

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ЭЛЕКТРОННЫЕ КЛЮЧИ НА ТРАНЗИСТОРАХ MOSFET

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве методических указаний для студентов Самарского университета, обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 12.03.04 Биотехнические системы и технологии, 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии, 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика

Составители: *И. А. Кудрявцев, Д. В. Корнилин,*
О. О. Мякинин, И. А. Матвеева

САМАРА
Издательство Самарского университета
2020

УДК 621.382.3(075)
ББК 32.852.3я7

Составители: *И. А. Кудрявцев, Д. В. Корнилин,*
О. О. Мякинин, И. А. Матвеева

Рецензент канд. техн. наук М. П. К а л а е в

Электронные ключи на транзисторах MOSFET: методические указания к лабораторной работе / составители: *И. А. Кудрявцев, Д. В. Корнилин, О. О. Мякинин [и др.]*. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 16 с.

В методических указаниях исследуются особенности электронных ключей на базе полевых транзисторов с изолированным затвором и индуцированным каналом. Рассматриваются вопросы выбора электронных компонентов, оценки быстродействия и энергопотребления. Приведены порядок выполнения лабораторной работы и требования к отчету.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 12.03.04 Биотехнические системы и технологии, 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии, 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика, выполняющих лабораторные работы по дисциплинам «Цифровые устройства и микропроцессоры».

Подготовлены на кафедре лазерных и биотехнических систем.

УДК 621.382.3(075)
ББК 32.852.3я7

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Создание новой схемы в среде LTspice и настройка анализа	4
2. Исследование схемы электронного ключа с n-каналом.....	8
3. Исследование схемы электронного ключа с p-каналом.....	11
4. Исследование ключа с индуктивной нагрузкой.....	12
5. Исследование КМДП-структуры.....	12
Список использованных источников	15

ВВЕДЕНИЕ

Электронные ключи являются основным элементом цифровой и силовой электроники. В настоящее время ключи на полевых транзисторах с изолированным затвором и индуцированным каналом (mosfet enhanced) вытеснили остальные типы по ряду причин, поэтому в данном лабораторном практикуме исследуется только этот тип ключей.


В данных методических указаниях рассматривается исследование нескольких схем ключей с помощью моделирования в программе LTspice XVII. В первой части рассматриваются основные приёмы работы с программой и анализируются базовые схемы ключей на базе транзисторов с n и p-каналами, во второй части – анализируются вопросы быстродействия и построения силовых ключей. Третья часть посвящена исследованию составного ключа на базе структуры КМДП (CMOS) и анализу энергопотребления структур на его основе.

Электронные ключи используются, в основном, в двух качествах: как коммутаторы тока и напряжения в силовых схемах и как формирователи цифровых сигналов в логических схемах. Существует также класс аналоговых электронных ключей, необходимых для построения коммутаторов в схемах сбора и обработки данных. Здесь этот класс не рассматривается.



Методические указания позволяют студентам изучить особенности поведения электронных ключей в различных схемах, а также принципы выбора электронных компонентов и влияния паразитных параметров на быстродействие и энергопотребления ключевых схем. Указания не претендуют на полноту описания процессов, происходящих в транзисторах и ключевых схемах, равно как особенностей моделирования электронных схем в среде LTspice, приводятся лишь краткие пояснения, необходимые для выполнения экспериментов. Методические указания содержат также требования к отчету и дополнительные задания для исследования особенностей ключевых схем.

1. СОЗДАНИЕ НОВОЙ СХЕМЫ В СРЕДЕ LTSPICE И НАСТРОЙКА АНАЛИЗА

Среда LTspice представляет собой достаточно простую в использовании среду моделирования, достаточно подробно описанную в [1–3].

Запустите среду разработки, после чего в меню выберите пункт **File/New Schematic**. Откроется рабочее окно редактора. С помощью панели инструментов можно внести на поле необходимые компоненты, наиболее простые из которых (R, L, C, общий провод) можно взять прямо с панели, более сложные – из меню, доступного при выборе пиктограммы . При этом откроется окно, показанное на рис. 1.

Получите у преподавателя конфигурацию схемы и, используя описанный ниже пример, выполните аналогичные действия и расчеты.

Создайте схему из добавленных ранее элементов, аналогичную рис. 3. Выберите mosfet транзистор (или указанный преподавателем) с n каналом (nmos), два источника напряжения (voltage) и резистор (res). Соединить компоненты можно с помощью инструмента, доступного с помощью пиктограммы . Ориентацию компонента можно изменить с помощью инструмента  или клавишами CTRL-R и CTRL-E.

