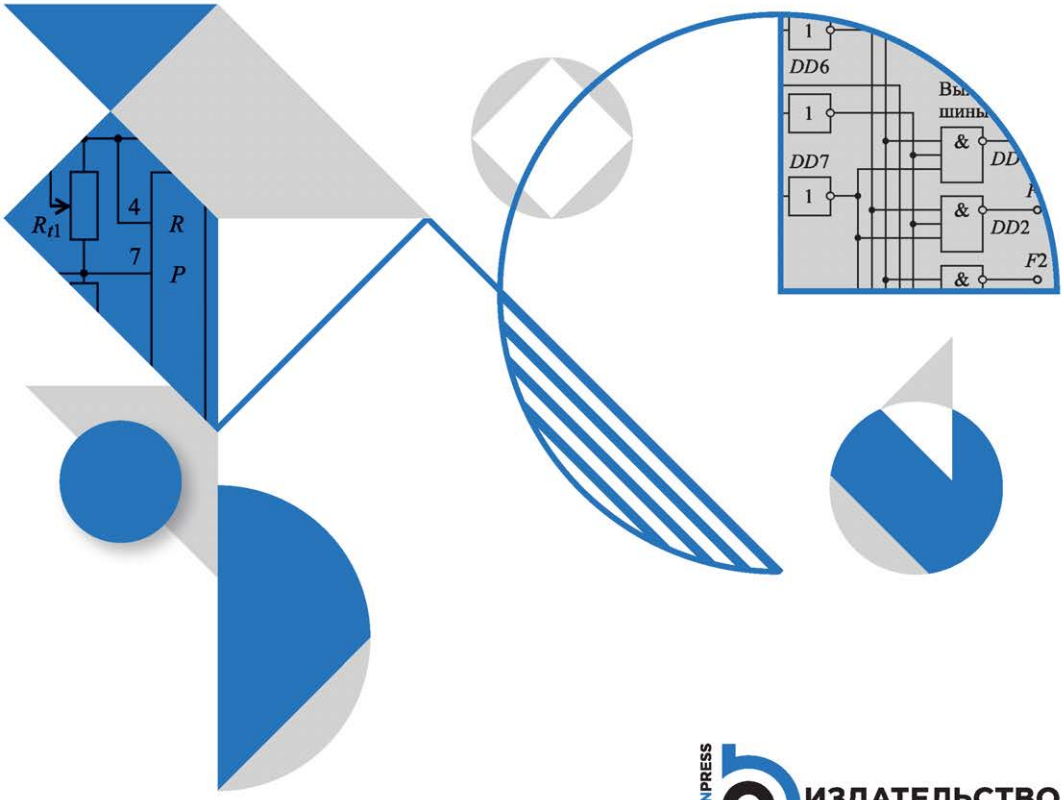
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Н.А. Жаркова, А.Н. Глотов

ТИПОВЫЕ УЗЛЫ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ



BAUMANPRESS
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

УДК 621.374
ББК 32.85
Ж35

Издание доступно в электронном виде по адресу
https://bmstu.press/catalog/item/7023/

Факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника»
Кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»

Рекомендовано Научно-методическим советом МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия

Жаркова, Н. А.

Ж35 Типовые узлы цифровых устройств : учебное пособие / Н. А. Жаркова, А. Н. Глотов ; под ред. Г. Н. Соловьева. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — 97, [3] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5439-6

Рассмотрены методы построения, схемотехника и характеристики типовых функциональных устройств цифровой техники: ключей, мультивибраторов, триггеров, регистров, счетчиков, шифраторов, дешифраторов, аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей. Дана методика расчета отдельных узлов.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих дисциплины «Цифровые устройства и микропроцессоры» и «Электроника и микропроцессорная техника».

