



# МИР математики

Н.Л. Бирюков, Н.Р. Триска

**Логарифмы  
в технических приложениях**

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2022

**УДК 519.662**

**ББК 22.141**

**Б64**

**Б64 Бирюков Н.Л., Триска Н.Р.**

**Логарифмы в технических приложениях**

**М.: ТЕХНОСФЕРА, 2022. – 172 с. – ISBN 978-5-94836-641-8**

Ключевые свойства логарифмов, заменяющих умножение сложением в огромном диапазоне величин, способствовали их широкой популярности в нормативной и научно-технической практике для представления относительного отношения двух величин и сравнения их в широком диапазоне. Эти относительные номиналы называют децибелами (дБ), неперами (Нп), фонами и т.п.

Наглядно иллюстрирует замечательное свойство логарифмов логарифмическая линейка – «ветеран» и «заслуженный деятель» вычислительной техники, позволяющий простым смещением движка получить произведение, частное, квадрат/куб, корень числа или синус угла. Именно логарифмической линейкой были массово вооружены инженеры, создавшие космические аппараты и ядерные реакторы, уникальные мосты, башни, памятники архитектуры, которые, в свою очередь, также служат памятником прикладного искусства инженеров, вооруженных логарифмической линейкой.

В современных вычислительных компьютеризированных практиках логарифмические метрики повсеместно используются для представления результатов обработки данных в табличном и графическом виде, в частности:

- для характеристики ослабления/затухания сигналов в телекоммуникационных линиях связи (проводных, волоконно-оптических, радиорелейных и т.д.);
- при построении диаграмм уровней внутренних цепей оборудования и линий;
- для представления уровней слышимости и громкости в акустике;
- для анализа амплитудно-частотных и фазовых характеристик отдельных звеньев электрических цепей и их каскадных включений в виде диаграмм Боде. Примером могут служить диаграммы Боде электрических фильтров и элементов систем автоматического управления;
- для идентификации шумов.

Эта книга подробно знакомит читателя с использованием логарифмической меры для оценки уровней сигналов в электросвязи и других сферах техники, с методами расчета и измерения уровней. Изложение сопровождается многочисленными примерами.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся техническими вопросами. Она будет полезна инженерам, занимающимся разработкой и эксплуатацией телекоммуникационного и другого оборудования, а также может использоваться при проведении практических и лабораторных занятий для студентов технических вузов.

**УДК 519.662**

**ББК 22.141**

© Бирюков Н.Л., Триска Н.Р., 2022

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2022

**ISBN 978-5-94836-641-8**

# СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                  |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Предисловие . . . . .                                                                                                            | 7        |
| <b>Раздел 1. Теория: коротко о главном . . . . .</b>                                                                             | <b>9</b> |
| 1.1. Понятие уровня сигнала . . . . .                                                                                            | 9        |
| 1.2. Понятие эталонного сигнала . . . . .                                                                                        | 11       |
| 1.3. Соотношение между уровнями по мощности<br>и напряжению . . . . .                                                            | 12       |
| 1.4. Источник эталонного сигнала — эталонный генератор<br>уровня . . . . .                                                       | 13       |
| 1.5. Согласованная и несогласованная схема соединения<br>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<br>равно 600 Ом? . . . . .                                                    | 19       |
| 1.10.2. Почему выбрана эталонная мощность,<br>равная 1 мВт? . . . . .                                                            | 20       |
| 1.10.3. Есть ли другие значения мощности, напряжения<br>или тока, относительно которых вычисляются<br>уровни сигналов? . . . . . | 20       |
| 1.10.4. Используются ли в электросвязи другие основания<br>логарифмов? . . . . .                                                 | 21       |
| 1.10.5. Почему в технике широко используется<br>логарифмическая мера . . . . .                                                   | 22       |
| Общие соображения . . . . .                                                                                                      | 23       |
| Версия 1 — «Физиологическая» . . . . .                                                                                           | 24       |
| Версия 2 — «Высшей математики». . . . .                                                                                          | 24       |
| Версия 3 — «Элементарной математики» или<br>«Здравого смысла». . . . .                                                           | 25       |
| Версия 4 — «Физическая» . . . . .                                                                                                | 25       |
| 1.10.6. Как используется дополнительная информация<br>в обозначениях дБ. . . . .                                                 | 26       |



|                                                                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Контрольные вопросы и упражнения . . . . .                                                                   | 26        |
| <b>Раздел 2. Практика: как вычислять уровни в уме? . . . . .</b>                                             | <b>28</b> |
| 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        |
| <b>Раздел 3. Лабораторный практикум: измерения уровней. . . . .</b>                                          | <b>34</b> |
| 3.1. Общие замечания . . . . .                                                                               | 34        |
| 3.2. Схема измерений. . . . .                                                                                | 34        |
| Упражнение 1. Демонстрация абсолютных уровней<br>на различных частотах . . . . .                             | 36        |
| Упражнение 2. Демонстрация абсолютных уровней<br>на различных нагрузках . . . . .                            | 38        |
| Упражнение 3. Определение выходного сопротивления<br>источника сигнала . . . . .                             | 47        |
| <b>Раздел 4. Прикладные аспекты: примеры использования<br/>логарифмической меры в электросвязи . . . . .</b> | <b>49</b> |
| 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<br>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<br>шума? . . . . .                                   | 62        |
| 4.3.2. Расчет шумов в каналах волоконно-оптических<br>линий связи . . . . .                                  | 65        |
| 4.3.3. Цветные шумы . . . . .                                                                                | 67        |
| 4.4. Псофометрический уровень шума и псофометрический<br>коэффициент. . . . .                                | 70        |
| 4.5. Динамический диапазон . . . . .                                                                         | 73        |
| 4.5.1. Что такое динамический диапазон сигнала<br>и канала? . . . . .                                        | 73        |