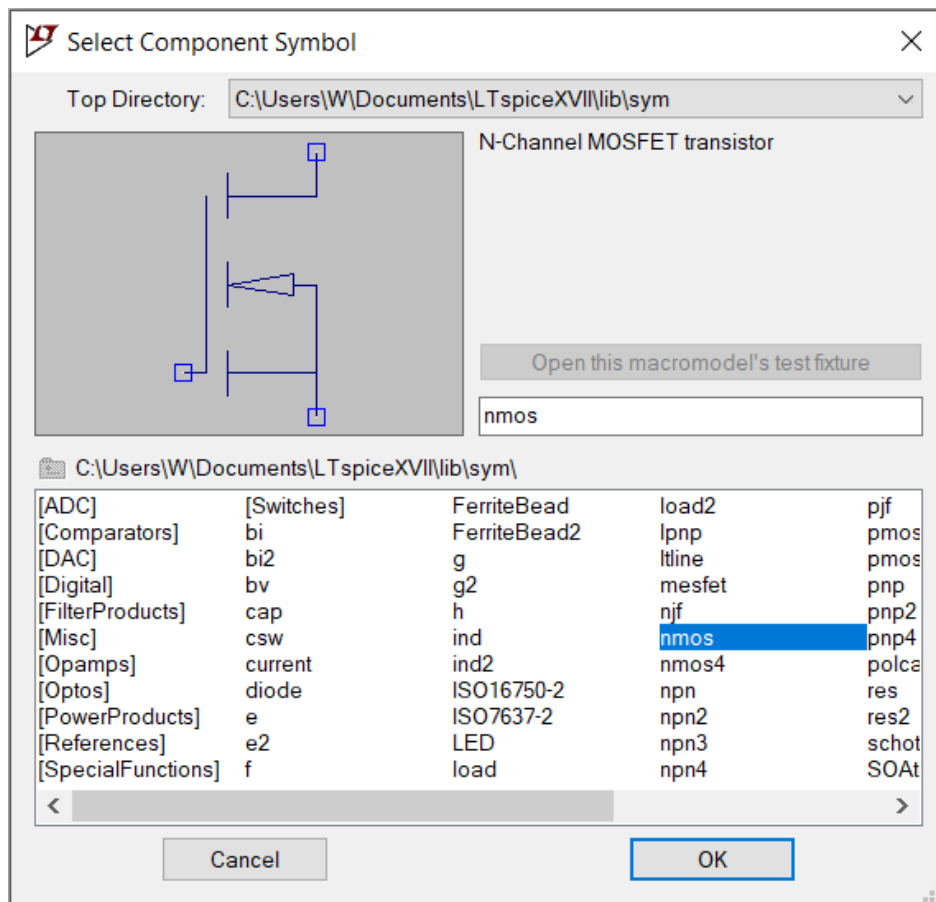


Рис. 1. Диалоговое окно выбора компонентов

Для изменения и выбора параметров компонентов достаточно щелкнуть правой клавишей на компоненте. Для резистора достаточно выбрать номинальное сопротивление. Номинал R1 – 1 Ом. Для своей схемы рассчитайте сопротивление резистора таким образом, чтобы ток стока составлял 60% максимально допустимого значения. На этом этапе поля допуска (Tolerance) и мощности (Power rating) можно оставить незаполненными. Для источника напряжения V1 выберите номинальное напряжение 5В (для транзистора, указанного преподавателем оцените V1 таким образом, чтобы оно составляло 80% максимально допустимого значения). Для второго источника в диалоговом окне нажмите кнопку advanced, затем заполните параметры, как показано на рис. 3. Внутреннее сопротивление (Series Resistance) укажем нулевым (не заполняем).

