

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

ЦЕЛОСТНОСТЬ СИГНАЛА

Вступление

Перед тем как погрузиться в эту тему, необходимо заметить, что *целостность сигнала* представляет собой весьма сложное понятие, и в итоге может довести вас до слёз и головной боли, если отнестись к его рассмотрению небрежно. Поэтому задача этого приложения заключается в том, чтобы дать только общее представление о концепции целостности сигнала. Если же вы хотите узнать об этом явлении больше, то очень рекомендую вам книгу, написанную экспертом в этой сфере, доктором Эриком Богатином (Eric Bogatin), «*Signal Integrity — Simplified*», ISBN: 0130669466, и книгу Говарда Джонсона (Howard Johnson) «*High Speed Signal Propagation: Advanced Black Magic*» ISBN: 013084408X.

Понятие целостности сигнала включает в себя ряд различных аспектов, в том числе явление изменения «формы» сигнала при его прохождении через проводник, а также явление отражения сигнала от конца несогласованного проводника (подобно тому, как отскакивает от стены брошенный по коридору мячик). Однако в данном разделе мы будем рассматривать только те явления интегральной целостности, которые можно объединить одним общим понятием — *перекрёстные помехи*.

Шумы (выбросы) и задержки сигнала, спровоцированные перекрёстными помехами, чаще происходят на уровне кремниевого кристалла, чем на уровне печатной платы. Поэтому сначала мы рассмотрим причины возникновения подобных явлений, а затем перейдём к их анализу на уровне кристалла и на уровне печатной платы.

Ёмкостное и индуктивное взаимодействие

Давайте рассмотрим два сигнальных проводника, мы назовём их *Проводник 1* и *Проводник 2*, причем каждый из которых одним концом подключен к выходу запитывающего его отдельного вентиля (источнику сигнала), а другим — к согласованной нагрузке. В идеальных условиях (в упрощенном виде) оба проводника будут совершенно прямыми, без изгибов и разрывов (то есть однородными), и каждый из них может быть представлен с помощью последовательно включенного резистора, последовательно включенной индуктивности, и конденсатора (Рис. А.1).

В этом простом примере конденсаторы C_{w1} и C_{w2} мы рассматриваем относительно «земли». В таком случае конденсатор состоит из двух металлических пластин, разделенных с помощью изоляционного слоя, который называется *диэлектриком*. Это значит, что если наши сигнальные проводники находятся в непосредственной близости относительно друг друга, то их можно будет рассматривать в качестве про-

Величина, которая характеризует противостояние вещества электрическому току, называется *сопротивлением* и обозначается буквой R , измеряется в Омах (1 Ом). Единица измерения «Ом» (иногда обозначается буквой греческого алфавита Ω) названа в честь немецкого ученого Георга Симона Ома, который в 1827 году определил отношения между напряжением, током и сопротивлением.

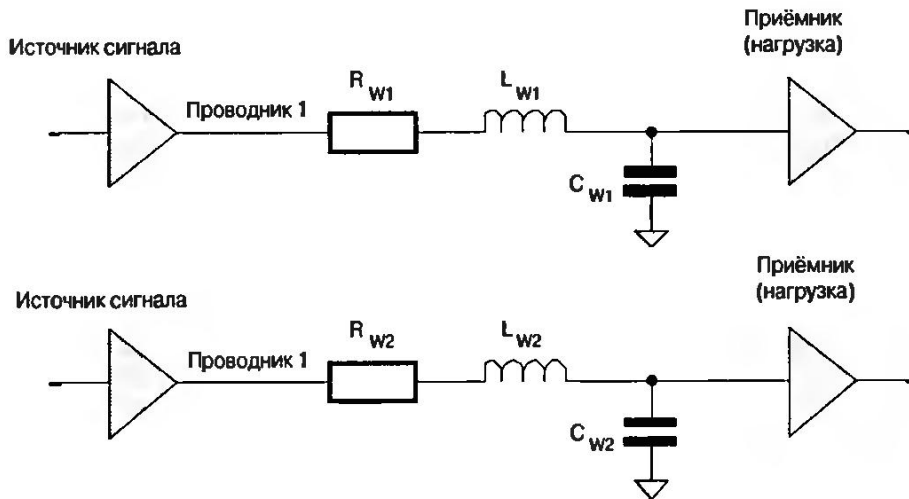


Рис. А.1. Два сигнальных проводника (упрощенное представление)

стейшего конденсатора. На принципиальной схеме это явление можно представить с помощью добавления символа C_M , который обозначает взаимную ёмкость (Рис. А.2).

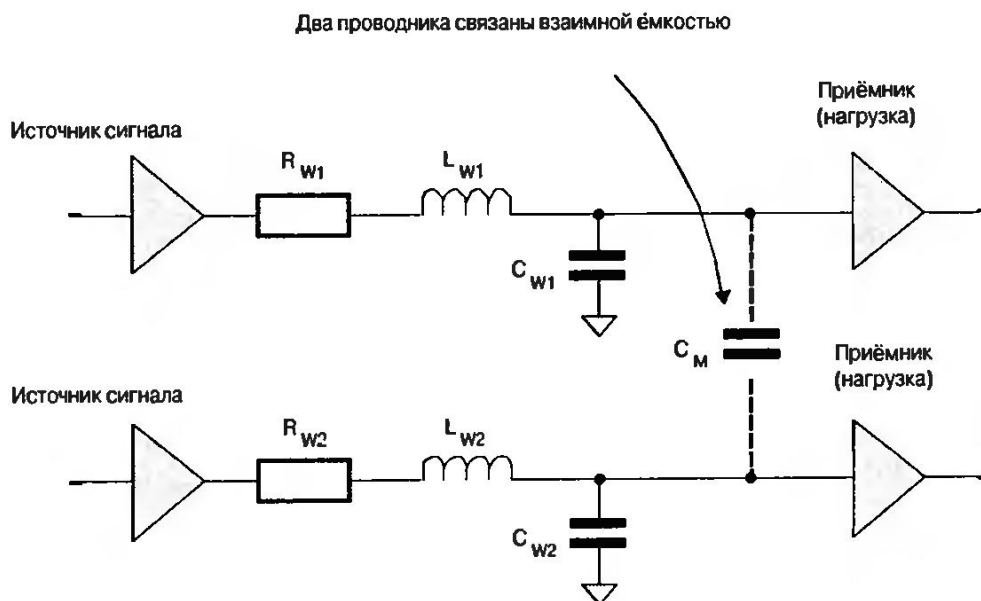


Рис. А.2. Два проводника, находящиеся в непосредственной близости, связаны взаимной ёмкостью

Когда сигнал в одном из проводников переходит с одного логического уровня на другой, то часть протекающих через него зарядов через взаимную ёмкость перетекают в другой проводник и провоцируют там возникновение шумов (выбросов) и задержку сигнала, о которых мы ещё поговорим немного позже.

Как мы уже заметили, каждый проводник обладает некоторой собственной индуктивностью. В первом приближении, индуктивность представляет собой свойство проводников, которое заключается в том, что при изменении тока, проходящего через первый проводник, создаётся магнитное поле, окружающее оба проводника. Следовательно, любые изменения магнитного поля вокруг первого проводника вызовут реакцию во втором проводнике.

Свойство проводника, которое характеризует его способность хранить электрический заряд, называют ёмкостью и обозначают буквой C , единица измерения фарада (Ф). Единица измерения «фарада» названа в честь английского учёного Майкла Фарадея, который в 1821 году сконструировал первый электрический мотор.

В 1831 году английский учёный Майкл Фарадей обнаружил, что изменения электромагнитного поля оказывают воздействие на ток в соседнем проводнике. Впоследствии это явление назвали индукцией.

Индуктивность обозначается заглавной буквой L в честь русского физика Эмилия Христиановича Ленца, который в 1833 году определил отношения между силой, напряжением и током при электромагнитной индукции.

Индуктивность измеряется в генри (Гн).

Единица измерения «генри» названа в честь американского учёного Джозефа Генри, который открыл явление индуктивности примерно в то же время, что и Фарадей.