УДК 621.374
ББК 32.85

Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте: info@baumanpress.ru

ISBN 978-5-7038-5439-6

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Оглавление

Предисловие 3
Основные условные обозначения 4
Введение 6

1. Транзисторные ключи 8
Ключевые схемы на биполярных транзисторах 8
Ключевые схемы на полевых транзисторах 11
Методы повышения быстродействия 13
Нелинейная отрицательная обратная связь 15
Двухтактные транзисторные ключи 17
Контрольные вопросы и задания 22

2. Триггеры 23
Симметричные триггеры на биполярных транзисторах 23
Симметричный триггер на МОП-транзисторах 29
Несимметричный триггер с эмиттерной связью (триггер Шмитта) 29
Триггеры на интегральных схемах 33
Контрольные вопросы и задания 38

3. Мультивибраторы 39
Ждущий мультивибратор на биполярных транзисторах 39
Одновибратор с эмиттерной обратной связью 44
Симметричный автоколебательный мультивибратор
на биполярных транзисторах 48
Мультивибратор на логических элементах 50
Мультивибратор на операционном усилителе 51
Мультивибратор на интегральном таймере 52
Контрольные вопросы и задания 55

4. Шифраторы 56
Контрольные вопросы и задания 58

5. Дешифраторы 59
Контрольные вопросы и задания 61

6. Мультиплексоры и демультиплексоры 62
Контрольные вопросы и задания 64

7. Сумматоры 65
Контрольные вопросы и задания 67

8. Регистры 68
Регистры хранения 68
Сдвиговые регистры 69
Реверсивные сдвиговые регистры 70
Контрольные вопросы и задания 70

9. Счетчики 71
Двоичные асинхронные счетчики 73
Синхронные двоичные счетчики 75

Декадные счетчики 76
Реверсивные счетчики 77
Контрольные вопросы и задания 78
10. Цифроаналоговые преобразователи 79
Цифроаналоговый преобразователь с суммированием токов 79
Цифроаналоговый преобразователь с суммированием напряжений 81
Широтно-импульсный цифроаналоговый преобразователь 82
Контрольные вопросы и задания 83
11. Аналого-цифровые преобразователи 84
Аналого-цифровой преобразователь последовательного действия 85
Аналого-цифровой преобразователь последовательного действия с двойным интегрированием 86
Аналого-цифровой преобразователь последовательного приближения 89
Аналого-цифровой преобразователь параллельного действия 91
Сигма-дельта аналого-цифровой преобразователь (σ-Δ АЦП) 92
Контрольные вопросы и задания 94
Заключение 95
Литература 96

1. Транзисторные ключи

Транзисторные ключи предназначены для коммутации тока (напряжения) в цепи нагрузки под воздействием внешних управляющих сигналов.

Ключевые схемы на биполярных транзисторах

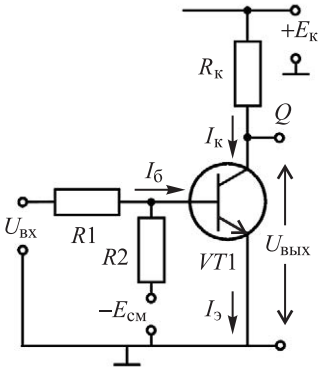
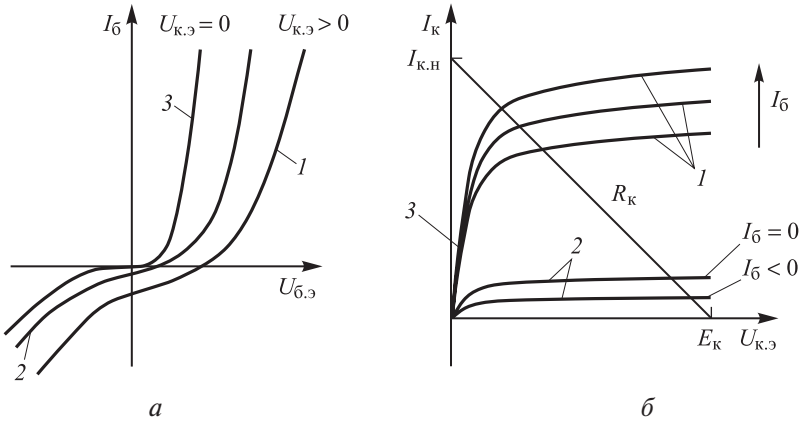


Рис. 1.1. Транзисторная ключевая схема

Транзисторная ключевая схема подобна схеме резистивного транзисторного усилителя (рис. 1.1). Однако по выполняемым функциям и режимам работы существуют отличия. Усилительный каскад предназначен для усиления сигнала с минимальными искажениями их формы и находится в активном режиме, которому соответствуют линейные характеристики транзистора [6].