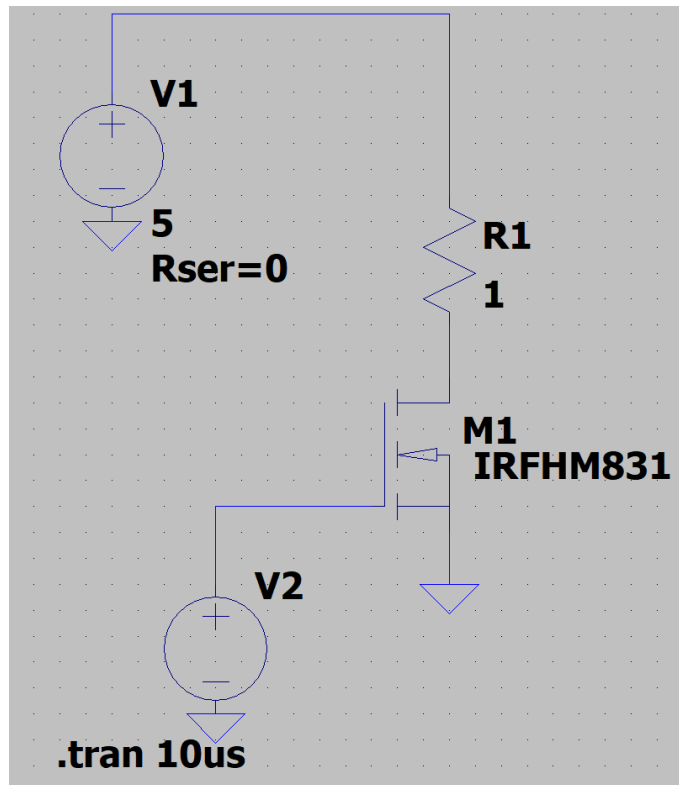


Рис. 2. Схема электронного ключа с использованием IRFHM831

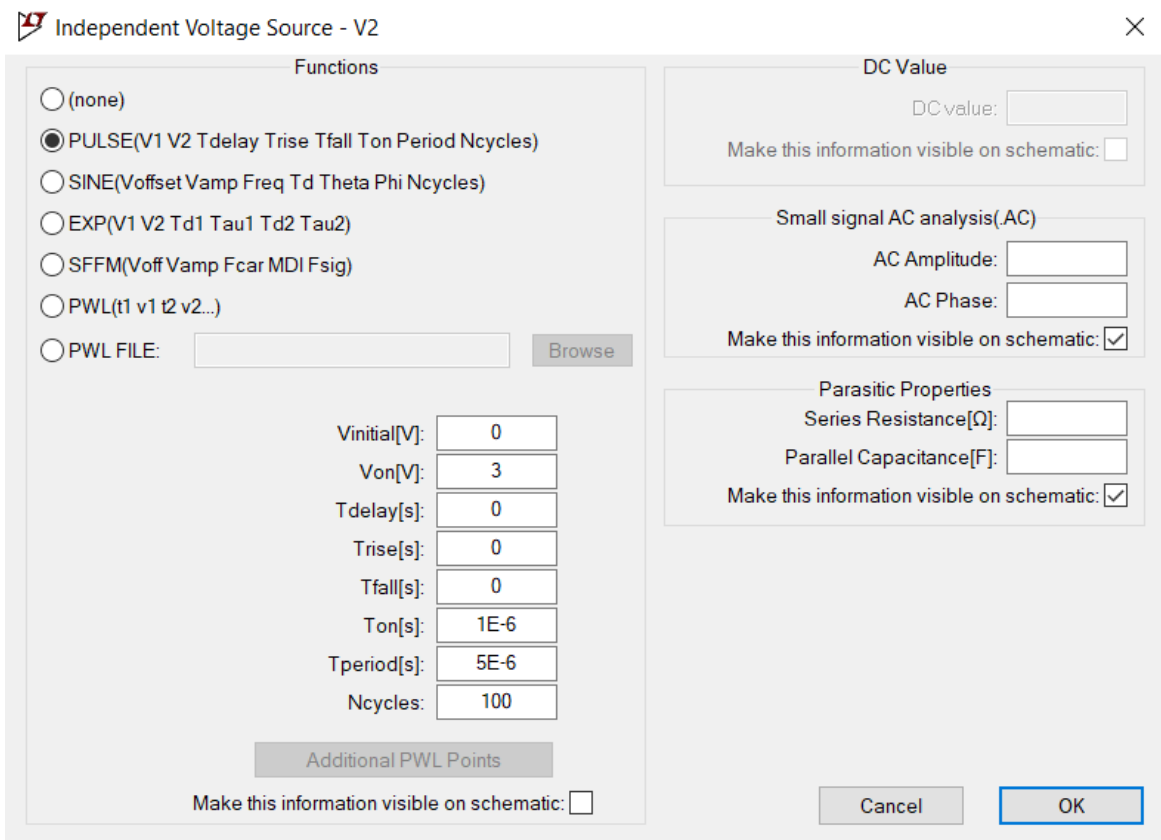



Рис. 3. Настройка источника импульсного напряжения V2

Моделирование можно запустить с помощью инструмента . При первом запуске откроется окно настройки параметров, показанное на рис. 4. Для нашего случая достаточно указать время анализа (в окне Stop Time) 10 мкс (10us), тип анализа по умолчанию устанавливается Transient.

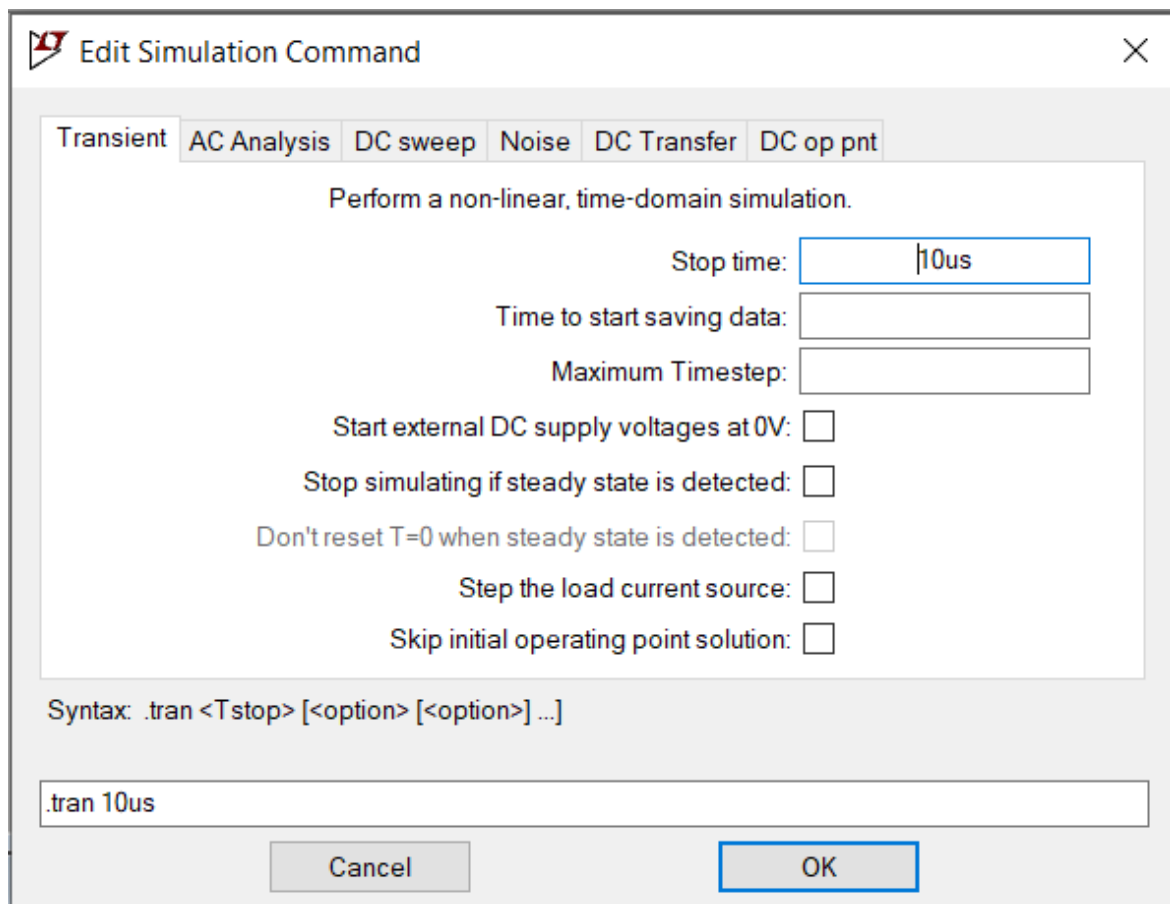
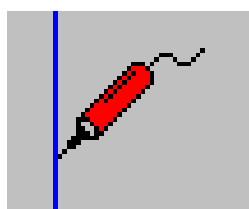
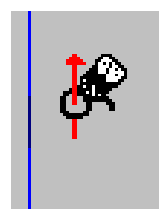


Рис. 4. Настройка параметров моделирования

После запуска анализа откроется окно результатов, но пока оно пустое, так как мы не указали никаких анализируемых сигналов. В простейшем случае нам достаточно анализировать токи и напряжения. Наведите курсор на участки схемы, как показано на рис. 5. Курсор приобретает форму пробника (сигнал напряжения), как показано на рис. 5, а или измерителя тока (рис. 5, б).



