

Хоровец Пауль, Хилл Уинфилд

Искусство схемотехники

Том 2

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 004
ББК 32.81
Х80

Х80 **Хоровец Пауль**
Искусство схемотехники: Том 2 / Хоровец Пауль, Хилл Уинфилд – М.: Книга по Требованию, 2024. – 588 с.

ISBN 978-5-458-46379-9

Том 2 содержит сведения о преобразователях информации, микропроцессорах и мини-ЭВМ, радиотехнических схемах, методах измерения и обработки сигналов, принципах конструирования аппаратуры, а также обширные приложения. Том 2 дополнен курсом лабораторных работ по схемотехнике П. Горовица и Я. Робинсона. Для специалистов в области электроники, автоматики, вычислительной техники, а также студентов соответствующих специальностей вузов.

ISBN 978-5-458-46379-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

шенствованное маломощное» семейство (74ALSxx) имеет еще лучшее отношение быстродействия к мощности. Термин «Шоттки» относится к использованию диодов с переходом «металл — полупроводник» (диоды Шоттки) в качестве фиксирующих. Эти диоды препятствуют насыщению транзистора, уменьшая время его переключения (см. разд. 13.22).

Серия «Шоттки» (74Sxx) традиционно считалась самой быстродействующей, но появившиеся в последнее время новые семейства («скоростное» 74Fxx и «усовершенствованное Шоттки») обладают еще лучшим быстродействием и отношением быстродействия к мощности. Когда широкий выбор этих новых серий ТТЛ станет приемлемым по сопоставимым ценам, они смогут полностью заменить серии 74Sxx и 74LSxx. «Маломощная» серия (74Lxx) имеет наименьшее потребление, однако из-за низкого быстродействия она тоже вытесняется серией 74LSxx. Серия 74Нxx считалась самым быстродействующим семейством и давала некоторое увеличение быстродействия по сравнению со стандартными сериями при соответственно большей мощности рассеяния. Сейчас она почти полностью устарела на фоне серии 74Sxx и используется лишь в тех случаях, когда нужен мощный токовый выход.

Для новых разработок на ТТЛ мы могли бы рекомендовать следующие серии логических элементов: а) серию 74LSxx (для большинства случаев) или серию 74xx, если требуется повышенная нагрузочная способность в режиме отвода тока (например, для управления лампами), и б) серию 74Sxx (либо 74Fxx или 74ASxx), если необходимо иметь повышенное быстродействие. Появление новых субсемейств ТТЛ отражает временную ситуацию, которая, вероятно, через несколько лет разрешится сама собой, после чего останутся, возможно, лишь три или четыре семейства.

Разновидности КМОП. В тех случаях, когда быстродействие не играет роли, используют семейство КМОП, поскольку оно имеет минимальное потребление. Кроме того, оно предъявляет самые незначительные требования к источнику питания (от +3 В до +18 В при очень малом токе) и поэтому является хорошим логическим семейством общего назначения, которое особенно удобно для построения несложных схем, поскольку при использовании в этом случае элементов ТТЛ источник питания может оказаться сложнее самой логической схемы.

Среди серий КМОП имеются различные модификации. Первоначальная серия 4000 была предложена фирмой RCA; затем она была вытеснена серией 4000А. Сейчас стандартной серией 4000 семейства КМОП является новая серия В. Утверждают, что она может работать при напряжении питания от 3 до 18 В, однако на самом деле даже при напряжении 5 В ее работа часто бывает неудовлетворительной вследствие низкого быстродействия и большого выходного сопротивления. Несколько лучшие характеристики при низком напряжении

питания имеет «изопланарная» серия КМОП 4000В фирмы Fairchild. Однако если вы хотите обеспечить высокое быстродействие и одновременно малое выходное сопротивление, то для питания КМОП лучше использовать напряжение 10 или 12 В.

Основной альтернативой серии 4000 является серия 74Схх КМОП. Функционально она тождественна сериям ТТЛ (аналогичная распылка контактов), однако фактически эта серия принадлежит семейству КМОП и имеет соответствующий диапазон напряжений питания, логические уровни и входные и выходные характеристики. Серия 74Схх полностью совместима со стандартной КМОП-серией 4000 и лишь ограниченно с ТТЛ. Этот важный вопрос о сопряжении элементов ТТЛ и КМОП вскоре будет рассматриваться более подробно.

