

# Введение

## От автора

Приветствую вас, дорогие читатели, и выражаю признательность за интерес, проявленный к нашей книге *“Высокоскоростная передача цифровых данных: высший курс черной магии”*. Эта книга задумана как своеобразное справочное пособие повышенного уровня сложности для высококвалифицированных разработчиков цифровой электроники, призванное помочь им довести разработки до максимальных пределов рабочей скорости и дальности передачи.

Книга предназначена для тех разработчиков, перед которыми стоит задача передавать информацию быстрее и дальше, чем до этого. В ней они найдут массу практических примеров и приемов.

Материалы, собранные в этой книге, отшлифованы мной за годы работы главным техническим редактором стандартов сетей Ethernet и Gigabit Ethernet — проектов, которые, надеюсь, изменили вашу жизнь к лучшему. Во время работы над этими и многими другими проектами описанные в книге модели и концепции были для меня бесценным подспорьем. Я хотел бы поделиться с вами моими знаниями.

После того как вы прочтете эту книгу, поделитесь приобретенными знаниями с теми, кто окружает вас, как это делал мой технический наставник Мартин Грэхем (Martin Graham), у которого я многому научился. Делитесь своими знаниями с коллегами по работе, прививайте новые идеи тем, кто руководит вами, но, прежде всего, постоянно учитесь сами. Если эта книга вдохновит вас на проведение хотя бы одного эксперимента с целью лучшего понимания сути той или иной проблемы, то, поверьте, вы на верном пути.

Для меня было большим счастьем общаться с теми, кто посещал мои курсы и лекции. Я признателен всем, кто не пожалел времени на то, чтобы поделиться со мной своими мыслями, соображениями, мечтами и проблемами. Я постоянно стремлюсь общаться с инженерами, которые могут рассказать много интересного и полезного из своего реального опыта.

С пожеланиями успеха в ваших новых разработках.

До встречи в Internet

Говард Джонсон, Д-р философии (Dr. Howard Johnson)

[www.sigcon.com](http://www.sigcon.com)

## Темы, охватываемые в данной книге

<b>Печатные дорожки</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Пределы достижимой скорости и расстояния</li> <li>RC- и LC-режимы распространения сигнала</li> <li>Графики и уравнения для расчета поверхностных и диэлектрических потерь</li> <li>Шероховатость поверхности</li> <li>Режимы распространения, отличные от TEM</li> <li>Переходная характеристика</li> <li>Влияние межслойных перемычек</li> </ul>
<b>Дифференциальная передача сигналов</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Дифференциальные полосковые пары со связью по боковой и по широкой стороне дорожек</li> <li>Влияние изгибов дорожек</li> <li>Расфазировка между дорожками дифференциальной пары</li> <li>Влияние геометрии дорожек на дифференциальное сопротивление линии</li> <li>Перекрестные помехи</li> <li>Электромагнитные излучения</li> </ul>
<b>Межстоечные соединения</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Коаксиальные кабели</li> <li>Кабели на основе витой пары</li> <li>Волоконно-оптические кабели</li> <li>Схемы коррекции</li> <li>Общие стандарты кабельных сетей зданий для локальных информационных сетей</li> </ul>
<b>Распределение сигналов тактовой синхронизации</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Особые требования, предъявляемые к сигналам тактовой синхронизации</li> <li>Повторители тактовой частоты</li> <li>Шлейфовое распределение сигнала тактовой синхронизации</li> <li>Джиттер сигнала тактовой синхронизации</li> <li>Фильтрация питания источников сигнала тактовой синхронизации</li> </ul>
<b>Моделирование</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Метод моделирования в частотной области</li> <li>Области применения технологий моделирования SPICE и IBIS</li> </ul>

## Построение материала в данной книге

В этой книге каждая глава посвящена отдельной теме, имеющей отношение к передаче высокоскоростных сигналов. Главы можно читать в любом порядке.

В главах 1 и 2 изложены физические основы явлений, определяющих параметры разнообразных линий передач, — поверхностный эффект, эффект близости, потери в диэлектрике и шероховатость поверхности.

Глава 3 посвящена разработке обобщенной модели частотной характеристики, справедливой для любых проводниковых структур, используемых в качестве линий передачи.

В главе 4 коротко изложена методика расчета временных форм сигналов по частотным передаточным функциям.

