

Тұрақты кернеу түрлендіргіштері. Төмендеткіш
және жоғарылатқыш түрлендіргіштердің жұмыс
принциптері.

2. Понижающий преобразователь (Buck Converter):

В понижающем преобразователе напряжение на выходе всегда меньше, чем на входе.

Рассмотрим основные элементы:

- **Напряжение:** Напряжение на выходе $V_{\text{выход}}$ связано с напряжением на входе $V_{\text{вход}}$ через коэффициент скважности (длительность импульса $t_{\text{включ}}$ и период работы T):

$$V_{\text{выход}} = V_{\text{вход}} \times D$$

Где:

- D — это коэффициент скважности, который определяется как отношение времени включения ключа (MOSFET) к общему времени работы (периоду).
- **Ток:** Ток на выходе будет зависеть от нагрузки, но в идеальных условиях ток на выходе и входе примерно равны с учетом соотношения напряжений:

$$I_{\text{вход}} = \frac{V_{\text{выход}}}{V_{\text{вход}}} \times I_{\text{выход}}$$

Таким образом, ток на выходе будет больше, чем на входе при понижающем преобразовании.

3. Повышающий преобразователь (Boost Converter):

В повышающем преобразователе напряжение на выходе всегда больше, чем на входе.

Рассмотрим, как работает такой преобразователь:

- **Напряжение:** Напряжение на выходе $V_{\text{ВЫХОД}}$ в зависимости от коэффициента скважности D можно выразить как:

$$V_{\text{ВЫХОД}} = \frac{V_{\text{ВХОД}}}{1 - D}$$

Где D — это коэффициент скважности, который также определяется как отношение времени включения ключа к общему периоду работы.

- **Ток:** Ток на выходе при повышении напряжения будет уменьшаться по сравнению с током на входе, и его связь можно выразить через следующее уравнение:

$$I_{\text{ВХОД}} = \frac{1 - D}{D} \times I_{\text{ВЫХОД}}$$

Как видим, ток на выходе будет меньше, чем ток на входе, при повышении напряжения.

4. Сравнение токов и напряжений в различных преобразователях:

- В понижающем преобразователе (Buck):

- $V_{\text{ВЫХОД}} < V_{\text{ВХОД}}$

- $I_{\text{ВЫХОД}} > I_{\text{ВХОД}}$

Если преобразователь понижает напряжение, то ток увеличивается, чтобы сохранить мощность (с учётом потерь).

- В повышающем преобразователе (Boost):

- $V_{\text{ВЫХОД}} > V_{\text{ВХОД}}$

- $I_{\text{ВЫХОД}} < I_{\text{ВХОД}}$

В повышающем преобразователе напряжение увеличивается, но ток уменьшается, так как мощность на входе должна равняться мощности на выходе (с учётом потерь).

5. Энергетические потери:

В реальных преобразователях всегда присутствуют потери, которые зависят от различных факторов:

- Потери в компонентах (MOSFET, диоды, индуктивности, конденсаторы).
- Потери из-за сопротивления проводников.
- Потери на переключение (особенно для высокочастотных преобразователей).

Из-за этих потерь реальная эффективность будет меньше, чем идеальная. КПД преобразователя можно рассчитать по следующей формуле:

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХОД}}}{P_{\text{ВХОД}}} \times 100\%$$

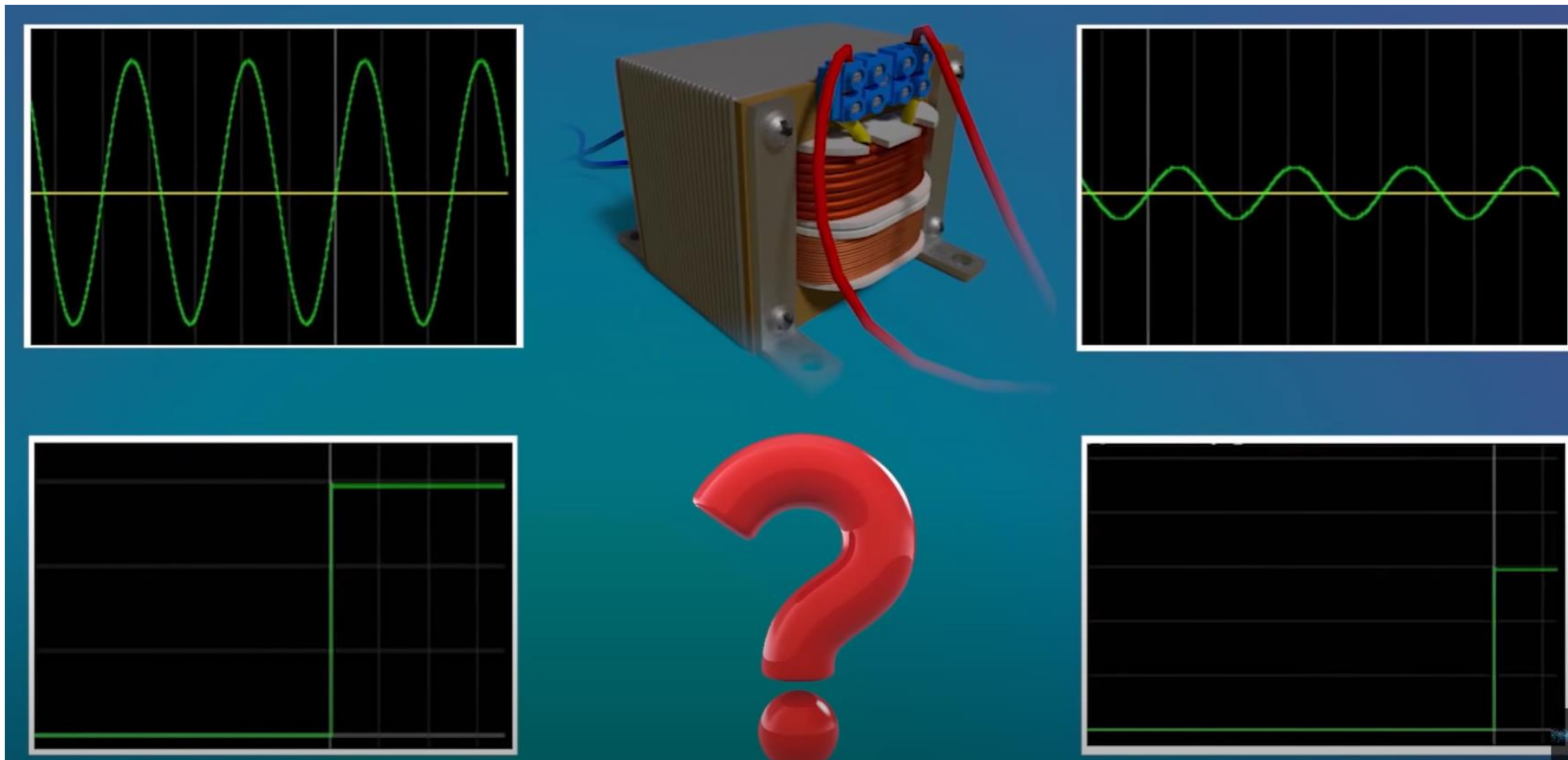
Где:

- $P_{\text{ВХОД}} = V_{\text{ВХОД}} \times I_{\text{ВХОД}}$
- $P_{\text{ВЫХОД}} = V_{\text{ВЫХОД}} \times I_{\text{ВЫХОД}}$

Таким образом, КПД показывает, насколько эффективно преобразователь передает энергию с учетом потерь.

Для понижения напряжения переменного тока мы используем трансформатор. Но как понизить напряжение постоянного тока?

Мы используем понижающий преобразователь, или buck-конвертер.

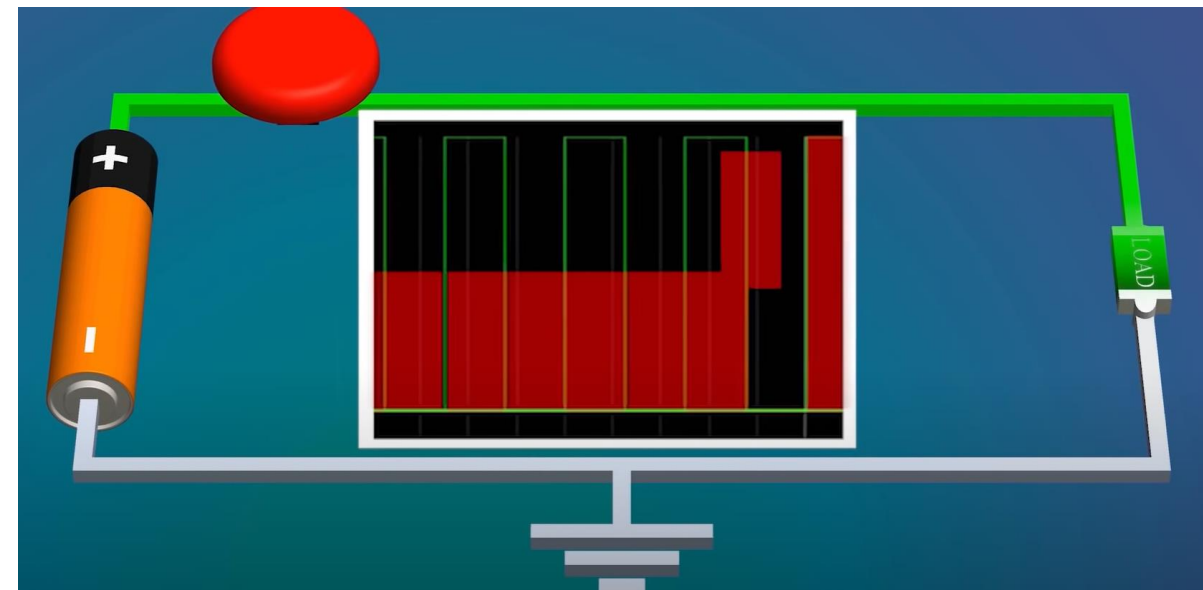
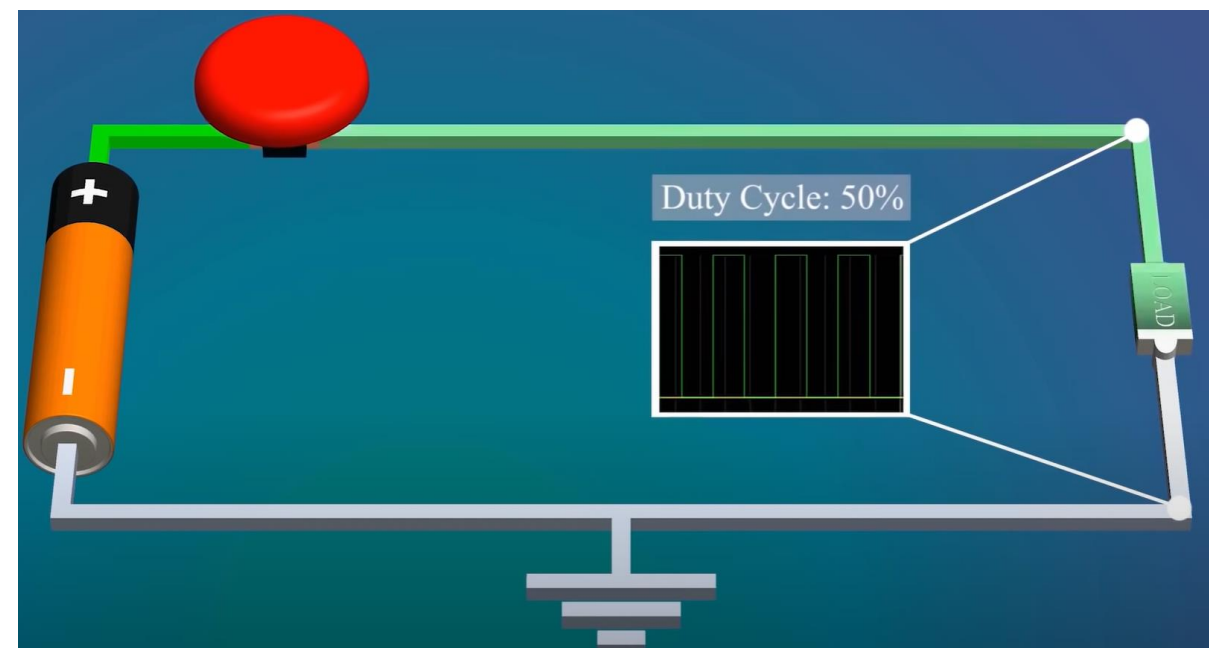


