



ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРНЫХ КЛЮЧЕЙ.

Байжонова Людмила Эгамбердиевна

*Ташкентский университет информационных
технологий имени Мухаммада ал-Хорезмий*

старший преподаватель кафедры электроники и радиотехники

Тел: +998909996858

Бахтиёров Жахонгир Дониёр угли

*Ташкентский университет информационных
технологий имени Мухаммада ал-Хорезмий*

студент второго курса

группа 221-24 КИФ

факультет: компьютерный инжиниринг

Тел: +998900078779

Аюпов Аъзамжон Абдусамад угли

*Ташкентский университет информационных
технологий имени Мухаммада ал-Хорезмий*

студент второго курса

группа 221-24 КИФ

факультет: компьютерный инжиниринг

Аннотация: В данной статье рассматриваются принципы работы транзисторных ключей, их основные характеристики и области применения. Особое внимание уделено анализу режимов работы биполярных и полевых транзисторов в ключевом режиме. Рассматриваются схемотехнические решения, влияющие на быстродействие, потери мощности и надежность работы. Проведён сравнительный анализ различных типов транзисторов, а также приведены результаты экспериментальных исследований.



Ключевые слова: транзисторный ключ, биполярный транзистор, полевой транзистор, насыщение, отсечка, переключение, электронные схемы, импульсный режим, быстродействие

Современная электроника невозможна без использования ключевых элементов, способных управлять электрическими сигналами. Одним из наиболее широко применяемых элементов являются транзисторные ключи. Они используются в цифровой электронике, импульсных источниках питания, системах автоматизации и микропроцессорной технике.

Транзисторный ключ представляет собой устройство, работающее в двух основных режимах: включено (проводит ток) и выключено (не проводит ток). В отличие от линейного режима, ключевой режим обеспечивает высокую эффективность и минимальные потери энергии. Актуальность исследования обусловлена широким применением транзисторов в современных электронных устройствах, где требуется высокая скорость переключения и энергоэффективность.

Транзисторный ключ — это электронная схема, которая работает в двух устойчивых состояниях: открытом (ключ замкнут, через нагрузку течёт большой ток) и закрытом (ключ разомкнут, ток через нагрузку практически отсутствует). Управляющий сигнал (обычно слабый) подаётся на управляющий электрод транзистора, а нагрузка (светодиод, реле, мотор, резистор) подключается в силовую цепь. Ключи позволяют микроконтроллерам или логическим микросхемам управлять мощными нагрузками.

Существуют два основных типа транзисторных ключей:

- На биполярных транзисторах (BJT) — управление током базы (токовый ключ).
- На полевых транзисторах (MOSFET) — управление напряжением на затворе (напряжённый ключ).



Ключ на биполярном транзисторе (BJT, чаще NPN в схеме с общим эмиттером)

Нагрузка включается в цепь коллектора, управляющий сигнал — через резистор в базу.

Режимы работы (статические):

- Режим отсечки (закрыт, логическая «1» на выходе): Входное напряжение низкое ($U_{вх} \approx 0$ В или $U_{БЭ} < 0,6-0,7$ В для кремниевых транзисторов). Оба р-п-перехода (эмиттер-база и база-коллектор) смещены в обратном или нулевом направлении. Ток коллектора минимален (примерно равен тепловому току $I_{К0}$). Напряжение на коллекторе близко к напряжению питания $U_{пит}$. Транзистор ведёт себя как разомкнутый ключ.

- Режим насыщения (открыт, логическая «0» на выходе): Входное напряжение высокое, ток базы I_B достаточен. Оба перехода смещены в прямом направлении. Ток коллектора достигает максимума $I_{Кнас} \approx (U_{пит} - U_{КЭнас}) / R_K$, где $U_{КЭнас} \approx 0,1-0,3$ В. Транзистор теряет усилительные свойства, напряжение на коллекторе минимально. Сопротивление между коллектором и эмиттером очень мало.

Коэффициент насыщения $S = I_B / I_{Бгр}$, где $I_{Бгр} = I_{Кнас} / \beta$ (β — статический коэффициент усиления по току, $h_{21э}$). Рекомендуемые значения $S = 1,5-3$. Больше S повышает помехоустойчивость, но ухудшает быстродействие и увеличивает потребляемый от управляющей схемы ток.