Существуют также специальные низковольтные кристаллы КМОП с металлическими затворами (например, для схем наручных часов), которые предъявляют чрезвычайно низкие требования к напряжению питания. Имеется, например, прекрасный кристалл, содержащий генератор с делителем частоты, которому требуется источник питания напряжением от 1,0 до 2,1 В. Он не совместим ни с ТТЛ, ни со стандартными КМОП.

9.02. Входные и выходные характеристики элементов ТТЛ и КМОП

Все цифровые логические семейства строятся таким образом, чтобы к выходу каждого элемента можно было подключить большое число входов, принадлежащих элементам того же семейства. Типичное значение коэффициента разветвления по выходу равно 10. Это означает, что к выходу, например, вентиля или триггера без нарушения технических требований можно подсоединить 10 входов. Другими словами, в обычной практике цифровых разработок вы можете обходиться без каких-либо сведений, касающихся электрических свойств используемых кристаллов, до тех пор, пока схема состоит только из цифровых логических элементов одного и того же семейства и фактически вам нечасто приходится думать о том, что же в действительности происходит на логических входах и выходах.

Однако как только вы попытаетесь управлять цифровыми схемами при помощи внешних сигналов, аналоговых или цифровых, или же захотите использовать выходы цифровой логики для управления другими устройствами, вам придется выяснить, что в действительности потребляет логический вход и чем может нагружаться логический выход. Кроме того, при объединении логических семейств надо знать схемотехнические свойства входов и выходов. Сопряжение разных логических семейств — вопрос не академический. Для того чтобы воспользоваться современными, все более доступными БИС, выполненными по МОП-технологии, необходимо знать, каким образом объединяются логические схемы различных типов. В последующих разделах мы подробно рассмотрим схемотехнические свойства логи-

ческих входов и выходов и приведем примеры сопряжения как между разными логическими семействами, так и между логическими устройствами и внешним миром.

Входные характеристики. На рис. 9.1 показаны важные характеристики входов ТТЛ и КМОП — зависимости выходного напряжения и входного тока от входного напряжения (для инвертора). По оси входного напряжения графики расширены за пределы диапазона, встречающегося в чисто цифровых схемах, так как при сопряжении схем значения входных сигналов могут легко превысить напряжение питания. Как следует из графиков, элементы ТТЛ и КМОП обычно работают с заземленным контактом отрицательного полюса питания.

Когда на вход элемента ТТЛ подается НИЗКИЙ уровень, он действует как источник тока заметной величины, а при ВЫСОКОМ уровне — как нагрузка, потребляющая весьма малый ток (40 мкА максимально, а в типичном случае — порядка нескольких мкА). Входной ток ВЫСОКОГО уровня фактически представляет собой настоящий коллекторный ток «инверсного» входного транзистора, а не ток утечки, как обычно полагают (рис. 9.2). Для правильного управления входом элемента ТТЛ серии 74xx необходимо обеспечить отвод тока порядка 1 мА при уровне входного напряжения не более 0,4 В.

Недопонимание этого условия часто приводит к неправильной работе элемента в интерфейсной схеме. Для отрицательных напряжений вход ТТЛ действует как фиксирующий диод, включенный на землю, а для напряжений выше +5 В вход эквивалентен транзистору с небольшим напряжением пробоя (несколько выше +5,5 В). Типичное значение входного порога логического перехода составляет приблизительно +1,3 В, но может изменяться в пределах от 0,8 В до +2,0 В (в худшем случае). Вентили ТТЛ с триггерами Шмитта на

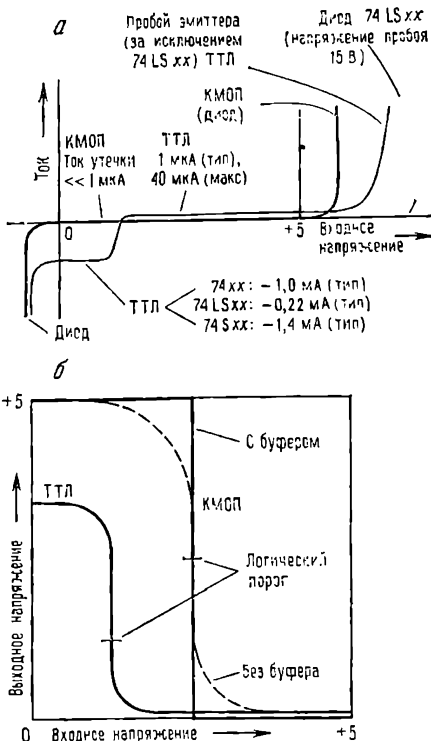


Рис.9.1. Характеристики логических входов. а — входной ток; б — передаточная характеристика.

