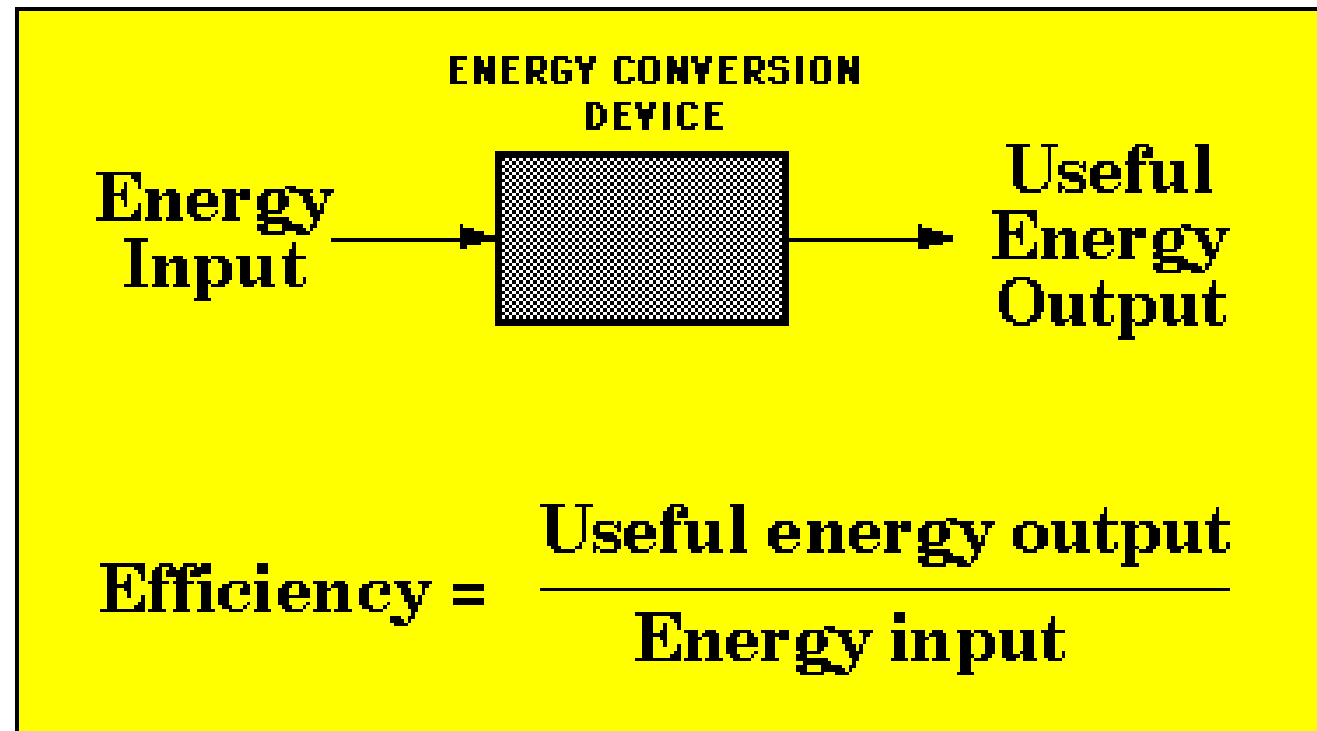


Энергия тиімділігі. Түрлендіргіш
құрылғылардың ПӘК-ін арттыру әдістері

Энергоэффективность – это ключевой параметр любого преобразовательного устройства, определяющий, насколько эффективно оно преобразует входную энергию в полезную выходную мощность. В энергетических системах и силовой электронике коэффициент полезного действия (КПД) является критически важным показателем, поскольку снижение потерь энергии позволяет повысить производительность системы, уменьшить тепловые нагрузки и снизить эксплуатационные затраты.

В данной статье рассмотрены основные методы повышения КПД преобразовательных устройств, включая использование современных полупроводниковых технологий, оптимизацию схемотехнических решений, улучшение управления и методов охлаждения.



1. Факторы, влияющие на КПД преобразователей

Преобразовательные устройства (инверторы, выпрямители, стабилизаторы напряжения, импульсные источники питания) теряют часть энергии из-за различных факторов:

•Потери в полупроводниковых элементах

- Омические потери в транзисторах и диодах.
- Динамические потери при переключении (переключательные потери).

•Потери в пассивных компонентах

- Гистерезисные и вихретоковые потери в магнитных материалах (дроссели, трансформаторы).
- Омические потери в резисторах, катушках индуктивности.

•Тепловые потери

- Генерация тепла при работе силовых ключей.
- Неэффективные методы отвода тепла.

•Импульсные выбросы и электромагнитные помехи

- Излучение и шумы, вызывающие дополнительные потери.
- Недостаточная фильтрация и защита.

Все эти факторы приводят к снижению КПД, поэтому разработка эффективных методов его повышения играет ключевую роль в проектировании преобразователей.