При работе в качестве ключа транзистор находится в одном из статических режимов: отсечки (закрыт) или насыщения (открыт и насыщен). Активный режим встречается лишь при переходе из одного статического режима в другой. Особенности работы биполярных транзисторов изложены в [6]. При отсутствии внешнего сигнала ключевой транзистор работает в режиме отсечки, при воздействии внешнего управляющего напряжения на базе транзистора он переходит в режим насыщения. Рассмотрим обобщенные характеристики *n–p–n*-транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (рис. 1.2).



а *б*

Рис. 1.2. Обобщенные характеристики:
а — входные характеристики; *б* — выходные характеристики

На характеристиках отмечены все три режима работы транзистора:
1 — активный; *2* — отсечки; *3* — насыщения.

Активный режим. Данному режиму соответствует смещение эмиттерного перехода в прямом направлении, коллекторного перехода — в обратном. При этом справедливы следующие соотношения:

$$U_{б.э} > 0,\ U_{к.э} = E_к - I_к R_к;$$

$$I_к = \beta I_б + I_{к0}(1 + \beta),$$

$$I_э = I_к + I_б,\ I_к = \alpha I_э + I_{к0} \cong \alpha I_э,\ I_б < I_{б.н},\ I_к < I_{к.н}.$$

Здесь $U_{б.э}$ — падение напряжения на эмиттерном переходе биполярного транзистора; $U_{к.э}$ — падение напряжения между коллектором и эмиттером биполярного транзистора; $E_к$ — источник ЭДС питания коллекторной цепи; $I_к$ —коллекторный ток в режиме линейных характеристик; $R_к$ — сопротивление резистора в цепи коллектора биполярного транзистора; $I_б$ — базовый ток в режиме линейных характеристик; β — статический коэффициент передачи тока базы в цепь коллектора; $I_{к0}$ — тепловой ток коллектора; $I_э$ — ток эмиттера биполярного транзистора; $I_б$ — ток базы биполярного транзистора; α — статический коэффициент передачи тока эмиттера в цепь коллектора; $I_{б.н}$ — ток базы биполярного транзистора в режиме насыщения; $I_{к.н}$ — прямой ток коллектора биполярного транзистора в режиме насыщения.

Коэффициенты передачи тока эмиттера и базы α и β соответственно в цепь коллектора транзистора характеризуют усилительные свойства транзистора: $\alpha = \beta / (\beta + 1)$, $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$.

Режим отсечки. Оба перехода смещены в обратном направлении. На входных характеристиках этому режиму соответствуют обратные ветви ($U_{б.э} < 0$), на выходных только одна кривая, где $I_б < 0$. Режим описывается соотношениями: $U_{б.э} < 0$, $I_б = -I_{к0}$, $I_к = I_{к0}$, $I_э = 0$, $U_{к.э} = E_к - I_{к0}R_к \cong E_к$.

Для схемы на рис. 1.1 необходимо рассчитать напряжение базы $U_{б.э}$ и проверить выполнение первого неравенства $U_{б.э} \leqslant 0$. К базе подключены три источника: ЭДС $U_{вх}$ и $E_{см}$, тока $I_{к0}$.