До 1925 года в Америке существовало два варианта написания слова алюминий «aluminium» и «aluminum». Затем члены Американского Химического Общества приняли официальное решение об использовании в своих публикациях варианта «aluminum».

Медь представляет собой один из самых древних металлов, используемых человеком (более 10000 лет).

У большинства живых существ, обитающих на земле, кровь красного цвета, это обусловлено наличием железосодержащего пигмента — гемоглобина. Но у некоторых примитивных живых организмов основой кровяного пигмента (купроглобина) является медь, и поэтому цвет их крови зелёный.

Это значит, что переход сигнала от одного логического значения к другому в одном из сигнальных проводников сопровождается изменением значения протекающего через него тока, который в сочетании с индуктивностью этого проводника способствует возникновению окружающего магнитного поля. Поле, по мере своего распространения, начинает взаимодействовать с индуктивностью других проводников, находящихся в непосредственной близости, что, в свою очередь, может вызывать помехи и задержки сигнала, которые мы рассмотрим немного позже. На рисунке взаимная индукция обозначена с помощью точки, добавленной к каждому символу, обозначающему индуктивность (Рис. А.3).

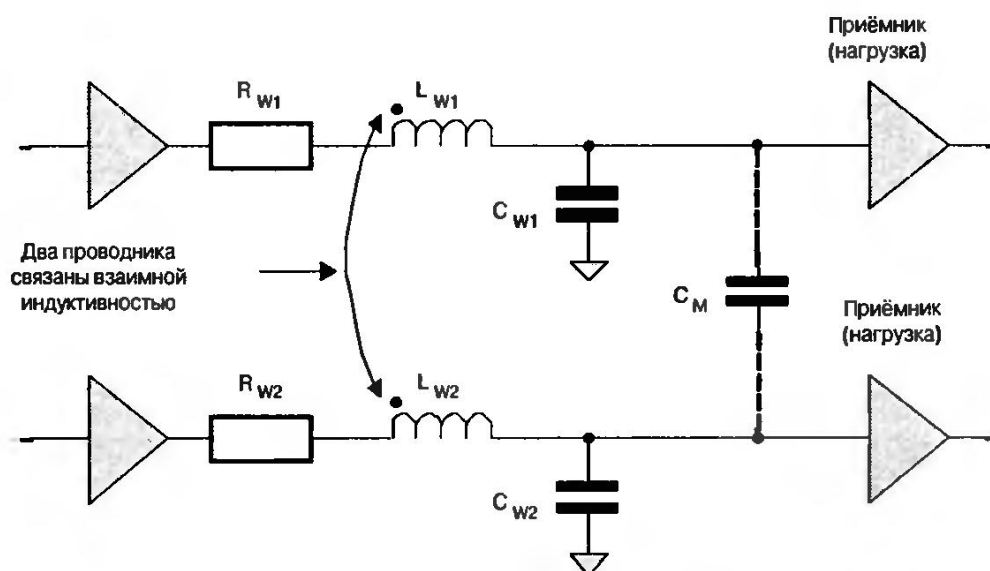


Рис. А.3. Два проводника, находящиеся в непосредственной близости, связаны взаимной индуктивностью

Эффекты на уровне кристалла

Резистивно-ёмкостные эффекты на уровне кристалла

В первых интегральных микросхемах дорожки изготавливались из алюминия (химическое обозначение Al), который обладает сравнительно высоким сопротивлением.

С появлением каждого нового технологического процесса изготовления микросхем размеры устройств становились всё меньше и меньше, и сопротивление алюминиевых дорожек уже не соответствовало новым требованиям.

Производители интегральных микросхем давно размышляли над изготовлением дорожек из меди (химическое обозначение Cu), так как медь является одним из лучших, из известных человечеству, проводников, особенно на высоких частотах. Однако медь обладает рядом недостатков, например, она может легко диффундировать в кремниевый кристалл, что приводит устройство в негодность. Проблема оставалась нерешенной до 1990-х, пока компания IBM не разрешила эту задачу с помощью специальных запирающих слоёв.

Хотя сопротивление меди намного меньше сопротивления алюминия, из-за чрезвычайно малых поперечных размеров сигнальных проводников в интегральных микросхемах, их сопротивление всё же остаётся довольно существенным. Поэтому задержки, связанные с распространением сигналов по дорожкам микросхемы, доминируют над задержками печатной платы из-за свойственных им параметров собственных сопротивлений и ёмкости (то есть RC-характеристик).

Здесь мы не учитываем индуктивность в сигнальных проводниках, и рассматриваться она будет только относительно сети проводников питания. В этих цепях питания обычно используют более широкие проводники со сравнительно меньшим сопротивлением, поэтому в таких случаях следует учитывать все упомянутые характеристики — сопротивление, индуктивность и ёмкость.

Увеличение ёмкостной связи боковых стенок

На заре развития технологий производства интегральных микросхем соотношение размеров дорожек было таковым, что их ширина значительно превосходила высоту (Рис. А.4, а). Уменьшение размеров устройств сказалось на процессах их производства, а это, в свою очередь, привело к изменению соотношений размеров дорожек — теперь высота стала больше ширины (Рис. А.4, б).

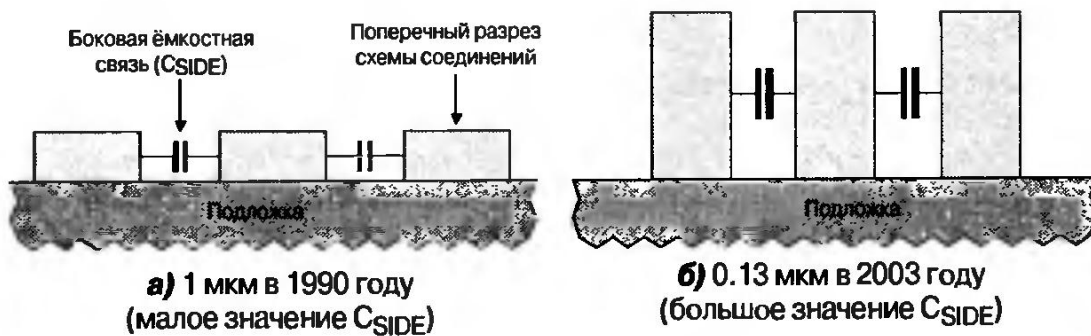


Рис. А.4. Увеличение явлений боковой ёмкости с уменьшением размеров устройства (масштаб не учтён, показано только соотношение размеров)

В результате этих изменений значительно увеличилось значение ёмкости (C_{SIDE}) между боковыми стенками соседних дорожек по сравнению с ёмкостью между основанием проводника и подложкой кристалла C_{AREA} и ёмкостью между боковой стенкой проводника и подложкой C_{FRINGE} . Более того, высокая степень интеграции современных устройств, которые могут поддерживать восемь и более слоёв металлизации, приводит к появлению существенной по величине ёмкостной связи между соседними слоями, которая на Рис. А.5 обозначена как $C_{CROSSOVER}$.