2. Методы повышения КПД преобразовательных устройств

2.1. Использование современных полупроводниковых материалов

Современные силовые полупроводниковые компоненты способны значительно снизить потери:

- **SiC (карбид кремния) и GaN (нитрид галлия)** – обладают меньшими переключательными потерями и меньшим сопротивлением открытого канала, что снижает энергопотребление.
 - **MOSFET и IGBT с низким сопротивлением канала** – уменьшают омические потери.
 - **Широкополосные полупроводники** – работают на высоких частотах, снижая размеры и массу преобразователя.
- Использование GaN- и SiC-транзисторов позволяет значительно уменьшить нагрев, увеличить рабочие частоты и уменьшить потребление энергии.

2.2. Оптимизация схемотехнических решений

Существует несколько схемных решений, которые помогают повысить КПД:

- **Резонансные схемы (ZVS, ZCS)** – минимизируют потери при переключении, уменьшая коммутационные выбросы.
- **Синхронное выпрямление** – замена диодов на MOSFET для снижения потерь в выпрямительных схемах.
- **Многоуровневые преобразователи** – снижают напряжение на каждом ключе, уменьшая потери мощности.
- **Применение цифрового управления** – более точное регулирование режима работы преобразователя.

2.3. Повышение частоты работы преобразователей

Повышение рабочей частоты преобразователя приводит к уменьшению размеров пассивных компонентов (трансформаторов, дросселей, конденсаторов) и снижению потерь:

- Использование **широкополосных полупроводников (SiC, GaN)** позволяет работать на частотах до нескольких сотен кГц и даже МГц.
 - Высокочастотные инверторы и преобразователи уменьшают потери на проводах и магнитных сердечниках.
- Однако увеличение частоты также увеличивает электромагнитные помехи (EMI), поэтому требуется продуманная фильтрация и экранирование.

2.4. Улучшение методов охлаждения

Так как часть энергии преобразуется в тепло, необходимо эффективно его рассеивать:

- Применение **жидкостного охлаждения** – эффективнее традиционных радиаторов.
- Использование **термопасты и термопрокладок** – улучшает теплоотвод.
- Оптимизация **конструкции радиаторов** – использование тепловых трубок, вентиляторов.

Снижение температуры работы полупроводниковых компонентов повышает их надежность и уменьшает потери.

2.5. Интеллектуальные системы управления

Современные преобразователи используют алгоритмы управления, которые повышают КПД:

- **Методы предсказания нагрузки** – адаптивное изменение режима работы в зависимости от условий.
- **Алгоритмы минимизации потерь** – например, отслеживание максимальной мощности (MPPT) в солнечных инверторах.
- **Интеллектуальные системы диагностики** – предотвращение перегрева, аварийных ситуаций.

Повышение КПД преобразовательных устройств – это важная задача, позволяющая уменьшить энергопотери, снизить эксплуатационные расходы и повысить надежность систем. Современные технологии, такие как GaN- и SiC-транзисторы, резонансные схемы, интеллектуальные алгоритмы управления и эффективные методы охлаждения, значительно увеличивают энергоэффективность преобразователей.

Развитие новых материалов и методов проектирования продолжает улучшать характеристики преобразовательных систем, делая их более экономичными и экологичными.

- Высокая энергетическая эффективность дает системам силовой электроники множество преимуществ, таких как снижение стоимости системы — как эксплуатационных, так и установочных расходов.
- Поскольку силовая электроника обеспечивает интеграцию возобновляемых источников энергии в традиционные системы, она также способствует снижению глобального потепления. Кроме того, компактные размеры силовой электроники позволяют уменьшить площадь охлаждения по сравнению с традиционными системами.
- Это значит, что размер радиатора и системы охлаждения будет значительно меньше по сравнению с традиционными энергетическими системами.
- В силовой электронике системы охлаждения, такие как радиаторы, вентиляторы и воздушный поток, предназначены для отвода рассеянной энергии в виде тепла (что является основными потерями), не допуская превышения допустимой рабочей температуры преобразователя.
- Почему необходимо соблюдать температурный предел? Дело в том, что некоторые компоненты рассчитаны на работу в определенном температурном диапазоне, и если этот предел будет превышен, компоненты могут работать некорректно или даже выйти из строя.
- Допустим, у нас есть блок, который представляет преобразователь, то есть силовой электронный преобразователь или оборудование.
- Если система питается от источника энергии, мы ожидаем получить на выходе ту же мощность.
- Однако на входе можно заметить, что преобразователь рассеивает определенное количество энергии, которая превращается в тепло или другие виды потерь.
- Таким образом, в конечном итоге выходная мощность оказывается меньше, чем входная.

Определение КПД

Коэффициент полезного действия (КПД) обозначается как η и определяется по формуле:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

где P_{in} — входная мощность, а P_{out} — выходная мощность.

