласованном подключении $R_G \neq R_n$, и в этом случае следует применить соотношение (1.4). Так, при $R_G = R_n$ отношение сопротивлений во втором члене в (1.4) равно 1, а логарифм, соответственно, равен 0 дБ. Если же $R_n > R_G$, то их отношение будет положительным, а уровень по напряжению будет больше уровня по мощности:

$$p_U = p_M + 10 \lg (R_n / R_G), \text{ при } R_n > R_G, \quad (1.4a)$$

а при $R_n < R_G$ отношение будет отрицательным, и уровень по напряжению будет меньше уровня по мощности:

$$p_U = p_M - 10 \lg (R_n / R_G), \text{ при } R_n < R_G. \quad (1.4б)$$

Задание: Определите э.д.с. генератора E_0 . (Ответ: $E_0 = 1,55 \text{ В}$.)



Выражение (1.4) следует применять с оговоркой. Например, если $R_n \rightarrow \infty$, то $U_G = E_0 = 2U_0$, где U_0 — напряжение на согласованной нагрузке при $R_G = R_n$. Из (1.3) получим $p_U = 20 \lg(2U_0/U_0) = 6 \text{ дБн}$, т. е. поправка равна 6 дБн (**напряжение возросло в 2 раза**), **но не больше!** Другими словами, если $R_n \gg R_G$, то напряжение на R_n увеличивается по сравнению с напряжением на согласованной нагрузке R_n , но не более чем в два раза.

Данное свойство широко используется на практике. Подробности приведены в разделе 1.9 и «Лабораторном практикуме».

1.6. Абсолютные уровни

Абсолютный уровень — это уровень мощности, напряжения или тока, вычисленный относительно значения мощности (напряжения или тока) эталонного генератора (см. 1.4), принятого за «нулевую — абсолютную» величину: 1 мВт (0,775 В или 1,29 мА). Обозначаются абсолютные уровни мощности и напряжения как **дБм(0)** и **дБн(0)** соответственно.

Заметим, что абсолютный уровень может рассчитываться как относительно 1 мВт, так и 1 Вт (подробней об этом будет сказано в подразделе 1.10.3). Международные обозначения абсолютных уровней приведены ниже:

- **dBW**: абсолютный уровень мощности, вычисленный относительно 1 Вт;
- **dBm**: абсолютный уровень мощности, вычисленный относительно 1 мВт;
- **dBu**: абсолютный уровень напряжения, вычисленный относительно 0,775 В;
- **dBV**: абсолютный уровень напряжения, вычисленный относительно 1 В.

Пример 1.1. Определим абсолютные уровни мощности в дБм и их разность для сигналов 10 мВт и 0,5 мВт.

Решение. Уровни мощности в дБм определяются подстановкой в формулу (1.2):

$$p = 10 \lg (10 \text{ мВт} / 1 \text{ мВт}) = 10 \text{ дБм0},$$

$$p = 10 \lg (0,5 \text{ мВт} / 1 \text{ мВт}) = -3 \text{ дБм0}.$$

Разность двух уровней мощности в дБ получаем из формулы (1.1):

$$\text{дБ} = 10 \lg (10 \text{ мВт} / 0,5 \text{ мВт}) = 13 \text{ дБ}$$

или

$$10 \text{ дБм} - (-3 \text{ дБм}) = 13 \text{ дБ}.$$

1.7. Относительные уровни

Относительный уровень используется для сравнения уровней разных точек электрических цепей, то есть это уровень в заданной точке «а» тракта или линии относительно какой-либо другой точки «b», принятой за исходную.

Относительный уровень равен разности абсолютных уровней заданной точки «а» и точки «b», принятой за исходную.

Международное обозначение — dBr.

Пример 1.2. Определим относительные уровни мощности в дБм для двух точек, в которых уровни сигналов 10 мВт (10 дБм0) и 0,5 мВт (−3 дБм0) (пример 1.1):

Решение. Относительные уровни мощности в дБ получаем из формулы (1.1):

$$\text{дБ} = 10 \lg (10 \text{ мВт} / 0,5 \text{ мВт}) = 13 \text{ дБ}$$

или

$$10 \text{ дБм} - (-3 \text{ дБм}) = 13 \text{ дБ}.$$

Пример 1.3. Относительный уровень точки 2 относительно точки 1 равен:

$$P_{2-1} = P_{M2} - P_{M1} = -42 \text{ дБм0} - (-30 \text{ дБм0}) = -12 \text{ дБм (или dBr)}.$$

Относительный уровень $P_{\text{вых}}$ относительно $P_{\text{вх}}$ равен минус 11 дБ (dBr).

1.8. Измерительные уровни

Измерительный уровень — это абсолютный уровень мощности или напряжения, рекомендованный для измерения параметров данной системы связи [1].

К измерительным уровням передачи относят уровни, «удобные» на практике при измерениях и вычислениях. В эксплуатационных условиях в основном используются измерительные уровни.

С измерительным уровнем связано понятие точки относительного измерительного уровня ТОИУ¹ В определении ТОИУ ис-

¹ТОИУ — точка относительного измерительного уровня, соответствует принятому в Америке понятию TLP — Transmission level point.