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5.2. Сжатие и расширение динамического диапазона —<br>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<br>кодировании. . . . .                                                | 81  |
| 4.5.2.4. Принципы реализации компандирования . . . .                                                                    | 87  |
| 4.5.2.5. Примеры . . . . .                                                                                              | 91  |
| 4.6. Помехозащищенность = отношение сигнал / шум<br>(помеха). . . . .                                                   | 95  |
| 4.6.1. Определение защищенности сигнала . . . . .                                                                       | 96  |
| 4.6.2. Оценивание коэффициента ошибок по степени<br>защищенности . . . . .                                              | 97  |
| 4.6.3. Оценивание продолжительности измерений<br>коэффициента ошибок . . . . .                                          | 98  |
| 4.6.4. Отношение сигнал/шум в одном оптическом<br>канале. . . . .                                                       | 101 |
| 4.6.5. Защищенность основного сигнала — dBc. . . . .                                                                    | 102 |
| 4.6.5.1. Отношение мощности несущего сигнала<br>к общей мощности шумов. . . . .                                         | 103 |
| 4.6.5.2. Отношение мощности несущего сигнала<br>к спектральной плотности шума ( $C/N$ ) . . . . .                       | 104 |
| 4.6.5.3. Отношение мощности сигнала к фазовым<br>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<br>последовательности? . . . . .                                           | 114 |
| 4.11. Логарифм в оценке пропускной способности канала . . . .                                                           | 119 |
| 4.11.1. Практические примеры . . . . .                                                                                  | 120 |
| 4.11.2. Роль защищенности $\gamma$ и полосы пропускания $\Delta f$<br>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-R<sup>1</sup>. 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.

---

<sup>1</sup>По 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 Европы<sup>1</sup> — 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.

---

<sup>1</sup> 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 **децибел**<sup>2</sup> (**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-

<sup>1</sup>Для обозначения уровней сигналов в русскоязычной литературе традиционно используется буква  $p$  (от немецкого *pegel*), хотя иногда используют  $l$  (от английского *level*).

<sup>2</sup>Для 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 уровня<sup>1</sup>. 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 —

---

<sup>1</sup>Аналогично 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 напряжению<sup>1</sup> 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:

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

<sup>1</sup>Если 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 МСЭ<sup>2</sup> 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}  $ |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

<sup>1</sup> До внедрения цифровых методов передачи в канале тональной частоты использовалась частота 800 Гц.

<sup>2</sup> 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.

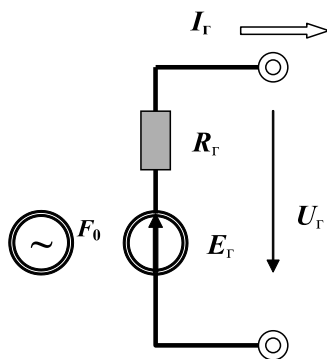


Рис. 1.1. Эквивалентная схема эталонной цепи генератора

### 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:  $p_U = p$ .

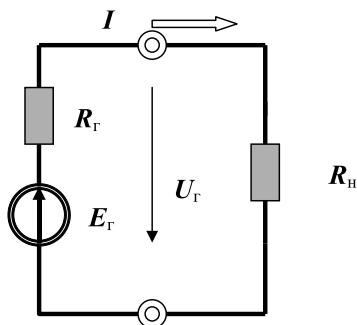


Рис. 1.2. Подключение эталонного генератора на нагрузку

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

$$p_U = p_{\text{м}} + 10 \lg (R_{\text{н}} / R_0), \text{ при } R_{\text{н}} > R_0, \quad (1.4a)$$

а при  $R_{\text{н}} < R_{\Gamma}$  отношение будет отрицательным, и уровень по напряжению будет меньше уровня по мощности:

$$p_U = p_{\text{м}} - 10 \lg (R_{\text{н}} / R_0), \text{ при } R_{\text{н}} < R_0. \quad (1.4б)$$

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



Выражение (1.4) следует применять с оговоркой. Например, если  $R_{\text{н}} \rightarrow \infty$ , то  $U_{\Gamma} = E_0 = 2U_0$ , где  $U_0$  — напряжение на согласованной нагрузке при  $R_{\Gamma} = R_{\text{н}}$ . 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  $R_{\text{н}} \gg R_0$ , то напряжение на  $R_{\text{н}}$  увеличивается по сравнению с напряжением на согласованной нагрузке  $R_{\text{н}}$ , 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 ТОИУ<sup>1</sup>. В определении ТОИУ ис-

---

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