

Электротехника и электроника управления

Конспект

Основы электротехники

Источник: school/Основы электротехники..pptx, 17 слайдов. Ниже — содержание учебного материала без внешней проверки.

Для нового формата курса подготовлен черновик базы для калибровки (исходный материал вне поставки: lectures/_drafts/electrical_1/electrical_1_base_ru.md): компактная Markdown-памятка с величинами $U/I/R/P/C/L$, формулами соединения резисторов и конденсаторов, обоими знаками резистора и схемами соединений и подключения приборов. Отбор и проверка (исходный материал вне поставки: lectures/_drafts/electrical_1/EDITORIAL_ru.md) сохранены отдельно; дополнения (исходный материал вне поставки: lectures/_drafts/electrical_1/electrical_1_addenda_plan_ru.md) имеют отдельные заготовки с планами. Настоящий файл остаётся исходным подробным разбором.

Основные величины

- **Электрический ток** (электрический ток) — направленное движение зарядов. Обозначение I , единица — ампер (A). Количественно: $I = \Delta q / \Delta t$.
- **Напряжение** (электрическое напряжение) — работа по переносу единичного заряда между двумя точками. Обозначение U , единица — вольт (V): $U = W/Q$.
- Показаны постоянный DC, переменный AC, импульсный и трёхфазный ток/напряжение.
- **Сопротивление** (электрическое сопротивление) характеризует противодействие проводника току. Единица — ом (Ω). Для проводника: $R = \rho \cdot l / S$.
- **Закон Ома** для линейного участка цепи: $I = U/R$.
- **Мощность** показывает скорость передачи или преобразования энергии. Единица — ватт (W); для постоянного тока $P = U \cdot I$, для резистивной нагрузки также $P = I^2 R = U^2 / R$.

Источник питания

- Реальный источник тока имеет внутреннее сопротивление r : у аккумулятора оно связано с электродами и электролитом, у генератора — в том числе с обмотками.
- Чем больше ток нагрузки, тем больше внутренняя просадка напряжения и нагрев источника.

Резисторы

- Резистор — пассивный элемент, использующий заданное электрическое сопротивление.
- По регулировке: постоянные, потенциометры и подстроечные.
- По монтажу: выводные THT и поверхностные SMD.
- Нелинейные резисторы: варисторы, терморезисторы, фоторезисторы, тензорезисторы и магниторезисторы; их сопротивление зависит от внешнего воздействия.

Последовательное соединение

- Наглядная схема с расчётом: notes/images/resistors-series-parallel-uk.png.
- Общее сопротивление: $R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + \dots$

- Ток через все резисторы одинаковый.
- Напряжение делится пропорционально сопротивлениям: $U_1 = I \cdot R_1$, $U_2 = I \cdot R_2$; сумма падений равна напряжению источника.
- Пример для $U = 12 \text{ V}$, $R_1 = 100 \text{ }\Omega$, $R_2 = 200 \text{ }\Omega$: $R_{\text{общ}} = 300 \text{ }\Omega$, $I = 40 \text{ mA}$, $U_1 = 4 \text{ V}$, $U_2 = 8 \text{ V}$.

Параллельное соединение

- Обратные сопротивления складываются: $1/R_{\text{общ}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots$
- Для двух резисторов: $R_{\text{общ}} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$.
- Напряжение на всех ветвях одинаковое, а общий ток равен сумме токов ветвей.
- Пример для $U = 12 \text{ V}$, $R_1 = 100 \text{ }\Omega$, $R_2 = 200 \text{ }\Omega$: $R_{\text{общ}} \approx 66,7 \text{ }\Omega$, $I_1 = 120 \text{ mA}$, $I_2 = 60 \text{ mA}$, $I_{\text{общ}} = 180 \text{ mA}$.
- Быстрая проверка: при параллельном соединении $R_{\text{общ}}$ всегда меньше наименьшего сопротивления ветви.

Наглядная схема: [notes/images/resistors-series-parallel.png](#).

Конденсаторы

- Конденсатор состоит из электродов, разделённых диэлектриком, и способен накапливать заряд.
- Основные параметры: ёмкость и номинальное напряжение. Рабочее напряжение нельзя превышать; допустимое значение может снижаться при нагреве.
- Для электролитических конденсаторов критична полярность подключения.

Последовательное и параллельное соединение

- Наглядная схема с расчётом: [notes/images/capacitors-series-parallel-uk.png](#).
- Последовательно: $1/C_{\text{общ}} = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots$; заряд на идеальных конденсаторах одинаков, а напряжение делится обратно пропорционально ёмкости.
- Для двух конденсаторов: $C_{\text{общ}} = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2)$. Общая ёмкость меньше наименьшей ёмкости в цепи.
- Параллельно: $C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + \dots$; напряжение на всех ветвях одинаковое.
- Пример $C_1 = 100 \text{ мкФ}$, $C_2 = 200 \text{ мкФ}$, $U = 12 \text{ В}$: последовательно $C_{\text{общ}} = 66,7 \text{ мкФ}$, $U_1 = 8 \text{ В}$, $U_2 = 4 \text{ В}$; параллельно $C_{\text{общ}} = 300 \text{ мкФ}$, $U_1 = U_2 = 12 \text{ В}$.
- Практическое дополнение, не из презентации: у реальных последовательно соединённых электролитических конденсаторов напряжение может распределяться неравномерно из-за разброса ёмкости и токов утечки; для выравнивания применяют балансирующие резисторы.