В главах с 5 по 11 рассматриваются конкретные типы линий передачи: однопроводные (несимметричные) печатные линии, дифференциальные линии, кабели на основе витой пары, 150-омный экранированный кабель на основе витой пары, коаксиальные кабели и волоконно-оптические кабели, а также обсуждаются общие стандарты кабельных сетей зданий.

Глава 12 посвящена всестороннему анализу проблем, связанных с распределением сигналов тактовой синхронизации.

В главе 13 рассматриваются области применимости технологий моделирования SPICE и IBIS.

Предполагается, что читатель в общих чертах знаком с частотным анализом линейных систем. Те, кто не изучал теории аналоговых цепей, могут просто использовать в своей работе формулы и примеры из данной книги. Тем из читателей, кто знаком с теорией линейных цепей, будет доступен более глубокий уровень понимания материала.

## **Связь материала, изложенного в данной книге, с ранее вышедшими книгами**

Эта книга — вторая в серии книг, написанных авторами. Первой вышла книга Джонсона и Грэхема *Конструирование высокоскоростных цифровых устройств: начальный курс черной магии* (книга на русском языке выйдет из печати в ИД “Вильямс” в III кв. 2005 г.). Обе эти книги могут использоваться как совместно, так и независимо друг от друга — они охватывают разный материал.

В первой книге рассматривается широкий спектр явлений, имеющих отношение к высокоскоростной передаче информации. Она закладывает прочные основы понимания таких характерных для печатных плат явлений, как “звон”, перекрестные помехи, дребезг земли и помехи по питанию. Анализ этих явлений проводится преимущественно на примерах простых цепей, что способствует более ясному и полному пониманию их сути. В дополнение к основным темам уделено внимание таким частным вопросам, как корпуса микросхем, работа с осциллографическим щупом и системы питания высокоскоростных цифровых устройств.

Новая книга *Высокоскоростная передача цифровых данных* имеет более специализированный характер — в ней собран материал более высокого уровня, предназначенный для углубленного изучения проблем, связанных с передачей сигналов на предельно достижимых скоростях и на предельно достижимых расстояниях.

Если вам необходимо передавать информацию еще быстрее и еще дальше, чем когда-либо прежде, из этой книги вы узнаете, как этого добиться.

*Конструирование высокоскоростных цифровых устройств* и *Высокоскоростная передача цифровых данных* — это комплект двух взаимно дополняющих друг друга справочных пособий, предназначенных для тех, кто работает в области высокоскоростной цифровой электроники.

Те, кому уже довелось читать другие мои книги, узнают мой стиль изложения. Я всеми силами стремился добиться как можно большей реалистичности изложения мыслей и фактов, накопленных мною за годы профессиональной деятельности.

## Благодарности

Без преувеличения, тысячи людей посвящали свое время обсуждению со мной вопросов высокоскоростной передачи сигналов, переписываясь или участвуя в проводимых мною семинарах. Эти обсуждения вдохновили меня на изучение и обобщение материала, составившего эту книгу. Я считаю своим долгом выразить всем им бесконечную признательность.

Следующие лица внесли персональный вклад в эту книгу — их вопросы и комментарии включены в ее текст (в алфавитном порядке): Сэл Агинаягэ (Sal Aguinaga), Джеймс К. Батч (James C. Bach), Эрик В. Бергер (Eric V. Berger), Реймонд Буллингтон (Raymond Bullington), Даг Батлер (Doug Butler), Тим Кэналес (Tim Canales), Брюс Карстен (Bruce Carsten), Коуд Кьюбит (Code Cubitt), Дейв Кутберт (Dave Cuthbert), Билл Даскалакис (Bill Daskalakis), Мартин Грэхем (Martin Graham), Пол Грин (Paul Greene), Гэри Гриффин (Gary Griffin), Боб Галлер (Bob Haller), Джон Лихью (John Lehew), Джон Лин (John Lin), Реймонд П. Мейкснер (Raymond P. Meixner), Крэйг Миллер (Craig Miller), Митч Мори (Mitch Morey), Дэн Нитцан (Dan Nitzan), Бхавеш Пэтел (Bhavesh Patel), Дипак Пэтел (Dipak Patel), Джим Рауцио (Jim Rautio), Рави (Ravi), Борис Шустерман (Boris Shusterman), Кевин Слаттери (Kevin Slattery), Боб Строуп (Bob Stroupe), Билл Штутц (Bill Stutz) (дважды), и Фабрицио Занелла (Fabrizio Zanella). Спасибо всем им за многие часы приятных бесед.