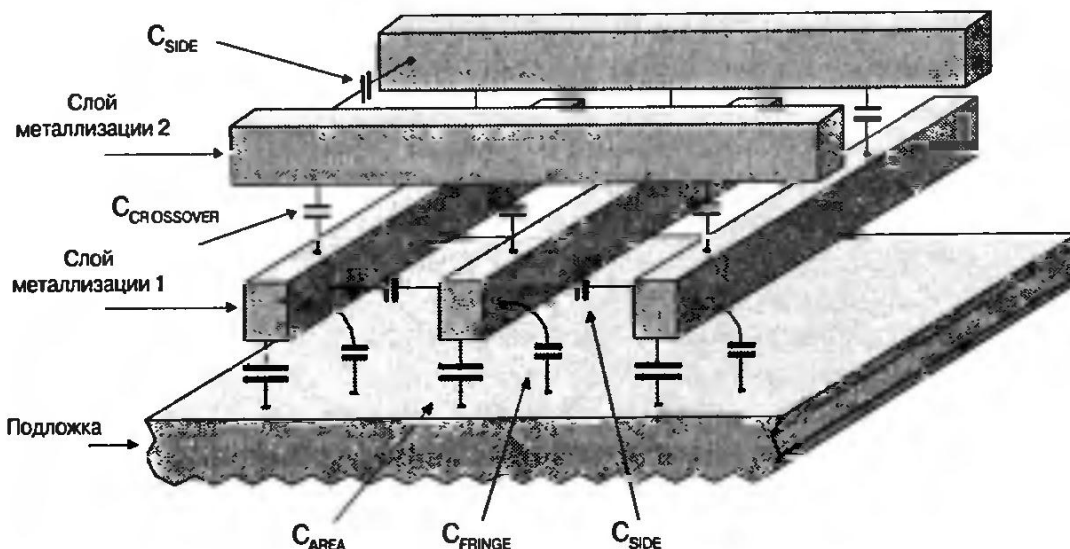


Рис. А.5. Ёмкостные явления, связанные с внутренними проводниками

Совокупность всех этих факторов приводит к повышению уровня сложности перекрёстных помех и изменению временных параметров, которые будут рассматриваться ниже.

Выбросы, вызванные перекрёстными наводками

Английское слово «glitch» (выброс), возможно, произошло от еврейского слова «glitsh» (ошибка, упущение).

При изменении логических уровней сигналов, протекающих в расположенных рядом проводниках, ёмкостная связь между дорожками внутри микросхем приводит к тому, что часть зарядов перетекает из одного проводника в другой. В зависимости от скорости изменения уровней сигналов (крутизны фронтов и спадов) и величины паразитной взаимной ёмкости (C_M), на соседних проводниках могут возникать значительные выбросы, вызванные перекрёстными наводками (Рис. А.6).

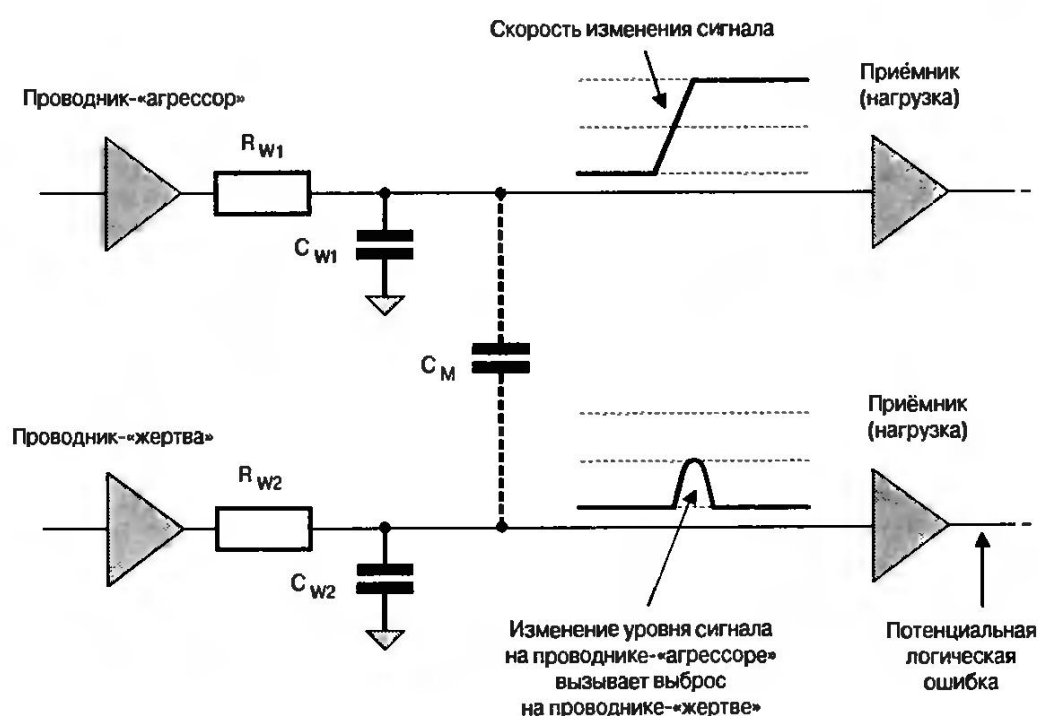


Рис. А.6. Выброс

Из данного примера мы видим, что изменение уровня сигнала в быстродействующей цепи проводника-агрессора провоцирует выброс напряжения на входе приёмника, подключенного к проводнику-жертве. Конечно, этот рисунок даёт нам лишь упрощенное представление всех протекающих процессов. В действительности каждая дорожка может состоять из множества сегментов, расположенных на разных слоях металлизации. Таким образом, сопротивления (R_{W1} и R_{W2}) и ёмкости (C_{W1} и C_{W2}) каждого проводника будут состоять из множества элементов, связанных с различными сегментами. Паразитная взаимная ёмкость (C_M) может также состоять из нескольких элементов.

Пример выброса, показанный на Рис. А.6, представляет собой только одну из четырёх возможных форм искажений, проявление которых основанно на том факте, что фронт или спад импульса в проводнике-агрессоре может происходить при разных логических значениях проводника-жертвы (Рис. А.7).

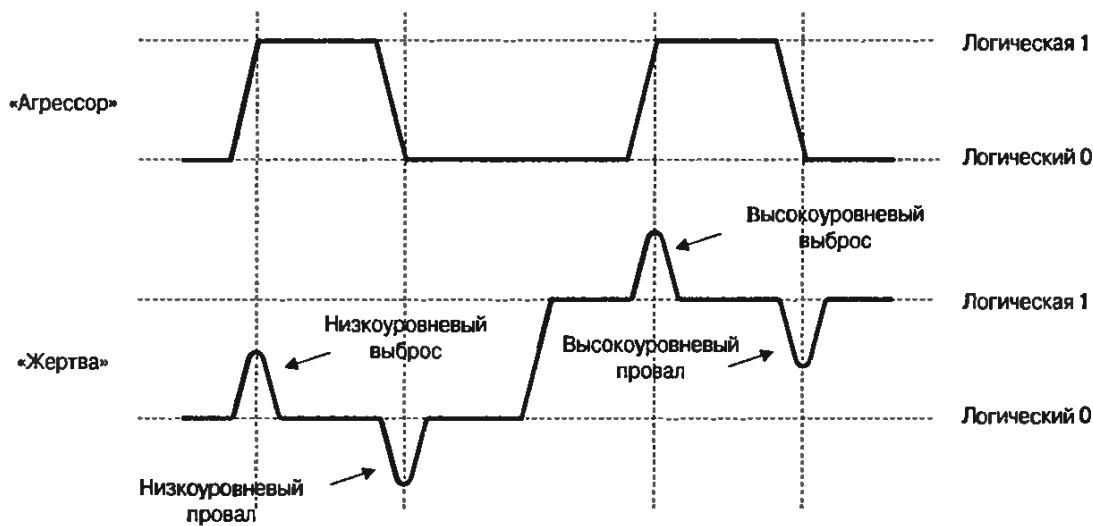


Рис. А.7. Виды выбросов

Если возникающие в проводнике-«жертве» выбросы или провалы пересекают входной порог срабатывания приёмного устройства, то это может привести к функциональной ошибке. В некоторых случаях эта ошибка проявляется в виде неправильных значений, которые впоследствии загружаются в регистр или защёлку. Иногда ошибка заставляет защёлку выполнить непредусмотренную загрузку, установку или сброс. Высокоуровневые выбросы и низкоуровневые провалы на проводнике-«жертве» также могут вызывать нежелательный перенос носителей заряда в транзисторах, формирующих логические элементы, вследствие чего работоспособность схемы может быть нарушена. Хотя эти явления (их ещё называют *эффектами горячих электронов*) не являются главной угрозой в контексте рассматриваемой нами технологии реализации цифровых микросхем с увеличением размеров устройств, реализованных с помощью *глубокого* и *сверхглубокого субмикрона*, проблемы, связанные с данными явлениями выйдут на первое место.