а) датчик напряжения



б) датчик тока

Рис. 5. Курсоры выбора анализируемых сигналов

После щелчка левой кнопкой мыши соответствующий сигнал добавляется на экран анализатора. Добавьте ток через резистор R1 и напряжение на стоке транзистора. Для удобства можно ввести наименование желаемого участка цепи с помощью контекстного меню (изучить самостоятельно). Пусть выходное напряжение будет носить имя Vout. Сейчас рабочее окно программы должно выглядеть, как показано на рис. 6. При желании можно включить и отключить сетку, изменить цвета и многое другое [1–3].

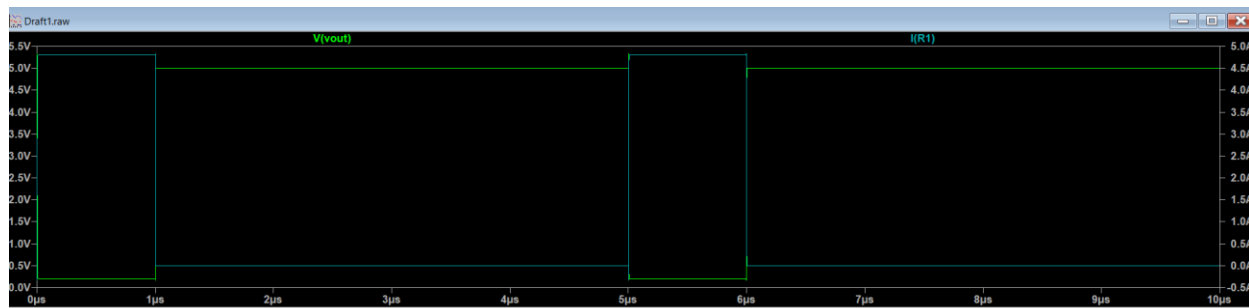
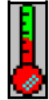


Рис. 6. Результаты моделирования с использованием RFHM831

Программа LTspice также позволяет изучить мгновенную мощность, рассеиваемую на элементах схемы. Для этого в режиме симуляции нужно удерживать кнопку ALT и подвести курсор к интересующему нас элементу.

При этом он приобретает форму термометра . При желании оценить среднюю мощность необходимо щелкнуть мышью по имени усредняемой величины на графике, удерживая нажатой клавишу CTRL. При этом отобразится информационное окно, показывающее среднее и среднеквадратическое значения выбранной величины. Величину среднего значения можно использовать для оценки интеграла величины по времени, умножив на длительность интервала интегрирования.

В первом приближении (исходя из рис. 6) можно отметить, что схема работает, как коммутатор, включая и выключая прохождение тока через нагрузочный резистор R1. В этом эксперименте мы использовали идеальные компоненты (кроме транзистора). *Рассчитайте величину тока через резистор R1 и напряжение на стоке транзистора. Данные, необходимые для расчета, можно найти в документации на применяемый транзистор в сети интернет. Проверьте соответствие величин тока и напряжения расчетным значениям.*

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО КЛЮЧА С N-КАНАЛОМ

Если увеличить фрагмент графиков, соответствующий моменту переключения транзистора, то можно увидеть картину, показанную на рис. 7 (момент включения).

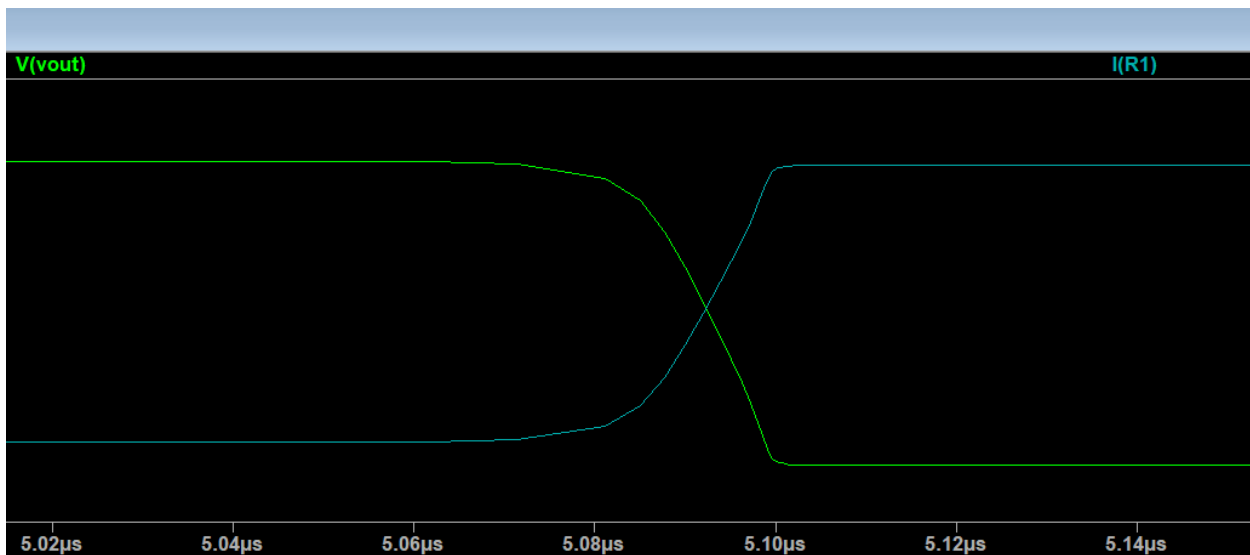


Рис. 7. Процесс коммутации IRFHM831

Быстродействие транзисторов типа MOSFET зависит от нескольких разных причин, в основном, это перезаряд различных паразитных емкостей. Подробно эти процессы описаны в [4, 5] и здесь не рассматриваются. По графикам тока через резистор $R1$ и напряжения на стоке транзистора, полученным в эксперименте, оцените время коммутации (нарастание тока стока до номинальной величины в статическом режиме).