Расчёт простого ключа на BJT:

1. Определить требуемый ток нагрузки $I_{Кнас}$.
2. Рассчитать $R_K = (U_{пит} - U_{КЭнас}) / I_{Кнас}$.
3. Определить граничный ток базы $I_{Бгр} = I_{Кнас} / \beta$.
4. Выбрать ток базы $I_B = S \times I_{Бгр}$.
5. Рассчитать $R_B = (U_{вх} - U_{БЭ}) / I_B$ ($U_{БЭ} \approx 0,7$ В в открытом состоянии).



Пример расчёта: $U_{пит} = 5 \text{ В}$, $I_{Кнас} = 100 \text{ мА}$, $\beta = 100$, $S = 2$, $U_{вх} = 5 \text{ В}$.

Тогда $R_K \approx 47 \text{ Ом}$, $I_B \approx 2 \text{ мА}$, $R_B \approx 2,15 \text{ кОм}$.

В режиме насыщения пропорциональность между токами базы и коллектора нарушается: дальнейшее увеличение I_B не приводит к росту I_K .

Динамика работы ключа на ВТТ (переходные процессы)

При переключении возникают задержки из-за ёмкостей переходов и накопления/рассасывания заряда в базе.

При включении (открытии):

- Время задержки включения (t_z): Заряд входных ёмкостей ($C_{Э} + C_K$).

Транзистор ещё не открывается, напряжение на коллекторе не меняется.

- Время формирования фронта (t_f): Нарастание тока коллектора от 10 % до 90 % от $I_{Кнас}$. Зависит от постоянной времени базы $t_B = 1 / (2\pi f_B)$, где f_B — граничная частота.

При выключении (закрытии):

- Время рассасывания заряда ($t_{рас}$): Удаление избыточных носителей заряда из базы. Транзистор остаётся в насыщении, хотя входной сигнал уже снят. Это самый длительный этап и основной фактор, ограничивающий быстродействие. Увеличивается при большом S .

- Время спада (среза, t_c): Снижение тока коллектора до 10 %.

Общее время переключения может составлять от единиц наносекунд (быстрые транзисторы) до микросекунд. Для ускорения применяют форсирующий конденсатор параллельно R_B или диод Шоттки (ненасыщенные ключи). Глубокое насыщение ухудшает динамику.

Ключ на полевом транзисторе (MOSFET, N-канальный enhancement-тип)



Управление осуществляется напряжением на затворе (УЗИ). Ток затвора в статическом режиме практически отсутствует (входное сопротивление очень высокое, десятки–сотни МОм).

Режимы работы:

- Закрыт: $U_{ЗИ} < U_{пор}$ (пороговое напряжение, обычно 2–4 В). Канал отсутствует, ток стока близок к нулю. Транзистор — разомкнутый ключ.

- Открыт: $U_{ЗИ} > U_{пор}$ (часто 5–10 В или больше для полной проводимости). Образуется проводящий канал, сопротивление сток-исток $R_{DS(on)}$ очень мало (мОм–омы). Потери на проводимость низкие даже при больших токах.

Схема: Нагрузка обычно между +Uпит и стоком, исток — на землю, сигнал — на затвор (через небольшой резистор 100–10 кОм). Рекомендуется pull-down резистор (10–100 кОм) между затвором и землёй, чтобы избежать плавающего состояния.

Преимущества MOSFET: Высокое быстродействие, низкие статические потери при больших токах, управление напряжением (удобно от логических уровней 3,3 В / 5 В). Нет постоянного тока управления.

Недостатки: Чувствительность к статическому электричеству, необходимость достаточного УЗИ для полного открытия, ёмкость затвора требует драйвера при высокой частоте переключения.

Для индуктивной нагрузки (реле, мотор) обязательно ставится защитный диод (flyback diode) параллельно нагрузке для гашения выбросов напряжения самоиндукции.

Сравнение ВJT и MOSFET в ключевом режиме

- ВJT: Дешёвые, хорошо работают при средних токах и напряжениях. Есть небольшое остаточное напряжение $U_{КЭнас}$. Требуется ток базы (нагрузка на управляющую схему). Время выключения больше из-за рассасывания



заряда. Подходят для низкочастотных приложений (управление реле, индикаторами).