Если у вас есть источник постоянного тока и переключатель, который периодически включается и выключается, то на выходе вы получите ШИМ-сигнал.

Длительность активного состояния цифрового сигнала относительно периода называется коэффициентом заполнения (duty cycle).

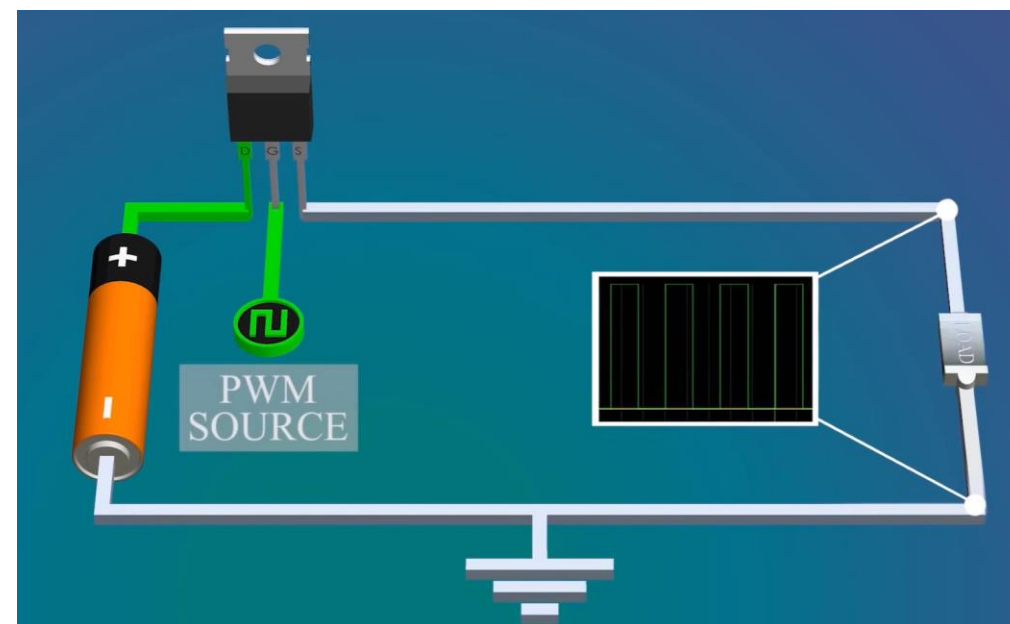
Если переключатель включен длительное время, коэффициент заполнения увеличивается, а если на короткое время — уменьшается.

если вычислить среднее значение сигнала с коэффициентом заполнения 50%, то напряжение на выходе будет половиной входного. Например, с 12 Вольт оно понизится до 6 Вольт.

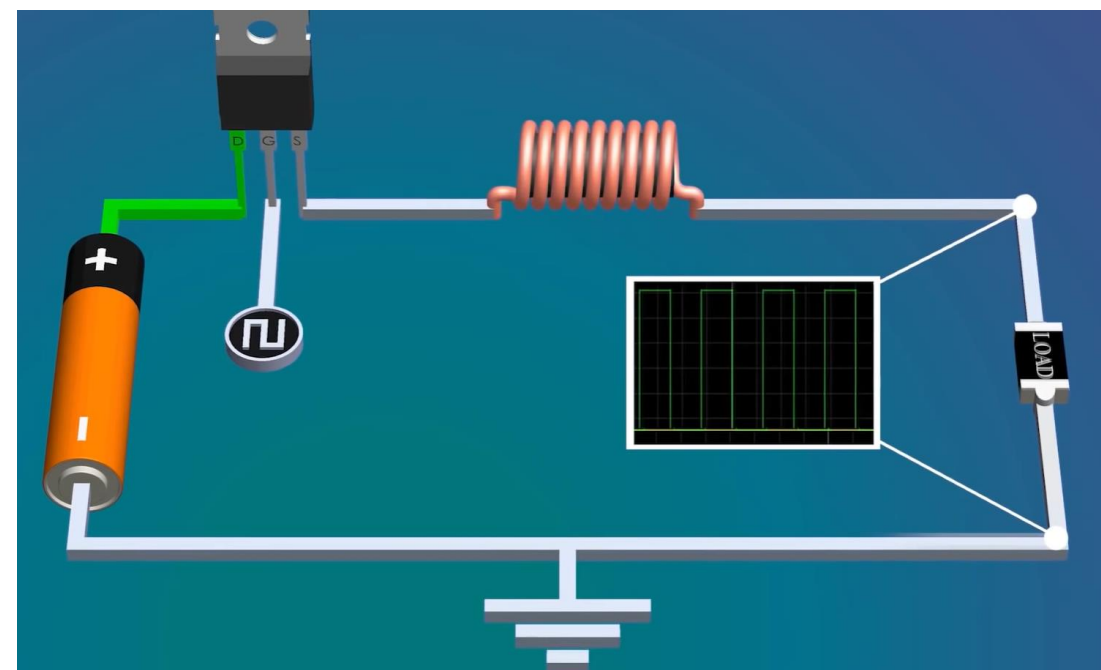


Для повышения эффективности мы заменим переключатель на MOSFET, управляемый ШИМ-сигналом.

ШИМ-сигнал создается и контролируется специальной схемой.

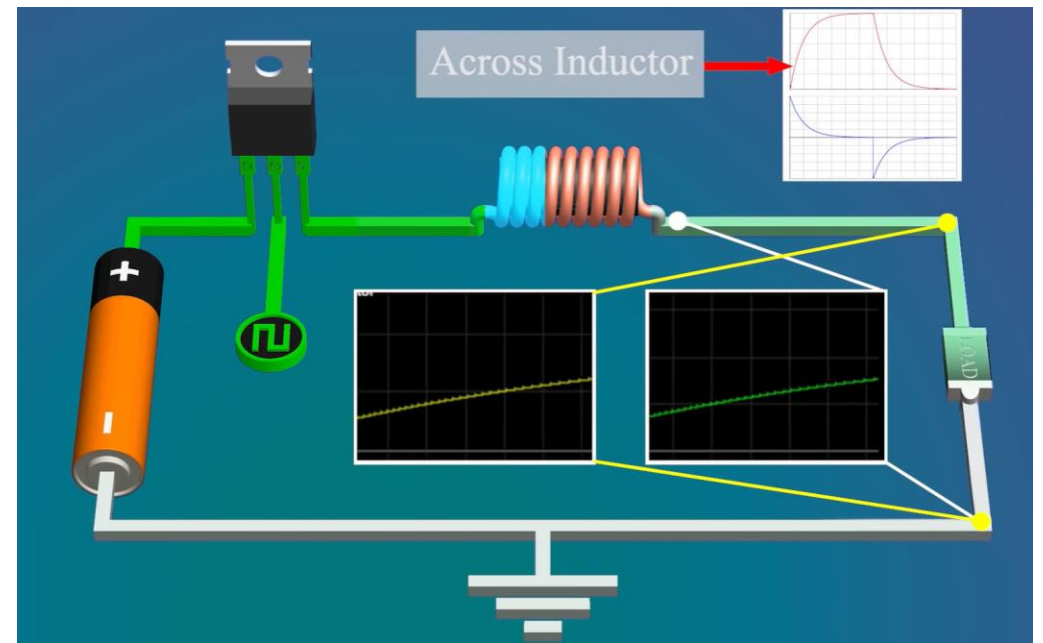


Однако на выходе этого сигнала остаются высокие пиковые напряжения. Чтобы их сгладить, мы добавляем индуктивность (катушку) в цепь нагрузки.

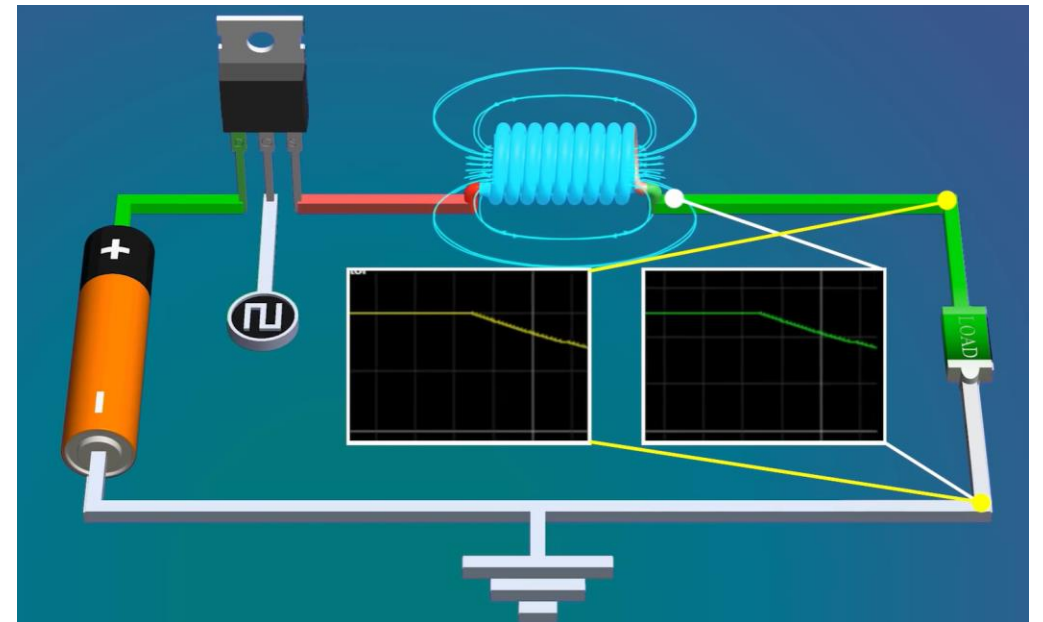


Индуктивность стремится сохранить постоянный ток через себя, мгновенно изменяя напряжение на своих выводах.