Я особенно признателен тем, кто добровольно взял на себя тяжелый труд рецензирования текста. Эта группа отважных людей выудила множество ошибок и предложила множество новых тем для исследований. То, что текст стал более качественным, это в значительной мере их заслуга (в алфавитном порядке): Джейкоб Бен Эри (Jacob Ben Ary) из компании Aquanet, Грэг Дернье (Greg Dernier) из компании Easystreet, Стив Эмс (Steve Ems) из компании Lecroy, Александр Гутерман (Alexandre Guterman) из компании Nortel, Вэлери Кугель (Valery Kugel) из компании Juniper, профессор Уилл Мури (Will Moore) из Оксфордского

университета, Жозе Морейра (Jose Moreira) из компании Agilent, Гопа Парамесваран (Gopa Parameswaran) из компании Cisco, Боб Росс (Bob Ross) из компании Mentor Graphics, Берт Симонович (Bert Simonovich) из компании Nortel, Пэлэни Субьях (Palani Subbiah) из компании Cypress, Джеф Томпсон (Geoff Thompson) из компании Nortel.

Редакторы моей книги из компании Prentice-Hall, Бернард Гудвин (Bernard Goodwin), Николас Радгубер (Nicholas Radhuber) и Кэрол Дж. Лолье (Carol J. Lallier), проявили профессионализм (и терпение) на протяжении всей работы, потребовавшейся для завершения этого проекта.

Без моей преданной и чрезвычайно прилежной помощницы Дженифер Эппс (Jennifer Epps) эта книга вряд ли бы увидела свет.

Все статьи, материалы которых включены в книгу, перепечатаны с разрешения издателей из журналов EDN — выпускаемого компанией Reed Business Information, Electronic Design Magazine — подразделения компании of Penton Media, Inc., и PC Design Magazine — издаваемого компанией UP Media Group, Inc., — источники указываются в заголовке каждой статьи.

Боб Росс (Bob Ross) из компании Mentor Graphics Corp., ранее занимавший пост руководителя группы EIA IBIS Open Forum, написал прекрасную статью о перспективах развития технологии моделирования IBIS для главы 13. Брюс Археймбью (Bruce Archambeault) написал статью о методах снижения электромагнитных излучений, включенную в главу 12, — я ее только отредактировал. Брэд Коул (Brad Cole) и Мэтт Хьюдейл (Matt Hudale) из компании Ansoft провели имитационное моделирование множества конфигураций межслойных перемычек, эти результаты приведены в главе 5. Гопа Парамесваран (Gopa Parameswaran) из компании Cisco провел моделирование емкостей межслойных перемычек, и хотя этих данных нет в окончательном варианте книги, я глубоко признателен ему за его работу. Стив Эмс (Steve Ems) и Роберт Таламбирас (Robert Talambiras) из компании Лесгоу, гостя у меня на ранчо в октябре 2000 г., пробудили во мне интерес к волноводным, отличным от TEM, типам распространения сигнала в линиях передачи. Роджер Биллингз (Roger Billings) из компании Wideband Corporation заслуживает быть упомянутым как обладатель мирового рекорда скорости передачи данных по колючей проволоке (глава 2).

Джеф Зонтаг (Jeff Sonntag) из компании Accelerant Networks был первым, кто обратил мое внимание на то, как характеристики кросс-платы изменяются с температурой (глава 5). Моя признательность также Джиму Тэвэколи (Jim Tavacoli) из компании Accelerant, приславшему прекрасные фотографии, которые демонстрируют адаптивную коррекцию в действии, — они помещены в главе 3.

Майкл Кинг (Michael King), Эд Сэйри (Ed Sayre) и Даг Смит (Doug Smith), с которыми я имел удовольствие обсуждать многие вопросы, оказали огромное влияние на меня. Я благодарен им за дружбу.

Мой технический наставник, доктор философии Мартин Грэхем (Martin Graham), преподаватель Калифорнийского университета в Беркли (Berkeley), оказывал мне постоянную поддержку, внимание и техническую помощь на протяжении последних двадцати лет, а также был первым, кто обратил мое внимание на общие закономерности характеристик затухания сигнала в линиях передачи и особенно их частотной зависимости. Спасибо Вам, Мартин.

Я благодарен моей прекрасной и чуткой жене Лиз за ее трогательную заботу обо мне. Она взяла на себя все заботы, дав мне время написать эту книгу.