Так как входная мощность складывается из выходной мощности и потерь, можно записать:

$$P_{in} = P_{out} + P_{loss}$$

Тогда можно переписать формулу КПД:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}}$$

После преобразований получаем:

$$(1 - \eta)P_{out} = \eta P_{loss}$$

Выразим выходную мощность через потери:

$$P_{out} = \frac{\eta}{1 - \eta} P_{loss}$$

Зачем это нужно? Это позволяет увидеть влияние потерь на выходную мощность. Мы можем оценить, насколько потери оказывают влияние на выходную мощность: незначительное или существенное.

Пример расчета

Рассмотрим преобразователь, у которого потери составляют 220 Вт. Сравним два варианта:

1. Первый преобразователь имеет КПД 85%
2. Второй преобразователь имеет КПД 95%

Для обоих преобразователей потери одинаковы — 220 Вт.

Вычислим выходную мощность для первого преобразователя:

$$P_{out1} = \frac{0.85}{1 - 0.85} \times 220 = 1.246 \text{ кВт}$$

Теперь рассчитаем выходную мощность второго преобразователя:

$$P_{out2} = \frac{0.95}{1 - 0.95} \times 220 = 4.18 \text{ кВт}$$

Вывод

Сравнив выходную мощность двух преобразователей, мы видим, что повышение КПД всего на 10% (с 85% до 95%) позволило почти втрое увеличить выходную мощность — с 1.246 кВт до 4.18 кВт.

Таким образом, даже при одинаковых потерях и использовании одинаковых компонентов можно значительно увеличить мощность, просто повысив КПД системы.

Структура интерфейса силовой электроники может представлять собой либо **один преобразователь**, либо **комбинацию нескольких преобразователей**.

Понимание структуры интерфейса силовой электроники **очень важно**, хотя оно довольно простое. Это поможет нам в будущем при проектировании силовых преобразователей для различных приложений.

Основные компоненты силовой электроники

В любой системе силовой электроники можно выделить **четыре основные части**:

1 Электрическая нагрузка

Нагрузка – это самая важная часть системы. Она даже важнее, чем сам преобразователь, источник питания или контроллер.

2 Силовой преобразователь

В силовом преобразователе основными компонентами являются:

- Ключевые элементы (транзисторы, диоды, тиристоры и др.),
- Элементы накопления энергии (конденсаторы, катушки индуктивности).

3 Источник питания

Это электрический источник энергии, который обеспечивает систему необходимой мощностью.

4 Контроллер

Контроллер управляет работой преобразователя, анализируя параметры источника и нагрузки. На основе этой информации он формирует управляющие сигналы, например, сигналы широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