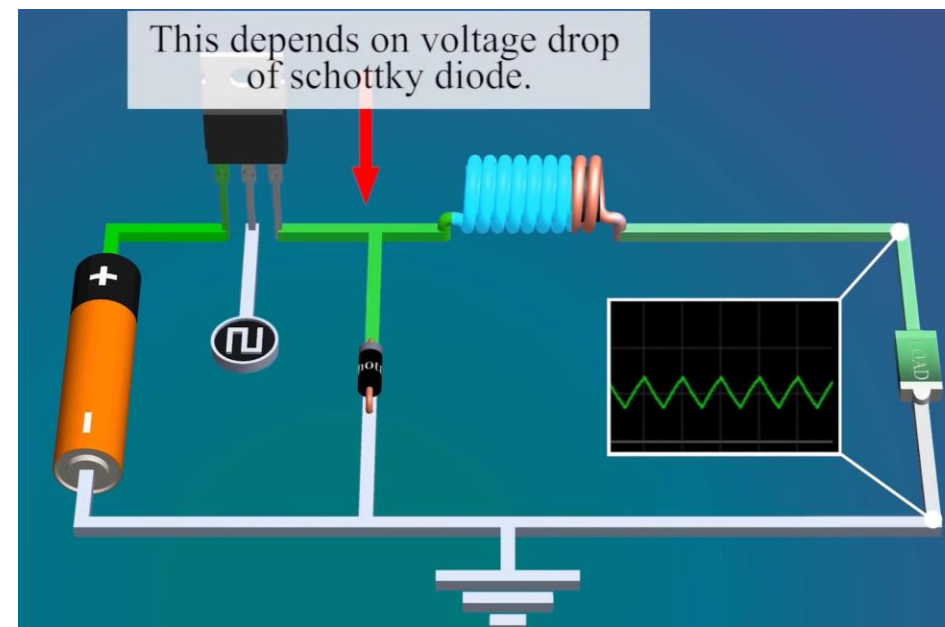
Когда переключатель замыкается, ток начинает течь, и индуктивность создает противоположное напряжение, чтобы сопротивляться изменениям.



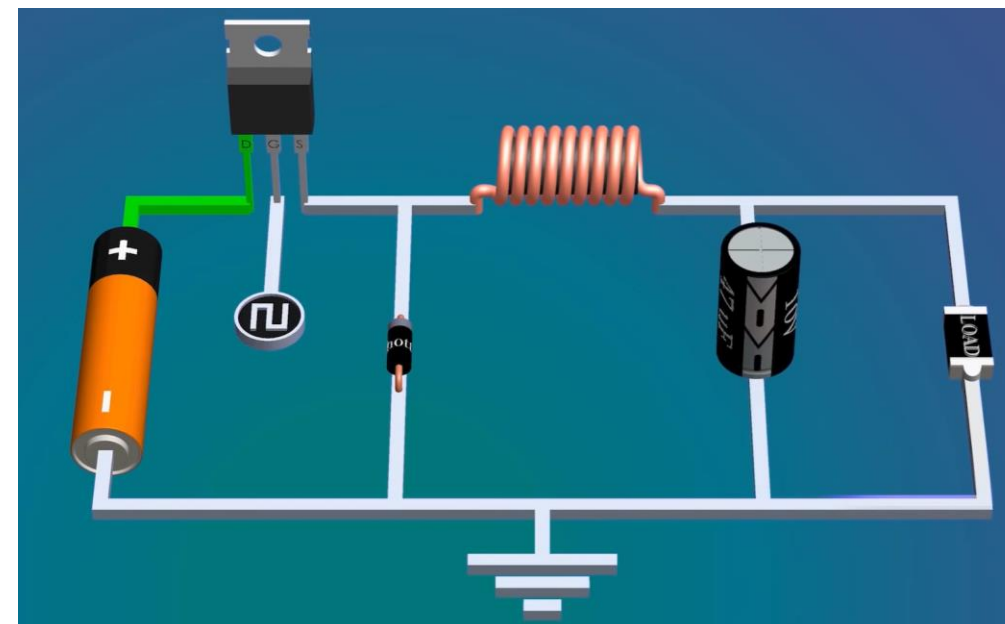
Энергия накапливается в магнитном поле катушки. Когда переключатель размыкается, катушка продолжает поддерживать ток, разряжая накопленную энергию.



Однако, чтобы защитить цепь от высокого напряжения при размыкании, добавляется диод Шоттки, создающий путь для тока.



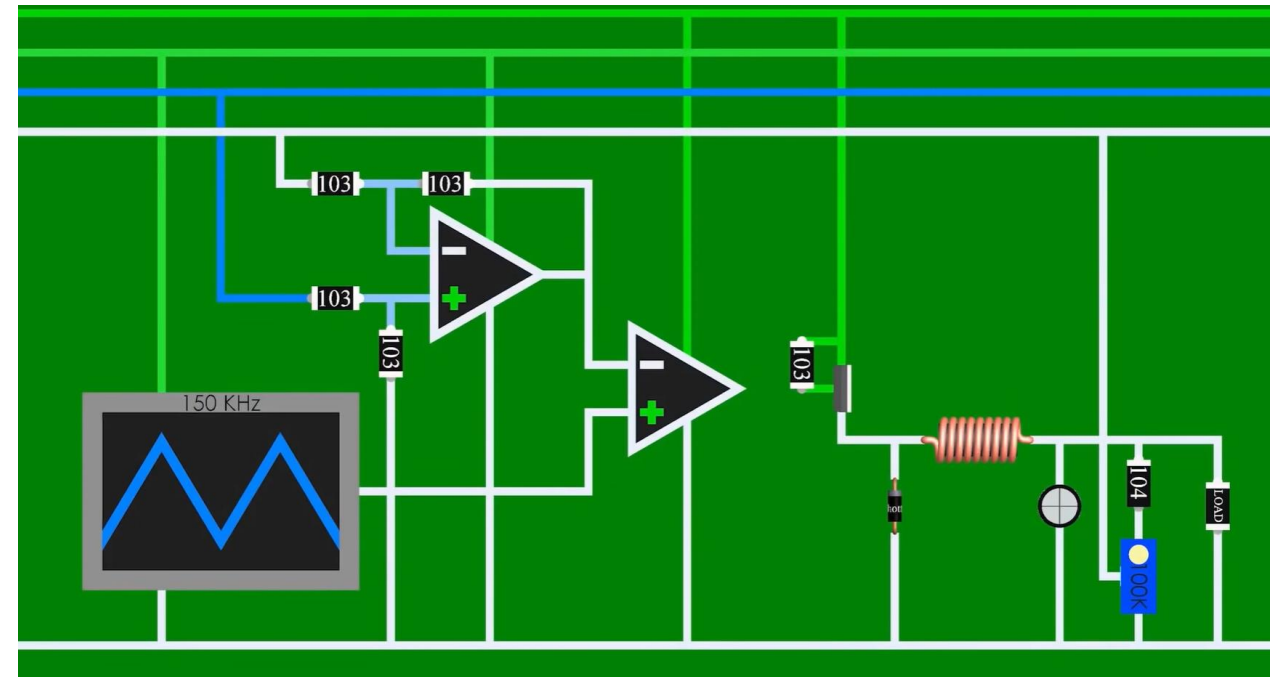
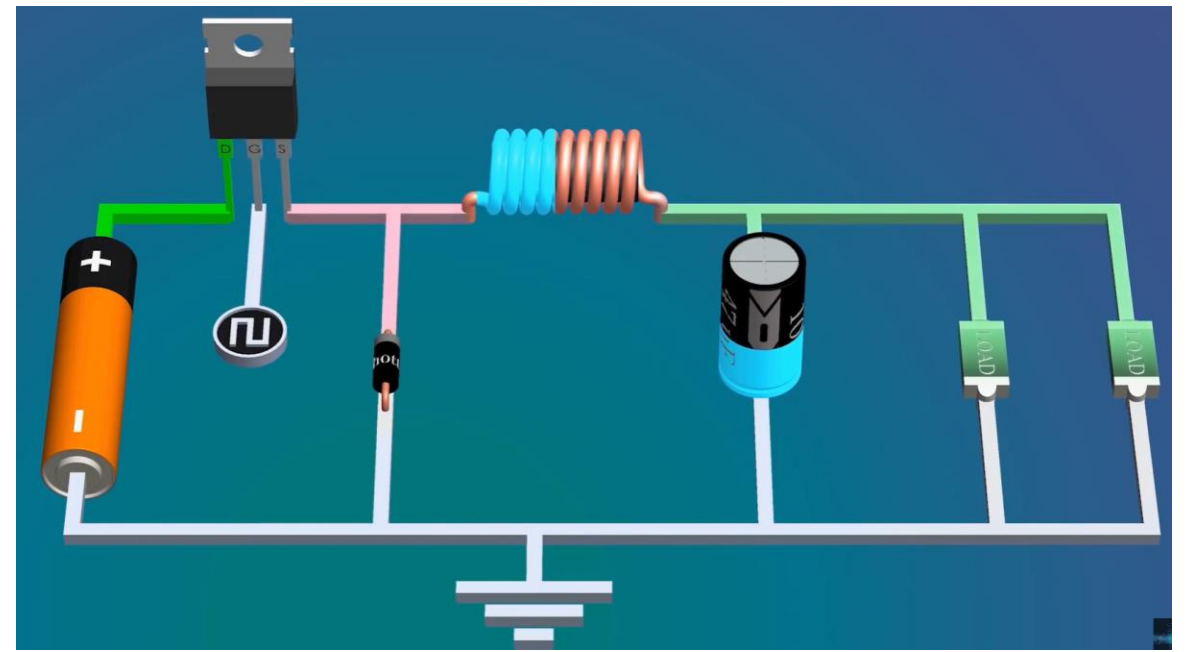
Для дальнейшего сглаживания выходного напряжения параллельно нагрузке подключается конденсатор. Конденсатор стремится поддерживать постоянное напряжение, накапливая или отдавая энергию.