Добавьте к графикам сигнал напряжения на затворе транзистора. Обратите внимание, что фронт и спад управляющего импульса имеют ненулевую величину, несмотря на то, что в диалоговом окне (см. рис. 2) заданы нулевые значения. Для уменьшения времени фронта необходимо вручную задать требуемую величину. Укажите значение $1p$ (1 пс) и сравните вид переходного процесса с рис. 7. **Определите время коммутации при включении и выключении. Чем можно объяснить выбросы напряжения и тока в моменты изменения напряжения на затворе? Почему при выключении величина выбросов меньше, чем при включении?**

Этот эксперимент не имеет практического значения, так как у нас идеальная схема, предполагающая источник входного сигнала с бесконечной мгновенной мощностью и нулевым внутренним сопротивлением. В реальных схемах, конечно, это недостижимо и невозможно. Одним из главных отличий от реальных схем является источник управляющего напряжения. На практике, конечно, нулевое внутреннее сопротивление невозможно.

Установите внутреннее сопротивление источника $V2$, равное 50 Ом (типовой импеданс источников сигналов). Это можно сделать двумя способами: изменить внутреннее сопротивление в окне параметров источника напряжения или добавить в цепь дополнительный резистор. Выберем второй способ (рис. 8), так как в первом случае нам не удастся построить график напряжения на источнике $V2$ (он будет совпадать с V_{in}). Запустите моделирование и добавьте график напряжения на $V2$ и затворе транзистора.

Определите время задержки включения и время задержки выключения схемы, а также время фронта и время спада. Изменяя амплитуду управляющего напряжения от 2В до 10В сделайте вывод о влиянии управляющего напряжения на скоростные параметры транзистора.

При фиксированном значении амплитуды управляющего напряжения исследуйте зависимость параметров ключа от величины нагрузочного сопротивления $R1$ в пределах от 1 Ом до 10000 Ом. Почему при возрастании сопротивления нагрузки увеличивается длительность спада импульса?

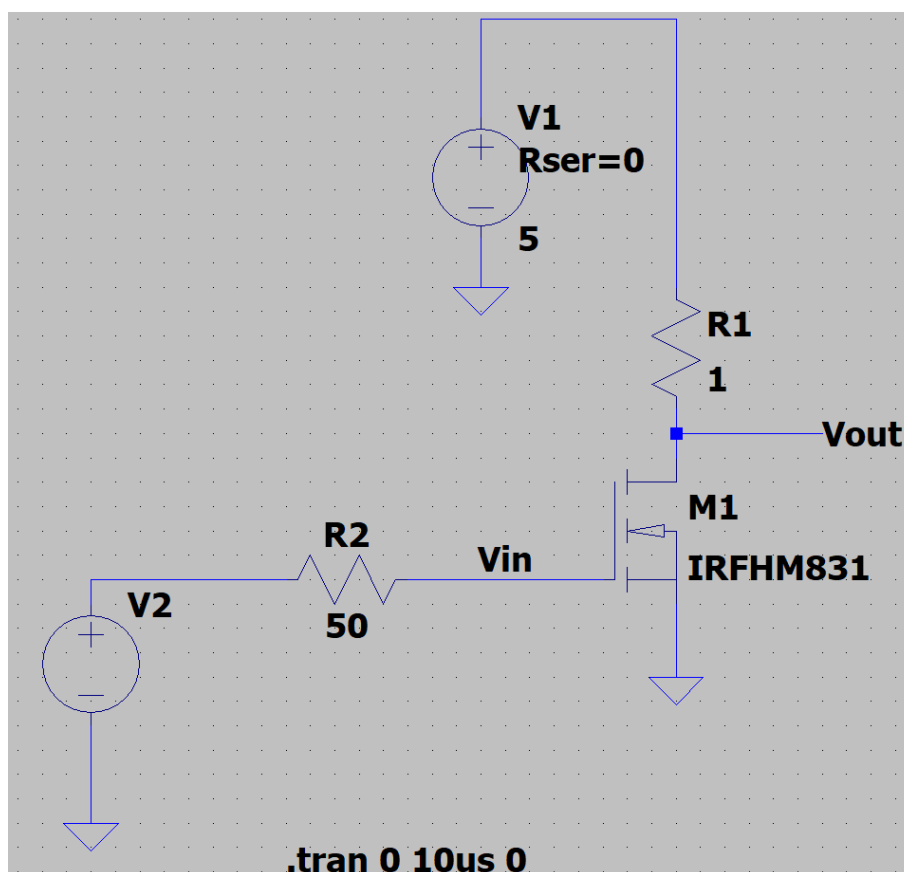


Рис. 8. Схема с резистором в цепи затвора с использованием IRFHM831

Добавьте к графикам ток через резистор $R2$ и исследуйте изменение формы тока при изменении амплитуды управляющего напряжения. Обратите внимание, что направление тока указывается стрелочкой на курсоре датчика тока. При желании изменить направление тока, считающееся положительным, воспользуйтесь меню Plot Settings/Add Trace и добавьте $-I(R2)$. **Чем объясняются изменения тока затвора при включении и выключении транзистора?**

Для удобства расчета длительности переходных процессов в ключах на МДП транзисторах целесообразно использовать параметр заряд включения $Q_{вкл}$. Например, транзистор с $Q_{вкл} = 20$ нКл можно включить за 20 мкс током в 1мА и за 20 нс током в 1А. Указанный параметр приводится в справочниках и определяется изготовителем экспериментальным путем.

Определите заряд, который перекачивается при отпирании транзистора в цепь затвора. Сравните его со справочным значением. Постройте график величины заряда, необходимого для отпирания, от тока стока открытого транзистора.