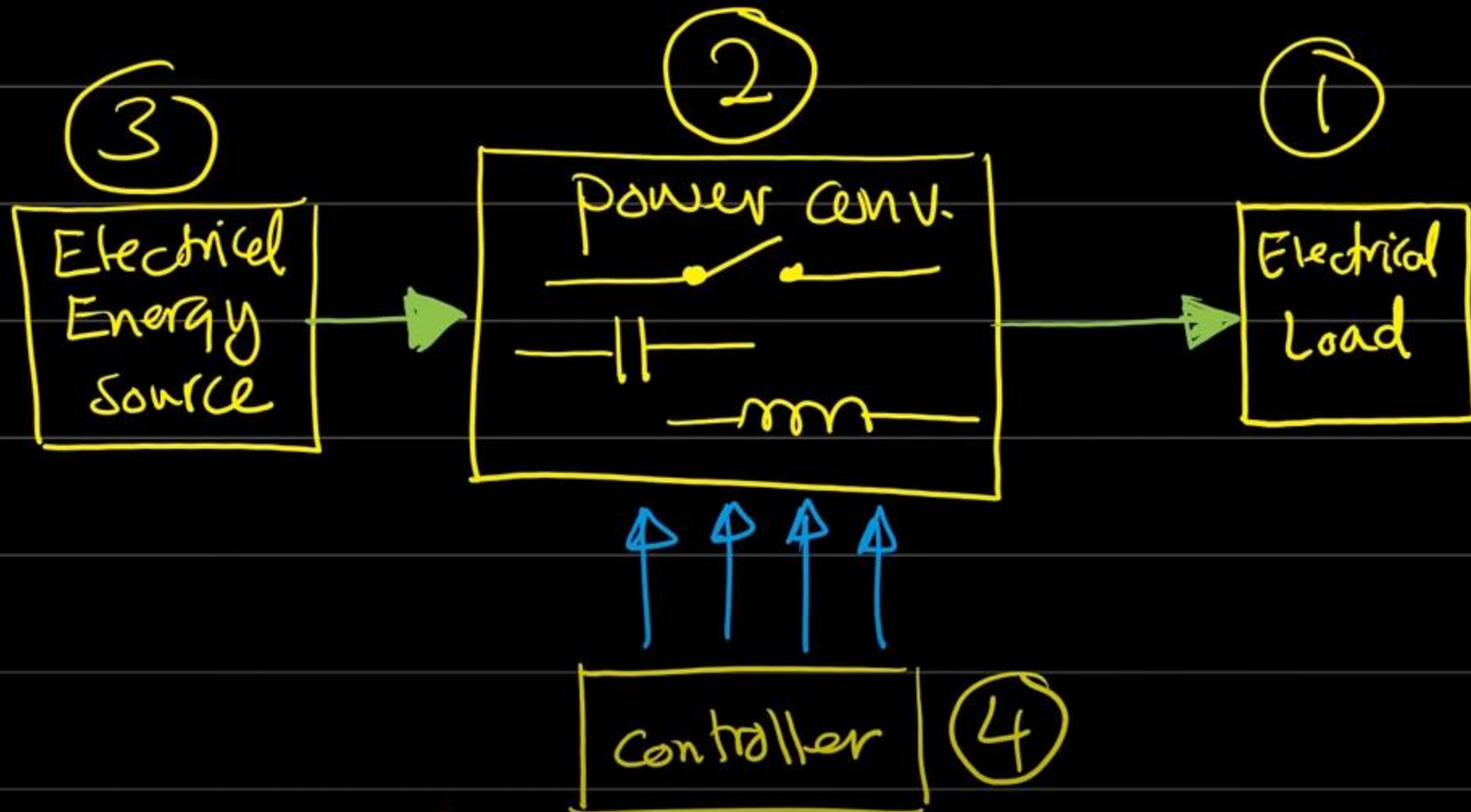
Взаимодействие компонентов

✦ Зеленые линии – это линии передачи мощности.

✦ Синие линии – это информационные связи (сигналы обратной связи).

Контроллер считывает данные с источника и нагрузки, анализирует их и управляет преобразователем для достижения оптимальной работы системы.

Structure of PE Interface



Виды силовых интерфейсов

Силовой преобразователь может работать в одном из двух режимов:

1 Режим источника напряжения (Voltage Source, VS)

- В этом режиме на выходе поддерживается постоянное напряжение.
- Нагрузка может потреблять любой ток в зависимости от своих характеристик.
- Обычно такие источники используют **конденсаторы** для стабилизации напряжения.
- Пример:
 - **Сетевой инвертор** для преобразования переменного тока в постоянный.
 - **Блоки питания** с регулируемым выходным напряжением.

⚠ **Важно!** Два источника напряжения нельзя напрямую соединять между собой, так как это приведет к конфликту напряжений.

2 Режим источника тока (Current Source, CS)

- В этом режиме на выходе поддерживается постоянный ток, а напряжение изменяется в зависимости от нагрузки.
- Обычно используют катушки индуктивности для стабилизации тока.
- Применяется в мощных системах, особенно при передаче энергии на большие расстояния.
- Часто используется в сетевых инверторах и преобразователях высокой мощности.

Пример:

- Системы передачи энергии постоянным током (HVDC).
- Мощные промышленные преобразователи для энергосистем.

✦ Как отличить источник напряжения от источника тока?

- Если на выходе конденсатор → это источник напряжения.
- Если на выходе катушка индуктивности → это источник тока.

Различие между источниками **напряжения** и **тока** является **ключевым в силовой электронике**. Если мы понимаем, **какой параметр должен быть фиксированным**, мы можем правильно проектировать системы с **минимальными потерями и максимальной эффективностью**.

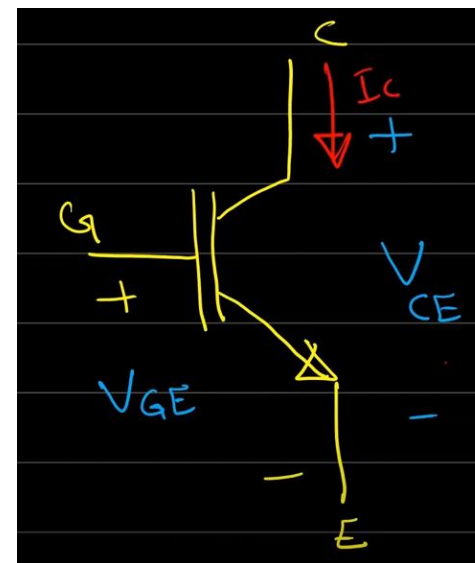
В силовой электронике транзисторы и диоды работают как переключатели, находясь либо во включенном (ON), либо в выключенном (OFF) состоянии, что отличается от линейной электроники.

Рассмотрим транзистор. Допустим, у нас есть транзистор IGBT.

Вот его три вывода:

- Затвор (Gate)
- Коллектор (Collector)
- Эмиттер (Emitter)

Также у нас есть напряжение V_{GE} (затвор-эмиттер) и V_{CE} (коллектор-эмиттер), а также ток коллектора.