Как бы то ни было, ответственность за все ошибки, оставшиеся в тексте книги, несу только я.

Информация, приведенная в книге, получена издательством Prentice Hall из источников, заслуживающих доверия. Однако ни издательство Prentice Hall, ни автор книги не могут дать гарантии в точности и полноте приведенной информации. Издательство Prentice Hall и авторы не несут ответственности за какие бы то ни было ошибки, упущения или ущерб, возникшие вследствие использования этой информации.

## Метрические единицы и обозначения, используемые в тексте книги

В этой книге используются метрические единицы, за исключением стандартных геометрических размеров печатных плат, которые указываются в дюймах. Обозначения переменных и универсальных функций выделяются курсивом. Постоянные, порядковые числительные, общеизвестные специальные функции указываются обычным текстовым шрифтом, например  $f(x) = 1 + \sin(x)$ . Матрицы и векторы выделяются **жирным** шрифтом.

## Пишите нам

Если у вас возникнут замечания по тексту книги или просто появится желание обсудить со мной какие-либо вопросы по теории линий передачи, вы найдете меня на моем ранчо, расположенном высоко в горах, недалеко от городка Твисп (Twisp), штат Вашингтон. Пишите мне по адресу [howiej@sigcon.com](mailto:howiej@sigcon.com).

Прекрасным местом, где можно ознакомиться с последними достижениями в области высокоскоростной передачи данных, является мой Web-сайт, [www.sigcon.com](http://www.sigcon.com). На этом сайте я собрал и постоянно пополняю коллекцию статей обо всем, связанном с проблемой высокоскоростной передачи данных, здесь же вы найдете расписание моих открытых семинаров. Если вас интересует дополнительная информация, затрагивающая тему целостности сигналов, подпишитесь на выпускае-

мый мною бюллетень. На этом же сайте вы найдете список опечаток, замеченных в книге.

Говард Джонсон, (Dr. Howard Johnson) является автором книг *High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic*, Prentice-Hall, 1993, *Fast Ethernet: Dawn of a New Network*, Prentice-Hall, 1996 и ведет раздел *Signal Integrity* в журнале EDN. Он постоянно проводит технические семинары для инженеров, специализирующихся в цифровой электронике, в Оксфордском университете и по всему миру.

## **Ждем ваших отзывов!**

Вы, уважаемый читатель, и есть главный критик и комментатор этой книги. Мы ценим ваше мнение и хотим знать, что было сделано нами правильно, что можно было сделать лучше и что еще вы хотели бы увидеть изданным нами. Нам интересно услышать и любые другие замечания, которые вам хотелось бы высказать в наш адрес.

Мы ждем ваших комментариев и надеемся на них. Вы можете прислать нам бумажное или электронное письмо либо просто посетить наш Web-сервер и оставить свои замечания там. Одним словом, любым удобным для вас способом дайте нам знать, нравится или нет вам эта книга, а также выскажите свое мнение о том, как сделать наши книги более интересными для вас.

Посылая письмо или сообщение, не забудьте указать название книги и ее авторов, а также ваш обратный адрес. Мы внимательно ознакомимся с вашим мнением и обязательно учтем его при отборе и подготовке к изданию следующих книг. Наши координаты:

E-mail: [info@williamspublishing.com](mailto:info@williamspublishing.com)

WWW: <http://www.williamspublishing.com>

Адреса для писем:

из России: 115419, Москва, а/я 783

из Украины: 03150, Киев, а/я 152



# Толковый словарь условных обозначений, используемых в книге

## Единицы измерений и универсальные постоянные

- $\Omega$  (Ом) Ом — единица электрического сопротивления; через проводник сопротивлением в один ом протекает ток в один ампер при разности потенциалов на концах проводника в один вольт.
- S (См) Международная единица электрической проводимости, сименс. Эквивалентна 1/Ом. Раньше для обозначения этой единицы проводимости иногда использовалось название мО (Ом, написанный в обратном порядке).
- $c$  Скорость света в вакууме,  $2,998 \times 10^8$  м/с.
- $\epsilon_0$  Электрическая постоянная (абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума),  $8,854 \times 10^{-12}$  Ф/м.
- $\mu_0$  Магнитная постоянная (абсолютная магнитная проницаемость вакуума),  $4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м.
- $j$  Корень квадратный из  $-1$ .