Что показано, но почти не объяснено

- В конце приведены схема и временные диаграммы понижающего импульсного преобразователя (step-down, buck converter), а также практическая схема на TPS64202.
- Работа ключа/MOSFET, диода, дросселя и обратной связи в презентации подробно не разобрана.

Транзистор, ключ и MOSFET

Практическое пояснение, добавленное отдельно от презентации курса.

- **Транзистор** — класс полупроводниковых приборов, которыми малым управляющим сигналом управляют большим током. Его можно использовать как усилитель или как ключ.

- **Ключ** — режим работы: прибор либо закрыт, либо максимально открыт. Электронный ключ может быть построен на MOSFET, биполярном транзисторе и других приборах.
- **MOSFET** — тип транзистора, управляемый напряжением между затвором и истоком VGS. Затвор почти не потребляет постоянный ток, но имеет ёмкость, которую приходится быстро заряжать и разряжать.
- Для типового N-channel low-side ключа: +питание → нагрузка → Drain; Source → GND; управляющий сигнал подаётся на Gate относительно Source. Земля контроллера и силовой части должна быть общей.
- $V_{GS} = 0$ — ключ закрыт; достаточное положительное VGS — открыт. Порог $V_{GS(th)}$ означает лишь начало слабой проводимости, а не полное открытие под нагрузкой.
- MOSFET выбирают по допустимым VDS, току, сопротивлению открытого канала $R_{DS(on)}$ при реальном напряжении управления затвором, тепловым условиям и заряду затвора Qg. Надпись «30 А» без оценки нагрева мало полезна.
- Потери в открытом ключе приблизительно $P = I^2 \cdot R_{DS(on)}$. При быстром PWM добавляются потери во время переключения; слабый драйвер затвора увеличивает нагрев.
- Практическая обвязка: резистор последовательно с Gate ограничивает импульс зарядки и звон; pull-down Gate–Source удерживает ключ закрытым при плавающем входе; для реле, соленоида и обычного DC-мотора нужен обратный диод параллельно нагрузке.
- В ESC три полумоста из MOSFETов попеременно подключают три фазы мотора к плюсу и минусу аккумулятора. Для одного мотора требуется минимум шесть силовых ключей; ими управляет специальный gate driver.
- Перед включением проверяют распиновку Gate/Drain/Source, общий GND, отсутствие короткого замыкания и нагрев. Силовую нагрузку первый раз запускают с ограничением тока.

Замечание к материалу

- В заметках слайдов 15 и 17 остался посторонний текст о расчёте поперечной скорости; к электротехнике он не относится и похож на артефакт шаблона.

Материалы для курса — 2026-09-07

Подготовлены расчёты, маркировки и измерения, физика R/C/L и переходные процессы, украинские переводы и две русские части подачи базы. В компактной базе возле приборов добавлены необходимые условия измерения сопротивления и подключения токового входа. Все версии (исходный материал вне поставки: lectures/REVIEW_PACKAGE_ru.md).

Электротехника 2: полупроводники и базовые электронные узлы

Короткая практическая версия. Отдельного файла лекции «Электротехника 2» в school/ нет; материал ниже собран самостоятельно и сверен с документацией производителей.

Иллюстрация источника: Диод Шоттки и стабилитрон. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Самая простая модель

- **Полупроводник** — материал, проводимостью которого можно управлять примесями, электрическим полем, светом и температурой.
- **Диод** — электрический «обратный клапан»: в основном пропускает ток в одну сторону.
- **Транзистор** — управляемый клапан: малый управляющий сигнал меняет большой ток.
- **Ключ** — не тип детали, а режим: транзистор либо закрыт, либо открыт настолько полно, насколько позволяет схема.

Иллюстрация источника: Популярные виды диодов и транзисторов. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Диод: что нужно понять

У диода два вывода: **анод** А и **катод** К. Условный прямой ток течёт $A \rightarrow K$. Полоса на корпусе обычно обозначает катод.

Катод — не «минус по определению». Например, у защитного стабилитрона катод подключают к защищаемому плюсу, а анод — к GND.

Основные типы

Тип	Главное свойство	Где применяют
Выпрямительный rectifier	рассчитан на силовой ток и обратное напряжение, но не обязательно быстрый	AC→DC, входные выпрямители, защита от переплюсовки
Диодный мост bridge	четыре согласованно соединённых выпрямительных диода в одном корпусе	двухполупериодное выпрямление AC
Сигнальный / переключательный	малая ёмкость и быстрое переключение при небольшом токе	логика, ограничители и обработка сигналов
Быстрый FRD/ultrafast	малое время и заряд обратного восстановления t_{rr}/Q_{rr}	импульсные источники и силовые ключевые схемы
Schottky / Шоттки	малое прямое падение V_f , быстро переключается; обычно больше утечка и ниже допустимое обратное напряжение	DC/DC, развязка источников, низковольтное питание
Zener / стабилитрон	работает в рассчитанном обратном пробое около V_z	опорное напряжение, простое ограничение уровня, защита Gate
Лавинный avalanche	рассчитан на контролируемый лавинный пробой	ограничение напряжения, защита и специальные импульсные режимы
TVS / ESD array	очень быстро принимает короткий импульс большой мощности; бывает одно- и двунаправленным	защита питания, USB/UART и других портов от выбросов/ESD
LED / laser diode	преобразует ток в обычный / когерентный свет	индикация, освещение, оптическая связь
Фотодиод	свет создаёт фототок; быстрее фототранзистора	датчики света, оптические приёмники
PIN	малая RF-ёмкость и управляемое ВЧ-сопротивление	RF-переключатели, аттенюаторы, защита ВЧ-входов
Варикап varactor/varicap	обратное напряжение меняет барьерную ёмкость	электронная настройка генераторов и RF-фильтров

Ключевые параметры: I_f — прямой ток, V_r — допустимое обратное напряжение, V_f — падение в прямом ходе, I_r — обратная утечка, t_{rr}/Q_{rr} — обратное восстановление, P/T_j — мощность и температура.