Вольт-амперная характеристика транзистора

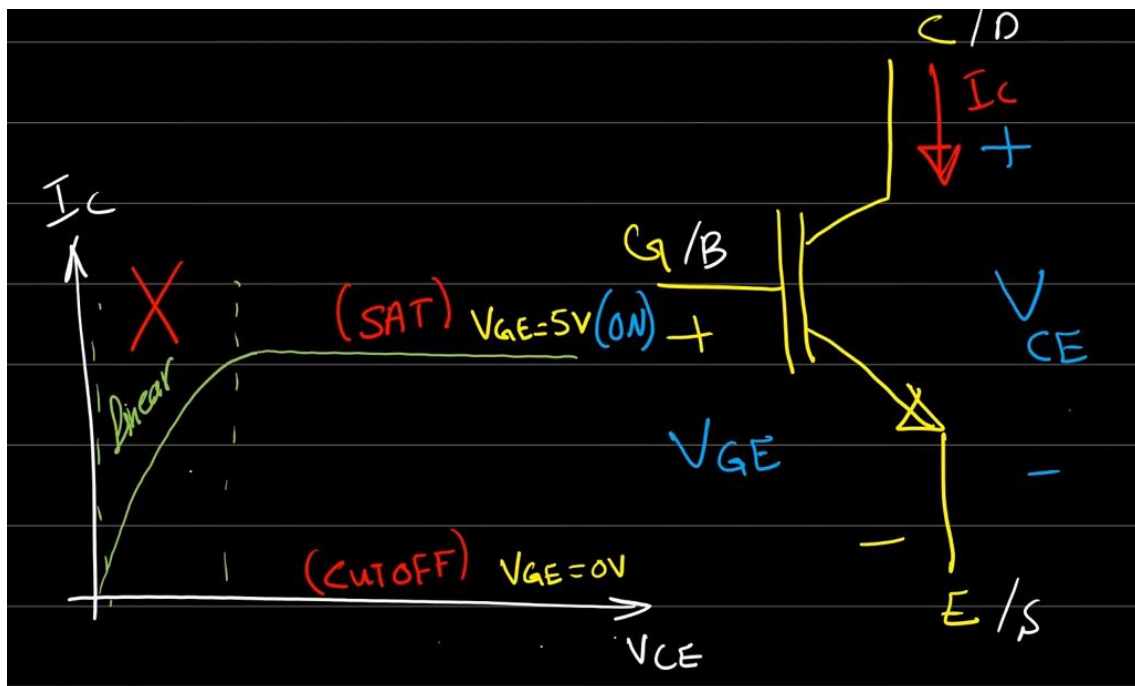
Если мы изобразим зависимость напряжения V_{CE} (коллектор-эмиттер) от тока коллектора, то увидим, что при увеличении тока через транзистор напряжение V_{CE} также увеличивается.

Для сравнения:

- В биполярном транзисторе (BJT) у нас есть база,
- В MOSFET есть сток, исток и затвор.

Однако в силовой электронике транзисторы работают не в линейном режиме, а либо в **режиме насыщения (ON)**, либо в **режиме отсечки (OFF)**.

То есть транзистор используется исключительно как **переключатель** и никогда не работает в линейном режиме.



Работа транзистора как переключателя

- Когда на **затворе** присутствует управляющий сигнал (например, 5 В), транзистор **включается (ON)**, ток начинает течь, и он работает как **короткое замыкание**.
- Когда на **затворе** нет сигнала (0 В), транзистор **выключается (OFF)** и ведёт себя как **разомкнутая цепь**.

Почему силовая электроника эффективна?

Высокая эффективность силовой электроники объясняется тем, что при работе транзистора в режиме **ON** или **OFF** потери мощности минимальны:

1. Когда транзистор включен (ON)

- Он работает как **короткое замыкание**.
- Напряжение на нем $V_{CE} = 0 \text{ В}$, но через него течет ток I .
- Потери мощности $P = V_{CE} * I = 0 \text{ В} * I = 0 \text{ Вт}$.

2. Когда транзистор выключен (OFF)

- Он работает как **разомкнутая цепь**.
- Через него **не течёт ток** ($I = 0 \text{ А}$), но присутствует напряжение V_{CE} .
- Потери мощности $P = V_{CE} * I = V_{CE} * 0 \text{ А} = 0 \text{ Вт}$.

Таким образом, в **идеальном** случае потери мощности в ключе равны **нулю**.

Пример: работа силового преобразователя

Рассмотрим простейший преобразователь (чоппер):

- На входе стоит конденсатор,
- Используется переключатель (например, транзистор),
- Нагрузка – резистор,
- Выходное напряжение V_{out} снимается после переключателя.

На входе мы подаём постоянное напряжение V_{in} .

Работа системы:

- Когда переключатель замкнут (ON)
 - Он действует как короткое замыкание.
 - Выходное напряжение $V_{out} = V_{in}$.
- Когда переключатель разомкнут (OFF)
 - Ток через него не идёт.
 - Выходное напряжение $V_{out} = 0 \text{ В}$.

