

Лекция 6. Электрические свойства цифровых интегральных микросхем

Цель лекции – предоставить магистрантам знания об электрических характеристиках, необходимые для эффективного проектирования, анализа и оптимизации цифровых интегральных микросхем.

Введение

В цифровых схемах сигналы могут принимать одно из двух дискретных значений, обычно обозначаемых как 1 и 0. Это контрастирует с аналоговыми схемами и системами, где сигналы могут принимать любые значения в непрерывном диапазоне. В двоичных цифровых системах, которые широко используются в современной электронике, сигналы представлены в виде последовательностей единиц и нулей. Оцифровка аналоговых сигналов имеет несколько значительных преимуществ. Во-первых, цифровые сигналы можно многократно сохранять, дублировать и передавать без потери качества. Это возможно благодаря тому, что дискретные уровни легко воспроизводятся и не подвержены затуханию или искажениям, которые часто встречаются в аналоговых системах. Во-вторых, цифровые системы более стабильны и надежны. Логические уровни 1 и 0 четко определены, что делает их менее чувствительными к помехам и шумам. Это снижает вероятность ошибок, связанных с постепенными изменениями сигнала, которые характерны для аналоговых систем. В-третьих, обработка цифровых сигналов более проста благодаря использованию цифровых вычислительных устройств, таких как процессоры и микроконтроллеры. Логические операции и вычисления над цифровыми сигналами выполняются быстро и точно. Кроме того, цифровые системы могут эффективно восстанавливаться от ошибок и искажений, так как для этого можно использовать методы коррекции ошибок и повторной передачи данных.

В цифровых схемах используются полупроводниковые электронные устройства для обработки или объединения двоичных сигналов в соответствии с заданными требованиями. Эти схемы известны как логические элементы. На практике два двоичных значения представляются различными уровнями напряжения. Цифровые интегральные схемы предполагают создание множества различных электронных устройств на одном кремниевом кристалле. Такой подход позволяет значительно уменьшить размеры и стоимость электронных устройств, а также повысить их производительность. Уровень интеграции цифровых схем классифицируется в зависимости от количества логических вентилей, которые могут быть размещены на одном кристалле. Уровень интеграции, от маломасштабной интеграции (МИС) до сверхбольшой интеграции (УБИС), влияет на конструкцию и производительность этих схем. Понимание электрических свойств этих цифровых интегральных микросхем имеет решающее значение для оптимизации их производительности. В этой лекции будут рассмотрены ключевые электрические характеристики, включая передаточные характеристики, рассеивание мощности, переходные характеристики и произведение мощности и задержки (PDP – power-delay product).

Передаточная характеристика

Важной электрической характеристикой любого логического элемента является передаточная характеристика. Она отображает зависимость выходного напряжения от входного напряжения и позволяет оценить, как логический элемент преобразует входные сигналы в выходные.

На рис.4.1 можно наблюдать несколько ключевых параметров передаточной характеристики. Рассмотрим их на примере инвертора, который представляет собой один из наиболее простых логических элементов:

- **Выходное низкое напряжение ($U_{Вых.Н}$)** - это значение выходного напряжения, которое соответствует логическому нулю;

- **Выходное высокое напряжение ($U_{Вых.В}$)** - это значение выходного напряжения, которое соответствует логической единице.

- **Входное низкое напряжение ($U_{Вх.Н}$)** - это максимальное значение входного напряжения, при котором логический элемент интерпретирует сигнал как логический ноль. Значения выше этого порога могут восприниматься как неопределенные.

- **Входное высокое напряжение ($U_{Вх.В}$)** - это минимальное значение входного напряжения, при котором логический элемент интерпретирует сигнал как логическую единицу. Значения ниже этого порога также могут быть неопределенными.

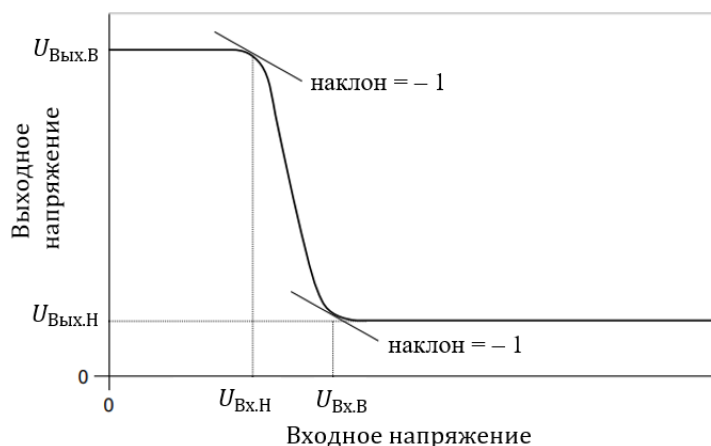


Рисунок 4.1. Передаточная характеристика инвертора

Разница между двумя выходными уровнями называется логическим перепадом:

$$U_{ЛП} = U_{Вых.В} - U_{Вых.Н} \quad (2.1)$$

В цифровых логических схемах входные значения между $U_{Вх.Н}$ и $U_{Вх.В}$ находятся в области неопределенности, где логический элемент может неправильно интерпретировать входной сигнал. Это связано с тем, что в этом диапазоне напряжений логические уровни не определены однозначно, и результат работы логического элемента может быть нестабильным или непредсказуемым. Чтобы минимизировать влияние этой неопределенности, следует стремиться к уменьшению диапазона между $U_{Вх.Н}$ и $U_{Вх.В}$.

По определению, $U_{Вх.Н}$ и $U_{Вх.В}$ - это входные напряжения, для которых наклон передаточной характеристики равен -1 (+1 для неинвертирующего логического вентиля):

$$\left. \frac{dU_{Вых}}{dU_{Вх}} \right|_{U_{Вх}=U_{Вх.Н}} = -1, \quad (2.2)$$

$$\left. \frac{dU_{Вых}}{dU_{Вх}} \right|_{U_{Вх}=U_{Вх.В}} = -1, \quad (2.3)$$

Пределы шума важны с точки зрения частоты битовых ошибок при наличии электрических помех. Они определяются как:

$$U_{НУШ} = U_{Вх.Н} - U_{Вых.Н} \quad (2.4)$$

$$U_{ВУШ} = U_{Вых.В} - U_{Вх.В} \quad (2.5)$$

где $U_{нуш}$ и $U_{вуш}$ – низкий и высокий уровень шума, соответственно. Электрические помехи с амплитудой, меньшей, чем допустимый уровень шума, ослабляются, в то время как помехи большей амплитуды могут создавать битовую ошибку. Поэтому желательно максимально снизить допустимый уровень шума.

Идеальная характеристика передачи напряжения будет показывать резкий переход между состояниями логического нуля и логической единицы, что обеспечивает максимальные шумовые запасы и минимизирует вероятность ошибок в интерпретации сигналов.

Рассеиваемая мощность

Рассеиваемая мощность является ключевым фактором при проектировании и эксплуатации цифровых интегральных схем, поскольку она оказывает значительное влияние на производительность и надежность электронных устройств. В портативных устройствах, таких как смартфоны и ноутбуки, важно минимизировать рассеиваемую мощность для увеличения срока службы батареи. Высокое потребление энергии приводит к быстрому разряду аккумулятора, что сокращает время работы устройства. Поэтому разработчики стремятся оптимизировать схемы и устройства, чтобы снизить их энергопотребление. Для всех типов цифрового оборудования, будь то портативное или стационарное, важно минимизировать рассеиваемую мощность из-за выделяющегося тепла. Тепло, образующееся в результате работы интегральных схем, необходимо эффективно отводить, чтобы избежать перегрева и повреждения компонентов. Высокая температура может негативно сказаться на производительности и долговечности устройства, а также вызвать сбои в работе. Чтобы справиться с этим, часто используются специальные тепловые решения. Например, для охлаждения интегральных схем разрабатываются корпуса с теплоотводами и вентиляторами, которые помогают отводить тепло от критически важных компонентов. В некоторых случаях, особенно в высокопроизводительных системах, может потребоваться водяное охлаждение, которое обеспечивает более эффективное отведение тепла по сравнению с воздушным охлаждением. Кроме того, в случаях с СБИС, требования к рассеиванию мощности могут ограничивать количество вентиляторов и функциональных блоков, которые можно разместить на одном кристалле. Это связано с тем, что увеличение числа вентиляторов приводит к росту потребляемой мощности и выделяемого тепла, что усложняет процесс охлаждения и может приводить к перегреву. Эти аспекты подчеркивают важность эффективного управления энергией и теплом в цифровых интегральных схемах, что является ключевым для обеспечения их надежности, производительности и долговечности.

В рассеивании может преобладать статическая составляющая или динамический вклад. В некоторых случаях оба вклада могут быть одинаковыми по величине, поэтому необходимо учитывать оба фактора. Рассеивание постоянного тока (статического) зависит от состояния выходного сигнала и разветвления.