При определении соотношения для расчета $U_{б.э}$ пользуются правилом: в схемах, содержащих несколько генераторов тока и ЭДС, воздействия от них рассматриваются отдельно, при этом не участвующие в расчете источники ЭДС считаются короткозамкнутыми, а все источники токов разомкнутыми:

$$U_{б.э} = I_{к0}\left(R_1 R_2\right) / \left(R_1 + R_2\right) + R_1 E_{см} / \left(R_1 + R_2\right) + U^0 R_2 / \left(R_1 + R_2\right).$$

Из этого соотношения видно, что в режиме отсечки создается положительное напряжение за счет входного источника и тока $I_{к0}$, поэтому возникает необходимость введения отрицательного смещения $-E_{см}$ для надежного запирания ключевой схемы. При $U_{вх} = 0$ для выполнения условия $U_{б.э} < 0$ должно быть:

$$E_{см} R_1 / \left(R_1 + R_2\right) + I_{к0} R_1 R_2 / \left(R_1 + R_2\right) < 0 \text{ или } R_2 I_{к0} < E_{см}, \text{ т. е. } R_2 < E_{см} / I_{к0}.$$

Ток $I_{к0}$ имеет сильную температурную зависимость, что может привести к открыванию транзистора при повышении температуры перехода. Поэтому в расчете $I_{к0}$ полагают равным $I_{к0max}$, который соответствует току при максимальной рабочей температуре. Можно приближенно оценить увеличение тока коллектора по следующим [6] формулам:

для кремниевых транзисторов

$$I_{к0}(T_{max}) = I_{к0}(+20\ °C)2^{\frac{T_{max}-20}{10}};$$

для германиевых транзисторов

$$I_{к0}(T_{max}) = I_{к0}(+20\ °C)3^{\frac{T_{max}-20}{10}}.$$

Видно, что германиевые транзисторы более подвержены изменению температуры.

Режим насыщения. Оба перехода смещены в прямом направлении. На входных характеристиках режиму соответствует кривая, где $U_{к.э} \cong 0$, на выходных — начальные участки кривых. Режим описывается соотношениями

$$I_б > I_{б.н},\ I_{к.н} = E_к / R_к;$$

$$I_{б.н} = I_{к.н} / \beta = E_к / \beta R_к;$$

$$U_{б.э} > 0,\ U_{к.э} \cong 0.$$

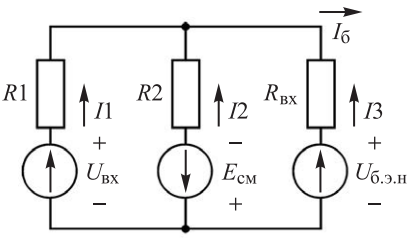


Рис. 1.3. Эквивалентная схема для расчета режима насыщения

Для выполнения первого условия нужно определить $I_б$. Для этого пользуются эквивалентной схемой, содержащей три источника (рис. 1.3).

На рис. 1.3 $U_{б.э.н}$ обозначает падение напряжения на переходе база — эмиттер в режиме насыщения. Находим базовый ток как сумму трех токов: $I_б = I1 + I2 + I3$. Направление тока $I_б$ соответствует стрелке (см. рис. 1.3).

С учетом того, что при насыщенном транзисторе $R_{вх}$ мало ($R_{вх} = 0$) и $U_{б.э.н} << U_{вх}$, эта эквивалентная схема упрощается и необходимо найти только токи

$$I1 = U_{вх} / R_1 \text{ и } I2 = -E_{см} / R_2;$$

$$I_б = U^1 / R_1 - E_{см} / R_2.$$

Если условие $I_б > I_{б.н} = E_к / R_к\beta$ выполняется, то транзистор находится в режиме насыщения.

Диаграммы работы ключевой схемы представлены на рис. 1.4.