В результате на выходе формируется импульсное напряжение с высокой частотой переключения.

Среднее значение выходного напряжения

Как найти среднее значение выходного напряжения $V_{out(avg)}$?

Используем формулу:

$$V_{out(avg)} = \left(\frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \right) \times V_{in}$$

Здесь:

- T_{on} – время включённого состояния,
- T_{off} – время выключенного состояния,
- $T_s = T_{on} + T_{off}$ – полный период переключения,
- $D = T_{on} / T_s$ – коэффициент заполнения (duty cycle).

Коэффициент D всегда находится в диапазоне от 0 до 1.

Переключающая частота рассчитывается как:

$$f_s = \frac{1}{T_s}$$

Таким образом, с помощью **широтно-импульсной модуляции (ШИМ)** можно регулировать выходное напряжение, изменяя коэффициент заполнения D .

Двухключевая схема – это способ улучшения работы прямоходовых и обратноходовых преобразователей, устраняющий их основные недостатки.

Проблемы обычных схем:

1. **Высокое напряжение на транзисторе** – нужно ставить ключ с запасом, что увеличивает сопротивление и потери.
2. **Снабберные цепи** – снижают перенапряжение, но рассеивают энергию, снижая КПД.

Как работает двухключевая схема?

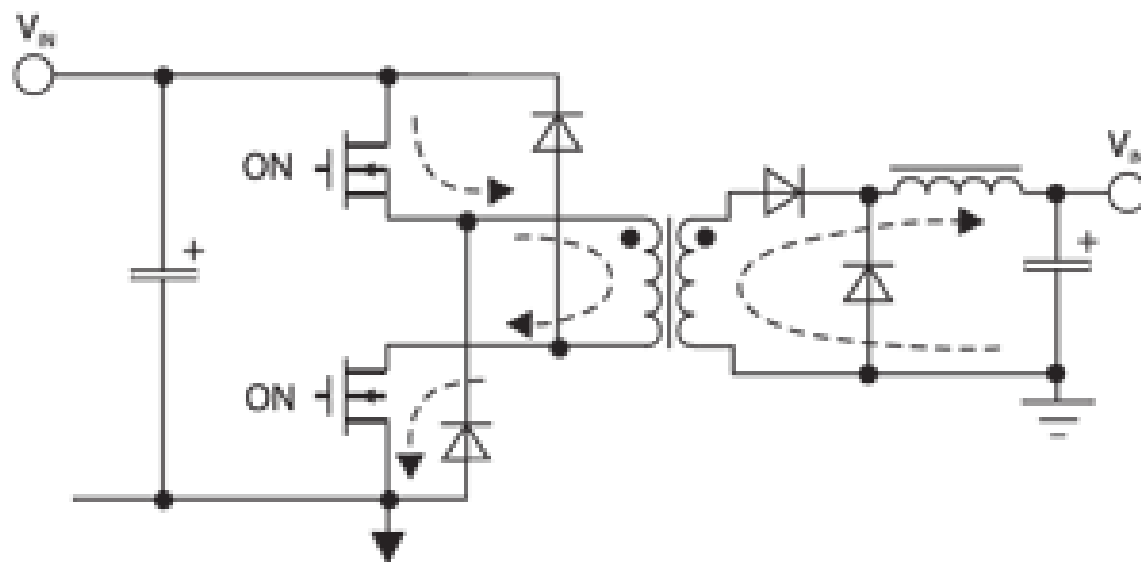
- Добавляется второй транзистор, который делит напряжение пополам.
- При включенных ключах (Q1 и Q2) энергия передается в нагрузку.
- При выключенных ключах энергия возвращается в сеть или заряжает входной конденсатор.

Преимущества:

- ✓ Напряжение на каждом ключе в 2 раза меньше → можно использовать транзисторы с меньшим сопротивлением.
- ✓ Энергия не рассеивается в снабберах → КПД выше, меньше помех.
- ✓ Нет необходимости в размагничивающей обмотке в прямоходовых схемах.
- ✓ Управление несложное – есть готовые драйверы для верхнего и нижнего ключей.