Задержки распространения сигнала

Ситуация становится ещё более сложной, когда одновременно на двух проводниках — на «агрессоре» и на «жертве» — происходит переключение сигнала. Например, при противоположных переключениях сигнал на проводнике-«жертве» может быть задержан во времени (Рис. А.8).

Если бы сигнал на проводнике-«жертве» распространялся изолированно (без учёта действия других проводников), то для преодоления порога срабатывания приёмника понадобилось бы некоторое время (примерно 50 процентов от общего времени переключения из 1 в 0). Однако выброс, спровоцированный выполняющимся в это же время переключением сигнала из 0 в 1 на проводнике-«агрессоре», задерживает сигнал на проводнике-«жертве» выше порога срабатывания в течение ещё некоторого времени. Это явление может привести к нарушению установки данных в системе.

Обратная ситуация может произойти, когда сигналы на обоих проводниках одновременно переключаются в одном и том же направлении, в этом случае скорость изменения уровня сигнала на проводнике-«жертве» может увеличиться (Рис. А.9).

1975 г. Америка.
Разработан микрокомпьютер KIM-1 на базе процессора 6502, изготовленного с помощью МОП-технологии.

Технологический процесс менее 0.5 мкм называется *глубоким субмикроном*.

С некоторого момента, значение которого точно не определено (или зависит от того, кто об этом говорит), мы погружаемся в область *сверхглубокого субмикрона*.

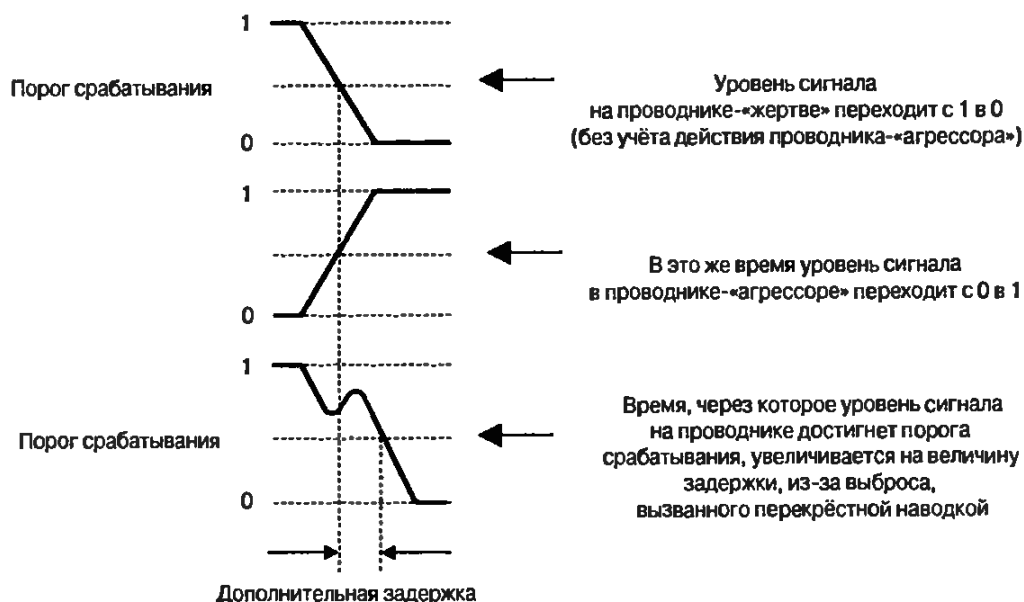


Рис. А.8. Увеличение задержки сигнала, вызванное перекрёстной наводкой

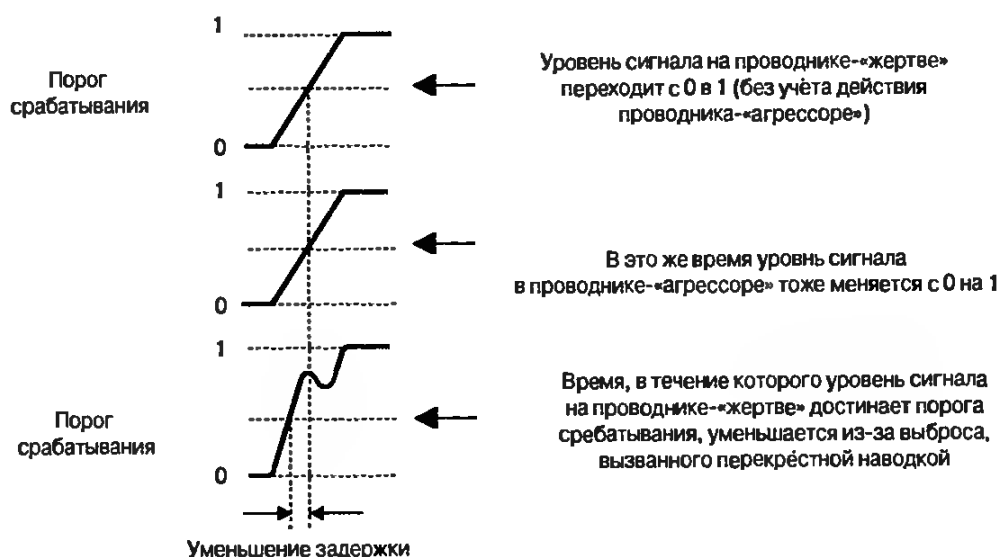


Рис. А.9. Уменьшение задержки сигнала, вызванное перекрёстной наводкой

В этом случае выброс, вызванный одновременным переключением сигналов на обоих проводниках в одинаковом направлении, приводит к тому, что уровень сигнала в проводнике-«жертве» достигает порога срабатывания приёмника раньше, чем ожидалось. Это явление может привести к потере данных системы.

Воздействие нескольких проводников-«агрессоров»

Следует заметить, что практически все рассмотренные выше примеры сильно упрощены. В реальных схемах каждый проводник-«жертва» подвержен влиянию множества проводников-«агрессоров» (Рис. А.10).

Точный анализ современных схем требует, чтобы влияния каждого проводника-агрессора было проанализировано и учтено индивидуально.

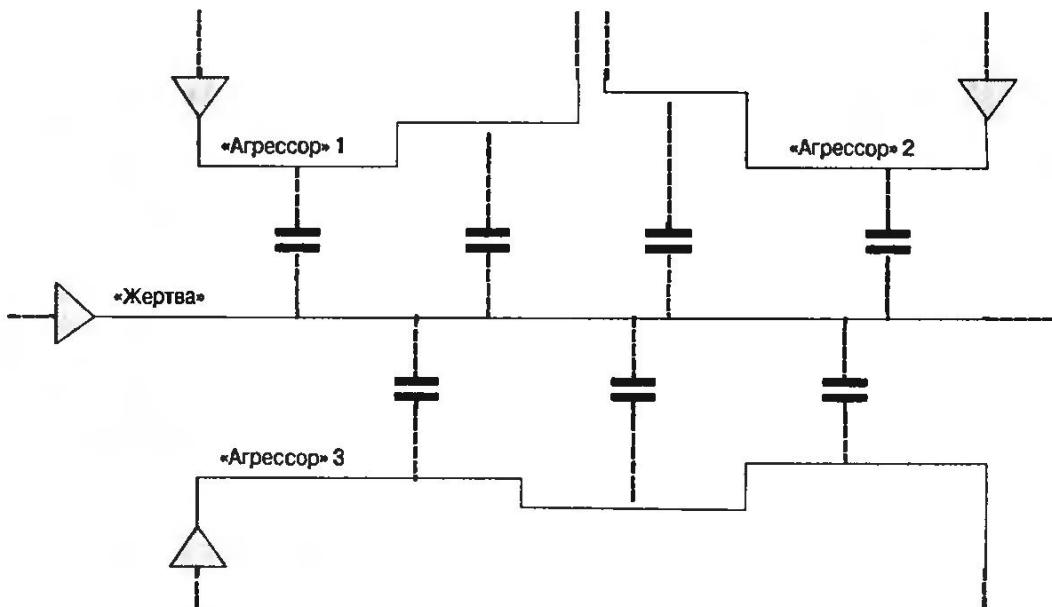


Рис. А.10. Воздействие нескольких проводников-«агрессоров»

И не надо забывать про эффект Миллера

Эффект Миллера, который приобретает особое значение на уровне кристалла, заключается в том, что одновременное изменение сигнала на обеих обкладках конденсатора приводит к изменению его эффективной ёмкости.