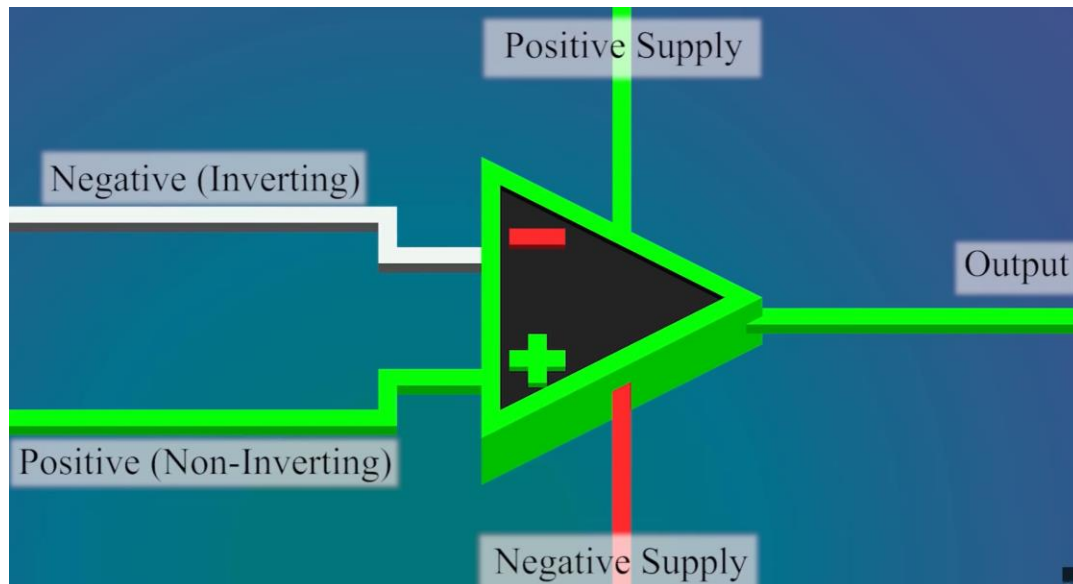
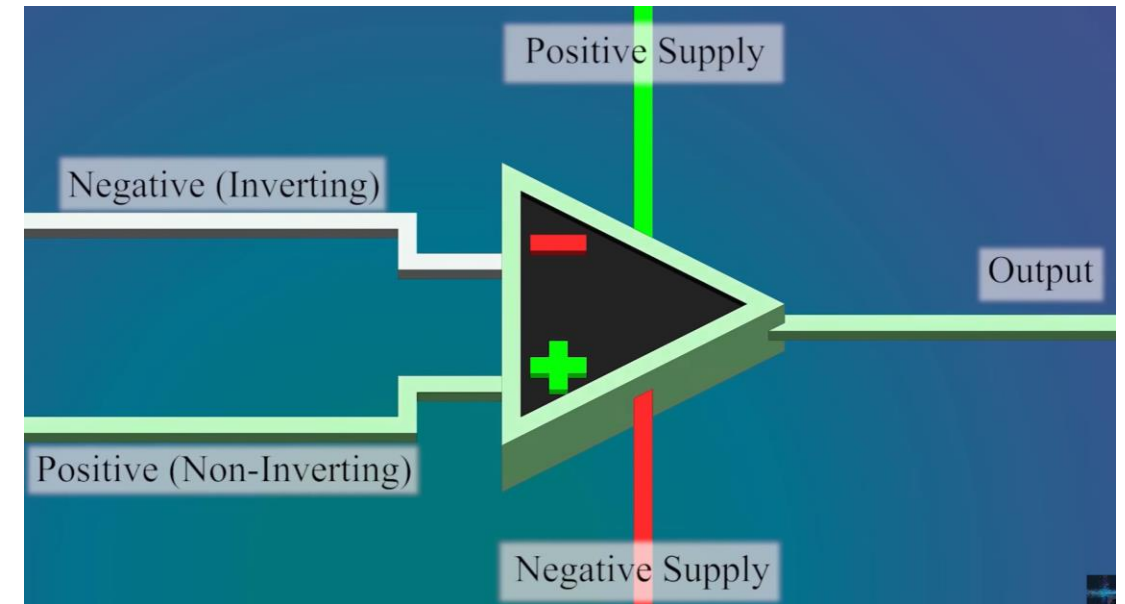
Но есть проблемы: при изменении нагрузки изменяется и выходное напряжение. Для стабилизации напряжения добавляется обратная связь, которая корректирует коэффициент заполнения ШИМ-сигнала.

Полная схема состоит из:

- делителя напряжения, снижающего выходное напряжение для обратной связи;
- операционного усилителя, сравнивающего это напряжение с опорным;
- компаратора, генерирующего ШИМ-сигнал для управления MOSFET.
- MOSFET может быть P- или N-канальным. P-канальный MOSFET включается, когда напряжение на его затворе ниже напряжения источника. Для N-канального MOSFET требуется напряжение выше напряжения источника, что делает его менее удобным в этой схеме.

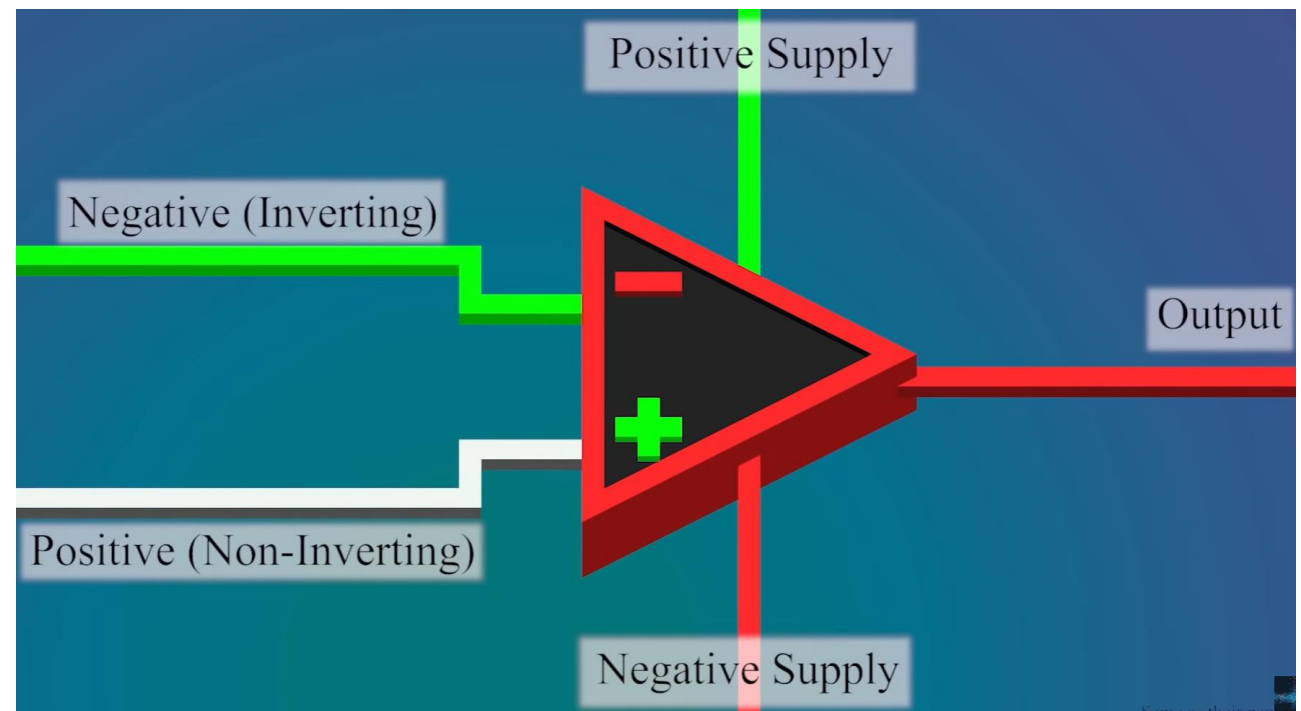
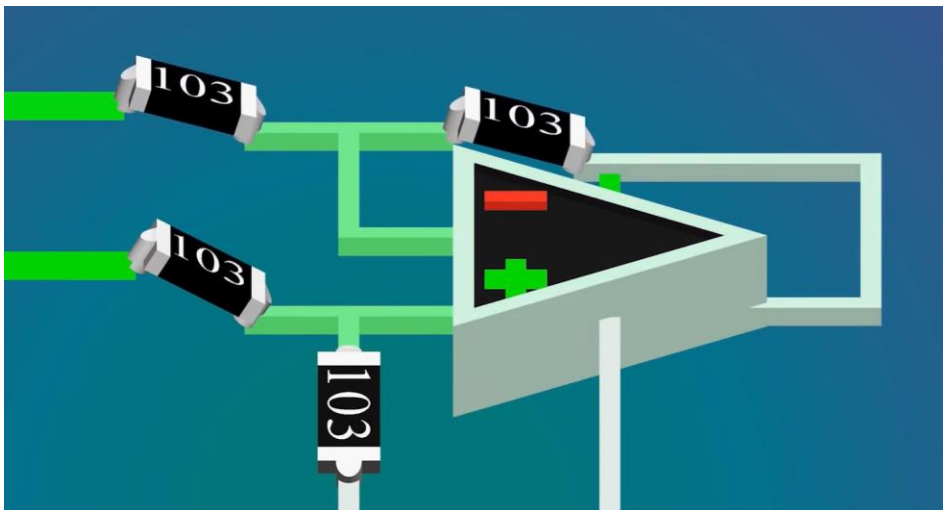
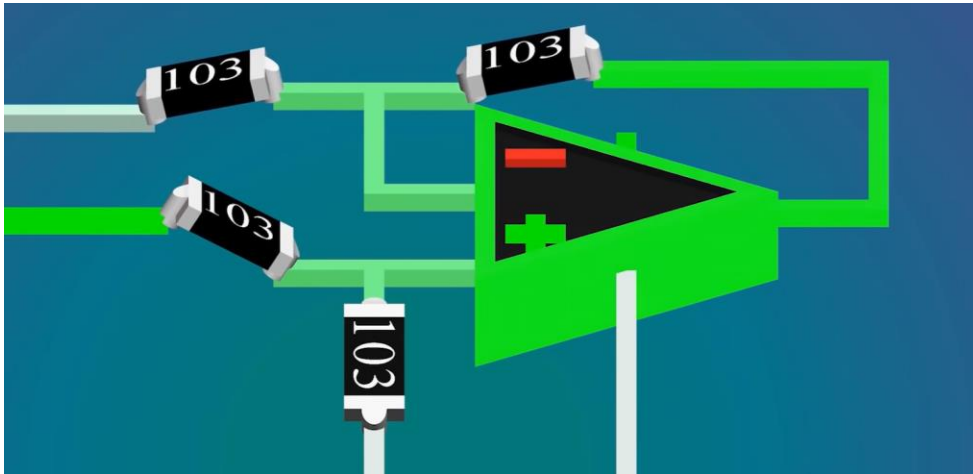


Напряжение на выходе понижается с помощью делителя напряжения и подается на операционный усилитель, который выполняет функцию усилителя ошибок. Этот компонент называется операционным усилителем или, сокращённо, ОУ. У него два входа и один выход, а ещё два терминала предназначены для подключения питающего напряжения. Операционный усилитель усиливает разницу между входными сигналами. Он сравнивает оба входных сигнала.