Зачем диод Шоттки

На обычном кремниевом диоде часто падает примерно 0,6–0,9 V, на Schottky — ориентировочно 0,2–0,5 V в зависимости от тока и температуры.

При токе 2 A:

- обычный диод при $V_f = 0,8$ V: $P = 0,8 \times 2 = 1,6$ W;
- Schottky при $V_f = 0,35$ V: $P = 0,35 \times 2 = 0,7$ W.

Поэтому Schottky меньше греется и оставляет нагрузке больше напряжения. Это особенно важно в низковольтном импульсном питании. Но выбирать его нужно по datasheet: низкий V_f не компенсирует недостаточные V_r , ток или охлаждение.

Как применять стабилитрон

Стабилитрон включают **в обратном направлении и параллельно нагрузке**, а ток ограничивают последовательным резистором:

$V_{in} \rightarrow R \rightarrow V_{out}$, затем стабилитрон $K \rightarrow V_{out}$, $A \rightarrow GND$; нагрузка также подключена $V_{out} \rightarrow GND$.

Расчёт:

$I_R = (V_{in} - V_z) / R$, а $I_z = I_R - I_{нагрузки}$.

Пример без нагрузки: $V_{in} = 12\text{ В}$, $V_z = 5,1\text{ В}$, $R = 680\ \Omega$.

$I_z \approx (12 - 5,1) / 680 \approx 10\text{ мА}$; мощность стабилитрона $P_z \approx 5,1 \times 0,010 = 0,051\text{ Вт}$.

Важно:

- без резистора стабилитрон почти закоротит источник и сгорит;
- при максимальном V_{in} и минимальной нагрузке проверяют максимальные I_z и P_z ;
- при максимальной нагрузке должен остаться достаточный ток стабилизации;
- это простой шунтирующий стабилизатор для малой мощности, а не замена BEC/DC-DC;
- TVS рассчитан главным образом на короткие выбросы, стабилитрон — на небольшую длительную стабилизацию/ограничение.

Выпрямитель, диодный мост и фильтр

Иллюстрация исходника: Выпрямитель, диодный мост и конденсаторный фильтр. (Изображение не включено в текстовую базу.)

- **Однополупериодный выпрямитель** — один диод пропускает только одну половину АС. Схема простая, но пульсации большие, их частота равна частоте входного АС.
- **Двухполупериодный диодный мост** — четыре диода переворачивают отрицательную полуволну. Через нагрузку ток всегда течёт в одном направлении, а частота пульсаций становится $2 \times f_{AC}$.
- В каждом полупериоде моста ток проходит через два диода, поэтому теряется примерно $2 \times V_f$.
- **Конденсаторный фильтр** подключают параллельно нагрузке после выпрямителя. Он заряжается около вершины импульса и отдаёт энергию нагрузке между вершинами.

Грубая оценка пульсаций после полного моста:

$\Delta V \approx I_{нагрузки} / (2 \times f_{AC} \times C)$.

Увеличение C уменьшает ripple, но увеличивает пусковой ток. Проверяют рабочее напряжение, полярность, ESR, допустимый ripple current и ток диодов. Конденсатор сглаживает напряжение, но сам по себе его точно не стабилизирует.

В FPV-дроне LiPo уже выдаёт DC, поэтому сетевого диодного моста на борту обычно нет. Такой узел есть в зарядниках и блоках питания. Входной low-ESR конденсатор ESC выполняет родственную задачу: локально отдаёт импульсный ток и уменьшает выбросы на проводах.

Чем биполярный транзистор отличается от полевого

Иллюстрация исходника: BJT и MOSFET. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Биполярный транзистор — BJT

- Типы: NPN и PNP; выводы Base, Collector, Emitter.
- **Управляется током базы.** Чтобы ключ оставался открыт, ток базы должен течь постоянно.
- В усилительном режиме примерно $I_c \approx h_{FE} \times I_b$; в ключевом режиме транзистор загоняют в насыщение, и расчёт только по h_{FE} ненадёжен.
- В открытом ключе есть падение $V_{CE(sat)}$, поэтому потери примерно $P \approx I_c \times V_{CE(sat)}$.
- Удобен для усиления аналоговых сигналов и простого включения небольших нагрузок. Нужен резистор базы.

Полевой транзистор — FET

- Семейство включает JFET и MOSFET; в силовой электронике FPV почти всегда имеется в виду **MOSFET**.
- MOSFET бывает N-channel и P-channel; выводы Gate, Drain, Source.
- Управляется напряжением** VGS, то есть напряжением Gate относительно Source.
- Постоянный ток в Gate почти не течёт, но Gate имеет ёмкость. При каждом переключении драйвер должен быстро зарядить и разрядить её.
- Открытый MOSFET похож на малое сопротивление $R_{DS(on)}$; потери проводимости примерно $P \approx I^2 \times R_{DS(on)}$.
- Поэтому MOSFET удобен как быстрый силовой ключ: ESC, BEC, PWM, защита питания.

Разница одной строкой

BJT: подай ток в Base → управляй током Collector.

MOSFET: создай VGS → открой канал Drain–Source.