На практике такие условия можно встретить, например, если мы рассмотрим сигнал, который распространяется по проводнику находящемуся в середине шины¹⁾. Если на одном или нескольких ближайших проводниках в шине одновременно произойдет переключение сигнала в том же направлении, что и на рассматриваемом проводнике, то связанная с этими проводниками взаимная ёмкость будет уменьшаться, что приведёт к уменьшению задержки переключения сигнала (в дополнение к эффекту уменьшения задержки вызванному выбросом, возникающему из-за перекрёстных наводок, как рассматривалось выше).

И наоборот, если на одном или нескольких ближайших проводниках в шине одновременно произойдет переключение сигнала в противоположных относительно рассматриваемого проводника направлениях, то это приведёт к увеличению взаимной ёмкости и увеличению задержки переключения сигнала.

Причина, по которой мы начали рассматривать явления искажений на уровне кристалла, заключается в том, что эти эффекты более близки и понятны разработчикам цифровых микросхем. Однако на практике явления нарушающие целостность сигнала (за исключением явлений, связанных с корпусом микросхемы) не представляют какого-либо интереса для инженеров, использующих ПЛИС, так как эти проблемы решаются изготовителями микросхем, чего нельзя сказать про искажения сигнала на уровне печатной платы, которые проявляются при установке на неё различных ПЛИС.

1975 г. Америка.
Компания *Sphere Corporation* представила микрокомпьютер *Sphere 1* на базе процессора 6800.

¹⁾ При рассмотрении электронных систем термином «шина» обозначают совокупность сигналов, выполняющих одинаковые функции и передающие данные одного типа.

1975 г. Америка.
Билл Гейтс (Bill Gates) и Пол Аллен (Paul Allen) основали компанию Microsoft.

В большинстве случаев для изготовления печатных плат используется материал FR4 (аббревиатура образована от слов «*flame retardant*» — огнезащитный состав). (У нас этот материал называют текстолит или стеклотекстолит. — Прим. ред.)

Эффекты на уровне печатной платы

Эффекты индуктивно-ёмкостного характера на уровне печатной платы

При рассмотрении явлений, происходящих на печатной плате, следует заметить, что влияние сопротивления медных дорожек на искажения сигналов весьма незначительно в сравнении с действием других эффектов. Обусловлено это тем, что дорожки на плате имеют ширину примерно 125 микрон и толщину 18 микрон, вследствие чего их поперечное сечение намного больше, чем у проводников на кристалле (чем больше поперечное сечение проводника, тем меньше его сопротивление). Но, с другой стороны, в этом случае наиболее сильно проявляют себя эффекты взаимной ёмкости и индуктивности. Поэтому при анализе сигналов на печатной плате рассматриваются их индуктивно-ёмкостные связи (LC-связи).

Разные способы представления проблемы

В современных быстродействующих высокотехнологичных печатных платах, почти все без исключения проводники работают подобно линиям передачи сигналов. Это значит, что мы можем изобразить фронт (или спад) сигнала в виде волны, распространяющейся через проводник с течением времени (Рис. А.11).

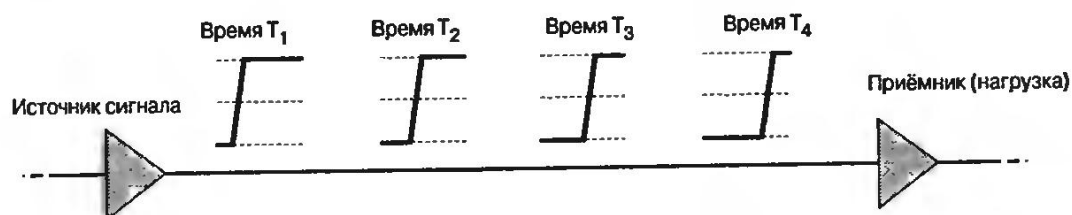


Рис. А.11. Фронт сигнала, распространяющийся по проводнику с течением времени

Что касается линий передачи, в которых задержка распространения сигнала больше длительности его распространения, то все возникающие при этом значения взаимных ёмкостей и индуктивностей зависят от текущего положения движущегося фронта. Это значит, что мы должны рассматривать проводник в виде последовательности небольших RLC-сегментов, которые на рисунке с целью его упрощения не показаны.

Эффекты взаимной ёмкости и индуктивности

Самое интересное в анализе искажений сигналов начинается тогда, когда мы рассматриваем две дорожки печатной платы, находящиеся в непосредственной близости друг к другу. Допустим, что по одному из таких проводников, который мы назовём «агрессором», движется фронт импульса. Этот проводник в свою очередь связан индуктивной и ёмкостной связью с соседним проводником-«жертвой» (Рис. А.12).

Наличие ёмкостной связи приведёт к тому, что движущийся по проводнику-«агрессору» фронт импульса вне зависимости от направления своего движения вызовет положительный импульс тока в проводнике-«жертве». В отличие от него, индуктивная связь вызовет в проводнике-«жертве» отрицательный импульс тока при движении

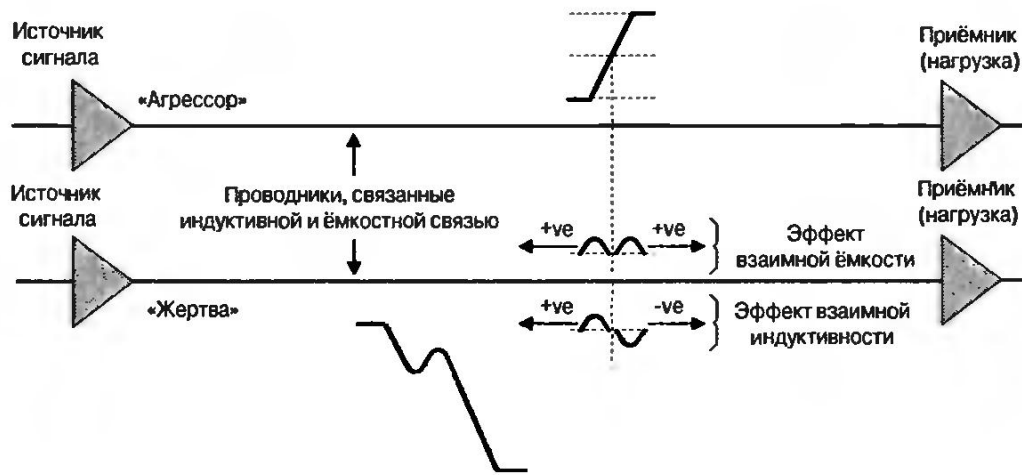


Рис. А.12. Эффекты взаимной индуктивности и ёмкости

фронта по «агрессору» в прямом направлении, и положительный импульс — при движении в обратном направлении.

Это значит, что взаимные ёмкостные и индуктивные связи могут усиливать друг друга при распространении сигнала в начале проводника (в области подключения проводника к источнику сигнала). И наоборот, они могут компенсировать друг друга при прохождении сигнала в конце проводника (в месте подключения приёмника сигнала). Другими словами, можно надеяться, что в лучшем случае одинаковые по амплитуде перекрёстные импульсы сложатся в противофазе и устранят друг друга. К сожалению, такое явление может произойти только случайно, если диэлектрический (изолирующий) слой вокруг проводников будет однородным. В реальном мире диэлектрик под дорожками в силу различных факторов будет неоднороден. Поэтому величина взаимной индукции остаётся неизменной, а значение взаимной ёмкости будет уменьшаться. Вследствие этого произойдёт увеличение влияния индуктивной составляющей, что вызовет повышение уровня шумов на входе приёмника. В реальных печатных платах индуктивные шумы могут от двух до четырёх раз превышать уровень ёмкостных шумов.