Добавьте график мощности рассеяния на транзисторе. Изучите изменения мощности рассеяния на транзисторе от величины нагрузочного резистора, а также от величины сопротивления в цепи затвора. Сделайте вывод о степени влияния этих параметров на величину рассеиваемой мощности.

Следует отметить, что при разработке силовых электронных ключей выбор источника управляющего напряжения играет очень важную роль. С особенностями выбора можно ознакомиться, например, в [7]. Особое значение имеет разработка системы управления силовыми ключами в мостовых и полумостовых схемах. Для решения этой задачи разрабатываются так называемые драйверы, описание которых выходит за рамки данных методических указаний. Обзор современных силовых ключей содержится в [8].

3. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО КЛЮЧА С Р-КАНАЛОМ

С особенностями транзисторов с р-каналом можно познакомиться в [9]. Основным мотивом к использованию транзистора этого типа является возможность управления заземленной нагрузкой, чего нельзя получить от схем, рассмотренных выше. Еще одним отличием является инверсный характер управления – транзистор отпирается низким уровнем напряжения на затворе.

Создайте схему, показанную на рис. 9 (с моделью транзистора, указанного преподавателем). Установите амплитуду V2 на уровне 5В (для своей схемы оцените необходимое напряжение, согласно документации на транзистор).

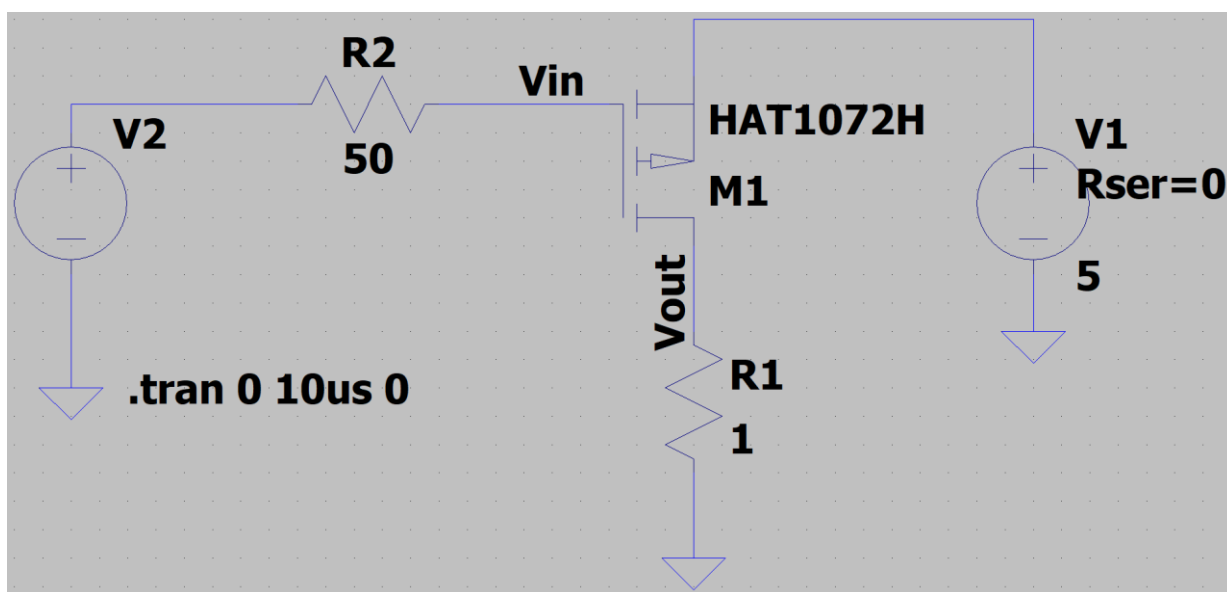


Рис. 9. Схема для исследования ключа на транзисторе с р-каналом HAT1072H

Получите графики тока нагрузки $I(R1)$, напряжения на затворе V_{in} , тока затвора и мощности рассеяния на транзисторе. Сделайте выводы об отличиях данной схемы (и особенностей графика) от предыдущей схемы.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ КЛЮЧА С ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

При коммутации тока через индуктивную нагрузку необходимо учитывать возникающий при этом переходный процесс. При размыкании тока через реле, электродвигатели, электромагнитные клапаны может возникать выброс напряжения, создающий мощные помехи и способный вывести из строя коммутирующий транзистор. В этих случаях следует предусматривать в схеме демпфирующий (free-wheeling) диод. Его функция – замыкание тока дросселя в момент размыкания ключа. В остальное время диод должен быть заперт и не должен оказывать влияния на схему.

В схеме, показанной на рис. 8 замените резистор в цепи стока на дроссель. Установите индуктивность 10 мкГн и внутреннее последовательное сопротивление (Series Resistance) 10 Ом. Оцените величину индуктивного выброса (например, по графику тока через индуктивность).

Постройте зависимость величины выброса от длительности импульса управляющего напряжения и величины индуктивности.

Добавьте на схему диод, как показано на рис. 10.

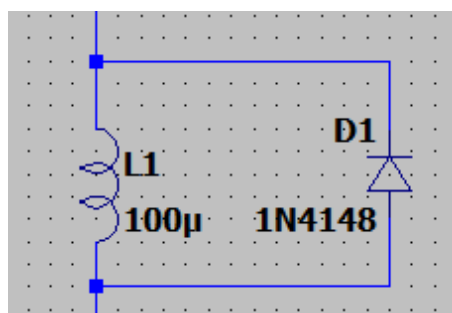


Рис. 10. Включение демпфирующего диода

Измените тип диода на диод Шоттки (Schottky) и изучите изменения поведения схемы. Дайте рекомендации по выбору демпфирующего диода для схем с индуктивной нагрузкой.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ КМДП-СТРУКТУРЫ

В цифровой технике электронные ключи используются несколько иначе, чем было рассмотрено выше. Здесь важным является формирование выходного напряжения с нужной скоростью переключения при минимальной мощности рассеяния на коммутаторе и мощности потребления. Из предыдущих экспериментов можно было увидеть, что для получения максимально быстрого переключения целесообразно минимизировать величину сопротивления

в цепи стока, что приведет к возрастанию общей мощности потребления. Поэтому в цифровых схемах применяются ключи с динамической нагрузкой, имеющей минимальное сопротивление при закрытом ключе с целью быстрого разряда емкостей и максимальное – при открытом ключе с целью минимизации тока потребления схемы и рассеиваемой на транзисторе мощности.