Это не значит, что MOSFET всегда лучше. BJT бывает проще и удобнее на малых токах или в линейном усилителе. MOSFET выигрывает там, где нужны большой ток, малые потери и быстрый PWM, но требует правильного VGS, защиты Gate и хорошего драйвера.

Популярные виды транзисторов

Семейство/тип	Чем отличается	Типичное применение
BJT NPN/PNP	управляется током Base	усилители, простые ключи малой и средней мощности
Darlington	два BJT дают очень большой коэффициент усиления тока; выше падение и медленнее выключение	реле, индикаторы, старые драйверные сборки
Digital / pre-biased BJT	резисторы Base уже встроены в корпус	компактные логические ключи
Фототранзистор	свет создаёт ток Base; чувствительнее, но обычно медленнее фотодиода	оптопары, датчики света
JFET	Gate образует управляющий PN-переход; очень высокое входное сопротивление	входы аналоговых усилителей, источники тока
MOSFET N/P enhancement	при нулевом VGS обычно закрыт; основной современный электронный ключ	логика, питание, PWM, ESC/BEC
MOSFET depletion	при нулевом VGS обычно открыт	специальные источники тока, пусковые и аналоговые цепи
Logic-level MOSFET	нормированное низкое $R_{DS(on)}$ при малом VGS	прямое управление от 3,3/5 V, если это разрешают Qg и ток GPIO
Power MOSFET	вертикальная силовая структура, низкое $R_{DS(on)}$, заметный Qg и body diode	ESC, DC/DC, защита питания, силовой PWM
IGBT	изолированный Gate плюс биполярная силовая проводимость	сотни вольт, инверторы, сварка и промышленный привод; не типичный FPV
SiC MOSFET	высокие напряжения, температура и скорость	высоковольтные эффективные преобразователи
GaN HEMT	очень быстрое переключение и малые паразитные заряды	компактные ВЧ-преобразователи питания и RF

SCR/thyristor, TRIAC и DIAC — популярные управляемые полупроводниковые ключи, но **не транзисторы**. Их чаще применяют в сетевых регуляторах, выпрямителях и управлении АС.

Логические элементы

Иллюстрация источника: Логические элементы и таблица истинности. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Логический 0 и 1 — не обязательно ровно 0 V и VCC, а допустимые диапазоны напряжения. Пороги VIL/VIH зависят от семейства логики и питания.

Элемент	Формула	Когда выход 1
NOT / НЕ	$Y = \neg A$	когда $A = 0$
AND / И	$Y = A \cdot B$	только когда оба входа 1
OR / ИЛИ	$Y = A + B$	когда хотя бы один вход 1
NAND / НЕ-И	$Y = \neg(A \cdot B)$	во всех случаях, кроме $A=B=1$
NOR / НЕ-ИЛИ	$Y = \neg(A + B)$	только когда оба входа 0
XOR / исключающее ИЛИ	$Y = A \oplus B$	когда входы разные
XNOR	$Y = \neg(A \oplus B)$	когда входы одинаковые

Современная логика обычно выполнена по технологии **CMOS**: P-channel MOSFETы тянут выход к плюсу, N-channel — к земле. NAND и NOR называют универсальными: из любого одного из этих типов можно собрать все остальные функции.

Практически важно:

- не оставлять входы плавающими — применять pull-up/pull-down;
- сверять VCC, VIL/VIH, допустимый ток выхода и совместимость уровней 3,3/5 V;
- учитывать задержку распространения и максимальную частоту;
- Schmitt trigger очищает медленный/шумный фронт за счёт разных порогов включения и выключения;
- open-drain/open-collector может только тянуть линию вниз и требует внешнего pull-up.

В FPV логические элементы в огромном количестве находятся внутри MCU, ESC и радиочипов. Отдельные микросхемы используют как буферы, инверторы, level shifter, формирователи reset/enable и для объединения управляющих условий.

Кварцевый резонатор

Кварц относится не к полупроводникам, а к **пьезоэлектрическим частотоподающим элементам**.

Иллюстрация источника: Кварцевый резонатор и генератор. (Изображение не включено в текстовую базу.)

- **Кварцевый резонатор / crystal unit** обычно имеет два вывода и является пассивным. Сам сигнал не генерирует: работает вместе с усилителем генератора внутри MCU/RF-чипа.
- **Готовый кварцевый генератор / XO** содержит кварц и усилитель в одном корпусе; обычно имеет VCC, GND, OUT и иногда EN.
- TCXO компенсирует уход частоты с температурой; VCXO позволяет немного подстраивать частоту напряжением; 32,768 kHz tuning-fork crystal часто задаёт часы RTC.
- Керамический резонатор похож по назначению и часто дешевле, но обычно менее точен и стабилен.

В типовой схеме Pierce кварц стоит между OSC_IN и OSC_OUT, а C1 и C2 идут на землю. Приблизённо:

$$CL \approx C1 \times C2 / (C1 + C2) + C_{stray}.$$

Номиналы нельзя выбирать только «по похожей плате»: CL, паразитная ёмкость пинов/дорожек, ESR, drive level и усилитель конкретной микросхемы определяют запуск и точность.

В FPV кварц/генератор задаёт такт MCU на FC и ESC, а также опорную частоту в RX/VTX/GNSS и других радиочипах. Повреждение или уход частоты может дать не только «не включается», но и нестабильный запуск, неработающий USB/радиоканал или неправильные тайминги.

Проверка:

- сначала питание, reset и пайка вокруг кварца;
- обычный мультиметр наличие генерации не показывает;
- тяжёлый щуп осциллографа добавляет ёмкость и может остановить генератор — нужен малокапацитивный щуп и контрольная точка clock, если она предусмотрена;
- заменять на ту же частоту, подходящие CL/ESR/drive level, корпус и температурный допуск;
- дорожки кварца держат короткими, симметричными и далеко от силовых переключающих узлов.