Если по каким-либо причинам характеристики обратной цепи ухудшится, то индуктивная составляющая может в 10...30 раз превысить уровень ёмкостной помехи. В таком режиме, когда перекрёстные помехи в основном определяются индуктивными составляющими, возникающие при этом выбросы мы называем *коммутационными шумами*. В случаях, когда несколько сигналов используют одну и ту же обратную цепь (общий, «земляной» провод), коммутационные шумы проходят через общий провод и называются *шумами общего провода*.

Эффект Миллера наоборот

При анализе искажений сигнала на уровне кристалла мы рассмотрели так называемый эффект Миллера, суть которого заключается в том, что если один или несколько сигналов переключается с одинаковой полярностью (переходят с одного уровня на другой в одном направлении) вместе с рассматриваемым сигналом, то значение их взаимной ёмкости будет уменьшаться, что приведёт и к уменьшению задержки распространения.

Однако, как упоминалось ранее, задержка распространения сигналов на уровне кристалла в основном носит резистивно-ёмкостной характер, а на печатной плате — определяется значением индуктивно-ёмкостных параметров. Это значит, что если один или несколько сиг-

1975 г. Америка.
Эд Робертс (Ed Roberts) вместе с сотрудниками Массачусетского технологического института разработали микрокомпьютер Altair 8800 на базе одноимённого процессора (8800).

1975 г. Англия.
Впервые в цифровых часах и калькуляторах стали применяться жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ).

налов на печатной плате переключаются в одном и том же направлении с находящимся в непосредственной близости рассматриваемым проводником, то значение взаимной индукции между этими проводниками увеличится. В неоднородном диэлектрике доля индуктивных искажений больше, чем ёмкостных, поэтому увеличение индуктивности сигнальных проводников приведёт к увеличению задержки распространения.

И наоборот, если один или несколько сигналов переключаются в *противоположном* с рассматриваемым проводником направлении, то это приведёт к уменьшению задержки распространения.

Эффекты линии передачи

В дополнение к рассмотренным выше процессам, конечно же, немаловажную роль играют и классические эффекты линии передачи, связанные с согласованием. В частности это относится к использованию последовательно включённых согласующих резисторов на выходе и параллельных резисторов на входе линии, но эти явления хорошо описаны во многих книгах, и нами рассматриваться не будут.

Как можно облегчить себе жизнь

К сожалению, на 70...80% проблема обеспечения целостности сигналов на печатной плате связана не с самой платой, а с корпусом микросхемы (ПЛИС).

В идеале микросхема должна иметь большое количество пар выводов вида питание-общий провод, и эти пары должны быть равномерно распределены по всей поверхности её корпуса с тем, чтобы обеспечить все сигнальные выводы индивидуальными, находящейся по соседству, цепями обратной передачи. На практике же выводы питания и общего провода в микросхемах обычно располагаются группами отдельно от сигнальных выводов (контактов ввода/вывода).

Вы можете сильно упростить себе жизнь, если будете использовать на практике несложные правила, а именно для элементов ввода/вывода, особенно для шин и высокоскоростных соединений, лучше использовать дифференциальные пары, чем отдельные проводники. Конечно, это сразу же увеличит в 2 раза количество требуемых контактов на корпусе микросхемы, необходимых для организации процесса ввода/вывода, но всё-таки стоит потратить на это время, если, конечно, вы можете себе позволить дополнительные расходы на реализацию дополнительных контактов.

Другая рекомендация относится к внутренним программируемым согласующим резисторам, которыми комплектуются устройства некоторых поставщиков. Их использование необязательно, и вместо них можно применить внешние дискретные компоненты. Внутренние согласующие резисторы изначально предназначались для уменьшения количества внешних элементов на печатной плате, тем самым, позволяя её разгрузить, но они также могут применяться для решения проблем целостности сигналов. Для этого существует эмпирическое правило, которое гласит, что для любых сигналов со временем фронта или спада 500 пикосекунд или менее, применение внешних согласующих элементов может разрушить сигнал, и в этом случае необходимо использовать внутрикристалльные элементы.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

ЭФФЕКТЫ ЗАДЕРЖКИ В ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО СУБМИКРОНА

Введение

При проектировании систем, основанных на использовании заказных микросхем (ASIC) или специализированных стандартных блоков (ASSP), расчет необходимых временных параметров и эффектов представляет собой довольно сложную задачу. С появлением каждого нового уровня технологического процесса анализ временных эффектов становится всё более устрашающим. С некоторого момента, значение которого точно не определено (или разными людьми определяется по-разному), но находится на уровне примерно 0.5-микронного (500 нанометров) технологического процесса, мы погружаемся в область, которой свойственны так называемые *эффекты задержки глубокого субмикрона*.

Конечно же, что касается ПЛИС, то их разработчики решают множество проблем, связанных с проявлением этих задержек, тем самым, скрывая их от конечного пользователя (то есть от проектировщика устройств на основе ПЛИС). Основываясь на этом, можно сказать, что у нас нет необходимости обсуждать эти явления в контексте ПЛИС. С другой стороны, разговоры об этих задержках ведутся постоянно, но я ни разу не встречал их полного и понятного любому человеку описания. Именно поэтому нижеследующее описание представлено здесь для вашего удовольствия и наслаждения.

Развитие спецификаций задержки

Давным-давно, в былые времена, где-то после Юрского периода, когда Землю населяли динозавры — скажем, в конце 1970-х или начале 1980-х годов — жизнь инженеров, разрабатывающих системы на основе заказных специализированных микросхем, была куда проще, чем у наших современников. Спецификация задержек для ранних (мультимикронных) технологий была элементарной во всех отношениях. Давайте рассмотрим простой 2-входовый вентиль И, для которого задержка прохождения данных от входа до выхода изначально была одинаковой для фронтов и спадов поступающих на вход импульсов (Рис. Б.1, а).

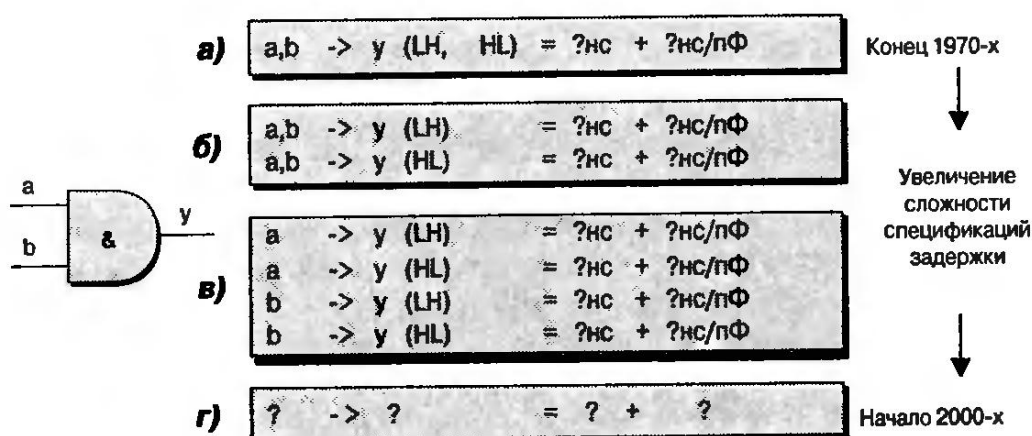


Рис. Б.1. Увеличение сложности спецификации задержек с течением времени

Содержимое этого приложения взято из моей книги «Designus Maximus Unleashed» (ISBN 0-7506-9089-5) с любезного разрешения издателя.

1975 г. Разработан микропроцессор 6502 с использованием МОП-технологии.

Однако уменьшение геометрических размеров устройств сопровождалось увеличением сложности спецификаций задержек. На следующем этапе задержки стали различаться для фронтов (возрастание сигнала) и спадов (спад сигнала) поступающих импульсов (Рис. Б.1, б), а затем появилось отличие в задержках для разных входов элементов (Рис. Б.1, в).