P_H – это рассеиваемая мощность постоянного тока с низким (логически нулевым) выходным состоянием. Как показано на рисунке 4.2, низкая выходная мощность определяется как:

$$P_H = U_{П} \cdot I_{ПН}, \quad (2.6)$$

где $U_{П}$ – напряжение питания, а $I_{ПН}$ – ток питания, который течет при низком выходном напряжении. Для показанного случая рассматриваемый вентиль представляет собой двухвходовой вентиль И-НЕ. Следовательно, выходное низкое состояние существует, когда оба входа привязаны к напряжению питания.

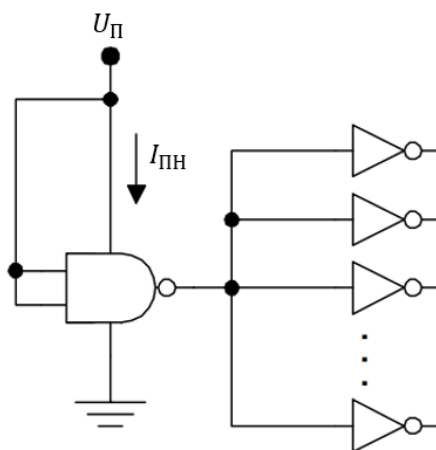


Рисунок 4.2. Определение P_H

P_B – рассеиваемая мощность постоянного тока для высокого выходного состояния. Согласно рисунку 4.3 выходная высокая мощность составляет:

$$P_B = U_{П} \cdot I_{ПВ}, \quad (2.7)$$

где $I_{ПВ}$ – ток, протекающий от источника питания к вентилю при условии выхода логической единицы. Для двухвходового вентиля И-НЕ, показанного на рисунке, выходное состояние высокого уровня существует, когда оба входа подключены к земле.

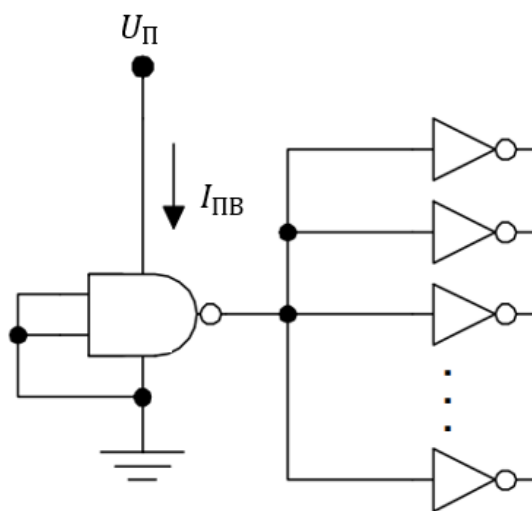


Рисунок 4.3. Определение P_B

Среднюю рассеиваемую мощность постоянного тока можно рассчитать по формуле:

$$P_{DC} = \frac{P_H + P_B}{2} \quad (2.8)$$

Переходные характеристики

Переходные характеристики имеют большое значение из-за их прямой связи со скоростью цифровых схем. Логические вентили с улучшенной переходной характеристикой позволяют использовать более высокие тактовые частоты и более высокие скорости передачи данных. На рис. 4.4 показано переходное поведение инвертора

с прямоугольным импульсом, подаваемым на вход. Четырьмя важными переходными параметрами для инвертора являются: t_{PHV} задержка распространения от низкого к высокому уровню, t_{PBH} – задержка распространения от высокого к низкому уровню, t_H – время нарастания выходного сигнала, t_C – время спада выходного сигнала.

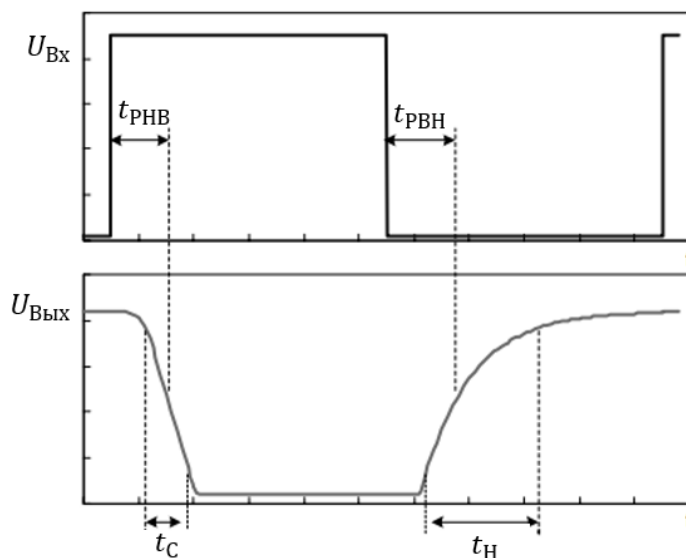


Рисунок 4.4. Переходная характеристика инвертора с прямоугольной формой входного сигнала.