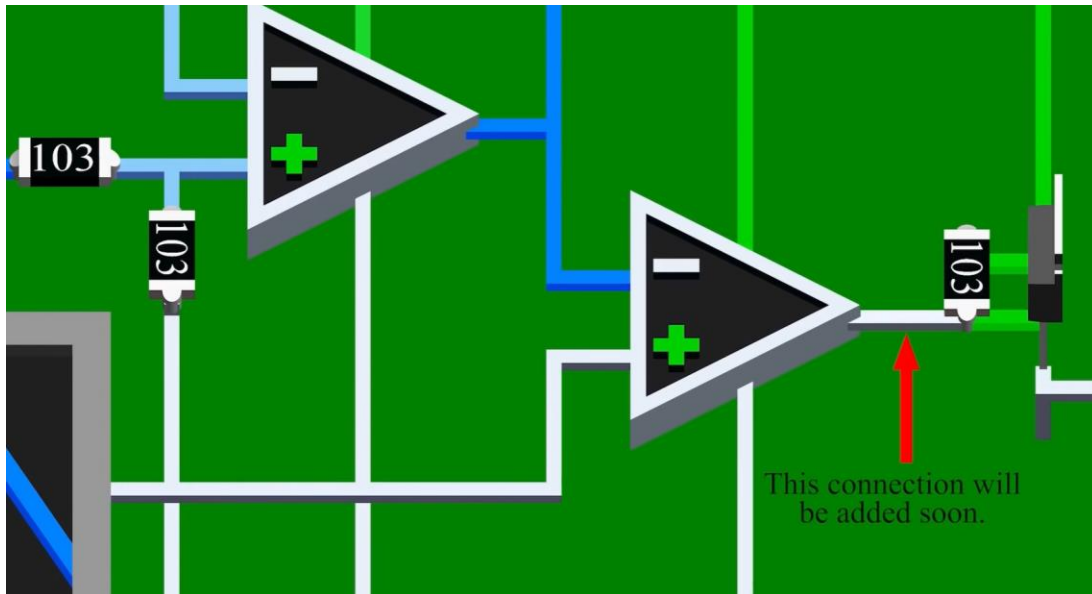
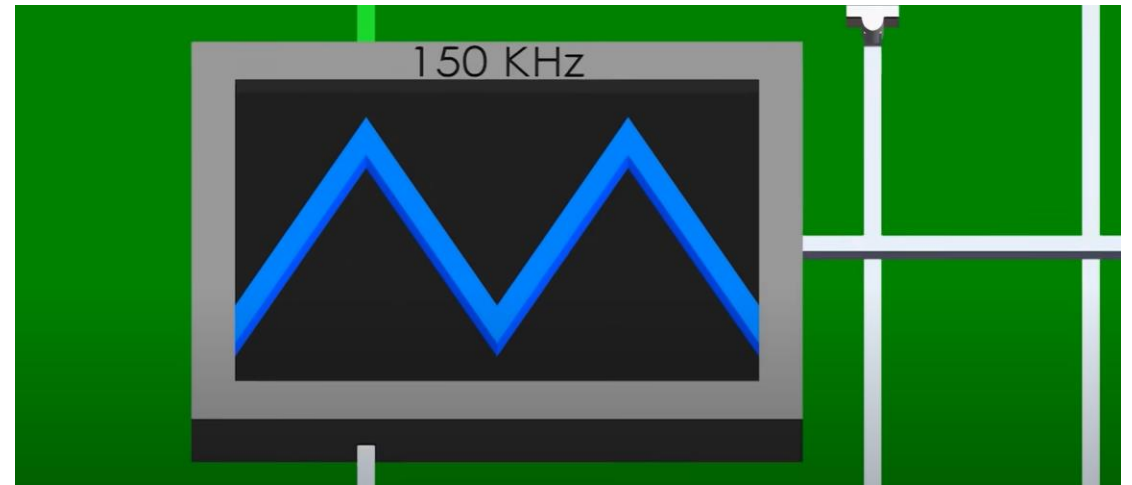
Если напряжение на неинвертирующем входе (положительном терминале) больше, чем на инвертирующем входе, то на выходе будет положительное питающее напряжение.

Если напряжение на инвертирующем входе (отрицательном терминале) больше, чем на неинвертирующем, то на выходе будет отрицательное питающее напряжение.



В этой конфигурации операционный усилитель стремится удерживать оба своих входа на одном уровне напряжения, и для этого он изменяет своё выходное напряжение. Так как обратная связь подаётся на инвертирующий вход, выходное напряжение меняется в зависимости от напряжения на инвертирующем входе. Это можно сравнить с качелями: когда входное напряжение падает, выходное растёт, и наоборот. Так работает дифференциальный усилитель.

Далее используется генератор треугольных сигналов.



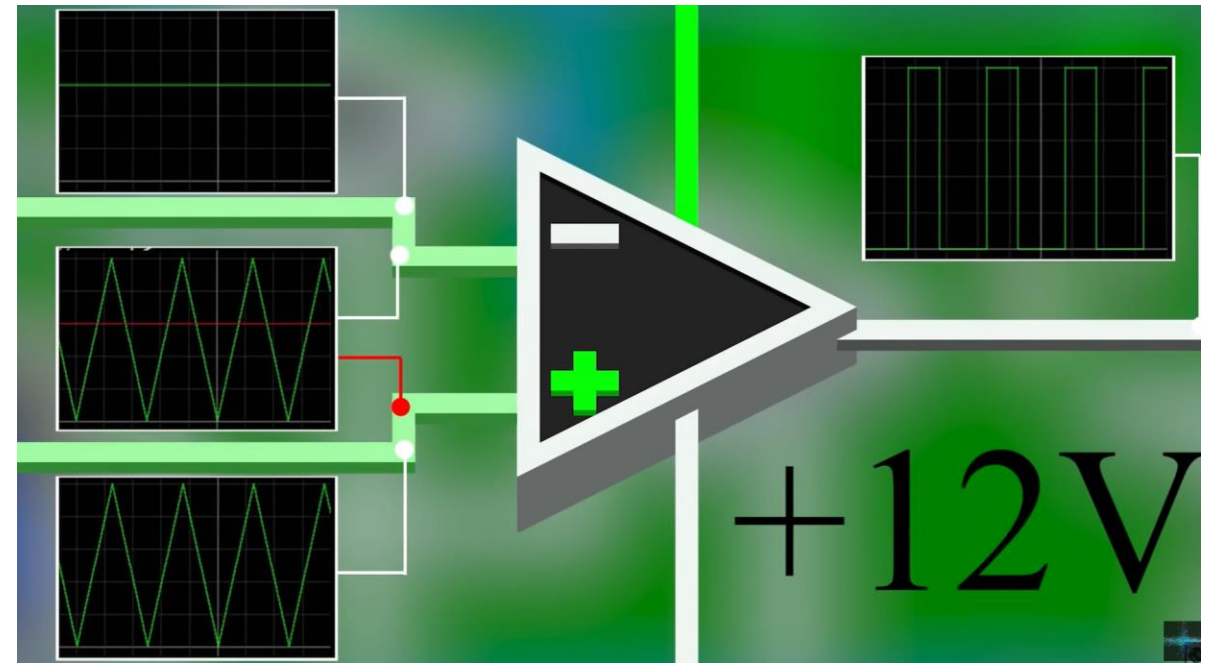
Выход усилителя ошибок и генератора подаётся на другой операционный усилитель, который работает как компаратор и формирует ШИМ-сигнал для управления МОП-транзистором.

В этом случае на инвертирующий вход компаратора подаётся постоянное напряжение от дифференциального усилителя, а на неинвертирующий вход — сигнал от генератора треугольной формы.

Когда треугольное напряжение выше постоянного, на выходе компаратора будет положительное питающее напряжение (например, +5 В).

Если постоянное напряжение выше треугольного, на выходе будет ноль (земля).

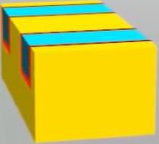
Таким образом, компаратор формирует ШИМ-сигнал. Если постоянное напряжение увеличивается, ширина импульса уменьшается, а если напряжение уменьшается, то увеличивается длительность включения транзистора.



Используется МОП-транзистор Р-канального типа.
МОП-транзистор N-канального типа включается, когда напряжение на затворе выше, чем на истоке, а Р-канальный включается, когда напряжение на затворе ниже напряжения на истоке.

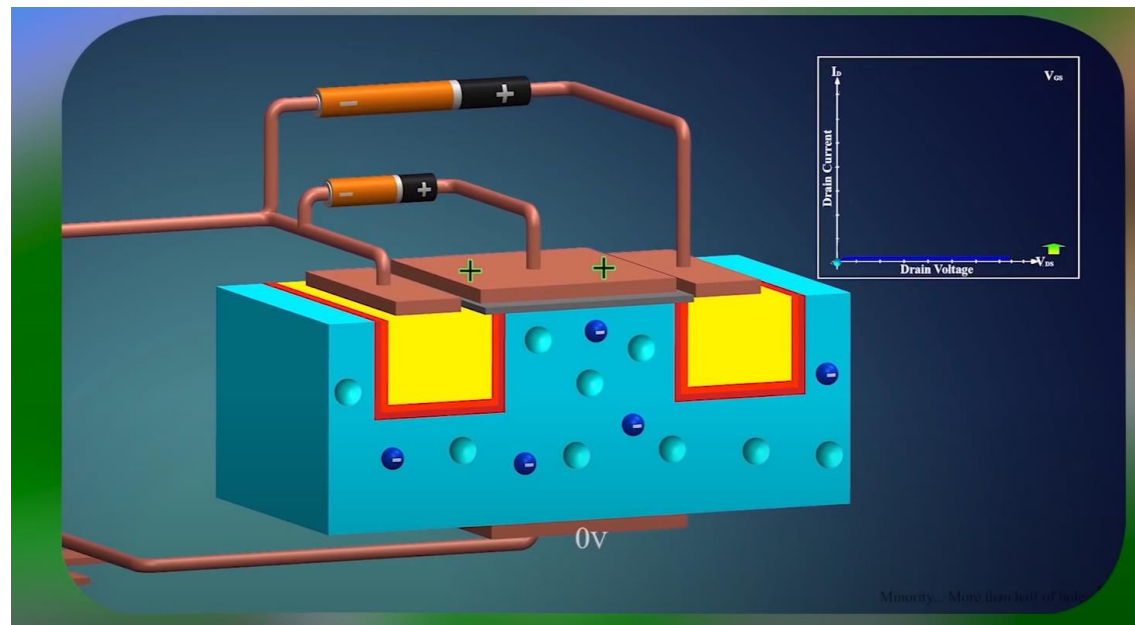
Таким образом, когда ШИМ-сигнал высокий, транзистор выключен, а когда ШИМ-сигнал низкий, транзистор включён.
Поэтому ширина импульса ШИМ-сигнала и длительность включения транзистора обратно пропорциональны.