В прежние времена задержки обычно описывались в виде записи $t_{нс} + t_{нс}/n\Phi$. В этом представлении первая часть ($t_{нс}$) отображает фиксированную задержку в наносекундах¹⁾ для всего логического элемента. К ней добавляется некоторая дополнительная задержка, измеряемая в наносекундах на пикофарад ёмкости нагрузки²⁾ ($t_{нс}/n\Phi$). Разумеется, эта форма записи просто не может описывать явления задержки в субмикронных технологиях, хотя бы вследствие того, что в этой области, как будет показано ниже, задержка определяется RLC-параметрами.

Набор определений

Перед тем, как с головой погрузиться в пучину субмикронных задержек, сначала необходимо рассмотреть ряд определений, которые представлены ниже.

Крутизна импульса

Крутизна (или наклон) импульса представляет собой скорость изменения сигнала при его переходе с уровня логического 0 на уровень логической 1 и наоборот. При мгновенном переходе, который не может быть достигнут в реальном мире, обеспечивается максимально возможное значение крутизны (Рис. Б.2).

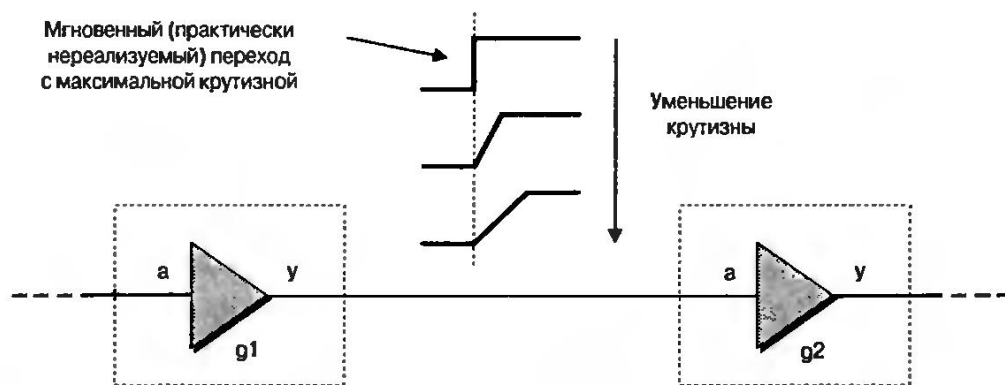


Рис. Б.2. Крутизна сигнала характеризует время, необходимое для перехода сигнала с уровня на уровень

Крутизна импульса представляет собой одну из выходных характеристик источника сигнала совместно с параметрами внутренних соединений (проводников) и входных характеристик нагрузки (вентилей).

¹⁾ Современные устройства работают намного быстрее, их задержка может измеряться в пикосекундах.

²⁾ Основной единицей измерения ёмкости служит Фарада в честь британского учёного Майкла Фарадея (Michael Faraday), который в 1821 году сконструировал первый электромотор.

Входной порог срабатывания

Порог срабатывания представляет собой точку на входной характеристике нагрузки (то есть логического элемента — вентиля), и характеризует собой уровень напряжения, пересечение которого входным сигналом будет означать, что на входе элемента логическое состояние сменилось на противоположное. Входной порог срабатывания обычно описывается в процентах от величины разности напряжений между уровнями логического 0 и логической 1, и каждый вход может иметь различные пороги срабатывания для фронтов и спадов (Рис. Б.3).

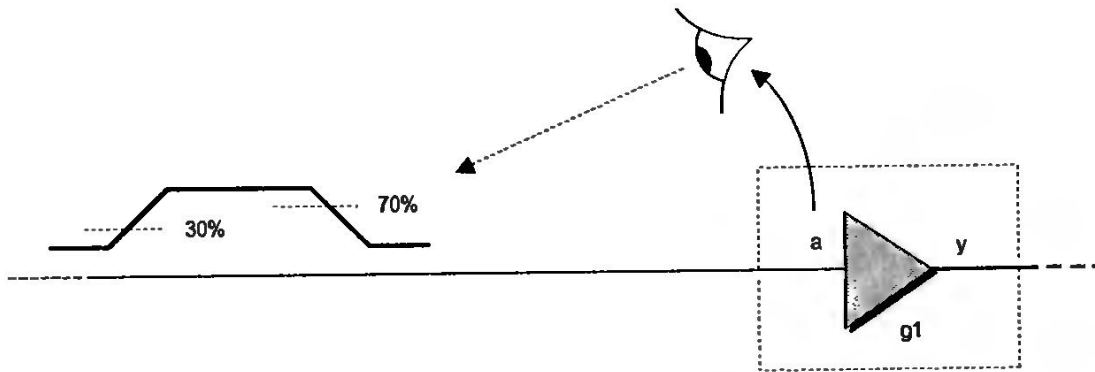


Рис. Б.3. Входной порог срабатывания может иметь различные значения для фронтов и спадов

Внутренние и внешние задержки

Внутренними называют задержки, которые свойственны внутренней архитектуре логических функций, соответственно внешние задержки относятся к внутренним (межблочным) соединениям (Рис. Б.4).

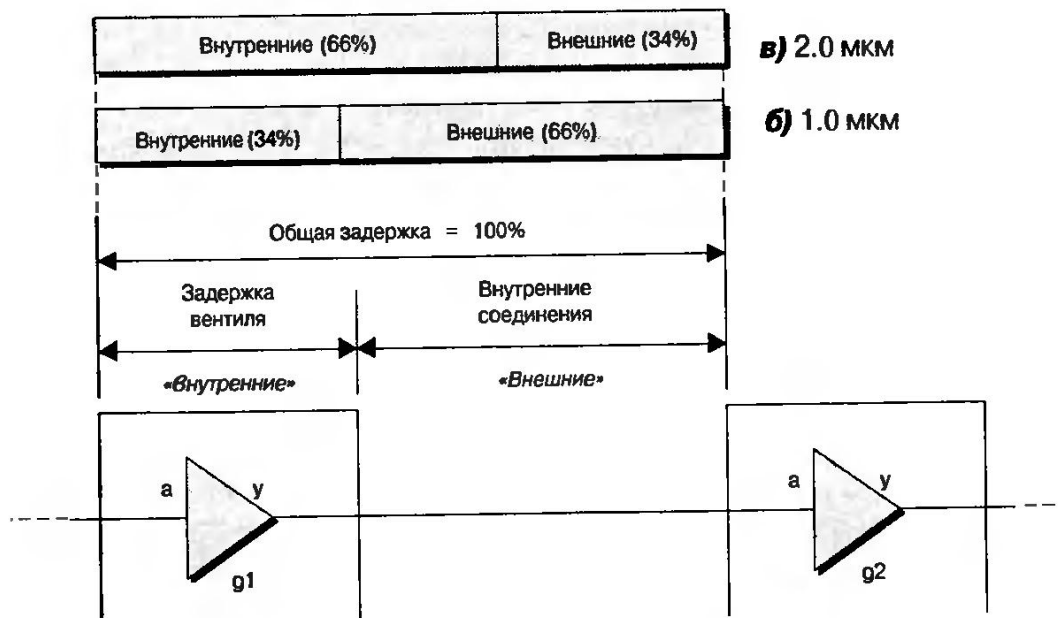


Рис. Б.4. Внутренние и внешние задержки

Во времена ранних мультимикронных технологий внутренние задержки преобладали над внешними. Например, в 2-микронной технологии внутренние задержки составляли величину порядка двух третей от общей задержки (Рис. Б.4, а). Но с уменьшением геометрических размеров элементов микросхем внешняя задержка стала расти. Так в 1-микронной технологии соотношение внутренних и внешних задержек изменилось с точностью до наоборот (Рис. Б.4, б).

1975 г. Америка.
Компания Microsoft
разработала язык
Basic 2.0 для мик-
рокомпьютера
Altair 8800.

1976 г. Америка.
Компания Zilog
разработала микропроцессор Z80.