Схема выхода предназначена для управления входами ТТЛ и имеет коэффициент разветвления по выходу 10 (то есть один выход может работать на 10 входов).

Выходная схема элемента КМОП представляет собой двухтактную пару комплементарных полевых МОП-транзисторов, один из которых ОТКРЫТ, а другой ЗАКРЫТ (рис. 9.2). При малых токах выходная схема ведет себя как резистор в несколько сотен омов, подключенный к земле или к шине U_+ , а при выходных токах, для которых выходное напряжение приблизительно на 1 В отличается от $U_{\text{пит}}$, выход в известном смысле превращается в «источник тока». Суммарные выходные характеристики представлены на рис. 9.3.

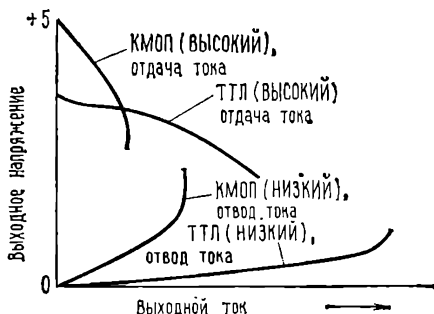


Рис. 9.3. Выходные характеристики логических вентилях.

Здесь приведены зависимости выходного напряжения от выходного тока для обоих состояний — ВЫСОКОГО и НИЗКОГО. Для упрощения рисунка выходной ток показан положительным. Заметим, что в элементах КМОП выходы в любом случае подключены либо к земле, либо к шине U_+ , что обеспечивает при отсутствии перегрузки полный перепад напряжения питания. При нормальном использовании выходы КМОП управляют входами КМОП. Так как входной ток отсутствует (за исключением токов заряда небольшой входной емкости), на выходах происходит полный перепад до U_+ или до нуля. Для сравнения отметим, что уровни ТТЛ в типичном случае составляют 50 мВ (НИЗКИЙ) или +3,5 В (ВЫСОКИЙ), если в качестве нагрузки используются также элементы ТТЛ. При включении нагрузочного резистора (почти любого номинала) ВЫСОКИЙ уровень на выходе элемента ТТЛ приближается к +5 В.

9.03. Сопряжение ТТЛ и КМОП

Для того чтобы не испытывать затруднений при работе с обоими семействами, нужно знать, как элементы этих семейств стыкуются друг с другом. На элементах КМОП реализованы некоторые изящные функции, которых нет на ТТЛ. Имея систему на элементах ТТЛ, работающую с невысокой скоростью, вы без труда можете добавить к ней некоторые функции, выполняемые на элементах КМОП. Кроме того, для облегчения стыковки с внешними устройствами, совместимыми с ТТЛ, а также при согласовании логической КМОП-схемы с кабелем на входах и выходах бывает полезно использовать буферные элементы ТТЛ.

Управление КМОП от ТТЛ. Если элемент КМОП работает от напряжения $+5\text{ В}$, то уровни почти совместимы. Единственная трудность заключается в том, что высокий уровень ТТЛ (типичное значение $3,4\text{ В}$) является граничным для КМОП и желательно, чтобы он был не ниже $+4,3\text{ В}$. Однако достаточно подключить к выходам ТТЛ нагрузочные резисторы (например, $3,3\text{ кОм}$, что эквивалентно нагрузке одним элементом ТТЛ), соединенные с шиной U_+ , и все станет в порядке. Резисторы можно устанавливать как на выходах с открытым коллектором, так и с активной нагрузкой.

Если элемент КМОП работает от более высокого напряжения питания, можно также включить нагрузочный резистор, но для этого нужно использовать «высоковольтные» кристаллы ТТЛ, имеющие

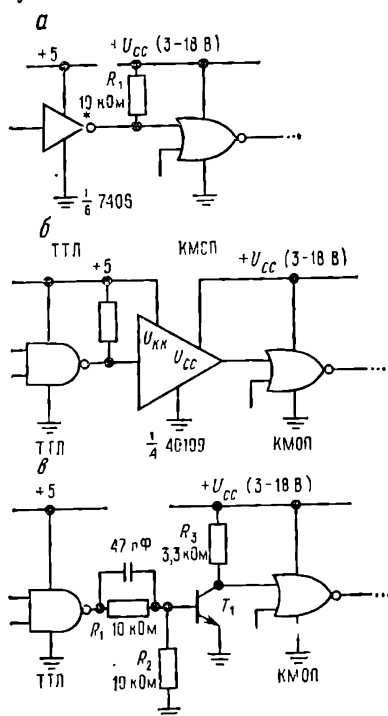


Рис. 94. Преобразование уровня от ТТЛ к КМОП.