MOSFET как ключ

N-channel low-side

Подключение: +питание → нагрузка → Drain, Source → GND. На Gate подают управляющее напряжение относительно Source. Это простой и эффективный вариант.

P-channel high-side

Source сидит на плюсе, Drain идёт к нагрузке. Открывается, когда Gate становится ниже Source. Схема управления проще, но при одинаковом размере P-channel обычно имеет большее RDS(on).

N-channel high-side

Имеет меньшие потери, но для полного открытия Gate обычно нужно поднять выше напряжения Source. Поэтому применяют high-side gate driver/bootstrap. Именно так устроены верхние ключи в ESC.

Что выбирать в datasheet

- VDS(max) — с запасом выше реального питания и выбросов;
- RDS(on) — именно при доступном VGS, а не только при 10 V;
- ID — вместе с корпусом, температурой и охлаждением, а не рекламной цифрой при 25 °C;
- Qg — заряд Gate: большой Qg требует более мощного драйвера и повышает потери на высокой частоте;
- VGS(max), тепловое сопротивление, SOA, параметры body diode.

VGS(th) означает только начало слабой проводимости при малом тестовом токе. Это **не** напряжение полного открытия силового ключа.

Практика в FPV-дроне

- В одном ESC для BLDC-мотора три полумоста, то есть минимум **6 MOSFET**. В 4-in-1 ESC — минимум 24 силовых ключа.
- В ESC N-channel MOSFET быстро коммутируют фазы; gate driver обеспечивает нужное VGS и быстрый заряд Gate.
- В BEC/DC-DC Schottky может работать как быстрый диод свободного хода; в синхронном преобразователе его функцию в основном берёт второй MOSFET.
- Стабилитрон может ограничивать напряжение Gate или создавать простую опору, но не питает FC вместо нормального стабилизатора.
- TVS может зажимать короткие выбросы на питании, но его напряжение и импульсная мощность должны быть рассчитаны. Входной low-ESR конденсатор у ESC всё равно необходим.
- У MOSFET есть встроенный body diode. Он задаёт путь обратного тока, но не означает, что для любой внешней катушки отдельная защита больше не нужна.

Подробная работа трёхфазного моста: ESC, MOSFETы и управление мотором.

Иллюстрация исходника: MOSFETы в ESC. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Безопасная проверка мультиметром

Перед измерением: снять пропеллеры, отключить LiPo и USB, разрядить входной конденсатор, сверить распиновку детали.

Диод

В режиме Diode:

- в прямом направлении прибор обычно показывает падение напряжения;
- после перестановки щупов исправный отдельный диод должен показать 0L;
- около 0 V в обе стороны похоже на КЗ, 0L в обе стороны — на обрыв или неправильные выводы;
- на плате параллельные цепи и конденсаторы искажают результат, поэтому сомнение подтверждают вне схемы или сравнением с исправным каналом.

Ориентиры, а не строгий тест: обычный Si примерно 0,5–0,8 V, Schottky примерно 0,15–0,45 V при малом тестовом токе мультиметра.

MOSFET/ESC

- Между Drain–Source в одну сторону может читаться body diode — это нормально.
- Почти нулевое сопротивление D–S в обе стороны после разряда Gate–Source часто означает пробой ключа, но на плате нужно учитывать параллельные MOSFETы и обмотки.
- Gate может ненадолго зарядиться от щупа и открыть MOSFET; перед сравнением каналов замкнуть Gate–Source через безопасный резистор или следовать процедуре datasheet.
- После ремонта первое питание — без пропеллеров и через ограничитель тока/smoke stopper.

Типовые ошибки

- Считать полосу на диоде универсальным знаком «минус».
- Включать стабилитрон без ограничителя тока.
- Путать стабилитрон и TVS: длительная стабилизация и поглощение короткого импульса — разные режимы.

- Считать $V_{GS(th)}$ напряжением полного открытия MOSFET.
- Измерять V_{GS} относительно общего GND, когда Source ключа движется.
- Выбирать MOSFET только по огромному ID с первой страницы datasheet.
- Считать MOSFET неисправным из-за показания его body diode.

Источники самостоятельной проверки

- ROHM, [Diode Types and Applications](#).
- ROHM, [Schottky Barrier Diodes: особенности и thermal runaway](#).
- Toshiba, [What is a bipolar transistor?](#).
- Infineon, [What is a MOSFET?](#).
- Littelfuse, [Automotive circuit protection using TVS diodes](#).
- ROHM, [AC-DC Basics: bridge rectifier and smoothing capacitor](#).
- Texas Instruments, [Logic Guide](#).
- STMicroelectronics, [Oscillator design guide for STM8/STM32](#).
- Epson, [Difference between a crystal unit and a crystal oscillator](#).

Проверено: 2026-09-04.

Материалы для курса — 2026-09-07

Подготовлены диодный тест, паспорт MOSFET и кварц, физика перехода, силового ключа и резонатора, украинские переводы и русская подача компактной базы. Большой ток мотора проходит через силовые ключи, командный сигнал — через управляющую электронику; эти роли сохранены в объяснении. Все версии (исходный материал вне поставки: lectures/REVIEW_PACKAGE_ru.md).

ШИМ-сигнал

Статус: самостоятельное техническое объяснение; напрямую из материалов курса не извлечено. В school/Основы электротехники. .pptx показан импульсный понижающий преобразователь, но принцип ШИМ подробно не разобран.