В интегральных схемах применяется структура КМДП (КМОП или CMOS), модель которой показана на рис. 11. Учитывая стремление к миниатюризации и особенности технологии ИМС, к этим транзисторам предъявляются требования высокой нагрузочной способности, но зато они должны занимать мало места на кристалле и обеспечивать быстрое переключение при минимальной рассеиваемой в статическом режиме мощности.

Для моделирования этой структуры выберем транзисторы `nmos4` и `pmos4`, которые позволяют произвольное задание геометрии транзистора. Особенности влияния геометрии интегрального транзистора можно изучить, например, в [10]. Соберите схему, как на рис. 11, и заполните параметры транзисторов, как показано на рис. 12. Это примерно соответствует технологии цифровых ИМС с проектными нормами 0,35 мкм. Будем анализировать работу структуры при напряжении питания 3 В и таком же управляющем напряжении.

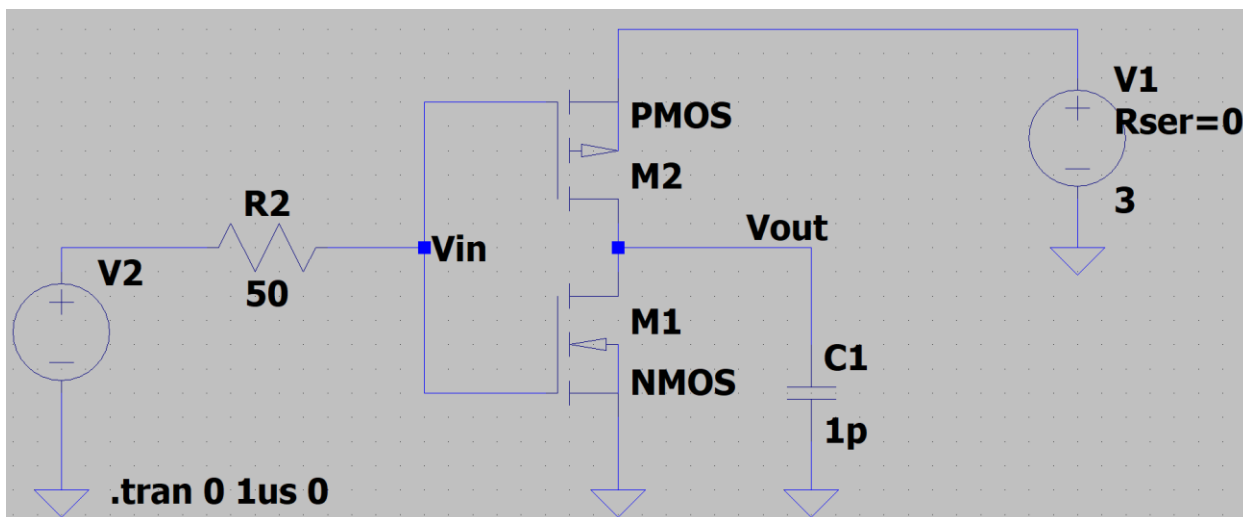


Рис. 11. Схема КМДП структуры

Запустите моделирование и *получите эюры напряжения на выходе схемы*. Убедитесь, что уровень низкого и высокого напряжений на выходе (логический ноль и логическая единица) достигают максимального и минимального значений.

Установите скважность управляющего сигнала равную двум и определите для заданной емкости нагрузки (1 пФ) максимальную частоту переключения, при которой схема формирует уровни выходного напряжения, достигающие максимального и минимального значений. Следует иметь в виду, что это моделирование также не полностью соответствует реальным схемам, так как задана только часть параметров транзисторов.

Измените параметры управляющего напряжения так, чтобы импульсы следовали с частотой 5 МГц при скважности 2. Изучите зависимость суммарной потребляемой мощности от величины емкости нагрузки, длительности фронтов управляющего сигнала и напряжения питания.