## Переменные, зависящие от времени и частоты

- $\omega$  (Круговая) частота (рад/с).
- $\omega_{LE}$  Верхняя граница режима сосредоточенных параметров (рад/с).
- $\omega_{LC}$  Пороговая частота LC-режима (рад/с).
- $\omega_{\delta}$  Пороговая частота проявления поверхностного эффекта (рад/с).
- $\omega_{rough}$  Пороговая частота проявления эффекта шероховатости (рад/с).
- $\omega_{\lambda}$  Пороговая частота возникновения волноводных типов волн, отличных от ТЕМ (рад/с).
- $\delta$  Глубина поверхностного слоя (всегда частотно-зависимая функция) (м).
- $i(t)$  Ток (являющийся функцией времени) (А).
- $I(\omega)$  Преобразование Фурье или Лапласа тока  $i(t)$ , являющегося функцией времени.

- $\nu(t)$  Напряжение (являющееся функцией времени) (В).  
 $V(\omega)$  Преобразование Фурье или Лапласа напряжения  $\nu(t)$ , являющегося функцией времени.

#### Параметры линии передачи

- $R$  Погонное (последовательное) сопротивление (Ом/м).  
 $L$  Погонная (последовательная) индуктивность (Гн/м).  
 $G$  Погонная (параллельная) проводимость (См/м).  
 $C$  Погонная (параллельная) емкость (Ф/м).  
 $z$  Последовательный погонный импеданс (комплексная величина), равный сумме  $z_i$  и  $z_e$  (Ом/м).  
 $z_i$  Внутренний последовательный импеданс (комплексная величина), характеризует величину магнитного потока, проникающего в проводники, и мощность, рассеиваемую проводниками (Ом/м).  
 $z_e$  Внешний последовательный импеданс (комплексная величина), характеризует величину магнитного потока в пространстве, окружающем проводники, и мощность, рассеиваемую в области, окружающей проводники (Ом/м). Вещественная составляющая импеданса  $z_e$  характеризует, в целом, сопротивление излучения структуры.  
 $L_i$  Внутренняя погонная индуктивность ( $j\omega L_i = j \operatorname{Im} z_i$ ) характеризует величину магнитного потока, проникающего в проводники (Гн/м).  
 $L_e$  Внешняя погонная индуктивность ( $j\omega L_e = j \operatorname{Im} z_e$ ) характеризует величину магнитного потока в пространстве, окружающем проводники (Гн/м).  
 $R_i$  Внутреннее погонное сопротивление ( $R_i = \operatorname{Re} z_i$ ) характеризует мощность, рассеиваемую проводниками, (Ом/м).  
 $y$  Параллельная погонная проводимость (проводимость изоляции) (комплексная величина) (См/м).  
 $\theta$  Угол, образованный вещественной и мнимой составляющими комплексной диэлектрической проницаемости материала (радианы). Равен арктангенсу отношения ( $-\epsilon''/\epsilon'$ ). Для малых углов  $\theta \approx \operatorname{tg} \theta = -\epsilon''/\epsilon'$ .  
 $\operatorname{tg} \theta$  Тангенс угла диэлектрических потерь — отношение мнимой составляющей комплексной диэлектрической проницаемости к ее вещественной составляющей ( $-\epsilon''/\epsilon'$ ).  
 $Z_C$  Волновое сопротивление линии передачи, функция частоты (Ом).  
 Обозначение  $Z_C$  используется для обозначения волнового сопротивления в тех случаях, когда необходимо подчеркнуть, что это функция, зависящая от частоты; обычно, но не всегда, для этого используется обозначение  $Z_C(\omega)$ . Величина  $Z_0$  интерпретируется как постоянная величина, представляющая собой значение волнового сопротивления на определенной частоте  $\omega_0$  (например,  $Z_0 = 50$  Ом).  
 $\nu$  Скорость распространения (м/с), а также напряжение (В).

$R_{DC}$	Сопротивление проводника по постоянному току (Ом/м).
$w$	Ширина печатной дорожки (м).
$h$	Высота подъема печатной дорожки над ближайшим опорным слоем (м).
$t$	Толщина печатной дорожки (м).
$b$	(Для полосковых линий) промежуток между опорными слоями (м).
$s$	Промежуток между обращенными друг к другу поверхностями двух печатных дорожек (м).
$r$	Радиус проводника круглого поперечного сечения (м).
$p$	Периметр проводника (м).
$a$	Площадь поперечного сечения проводника (м <sup>2</sup> ).