GATE VOLTAGE (w.r.t. Source)	MOSFET	
	P 	N 
+5	OFF	ON
-5	ON	OFF

Вы можете спросить, почему не использовать N-канальный транзистор, ведь он включается при высоком сигнале на затворе?

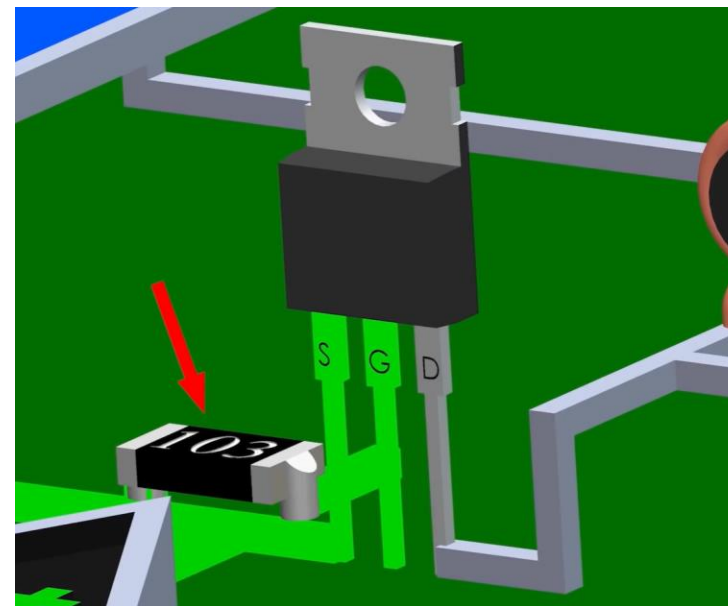
Дело в том, что напряжение на затворе должно быть выше напряжения на истоке, а во время работы напряжения на истоке и стоке практически равны. Поэтому для включения N-канального транзистора потребуется напряжение выше V_{cc} . Именно поэтому здесь используется P-канальный транзистор.



Кроме того, добавляется подтягивающий резистор между истоком и затвором.

Напряжения питания создаются с помощью стабилизаторов напряжения.

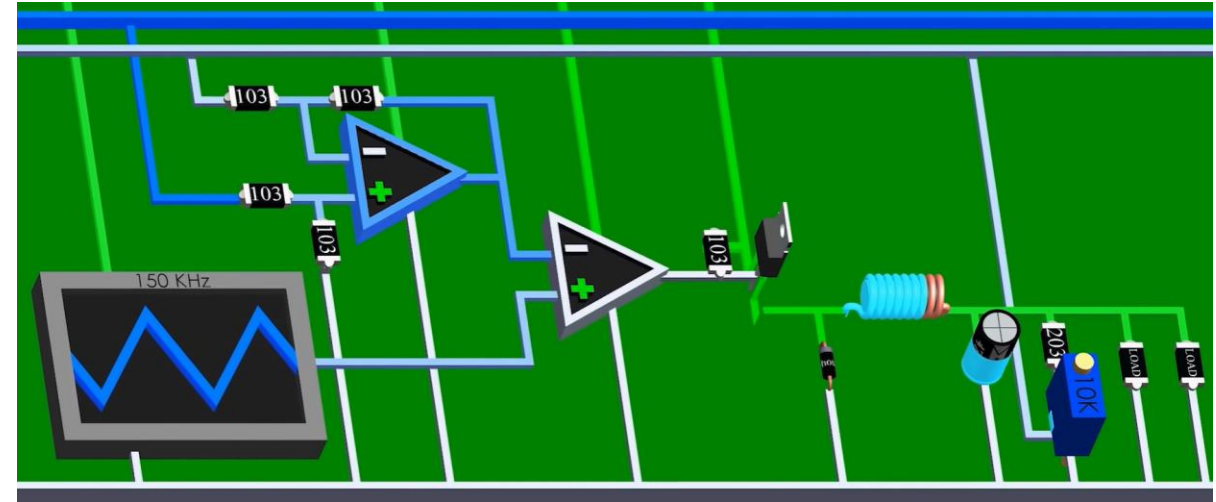
Так как эти напряжения используются только для опорных целей, ток через них практически не протекает, и потери мощности минимальны.



Если нагрузка увеличивается, ток возрастает, но ШИМ-сигнал остаётся прежним, поэтому напряжение падает.

Это вызывает снижение напряжения на опорном сигнале, что увеличивает разницу между опорным напряжением и входным на дифференциальном усилителе.

В результате напряжение на выходе усилителя ошибок увеличивается, уменьшая коэффициент заполнения ШИМ-сигнала, и транзистор включается на более длительное время, что повышает выходное напряжение.



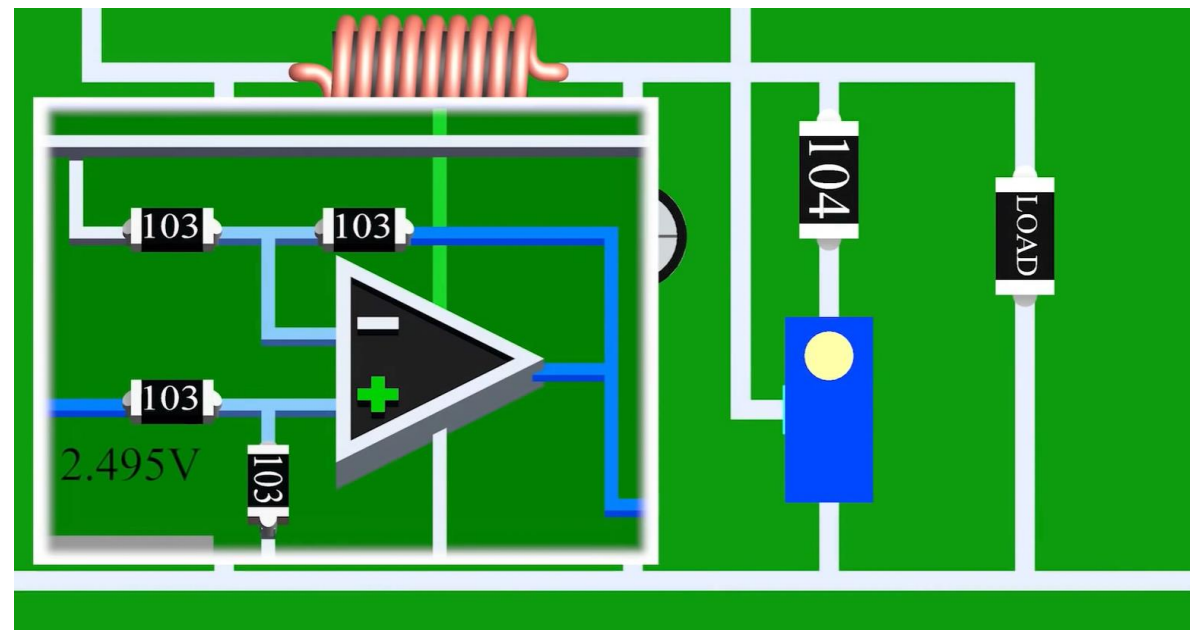
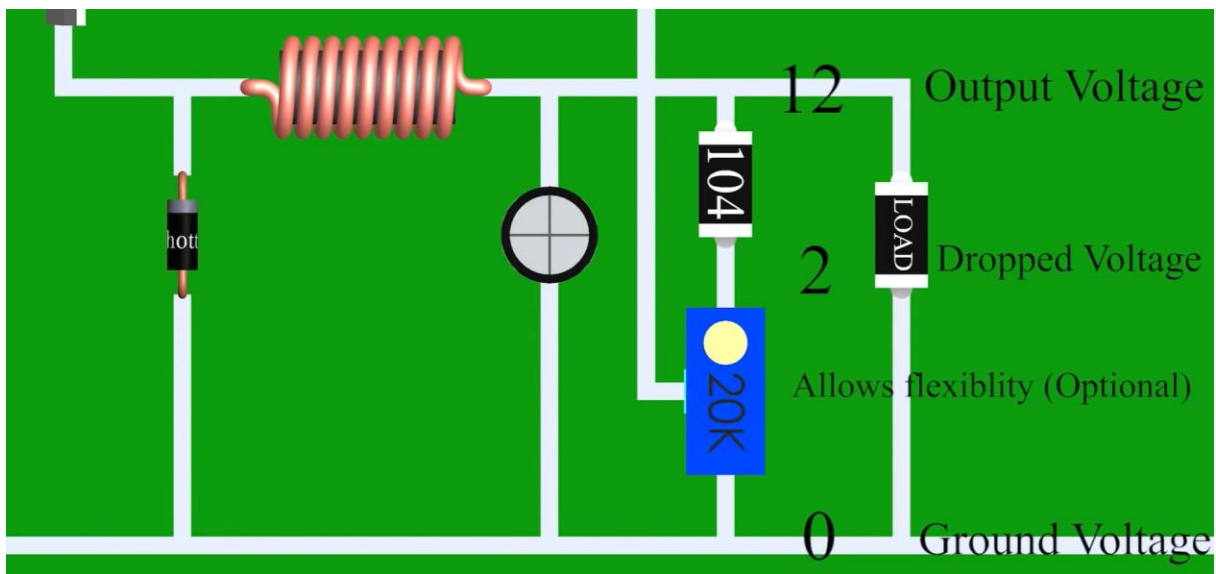
Также можно регулировать выходное напряжение, изменяя сопротивление потенциометра.

Это изменение сопротивления влияет на обратное напряжение, что в свою очередь меняет выход усилителя ошибок и, следовательно, ШИМ-сигнал.

Важно учитывать некоторые моменты при проектировании.

Во-первых, напряжение на усилителе ошибок всегда должно быть ниже опорного напряжения.

Поэтому делитель напряжения выбирается так, чтобы напряжение не превышало 2 В.