Суть

ШИМ — широтно-импульсная модуляция (PWM, pulse-width modulation; укр. широтно-імпульсна модуляція). Ключ быстро переключает выход между двумя состояниями, обычно 0 и напряжением питания. Управление выполняется изменением длительности включённого состояния при заданном периоде.

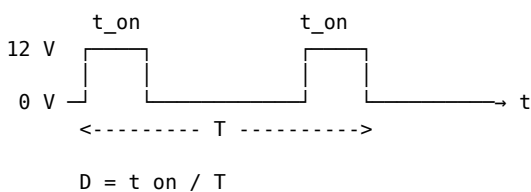
- Период: T .
- Частота: $f = 1/T$.
- Время включения: t_{on} .
- Коэффициент заполнения (duty cycle): $D = t_{on}/T$, от 0 до 1 или от 0% до 100%.
- Для идеального сигнала 0...Упит: среднее за период $U_{ср} = D \cdot U_{пит}$.

Пример: при $U_{пит} = 12\text{ V}$ и $D = 25\%$ выход каждый период находится 25% времени на уровне 12 V и 75% времени на уровне 0 V; $U_{ср} = 3\text{ V}$. Мгновенное напряжение при этом не равно 3 V — оно переключается между 0 и 12 V.

Иллюстрация источника: Влияние коэффициента заполнения ШИМ на нагрузку.
(Изображение не включено в текстовую базу.)

На всех трёх диаграммах период одинаков. Слева импульс узкий — передаётся мало энергии; в центре время ON и OFF одинаково; справа импульс широкий — нагрузка получает больше энергии. Светодиод светит ярче, а двигатель развивает больший средний момент.

Временная диаграмма



При неизменной частоте увеличение D делает импульсы шире. При неизменном D увеличение частоты сокращает и период, и длительность каждого импульса, но идеальное среднее значение не меняется.

Почему нагрузка реагирует на среднее

ШИМ не создаёт промежуточное напряжение непосредственно. Усреднение происходит за счёт инерции нагрузки или фильтра:

- индуктивность обмотки двигателя сглаживает ток;
- механическая инерция ротора сглаживает изменение момента и оборотов;
- конденсатор и дроссель в импульсном преобразователе сглаживают напряжение/ток;
- глаз усредняет достаточно быстрое мигание светодиода.

Если частота слишком мала, появляются видимое мерцание, слышимый писк, пульсации тока или рывки момента. Слишком высокая частота увеличивает потери на переключение ключей. Рабочую частоту выбирают под нагрузку и силовую схему.

Среднее напряжение, RMS и мощность — не одно и то же

Формула $U_{\text{ср}} = D \cdot U_{\text{пит}}$ описывает среднее напряжение. Для прямоугольного сигнала 0... $U_{\text{пит}}$ действующее значение:

$$U_{\text{rms}} = U_{\text{пит}} \cdot \sqrt{D}.$$

Для чисто резистивной нагрузки:

$$P_{\text{ср}} = U_{\text{rms}}^2 / R = D \cdot U_{\text{пит}}^2 / R.$$

Поэтому нельзя во всех схемах безоговорочно заменить ШИМ источником постоянного напряжения $U_{\text{ср}}$. Такая замена полезна для медленной или фильтрующей нагрузки, но неверна для оценки нагрева резистора и некоторых электрических режимов.

Термины

Коэффициент заполнения $D = t_{\text{on}}/T$ иногда разговорно называют «скважностью». Строгое определение скважности:

$$Q = T/t_{\text{on}} = 1/D.$$

Пример: $D = 25\%$, а $Q = 4$. При чтении документации нужно проверить, что именно автор называет duty или «скважностью».

Практика в FPV-дроне

Иллюстрация источника: Где ШИМ применяется в FPV-дроне. (Изображение не включено в текстовую базу.)

1. ESC и моторы — главное применение

Путь управления:

стик газа → приёмник → FC → команда DShot → ESC → MOSFETы → три фазы мотора.

- Полётный контроллер вычисляет требуемую тягу каждого двигателя.
- По линии M1...M4 он отправляет ESC команду, обычно цифровой пакет DShot.
- Микроконтроллер ESC принимает команду и управляет шестью MOSFETами трёхфазного полумоста.
- MOSFETы очень быстро подключают обмотки мотора к аккумулятору и отключают их. Модуляция длительности включения регулирует фазный ток, средний момент и обороты.

Важно: значение газа в пакете DShot и коэффициент заполнения силовых ключей — не одно и то же. ESC учитывает положение ротора, коммутацию фаз, напряжение батареи, настройки timing/demag и защитные ограничения.

2. Понижающие преобразователи ВЕС

Встроенный или отдельный BEC/buck converter получает, например, напряжение аккумулятора 4S/6S и формирует линии 5 V, 9 V или другое питание для FC, камеры, VTX и периферии.

Внутри преобразователя ШИМ управляет силовым ключом. Дроссель и конденсаторы сглаживают импульсы, поэтому на выходе получается почти постоянное напряжение.

3. Светодиоды

На LED-ленте или управляемом выходе яркость обычного светодиода можно менять коэффициентом заполнения:

- малый D — тускло;
- большой D — ярко;
- частота должна быть достаточно высокой, чтобы не было заметного мерцания.

У адресных светодиодов WS2812 линия данных использует кодирование длительностью импульса, а яркостью каждого канала управляет внутренний контроллер светодиода.