#### Высокочастотные параметры линии передачи, определенные на частоте $\omega_0$

$\omega_0$	Частота, на которой определяются высокочастотные параметры линии передачи (рад/с). Значение частоты выбирается выше пороговой частоты LC-режима и пороговой частоты поверхностного эффекта, но ниже пороговой частоты возникновения волноводных типов волн (рад/с).
$R_0$	Высокочастотное (погонное) сопротивление на частоте $\omega_0$ (Ом/м).
$L_0$	Погонная последовательная индуктивность на частоте $\omega_0$ (Гн/м).
$C_0$	Погонная параллельная емкость на частоте $\omega_0$ (Ф/м).
$\theta_0$	Угол, образованный вещественной и мнимой составляющими комплексной диэлектрической проницаемости материала (радианы) на частоте $\omega_0$ . Равен арктангенсу отношения $(-\epsilon''/\epsilon')$ . Для малых углов $\theta_0 \approx \text{tg } \theta_0 = -\epsilon''/\epsilon'$ .
$Z_0$	Волновое сопротивление линии передачи на частоте $\omega_0$ (Ом). Величина $Z_0$ интерпретируется как постоянная величина, представляющая собой значение волнового сопротивления на определенной частоте $\omega_0$ (например, $Z_0 = 50$ Ом). Обозначение $Z_C$ используется в тех случаях, когда необходимо подчеркнуть, что волновое сопротивление является функцией частоты; обычно, но не всегда, для этого используется обозначение $Z_C(\omega)$ .
$\nu_0$	Скорость распространения (величина, обратная постоянной групповой задержки) на частоте $\omega_0$ (м/с).

#### Параметры веществ и материалов

$\epsilon$	Абсолютная диэлектрическая проницаемость среды (в общем случае комплексная величина) (Ф/м).
$\epsilon'$	Вещественная составляющая абсолютной комплексной диэлектрической проницаемости среды, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ (Ф/м).
$\epsilon''$	Мнимая составляющая абсолютной комплексной диэлектрической проницаемости среды, взятая с противоположным знаком $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ (Ф/м).
$\epsilon_r$	Относительная диэлектрическая проницаемость среды, определяемая как $\epsilon/\epsilon_0$ (в общем случае комплексная величина).

- $\chi_e$  Диэлектрическая восприимчивость  $\chi_e = \epsilon_r - 1$  (в общем случае комплексная величина).
- $\mu$  Абсолютная магнитная проницаемость среды (в общем случае комплексная величина) (Гн/м).
- $\sigma$  Удельная (объемная) проводимость (См/м).  
 Для отожженной меди, используемой в обычных проводах:  $\sigma = 5,80 \times 10^7$  См/м.  
 Для электролитической (чистой) меди печатных дорожек:  $\sigma = 5,98 \times 10^7$  См/м.  
 Для алюминия, используемого в обычных проводах:  $\sigma = 3,54 \times 10^7$  См/м.  
 Для электролитического (чистого) алюминия:  $\sigma = 3,77 \times 10^7$  См/м.  
 Для серебра (чистого):  $\sigma = 6,29 \times 10^7$  См/м.  
 Для стали марки SAE1045:  $\sigma = 5,80 \times 10^6$  См/м.  
 Для нержавеющей стали:  $\sigma = 1,16 \times 10^6$  См/м (варьируется в широких пределах).  
 Для никеля (чистого):  $\sigma = 1,16 \times 10^7$  См/м.  
 Примечание. Вследствие большого разнообразия в составе легирующих элементов стали относительная магнитная проницаемость “обычной” стали находится в пределах от 100 до 10 000 и выше. Такой широкий диапазон значений магнитной проницаемости обуславливает широкий диапазон значений глубины поверхностного слоя для этого материала.
- $\rho$  Удельное (объемное) электрическое сопротивление (Ом×м) (величина, обратная  $\sigma$ ).
- $\eta$  Собственный импеданс среды: отношение напряженности электрического поля к напряженности магнитного поля в плоской волне, распространяющейся в среде (Ом).

#### Обозначения общеупотребительных параметров

- $l$  Длина структуры (м).
- $\mathcal{L}$  Длина переднего или заднего фронта  $\mathcal{L} = t_{10-90} v_0$  (м).
- $t_{10-90}$  Время нарастания или время спада сигнала, измеренное по уровням 10% – 90% (с).
- $V_{CC}$  Напряжение питания цифровых микросхем (В).