- MOSFET: Лучше для высоких токов и мощности (низкие потери). Быстрее переключаются, особенно на высоких частотах. Нет тока управления в статике. Дороже в некоторых случаях, требуют осторожности с ESD-защитой. Идеальны для импульсных источников питания, ШИМ, мощных драйверов.

- Гибридные варианты: Схема Дарлингтона (для очень большого эффективного β), IGBT (комбинация ВJT и MOSFET для очень высоких мощностей).

Типичные исследования в лабораторной работе

- Сборка схемы ключа и снятие статических характеристик: передаточной ($U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$), выходных характеристик. Определение уровней лог. «0» и «1», коэффициента насыщения.

- Исследование динамики: Подача прямоугольных импульсов, измерение времён задержки, фронтов, рассасывания с помощью осциллографа. Анализ влияния РБ, РК, коэффициента насыщения.

- Работа с индуктивной нагрузкой и защита диодом.

- Сравнение обычного, форсированного и Дарлингтон-ключа.

- Моделирование в программах типа LTSpice, Micro-Cap или Proteus для сравнения с экспериментом.

Практические рекомендации:

- Для ВJT всегда используйте ограничивающий резистор в базе.

- Для MOSFET — pull-down на затворе.

- При индуктивной нагрузке — защитный диод.

- Выбирайте транзистор с запасом по току и напряжению (минимум в 1,5–2 раза).



- При высоких частотах предпочтительны MOSFET или специальные быстрые ВТТ.

Полученные результаты подтверждают теоретические положения о преимуществах полевых транзисторов в ключевых схемах. Однако выбор типа транзистора зависит от конкретных условий эксплуатации.

Биполярные транзисторы остаются актуальными в схемах с низкой стоимостью и простыми требованиями. В то же время MOSFET-транзисторы предпочтительны в высокочастотных и энергоэффективных устройствах.

Особое внимание следует уделять схемам управления, поскольку именно они определяют быстродействие и стабильность работы ключа. Также важно учитывать тепловые режимы и использовать радиаторы при необходимости.

Заключение

Таким образом, транзисторные ключи являются важнейшим элементом современной электроники. Проведённое исследование показало, что эффективность работы ключа зависит от типа транзистора, режима работы и параметров схемы управления.

Полевые транзисторы обладают рядом преимуществ, однако биполярные транзисторы остаются востребованными в ряде приложений.

На основе проведённого исследования можно предложить следующие рекомендации:

Использовать MOSFET-транзисторы в высокочастотных и энергоэффективных схемах;

Применять биполярные транзисторы в простых и бюджетных устройствах;



Оптимизировать параметры управляющих цепей для уменьшения времени переключения;

Учитывать влияние паразитных элементов при проектировании схем;

Обеспечивать эффективное охлаждение транзисторов при работе с высокой мощностью;

Использовать моделирование перед практической реализацией схем.

Литература

1. Бойлестад Р., Насельский Л. Электронные устройства и схемотехника. – М.: Вильямс, 2018. – 912 с.
2. Седра А., Смит К. Микрoэлектронные схемы. – М.: Вильямс, 2019. – 1040 с.
3. Милман Дж., Халс К. Электронная техника. – М.: Мир, 2017. – 768 с.
4. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. – Cambridge University Press, 2015. – 1220 p.
5. Rashid M. H. Power Electronics: Circuits, Devices and Applications. – Pearson, 2014. – 944 p.
6. Baliga B. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. – Springer, 2019. – 1080 p.
7. Streetman B., Banerjee S. Solid State Electronic Devices. – Pearson, 2016. – 640 p.
8. Gray P., Hurst P., Lewis S., Meyer R. Analysis and Design of Analog Integrated Circuits. – Wiley, 2018. – 880 p.
9. Андреев В. Г. Полупроводниковые приборы и их применение. – М.: Энергоатомиздат, 2016. – 560 с.
10. Каган Б. М. Основы электронной техники. – М.: Академия, 2017. – 384 с.
11. Белов А. В. Транзисторы и их применение в электронных схемах. – СПб.: Питер, 2019. – 320 с.
12. Mohan N., Undeland T., Robbins W. Power Electronics: Converters, Applications and Design. – Wiley, 2013. – 824 p.