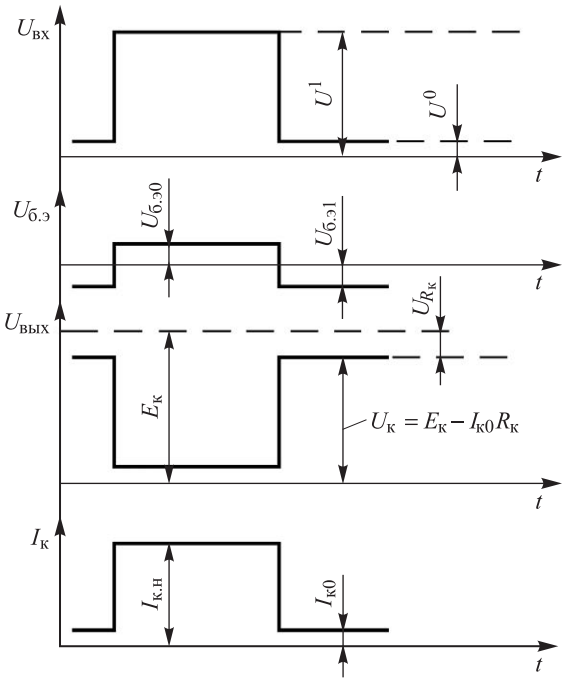


Рис. 1.4. Диаграммы работы ключевой схемы

Эти диаграммы являются идеализированными без учета переходных процессов при переключении транзистора.

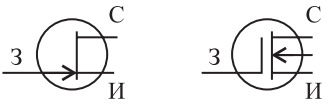
Ключевые схемы на полевых транзисторах

Полевые транзисторы (ПТ) — униполярные полупроводниковые приборы. Проводимость ПТ обусловлена только свободными основными носителями. Транзисторы различают по типу затвора:

- с затвором в виде закрытого p–n перехода (рис. 1.5, *а*);
- с изолированным затвором.

Транзисторы первого типа работают в режиме обеднения, т. е. увеличение разности потенциалов между затвором и истоком уменьшает проводимость канала.

Полевой транзистор с изолированным затвором на основе структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) и металл-оксид-полупроводник (МОП) также представлены на рис. 1.5, *б*. В зависимости от технологии изготовления МДП могут работать как в режиме обогащения, так и в режиме обеднения.



а *б*

Рис. 1.5. Типы полевых транзисторов:

а — полевой транзистор с затвором в виде закрытого p–n-перехода; *б* — полевой транзистор с изолированным затвором

Обычно у полевых транзисторов рассматривают выходные $I_с = f(U_с)$ и проходные $I_с = f(U_з)$ характеристики (рис. 1.6), так как входное сопротивление велико и входные характеристики не имеют практического смысла.

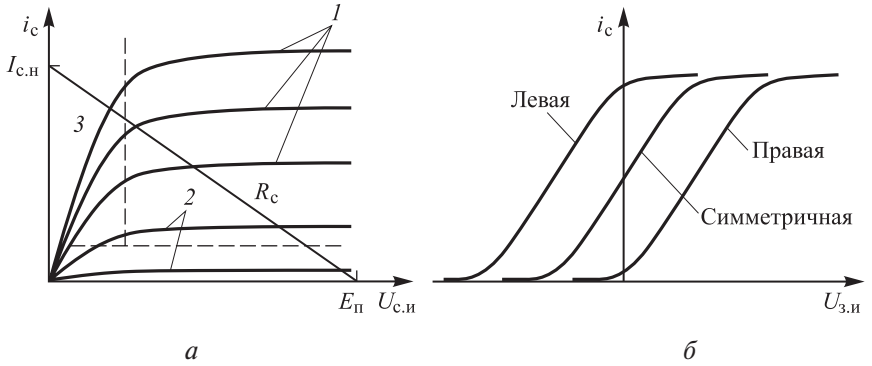


Рис. 1.6. Обобщенные характеристики полевого транзистора:
а — выходные; *б* — проходные

В зависимости от расположения относительно оси координат проходная характеристика $I_с(U_{з.и})$ может быть левой, правой и симметричной. В цифровых и импульсных устройствах больше находят применение с правыми характеристиками.

При подаче на вход усилителя на ПТ импульсного сигнала различают так же, как и на биполярных транзисторах (БПТ), три режима работы:

1 — активный;

2 — отсечки;

3 — насыщения.

В отличие от биполярных полевые транзисторы в выключенном состоянии имеют значительно большее сопротивление и, следовательно, меньшую потребляемую мощность. Это одна из причин, которая обусловила широкое применение в цифровой и импульсной технике полевого транзистора [3].