выходы с открытым коллектором. Примерами таких элементов могут служить ИМС 7406 (шесть инверторов), 7407 (шесть буферных каскадов) и 7426 (четыре 2-входовых элемента И-НЕ). Другой способ заключается в использовании преобразователя уровня КМОП типа 40109, на вход которого подаются сигналы относительно источника $U_{кк}$ (уровни ТТЛ), а на выходе формируются сигналы с уровнями КМОП относительно второго источника $U_{сс}$. Для того чтобы схема ТТЛ могла управлять элементом КМОП, работающим от источника напряжением $U_{сс} > 5\text{ В}$, контактный вывод $U_{кк}$ соединяется с источником питания ТТЛ (5 В), а вывод $U_{сс}$ подключается к источнику питания КМОП. Как и прежде, на стандартных выходах ТТЛ надо устанавливать нагрузочные резисторы. Третья возможность — это использование *при*-транзистора. Схема такого подключения с точно указанными напряжениями питания приведена на рис. 9.4.

В базовой цепи этой транзисторной схемы установлены два резис-

тора, которые создают входной «порог», приблизительно равный падению напряжения на двух диодах (так же, как и на реальном входе ТТЛ), обеспечивая хорошую помехоустойчивость. «Ускоряющий» конденсатор увеличивает скорость переключения (см. разд. 13.22). Иногда резистор R_2 отсутствует, и тогда транзистор открыва-

ется при входном напряжении, приблизительно равном 0,7 В. В этом случае достаточная помехоустойчивость не обеспечивается, поскольку в системах ТТЛ по шине земли часто возникают выбросы величиной до 0,5 В (см. разд. 9.14). Заметим, что *npr*-транзистор работает как инвертор. Если быстродействие не имеет значения, то величина нагрузочного резистора в схеме с открытым коллектором может быть значительно выше. Для повышения помехоустойчивости можно применять меньшие номиналы.

Управление ТТЛ от КМОП.

Если элемент КМОП питается от источника напряжения +5 В, то его можно непосредственно нагрузить одним элементом 74Lxx или двумя элементами 74LSxx. От буферных схем КМОП типа 4049 (шесть инверторов) или 4050 (шесть буферных каскадов) могут непосредственно работать два элемента 74xx или восемь элементов 74LSxx. Буферная схема с «открытым стоком» типа 40107 (с нагрузочным резистором, подключенным к шине +5 В) может работать на 10 элементов 74xx или на 40 элементов 74LSxx.

При питании элементов КМОП более высоким напряжением также существует несколько способов сопряжения. В первом методе можно использовать схемы 4049/4050. Для этих ИМС допускается превышение входными уровнями напряжения питания, поэтому контакты U_{cc} можно соединять непосредственно с цепью +5 В. Это позволит обеспечить на выходе перепад напряжения от нуля до +5 В и даст возможность подключать к нему два элемента 74xx или восемь элементов 74LSxx. Входной порог в этом случае равен приблизительно +2,5 В. Другой метод заключается в использовании элемента 40107 или 74C906, работающего от источника питания КМОП с нагрузочным резистором, подключенным к шине +5 В. Третий метод, как и прежде, основан на применении *npr*-транзистора. Схемы показаны на рис. 9.5. Как и в предыдущем случае, транзисторный каскад — инвертирующий.