4. Сервоприводы и периферия

Классический RC-сервопривод получает повторяющиеся управляющие импульсы. Длительность импульса кодирует требуемое положение, а не среднюю мощность двигателя сервы. Это исторически также называют PWM servo signal, хотя назначение отличается от силового ШИМ ESC.

Пассивный пьезоизлучатель можно возбуждать ШИМ требуемой звуковой частоты. Активный бuzzer обычно уже содержит генератор и требует только включения питания.

Где ШИМ обычно не нужно искать

- CRSF/ELRS, UART и телеметрия — цифровые протоколы передачи данных.
- DShot — цифровые импульсные пакеты; коэффициент заполнения линии не задаёт мощность мотора напрямую.
- Видеосигнал и радиосигнал VTX — другие виды модуляции.
- Аккумулятор выдаёт постоянное напряжение; импульсы создают электронные ключи нагрузки.

Диагностика осциллографом

Проверять:

1. уровни LOW/HIGH и отсутствие опасного превышения напряжения;
2. частоту f и период T ;
3. длительность t_{on} и коэффициент заполнения D ;
4. форму фронтов, выбросы и звон;
5. правильную точку земли щупа.

Перед проверкой моторных выходов снять пропеллеры и надёжно закрепить аппарат. Логический сигнал FC→ESC измеряют относительно GND контроллера.

При измерении силовой части ESC обычный заземлённый осциллограф может создать короткое замыкание через землю щупа. Землю щупа нельзя цеплять к фазному выводу мотора. Для плавающих узлов и фазных полумостов нужен подходящий дифференциальный щуп либо изолированная методика измерения.

UART и I²C

Самостоятельное техническое пояснение; отдельный файл курса по этой теме не использовался.

UART

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) — асинхронный последовательный интерфейс, обычно для связи двух устройств.

Иллюстрация источника: UART в FPV-дроне. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Подключение

- TX одного устройства подключается к RX другого: TX → RX.
- Для двусторонней связи нужна обратная линия: RX ← TX.
- Земля обязательна: GND ↔ GND.
- Отдельной тактовой линии нет. Оба устройства заранее настраиваются на одинаковую скорость (baud rate), число бит данных, чётность и число стоповых битов.
- Питание периферии не является сигнальной линией UART и подключается отдельно с проверкой допустимого напряжения.

Кадр

Типичный формат 8N1:

1. линия в покое находится в состоянии логической 1;
2. start bit = 0;
3. восемь бит данных, младший бит первым (LSB first);
4. бита чётности нет (N — no parity);
5. stop bit = 1.

На один байт данных при 8N1 передаётся 10 бит. Поэтому теоретический предел полезного потока равен примерно $\text{baud}/10$: при 115200 baud — около 11520 byte/s, без учёта пауз и протокола верхнего уровня.

Практика на БПЛА

- UART-порты полётного контроллера используют для приёмника управления, GPS, телеметрии, цифрового VTX/MSP и другой периферии.
- Один обычный UART не является общей адресной шиной: два передатчика нельзя просто соединить с одним RX, иначе они будут электрически конфликтовать.
- Некоторые интерфейсы используют только одну линию, инверсию или half-duplex. Например, SBUS, SmartAudio, Tramp и одно-проводные варианты нельзя подключать только по сходству названий площадок — нужно проверить схему FC и документацию устройства.

Типичные неисправности

- перепутаны TX/RX;
- нет общего GND;
- не совпадают baud rate или формат кадра;
- выбран не тот UART в Betaflight;
- конфликт функций порта;
- перепутаны обычный и инвертированный сигнал;

- уровень 5 V подан на вход, допускающий только 3,3 V.

UART TTL/CMOS и RS-232 — не одно и то же: у RS-232 другие электрические уровни и полярность, поэтому прямое соединение без преобразователя может не работать и быть опасным.

I²C

I²C (Inter-Integrated Circuit, также пишут I2C) — синхронная адресная шина для нескольких микросхем на общих линиях.

Иллюстрация источника: I²C в FPV-дроне и на полётном контроллере. (Изображение не включено в текстовую базу.)

Подключение

- SDA — двунаправленная линия данных.
- SCL — линия тактового сигнала, обычно формируемого контроллером шины.
- GND устройств объединяется.
- Все устройства подключаются к SDA и SCL параллельно и различаются адресами, обычно 7-битными.
- SDA и SCL имеют выходы типа open-drain/open-collector: устройства активно тянут линию только к нулю. Логическую единицу создают подтягивающие резисторы (pull-up) к напряжению логики.
- Подтяжки нужны на обеих линиях, но не обязательно возле каждого устройства: важна одна корректно рассчитанная эквивалентная подтяжка на всю шину.

Передача

1. START: SDA переходит из 1 в 0, пока SCL = 1.
2. Передаются 7 бит адреса, затем бит R/W.
3. На девятом такте, который формирует контроллер, получатель тянет SDA в 0 для ACK либо оставляет линию в 1 для NACK.
4. Передаются байты данных, старший бит первым (MSB first); после каждого байта следует ACK/NACK.
5. STOP: SDA переходит из 0 в 1, пока SCL = 1.

Распространённые режимы скорости: 100 kbit/s (Standard-mode), 400 kbit/s (Fast-mode), 1 Mbit/s (Fast-mode Plus) и 3,4 Mbit/s (High-speed mode). Конкретный режим должен поддерживаться всеми участвующими устройствами и разводкой.