Ключ на ПТ показан на рис. 1.7. При $U_{вх} \geqslant e_0$ ПТ заперт и $U_{вых1} = +E_п$. При $U_{вх} < e_0$ ПТ открыт и $U_{вых0} = +E_п r_к / (r_к + R_с)$, где $r_к$ — сопротивление канала открытого полевого транзистора; e_0 — напряжение запирания полевого транзистора.

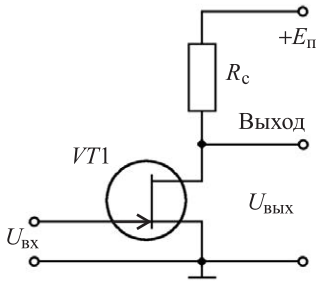


Рис. 1.7. Ключевая схема на полевом транзисторе

Паразитные емкости транзистора и нагрузки обусловливают конечные значения длительности фронта и спада выходного сигнала.

Ключевой каскад на транзисторе МОП работает аналогично (рис. 1.8), но при низком входном напряжении $U_{вх} < e_0$ транзистор заперт, при высоком $U_{вх} > e_0$ транзистор включен.

Для уменьшения мощности, рассеиваемой на ключевом транзисторе, и ускорения разряда паразитных емкостей вместо линейного резистора

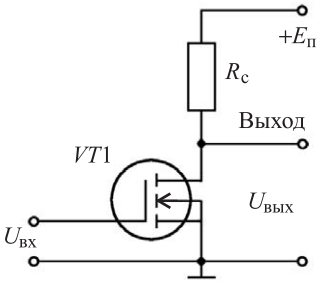


Рис. 1.8. Ключевой каскад на МОП-транзисторе

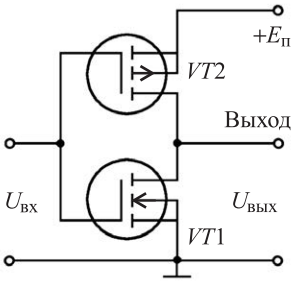


Рис. 1.9. Ключевой каскад на двух комплементарных МОП-транзисторах

$R_с$ часто используют ПТ, имеющий проводимость канала, отличную от проводимости ключевого транзистора. Пример такой схемы на МОП-транзисторах с индуцированными каналами показан на рис. 1.9.

Ключевой транзистор $VT1$ имеет канал n-типа, нагрузочный транзистор — p-типа. Данное деление транзисторов на ключевой и нагрузочный условно, поскольку при работе ключевого каскада переключаются оба транзистора.

Методы повышения быстродействия

Ниже рассмотрены методы, позволяющие сократить длительности переходных процессов в ключе с ОЭ [6, с. 496].

Транзисторный ключ, рассмотренный выше, относится к классу насыщенных ключей, так как входит в состояние насыщения и глубокой отсечки. При переключении из одного режима работы в другой необходимо быстро рассосать избыточный накопившийся заряд в базе и быстро разрядить входные емкости транзистора.

Форсированное включение. В [6] показано, что сокращение длительности фронтов переходного процесса может быть достигнуто при форсированном включении и выключении, время рассасывания избыточного заряда достигается уменьшением насыщения транзистора. Форсированное включение предполагает, что форма базового тока должна быть такой, как показано на рис. 1.10.

Хорошее приближение к такой форме базового тока достигается использованием ускоряющей емкости в базовой цепи (см. рис. 1.10). Если в цепи только сопротивление $R_б$ (нет емкости), то ток

$$I_б^1 = \frac{E_г - U_{б.э}}{R_г + r_б + R_б};\ \text{так как}\ R_г << R_б,\ r_б << R_б\ \ \text{и}\ U^1 >> U_{б.э}\ ,\ \text{то}\ I_б^1 \cong \frac{E_г}{R_б}.$$

При включении емкости в первый момент будет гораздо больший ток:

$$I_б^1 = \frac{E_г - U_с - U_{б.э}}{R_г + r_б + R_б};\ \text{так как}\ U_с(0) = 0\ \ \text{и}\ U_{б.э} << U^1,\ \text{то}\ I_б^1 \cong \frac{E_г}{R_г + r_б}.$$