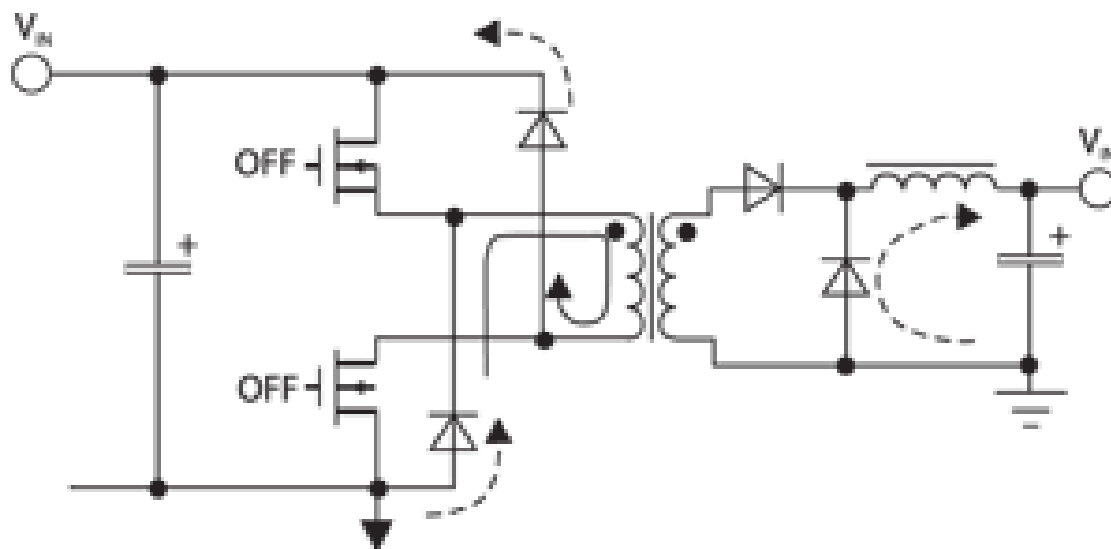
Вывод:

Двухключевая схема делает преобразователь **более эффективным**, снижает **потери, помехи** и **напряжение на ключах**, что упрощает выбор компонентов.



Двухключевая схема:

- цепь тока при открытых ключах
- цепь тока при закрытых ключах



Вместо традиционной параллельной работы фаз в многофазных преобразователях часто используют **чередующийся (interleaved) режим**, который снижает пульсации тока, уменьшает размеры фильтров и позволяет равномерно распределять нагрузку.

Однако есть недостатки:

- **При малых нагрузках** – КПД падает из-за увеличения коммутационных потерь и неравномерного распределения тока.

- **При больших нагрузках** – наоборот, эффективнее многофазный режим, так как снижается активное сопротивление (R_{path}), а значит, потери на проводимость уменьшаются.

Решение проблемы

Чтобы повысить КПД при низких нагрузках, **используют умное управление** – при снижении нагрузки **включается однофазный режим**. Например, контроллер **ADP1043** автоматически переключает преобразователь между одно- и многофазными режимами, повышая КПД до 15%.

Также потери можно уменьшить, **отключая синхронный выпрямитель** при малых нагрузках и заменяя его диодом Шоттки, что дополнительно увеличивает КПД на 5%.

Важные нюансы

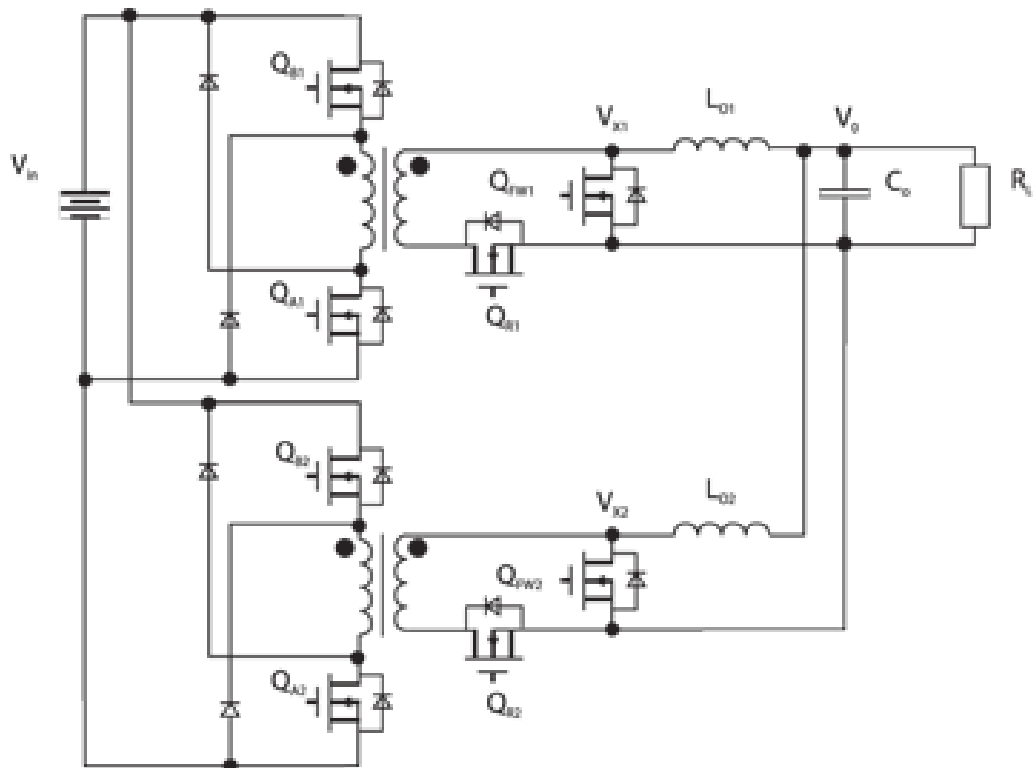
- **Обратная связь по току** в каждой фазе помогает равномерно распределять токи, предотвращая перегрузку отдельных фаз.