Практика на БПЛА

- I²C часто связывает FC с барометром, магнитометром, дополнительными датчиками и памятью.
- Шина рассчитана прежде всего на короткие соединения внутри платы или устройства. Длинные провода увеличивают ёмкость, замедляют фронты и повышают чувствительность к помехам от ESC, моторов и DC/DC-преобразователей.
- Два устройства с одинаковым неизменяемым адресом нельзя одновременно использовать на одной шине без второго I²C-контроллера или мультиплексора. Иногда адрес меняется выводом конфигурации.
- Номинал pull-up выбирают по напряжению, скорости и ёмкости шины. Слишком большое сопротивление даёт медленный подъём сигнала, слишком маленькое — повышенный ток, когда линия удерживается в нуле.

Типичные неисправности

- отсутствуют подтягивающие резисторы либо они подключены к неправильному напряжению;
- перепутаны SDA/SCL;
- нет общего GND;
- совпали адреса устройств;
- одно устройство удерживает SDA в нуле и блокирует всю шину;
- слишком длинные провода, высокая ёмкость или сильные импульсные помехи;
- выбранная частота выше возможностей датчика или разводки.

Главное различие

Признак	UART	I ² C
Принцип	асинхронный	синхронный
Сигналы	TX, RX	SDA, SCL
Соединение	обычно два устройства	несколько устройств на общей шине
Выбор устройства	отдельный порт/линии	адрес
Направление	full-duplex по двум линиям	half-duplex по общей SDA
Такт	согласованная baud rate, без отдельного провода	отдельная линия SCL
Подтяжки	обычно не нужны как часть интерфейса	обязательны для SDA и SCL
Порядок битов	обычно LSB first	MSB first
Подтверждение	в самом UART нет	ACK/NACK после байта
Типичное применение на FC	RX, GPS, VTX, телеметрия	бортовые датчики

Быстрый выбор при диагностике

- Видны площадки TX/RX — искать UART, перекрёстное подключение и настройки serial-порта.
- Видны SDA/SCL — искать I²C, адрес устройства и pull-up.
- UART молчит только с одним устройством — сначала проверить TX/RX, GND и baud rate.
- I²C перестала видеть сразу все датчики — искать общую проблему шины: питание, pull-up или линию, зажатую в ноль.

ESC, MOSFETы и управление мотором FPV-дрона

Практическое пояснение. Оно развивает тему MOSFET/PWM из конспекта электротехники; отдельная внешняя проверка в рамках обсуждения не выполнялась.

Наглядная схема: <notes/images/esc-mosfet-motor-control.png>.

Цепочка управления

1. Полётный контроллер рассчитывает требуемую тягу и отправляет ESC команду, например по DShot.
2. Микроконтроллер ESC принимает команду и определяет, какие фазы мотора переключать. У sensorless-мотора положение ротора после запуска оценивается по обратной ЭДС (back-EMF) незапитанной фазы.
3. Gate driver быстро заряжает и разряжает затворы силовых MOSFETов.
4. MOSFETы подключают фазы мотора к VBAT или GND; последовательная коммутация создаёт вращающееся магнитное поле.

DShot — команда FC→ESC. Силовой PWM и коммутацию фаз формирует сам ESC; это разные сигналы.

Силовая часть

- FPV-мотор — трёхфазный бесщёточный двигатель. Для каждой фазы ESC имеет полумост: верхний MOSFET подключает фазу к плюсу аккумулятора, нижний — к минусу.
- Три полумоста дают минимум шесть силовых MOSFETов на мотор и 24 на обычном 4-in-1 ESC. Для большого тока ключи могут включаться параллельно.
- Верхний и нижний MOSFET одного полумоста нельзя открывать одновременно: получится сквозной ток VBAT → GND. Драйвер оставляет между переключениями короткое мёртвое время (dead time).
- PWM регулирует среднее напряжение и ток фазы, а значит момент и передаваемую мощность. Обороты не задаются напрямую: они зависят также от KV, напряжения, пропеллера и нагрузки.

Запуск и работа

- На неподвижном моторе нет измеримой back-EMF, поэтому ESC сначала выполняет начальную коммутацию без точного знания положения ротора.
- После раскрутки ESC синхронизирует коммутацию с ротором по back-EMF. Потеря этой синхронизации ощущается как рывок, писк или остановка и называется desync.
- Активное торможение (damped light/синхронное торможение) заставляет мотор быстрее сбрасывать обороты; энергия частично возвращается в питание, создавая выбросы напряжения.

Практические причины отказа

- Перегрузка мотором или слишком тяжёлым пропеллером повышает ток и нагрев MOSFETов.
- Повреждённая обмотка, заклинивание мотора или замыкание фаз резко увеличивает ток.
- Недостаточно открытый или медленно переключаемый MOSFET сильно греется.
- Одновременное открытие верхнего и нижнего ключей вызывает почти прямое КЗ аккумулятора.
- Длинные силовые провода и активное торможение создают выбросы напряжения; низко-ESR конденсатор у входа ESC уменьшает их.

Быстрая диагностика

- Мотор дёргается и не стартует: проверить все три фазных провода, пайку, обмотки и другой исправный мотор на этом выходе ESC.
- Один мотор/угол быстро греется: проверить механику, пропеллер, винты мотора, настройки и исправность соответствующего канала ESC.
- MOSFET часто пробивается в короткое замыкание Drain–Source; подозрительный ESC не подключать сразу к обычному аккумулятору — первый запуск выполнять с ограничителем тока.
- Сопротивления между каждой парой фаз исправного мотора должны быть примерно одинаковыми; соединения фазы с колоколом, статором или рамой быть не должно.

Ключевая модель

FC задаёт требуемую тягу → ESC выбирает момент коммутации → gate driver управляет MOSFETами → три фазы создают вращающееся поле → ротор следует за ним.