Время нарастания и время спада выходного сигнала измеряются между точками 10 и 90% на форме сигнала. Точка 10% – это момент времени, в который выходное напряжение находится на 1/10 пути от низкого значения до высокого значения; точка 90% определяется аналогичным образом. Задержки распространения измеряются между точками 50% на входных и выходных сигналах (точками, в которых напряжение находится посередине между двумя предельными значениями). Согласно терминологии, задержка распространения от низкого к высокому, t_{PHV} , относится к переходу от низкого к высокому на выходном узле. Для инвертора это соответствует противоположному переходу на входном узле. Аналогично, t_{PBH} относится к переходу от высокого уровня к низкому на выходном узле.

Существует обратная зависимость между наихудшей задержкой распространения и максимально достижимой системной тактовой частотой. Существует эмпирическое правило:

$$f_{CLK} < \frac{1}{20t_p}, \quad (2.9)$$

где f_{CLK} – тактовая частота. Конечно, это правило не является жестким и быстрым; фактическое соотношение зависит от эффективности конструкции системы. Тем не менее, верно, что улучшение задержки распространения позволяет напрямую улучшить тактовую частоту и производительность системы.

Задержки распространения определяются экспериментально с использованием кольцевых генераторов, подобных тому, который показан на рис. 4.5. Кольцевой генератор содержит нечетное число инверторов, и видно, что выходной сигнал в любом узле колеблется с частотой, заданной:

$$f_M = \frac{1}{M(t_{PHV} + t_{PBH})}, \quad (2.10)$$

где M – (нечетное) количество инверторов в кольце.

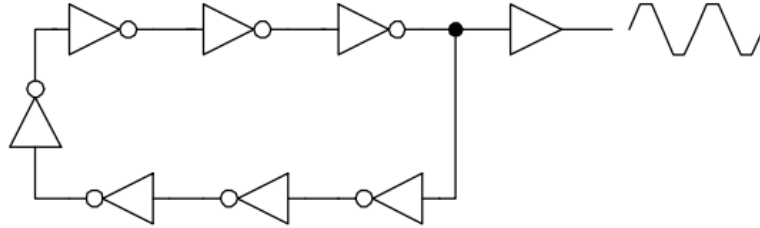


Рисунок 4.5. Семиступенчатый кольцевой генератор с буферизованным выходом

Показатель PDP – произведение мощности и задержки

Показатель PDP является важным показателем качества логического элемента. Он определяется как:

$$PDP = P \cdot t_p, \quad (2.11)$$

где P – рассеиваемая мощность, t_p – задержка распространения. Если значения t_{pHV} и t_{pVH} отличаются друг от друга, используется среднее значение. Рассеиваемая мощность может зависеть от частоты, поэтому условия измерения должны быть указаны в любой значимой спецификации PDP. PDP имеет единицы измерения энергии, и типичные значения измеряются в пикоджоулях.

Широкое использование PDP в качестве критерия эффективности отражает соотношение мощности и скорости в цифровых схемах. Для любой конкретной схемы масштабирование сопротивлений, как правило, обеспечивает равномерное соотношение между скоростью и мощностью. Удвоение сопротивлений увеличит мощность, но удвоит задержки распространения. Уменьшение сопротивлений вдвое увеличит мощность, но вдвое уменьшит задержки распространения. При любом подходе PDP остается неизменным; следовательно, для улучшения коэффициента задержки питания требуется усовершенствование схемы или транзисторов. В этом суть цифрового проектирования на уровне устройств и схем.

Контрольные вопросы:

1. Что такое передаточная характеристика логического элемента? Какие параметры ВТС являются критическими для инвертора?
2. Почему важно минимизировать диапазон неопределенности между $U_{Vx.H}$ и $U_{Vx.V}$? Как это влияет на работу логического элемента?
3. Почему важно учитывать рассеиваемую мощность в цифровых интегральных схемах? Какие факторы следует учитывать при управлении рассеиваемой мощностью?
4. Как переходные характеристики влияют на производительность цифровых схем? Объясните, что такое задержка распространения, время нарастания и время спада выходного сигнала.
5. Как связаны задержка распространения и тактовая частота системы? Какое эмпирическое правило используется для оценки максимальной тактовой частоты?
6. Что такое показатель PDP и как он определяется?
7. Как используется кольцевой генератор для измерения задержек распространения? Как частота кольцевого генератора связана с количеством инверторов в цепи?