- **Быстрое переключение режимов и коррекция задержек в управлении** улучшают динамическую работу системы.

- **Контроллер ADP1043** значительно упрощает проектирование за счет цифрового управления и автоматического выбора оптимального режима.

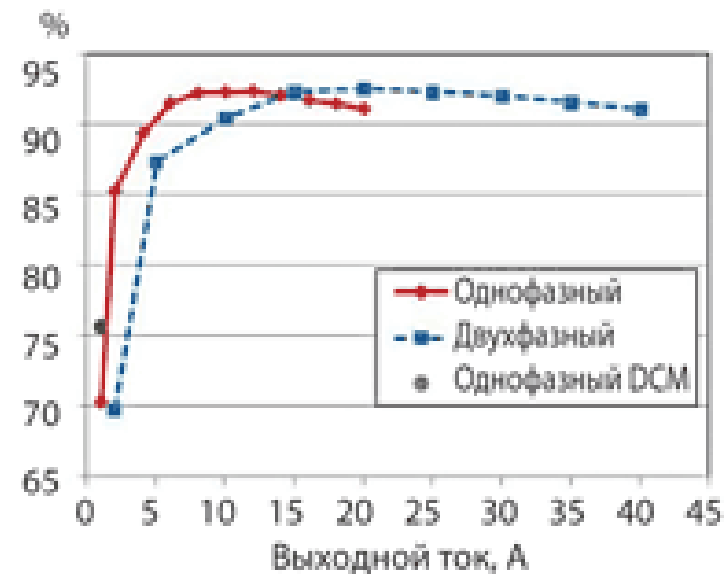
Итог

Чередующийся режим эффективен при больших нагрузках, но для повышения КПД при низких нагрузках важно **автоматически переходить в однофазный режим** и применять **оптимизированные схемы управления**.



Двухфазный двухключевой преобразователь

Зависимость КПД от тока нагрузки



Обычные преобразователи теряют энергию на коммутацию ключей, особенно при высоких частотах. **Резонансные преобразователи** решают эту проблему, обеспечивая "мягкую" **коммутацию** – переключение при **нулевом напряжении**, что снижает потери.

Как это работает?

- В преобразователе используется **резонансный контур** (катушка + конденсатор).
- Управление происходит **изменением частоты**.
- Если нагрузка увеличивается → частота уменьшается → выходное напряжение повышается.
- Если нагрузка уменьшается → частота увеличивается → напряжение понижается.

Плюсы:

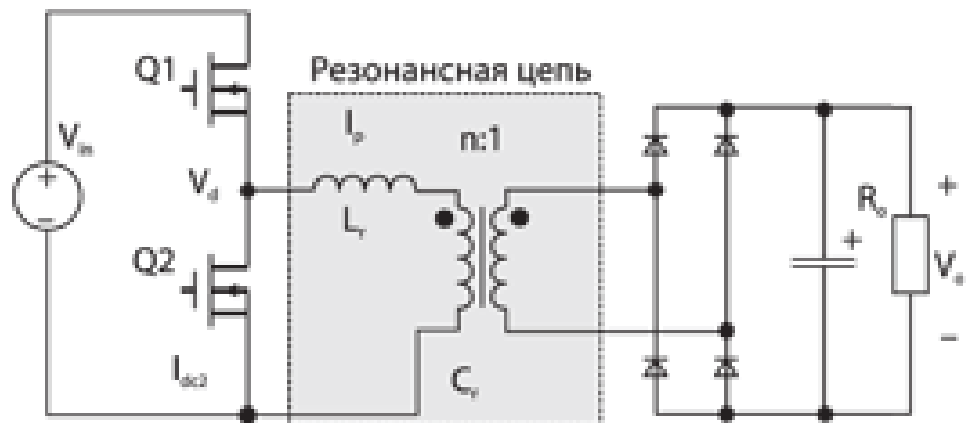
- ✓ Снижение коммутационных потерь.
- ✓ Меньший нагрев компонентов.
- ✓ Более плавное, близкое к синусоиде выходное напряжение.

Минусы:

- ✗ При малой нагрузке частота должна сильно возрастать, что **ограничивает применение**.
- ✗ Требуется сложная схема управления.

Вывод:

Резонансные преобразователи **эффективны для высокочастотных систем** и **повышают КПД**, но требуют оптимизации для работы при малых нагрузках.



Классический резонансный преобразователь

Резонансный LLC-преобразователь