1976 г. Стив Возняк (Steve Wozniak) и Стив Джобс (Steve Jobs) разработали микрокомпьютер Apple I на базе процессора 6502.

Со временем тенденция роста доли внешних задержек сохраняется, так как размеры внутренних соединений уменьшаются медленнее, чем размеры вентиля и транзисторов. В современных глубоко-субмикронных технологиях доля внешних задержек может составлять 80 процентов и более от величины общей задержки.

Задержки вывод-вывод и точка-точка

По большому счёту задержки типа *вывод-вывод* ($Pn-Pn$ — *pin-to-pin*) и *точка-точка* ($Pt-Pt$ — *point-to-point*) являются современными названиями внутренних и внешних задержек соответственно. Задержка *вывод-вывод* характеризует собой время от прихода воздействия на вход вентиля до появления соответствующей реакции на его выходе, а *точка-точка* описывает время распространения сигнала между выходом источника сигнала и входом нагрузки¹⁾ (Рис. Б.5).

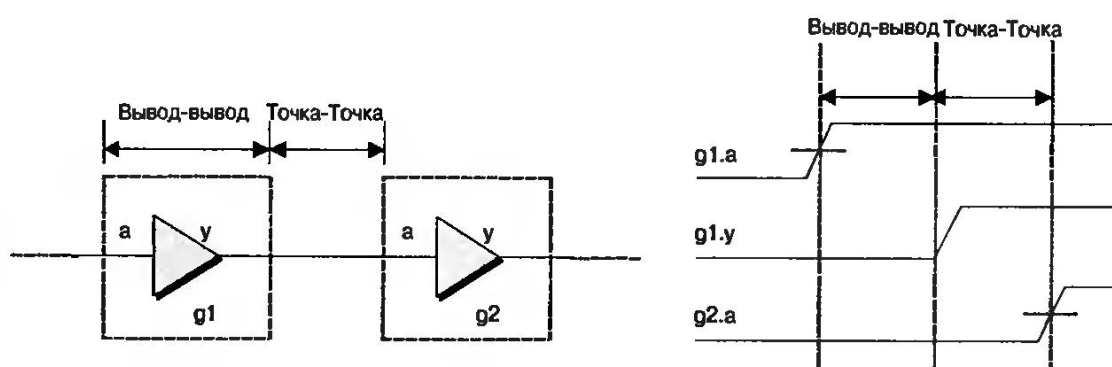


Рис. Б.5. Задержки вывод-вывод и точка-точка

Если быть более точным, то задержка *вывод-вывод* равна времени от момента достижения входным сигналом порога срабатывания до *начала* соответствующей реакции на выходе вентиля, а задержка *точка-точка* определяется от *начала* соответствующей посылки источника сигнала до достижения ею порога срабатывания нагрузки.

Существует ряд причин, почему мы придаём особое значение тому факту, что в качестве завершающего отсчета для задержки вывод-вывод мы берём *начало* отклика, так же как задержку точка-точка отсчитываем от *начала* посылки источника сигнала. В прошлом эти задержки отсчитывались от времени, когда сигнал достигал уровня 50% от разницы между 0 и 1. Такой подход был допустим, так как считалось, что порог срабатывания у вентиля также составляет 50%. Но в связи со значительным увеличением крутизны импульсов предположим, что входной порог срабатывания снизился до 30%. Если в этом случае мы будем полагать, что задержка измеряется от уровня 50 процентов, то вполне вероятно, что вентиль нагрузки увидит фронт (или спад) импульса до того, как мы будем ожидать его появления. Также при моделировании смешанных (аналоговых и цифровых) сигналов достоверное время прохождения фронта (или спада) импульса от выхода вентиля в цифровой части к аналоговым компонентам определяется по точке, в которой и начинается формироваться фронт импульса на выходе вентиля.

¹⁾ Следует заметить, что разработчики печатных плат обычно не анализируют внутреннюю структуру электронных компонентов, и обычно рассматривают их как «чёрные ящики». А упомянули мы об этом потому, что под термином «точка-точка» эти разработчики могут подразумевать время распространения сигнала между двумя точками на плате.

Зависимость от состояния и зависимость от крутизны

Все параметры, связанные с входом вентиля (включая задержку вывод-вывод), которые зависят от логических значений на других входах этого элемента, называются *зависимыми от состояния*. Аналогично, все параметры, связанные с входом вентиля (включая задержку вывод-вывод), которые зависят от крутизны поступающих на их входы импульсов, называются *зависимыми от крутизны*. Эти определения пока не оказывают существенного влияния на работу устройств, хотя в недалёком будущем они могут проявить себя по-другому.

Альтернативные модели внутренних соединений

С уменьшением размеров структур на кремниевом кристалле и увеличением количества вентилях в устройстве, задержки на внутренних соединениях стали более существенными, чем на вентилях, что привело к увеличению сложности алгоритмов, необходимых для их точного описания. Кратко эти алгоритмы рассмотрены ниже.

Модель с сосредоточенной нагрузкой

Как отмечалось выше, задержка на вентилях вида вывод-вывод в первых мультимикронных технологиях доминировали над задержками вида точка-точка. К тому же, длительность фронтов и спадов сигнала обычно была больше, чем время, необходимое для их прохождения через внутренние соединения. В этом случае для описания внутренних соединений обычно было достаточно так называемой модели внутренних соединений с сосредоточенной нагрузкой (Рис. Б.6).

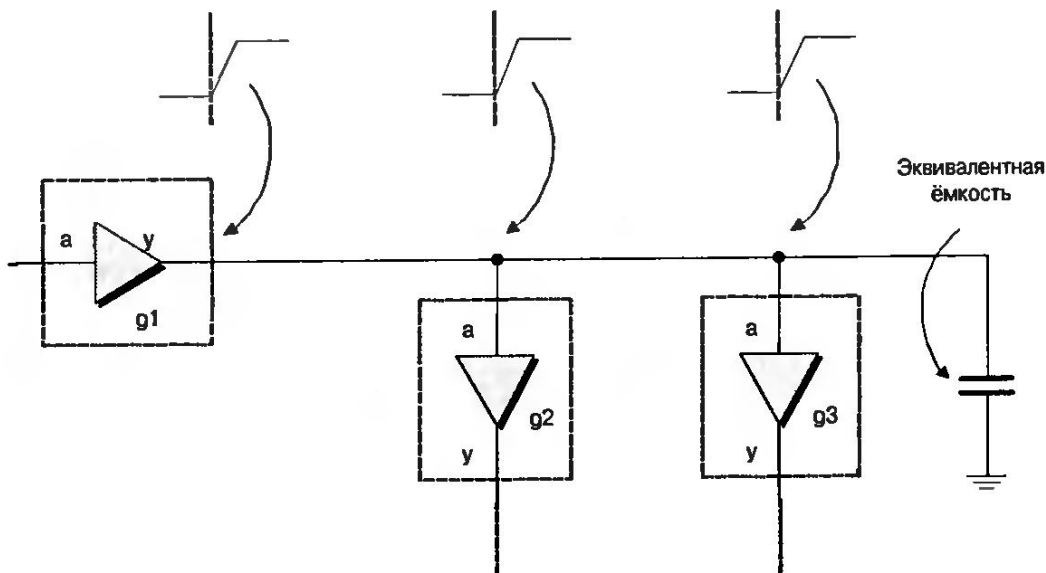


Рис. Б.6. Модель внутренних соединений с сосредоточенной нагрузкой

Идея этой модели состоит в том, что все ёмкости, связанные с проводниками и входами вентиля, объединяют вместе и образуют один *эквивалентный конденсатор*. Ёмкость этого конденсатора затем умножалась на параметр вентиля (источника сигнала), который обычно выражался в нс/пФ для получения значения задержки точка-точка. Модель с сосредоточенной нагрузкой отличается тем, что все узлы на проводнике начинают передачу в одно и то же время и с одинаковой крутизной импульса. Эта модель также может называться *чистой RC-моделью*.

1977 г. Америка.
Компания Apple разработала микрокомпьютер Apple II.