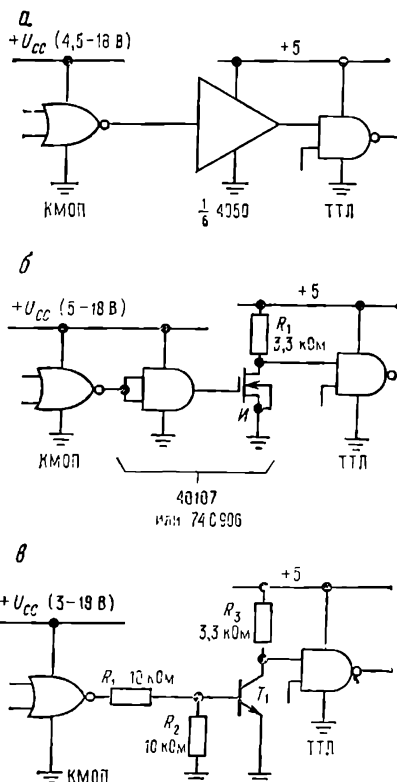


Рис. 9.5. Преобразование уровня от КМОП к ТТЛ.

9.04. Управление входами ТТЛ и КМОП

Механические ключи в качестве устройства ввода. Если известны входные характеристики управляемой логической схемы, то довольно легко управлять цифровыми входами от переключателей, клавиатуры, компараторов и т. д. Проще всего здесь использовать резистор, подключенный к шине питания (рис. 9.6). При работе с элементами ТТЛ, принимая во внимание их входные характеристики,

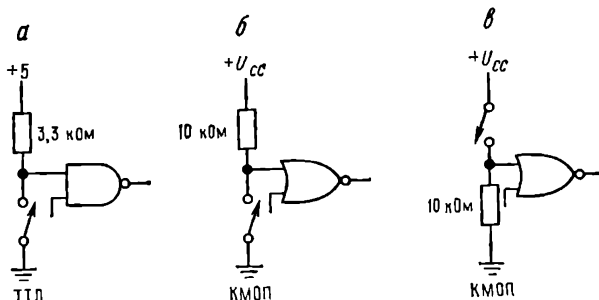


Рис. 9.6. Управление логическими элементами от механических ключей (без защиты от дребезга).

лучше, когда резистор коммутируется на землю. В этом случае ключ дает хороший отвод тока при НИЗКОМ уровне на входе, а резистор обеспечивает для ВЫСОКОГО уровня напряжение $+5\text{ В}$, создавая высокую помехоустойчивость. Кроме того, удобно иметь цепь возврата на землю через ключ.

Вариант схемы, в котором резистор подключается к земле, а ключ замыкается на шину $+5\text{ В}$, использовать нежелательно, поскольку в этом случае для того, чтобы обеспечить НИЗКИЙ уровень ТТЛ (порядка нескольких десятых вольта), потребуется резистор с небольшим сопротивлением (например, 220 Ом) и через замкнутый тумблер будет протекать довольно большой ток. При разомкнутом ключе (наихудшие условия с точки зрения наводок) помехоустойчивость предыдущей схемы составляет не менее 3 В , тогда как во второй схеме она может упасть до $0,4\text{ В}$ (для стандартного элемента ТТЛ входной ток равен $-1,6\text{ мА}$, а порог НИЗКОГО уровня составляет $+0,8\text{ В}$). Кроме того, как будет показано ниже, входы ТТЛ нежелательно соединять непосредственно с источником $+5\text{ В}$.

Что касается элементов КМОП, то, поскольку их входы не потребляют тока, а типовое значение порогового уровня составляет половину $U_{\text{сс}}$, здесь с одинаковым успехом могут применяться оба способа подключения резистора. На практике один контакт ключа принято заземлять, однако если для упрощения схемы ВЫСОКИЙ уровень на входе желательно создавать с помощью замкнутого ключа, резистор можно запаять на землю. Все три метода иллюстрируются на рис. 9.6.

Дребезг контактов механического ключа. Как отмечалось в гл. 8, после замыкания контактов механических переключателей дребезг контактов продолжается приблизительно 1 мс. У крупногабаритных переключателей дребезг может продолжаться до 50 мс. Дребезг может вызывать хаотические переключения элементов, реагирующих на смену состояния сигнала, или «фронт». Например, ключ, непосредственно подключенный к счетному входу триггера или счетчика, вызовет при переключении их многократное срабатывание. В подобных случаях нужно использовать электронные средства для подавления дребезга ключа. Приведем несколько способов.

1. На входах асинхронного RS -триггера, построенного с помощью двух вентилей, нужно установить резисторы, разумеется, подключенные к шинам питания (рис. 9.7). Здесь можно также применить стандартный триггер, имеющий входы установки в «0» и «1» (например, элемент 7474), заземлив его тактовый вход.