Кроме того, необходимо учитывать входы компаратора: при неправильной конфигурации изменится диапазон напряжения.

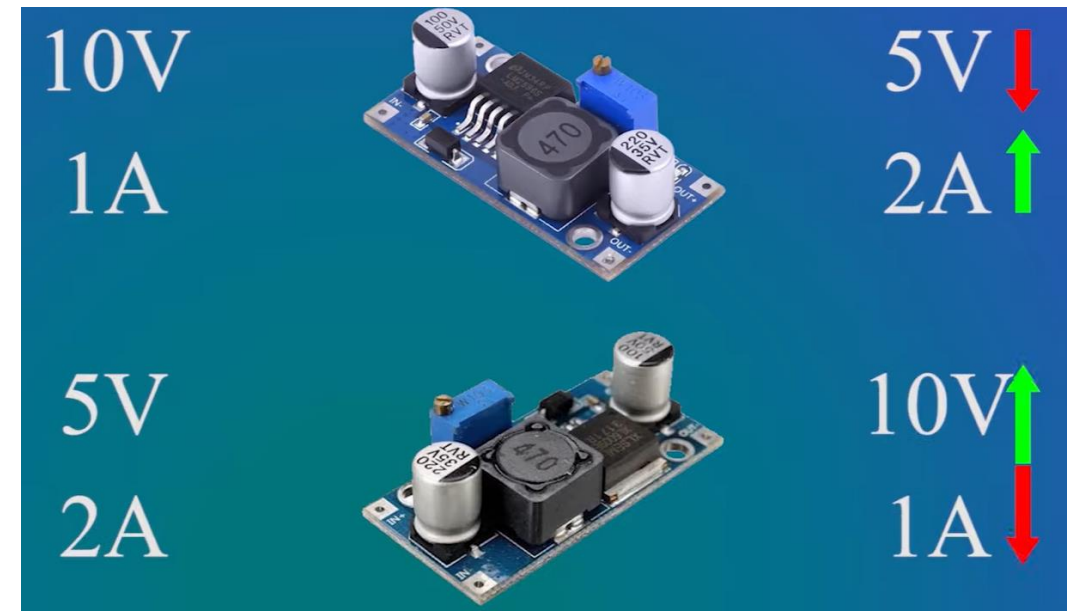
Так работает понижающий преобразователь в замкнутом контуре.

Он преобразует высокое напряжение с источника в более низкое на выходе, увеличивая ток.

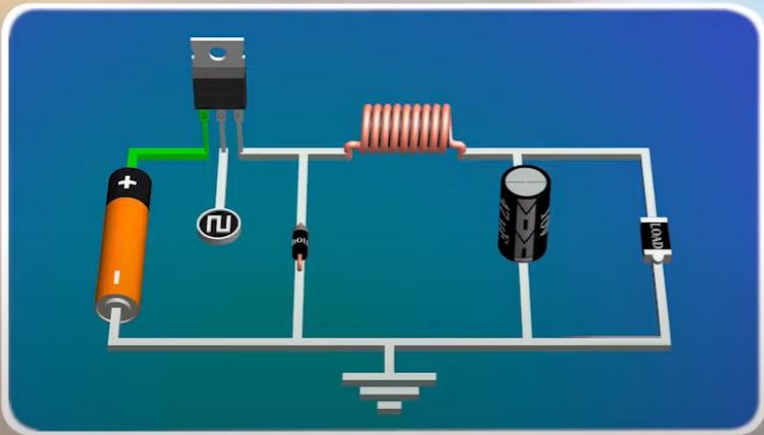
- В понижающем преобразователе напряжение уменьшается, а ток увеличивается.

- В повышающем преобразователе напряжение увеличивается, а ток уменьшается.

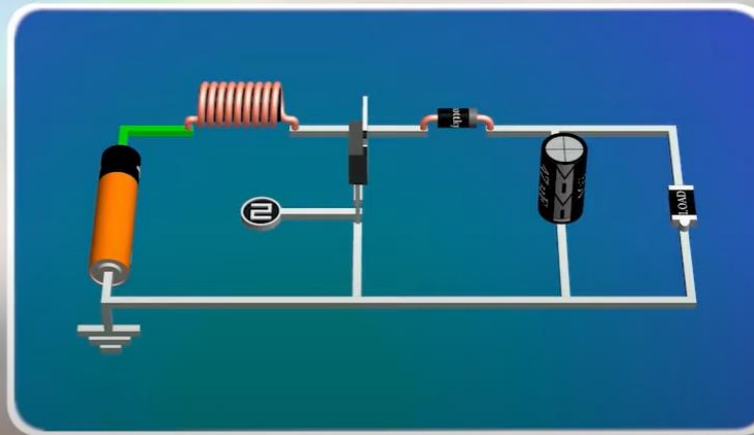
Оба преобразователя используют одинаковые компоненты, но они соединены по-разному.



Buck Converter



Boost Converter



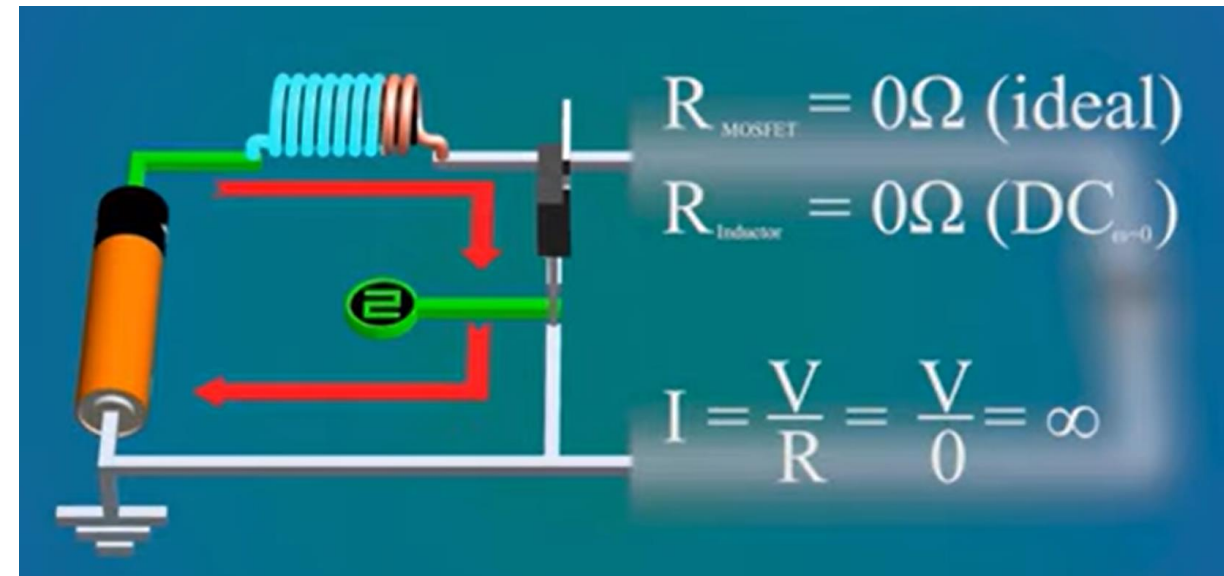
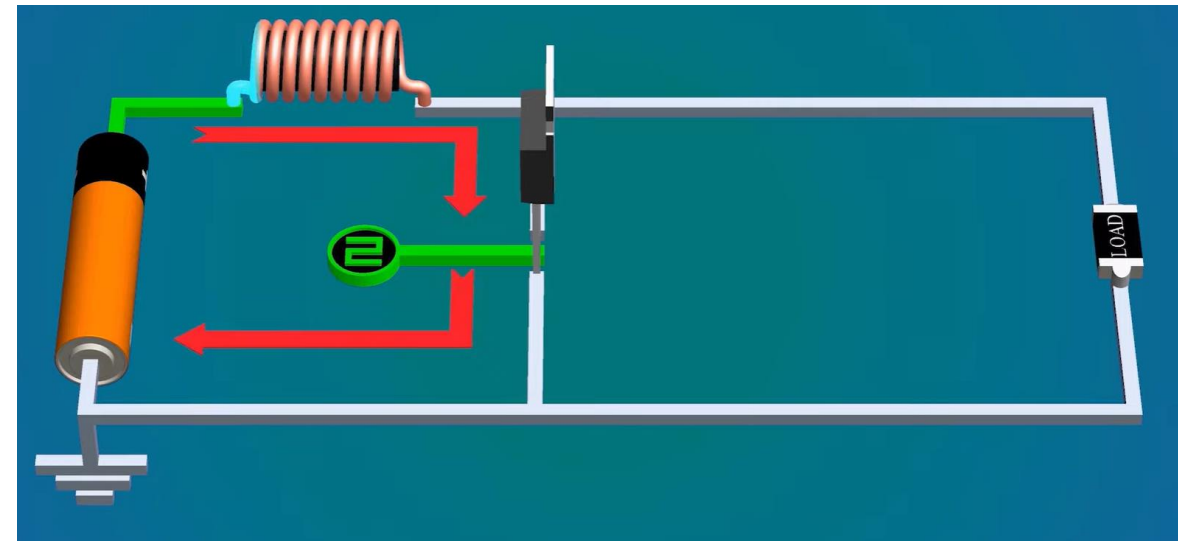
Для работы Boost-конвертера используется N-канальный MOSFET, который управляется ШИМ-сигналом (Широтно-Импульсная Модуляция).

1. Когда ключ замкнут (включён):

1. Ток начинает течь через индуктивность.
2. Индуктор (катушка) накапливает энергию в своём магнитном поле, а ток постепенно увеличивается.
3. В этой фазе сопротивление ключа равно нулю, а индуктор ведёт себя как короткое замыкание для постоянного тока.

2. Когда ключ разомкнут (выключен):

1. Ток не может мгновенно остановиться, поэтому индуктор начинает отдавать накопленную энергию.
2. Напряжение индуктора складывается с напряжением источника, создавая повышенное выходное напряжение.



Решение проблем

•Проблема импульсного напряжения:

Без дополнительного сглаживания напряжение на выходе не будет постоянным, а будет иметь импульсный характер.