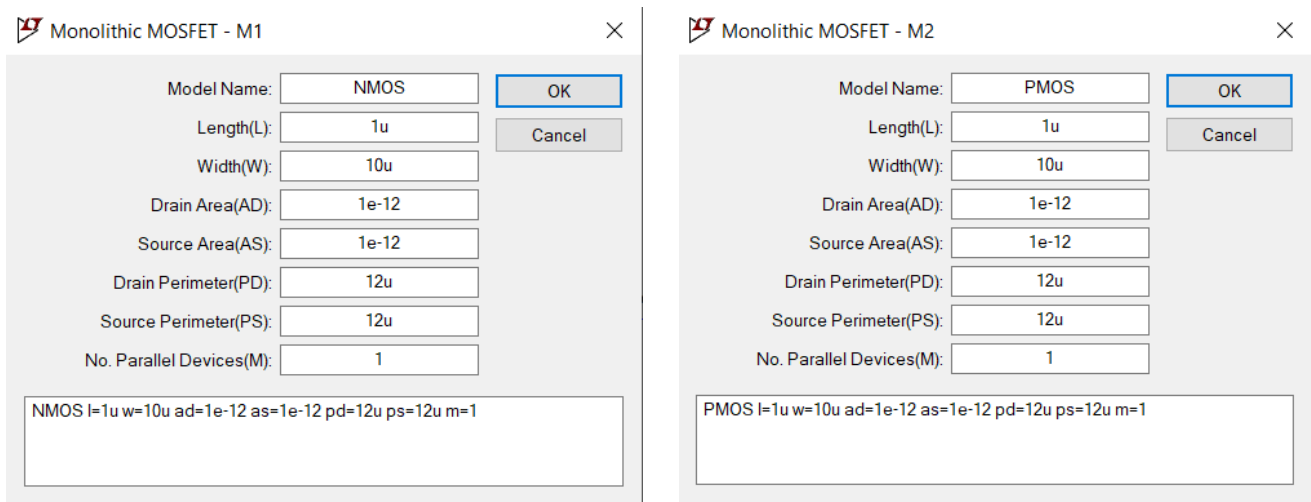


Рис. 12. Параметры транзисторов для моделирования КМДП структуры

Одним из важнейших обстоятельств для разработчика цифровых схем является обеспечение стабильного и надежного питания. Вместе с тем импульсный характер процессов переключения и неизбежные индуктивности трасс печатных плат требуют повышенного внимания к этому вопросу.

Измените схему, как показано на рис. 13. Установите индуктивность дроселя равной 10 нГн и внутреннее сопротивление источника питания – 1 Ом.

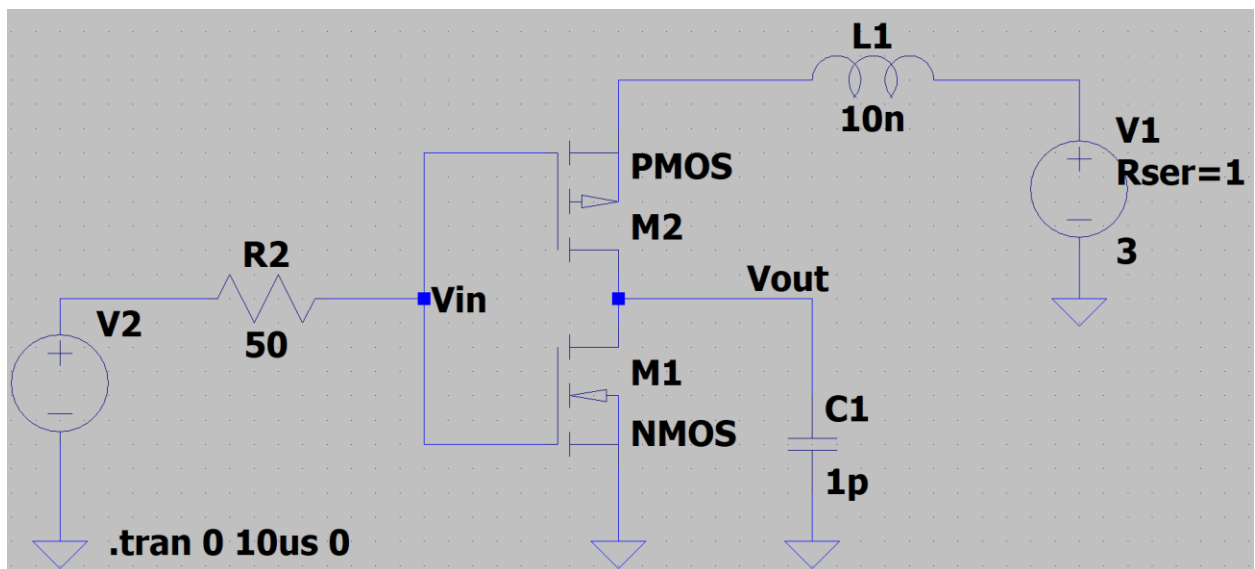


Рис. 13. Схема для исследования цепи питания

Добавьте блокировочный конденсатор (в пределах 10-300 нФ) между истоком транзистора с р-каналом и общим проводом. Оцените влияние этого конденсатора на величину выброса напряжения на истоке транзистора с р-каналом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Володин В. Я. LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 400 с.: ил. + Видеоуроки (на DVD) – (Электроника).
2. Сохор Ю.Н. Моделирование устройств в LTspice: учебно-методическое пособие. Псков: Изд-во ППИ, 2008. 165 с.
3. LTspice IV manual. <https://ecee.colorado.edu/~mathys/ecen1400/pdf/scad3.pdf>
4. The Power MOSFET Application Handbook. Design Engineer's Guide. <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/MOSFET-Application-Handbook.pdf>
5. Понимание работы МОП полевого транзистора с гексагональной структурой в режиме переключения. <http://www.irf.ru/pdf/articles/AN-947.pdf>
6. Новый фактор заряда затвора мощных МОП полевых транзисторов приводит к простой схеме запуска. <http://www.irf.ru/pdf/articles/AN-944A.pdf>
7. Характеристики запуска затвора и требования к мощным МОП-транзисторам. <http://www.irf.ru/pdf/articles/AN-937B.pdf>
8. Дьяконов В. Мощные полевые транзисторы: история, развитие и перспективы / Аналитический обзор // Силовая Электроника, №3, 2011. <https://power-e.ru/components/moshhnye-polevye-tranzistory/>
9. Введение в р-канальные МОП полевые транзисторы. <http://www.irf.ru/pdf/articles/AN-940B.pdf>
10. Erik Bruun CMOS Integrated Circuit Simulation with LTspice IV – a Tutorial Guide 1st Edition. 2016. <https://bookboon.com/en/cmos-integrated-circuit-simulation-with-ltspice-ebook>

Методические материалы

ЭЛЕКТРОННЫЕ КЛЮЧИ НА ТРАНЗИСТОРАХ MOSFET

Методические указания к лабораторной работе

Составители: ***Кудрявцев Илья Александрович,
Корнилин Дмитрий Владимирович,
Мякинин Олег Олегович,
Матвеева Ирина Александровна***

Редактор А.В. Ярославцева
Компьютерная верстка А.В. Ярославцевой

Подписано в печать 30.12.2020. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печ. л. 1,0.
Тираж 25 экз. Заказ . Арт. – 36(РЗМ)/2020.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.