2. Рассмотренная схема в интегральном исполнении. Элементы 74279, 4043 и 4044 представляют собой счетверенные RS -триггеры, а 8544 — счетверенную схему защиты от дребезга, имеющую встроенные нагрузочные резисторы, опирающийся вход (СТРОБ) и выходы с тремя состояниями.

3. Можно использовать триггер Шмитта семейства КМОП с задерживающей RC -цепью на входе (рис. 9.8). Дребезг будет сглаживаться

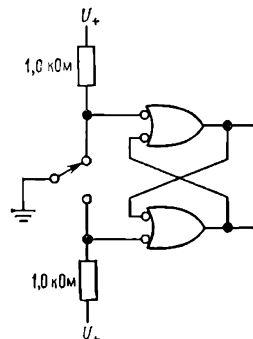


Рис. 9.7. Схема защиты от дребезга ключа.

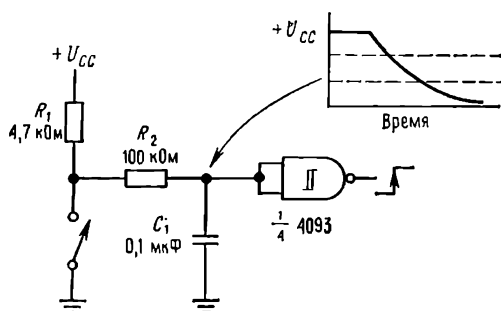


Рис. 9.8.

фильтром нижних частот R_2C_1 , поэтому триггер Шмитта переключается только один раз. Обычно вполне достаточно иметь постоянную времени RC -цепи в пределах от 10 до 25 мс. Этот метод нельзя с таким же успехом применять в схемах на элементах ТТЛ, поскольку для управления их входами необходимо обеспечить малое выходное сопротивление.

4. Можно воспользоваться ИМС типа 4490, которая представляет собой шестеренный подавитель дребезга. В этой прекрасной схеме в качестве фильтра нижних частот используется цифровая задержка (5-разрядный регистр сдвига для каждого ключа). В состав ИМС входят внутренние нагрузочные резисторы и тактовый генератор. Величина задержки задается пользователем с помощью внешнего времязадающего конденсатора, который определяет частоту генератора. В настоящее время эта микросхема не имеет эквивалента в исполнении ТТЛ.

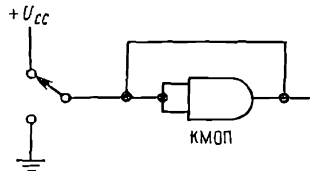


Рис. 9.9

5. Схема, приведенная на рис. 9.9. В качестве буферного каскада КМОП можно использовать неинвертирующий вентиль, как показано на рисунке, или один из элементов корпуса ИМС 4050 (или 4502). В отличие от вентилях ТТЛ, которые защищены только от замыкания на землю, для элементов КМОП вполне допустимо подключение выхода как на землю, так и на шину U_{cc} .

6. Можно применять устройства со встроенными схемами защиты от дребезга. Такие схемы обычно имеются в шифраторах клавиатуры, использующих в качестве устройств ввода механические ключи.

7. Ключи, построенные на использовании эффекта Холла. Эти твердотельные ключи, управляемые магнитным полем, используются в качестве панельных или клавиатурных ключей. В обоих случаях магнит и ключ объединяются в одном законченном изделии. Ключи работают от напряжения $+5$ В и вырабатывают на выходе свободные от дребезга логические сигналы, которые могут использоваться для управления элементами ТТЛ и КМОП, работающими от $+5$ В. С точки зрения износа ключи с эффектом Холла практически вечны, так как в них отсутствуют механические контакты.

Несколько общих замечаний о ключах как устройствах ввода. Обратите внимание, что при использовании методов, указанных в пп. 3 и 4, а как правило, и в п. 6, можно применять однопозиционные однополюсные переключатели (иногда их называют переключателями «типа А»), в то время как в случае остальных методов должны использоваться двухпозиционные однополюсные переключатели (типа Б). Следует также иметь в виду, что далеко не всегда требуется защищать входы от дребезга, поскольку не все схемы, управляемые ключами, восприимчивы к фронтам. Отметим еще один важный момент: хорошие механические ключи обычно обладают свойством «самоочистки», которое позволяет сохранять чистыми контактные поверхности (чтобы увидеть, что это значит, разберите один ключ). Тем не менее схему желательно строить таким образом, чтобы через контакты ключа протекал ток хотя бы в несколько миллиампер для их очистки.