•Решение:

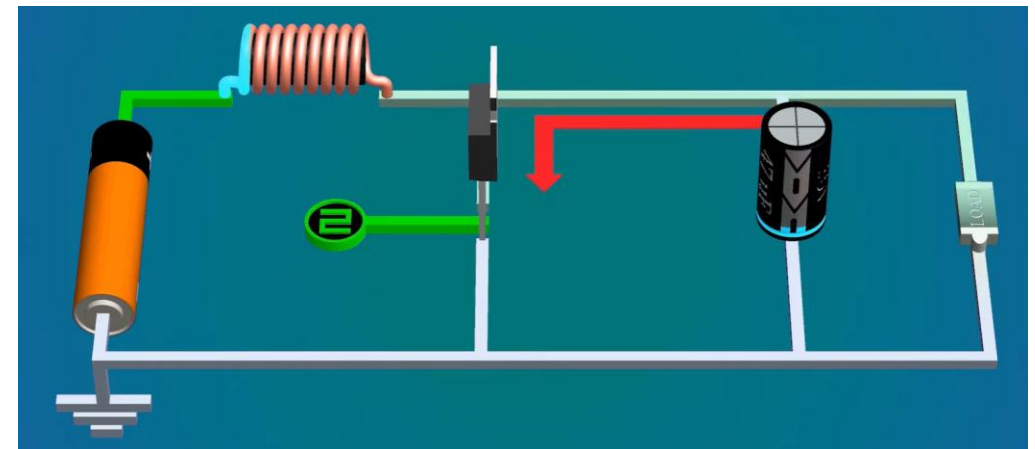
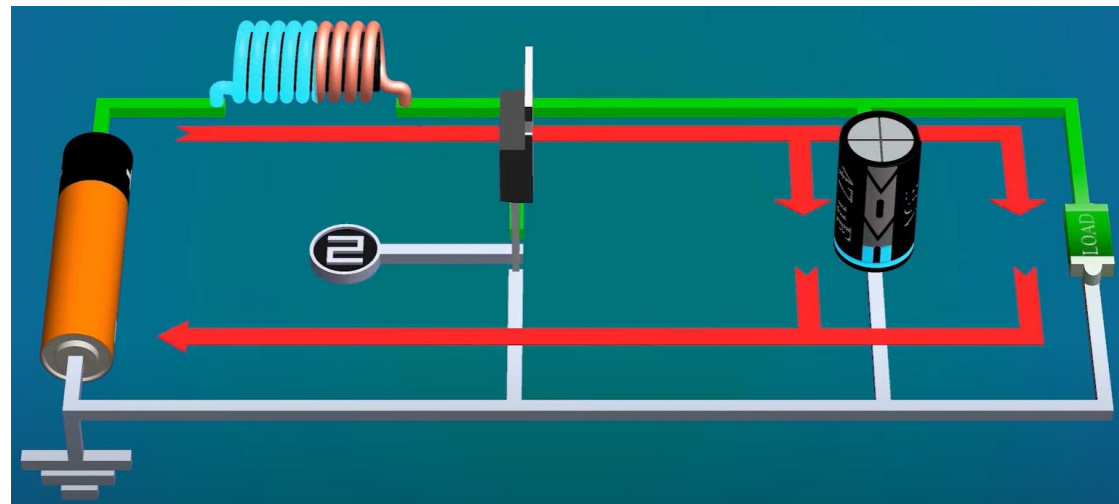
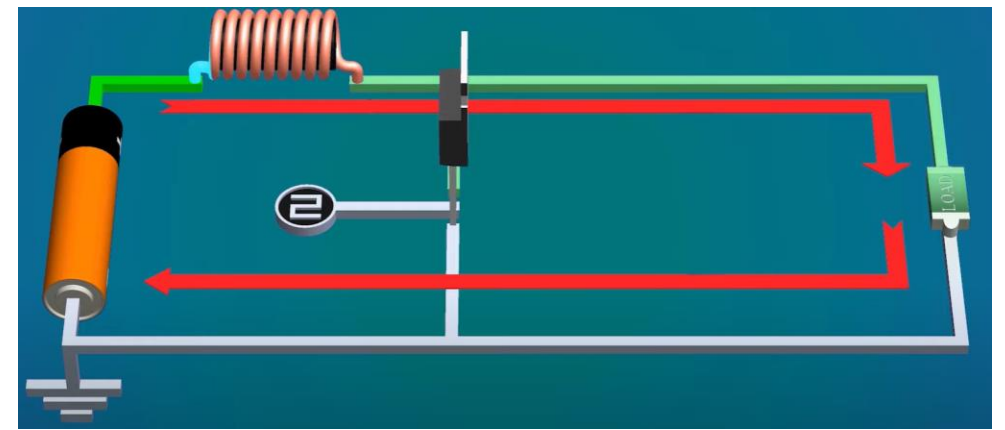
Добавляется конденсатор параллельно нагрузке. Он накапливает энергию во время скачков напряжения и обеспечивает стабильный ток для нагрузки.

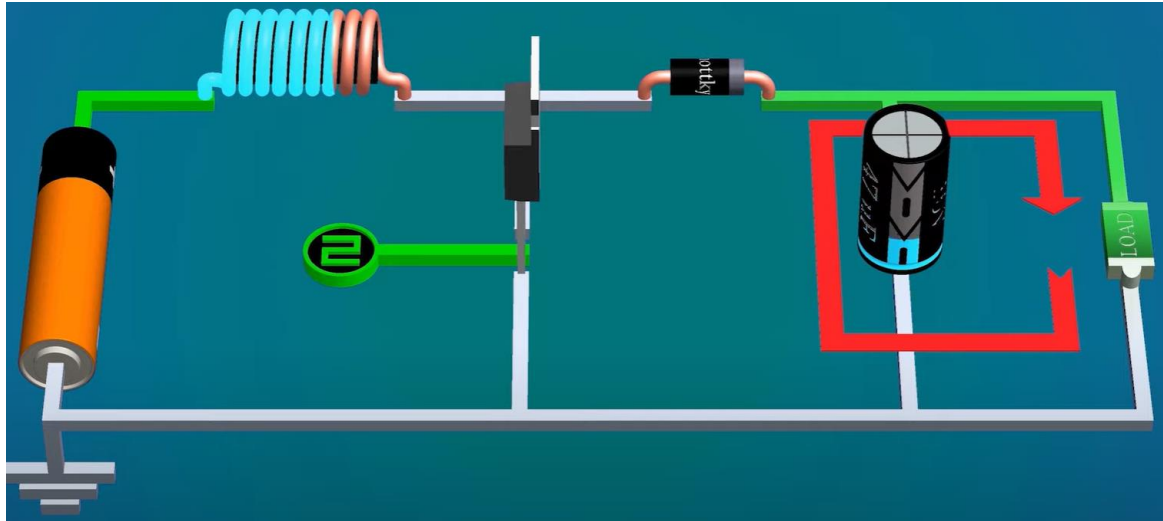
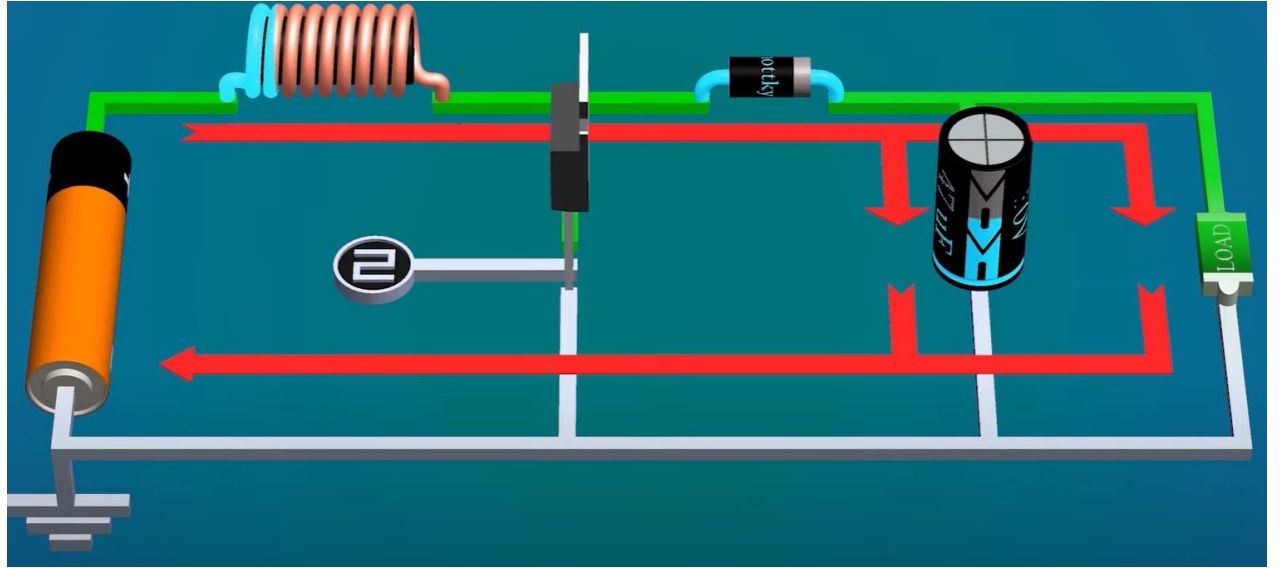
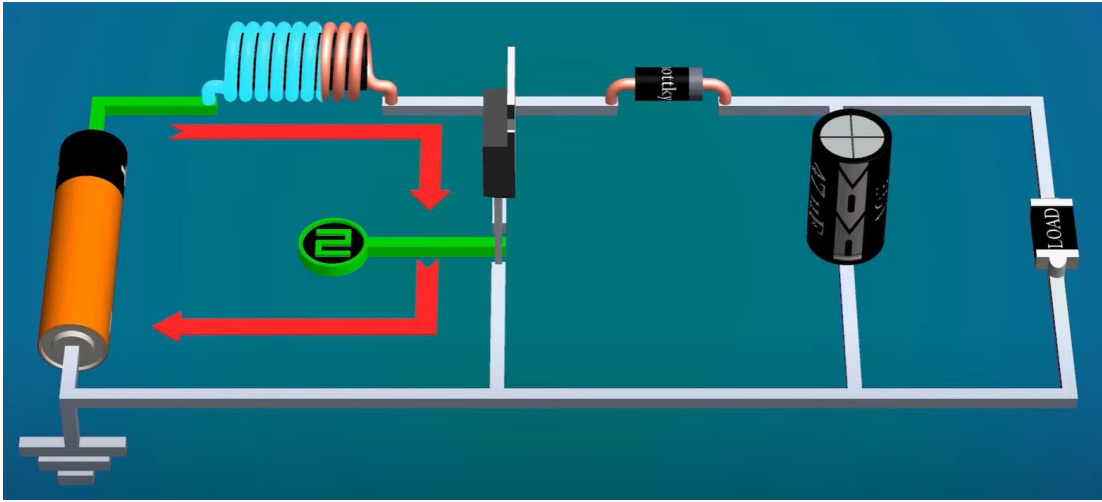
•Проблема утечки тока через ключ:

Когда ключ включён, конденсатор может разряжаться через него, что снижает эффективность цепи.

•Решение:

Установка диода между индуктором и конденсатором позволяет току течь только в одном направлении, предотвращая разряд конденсатора через ключ.





Регулировка напряжения

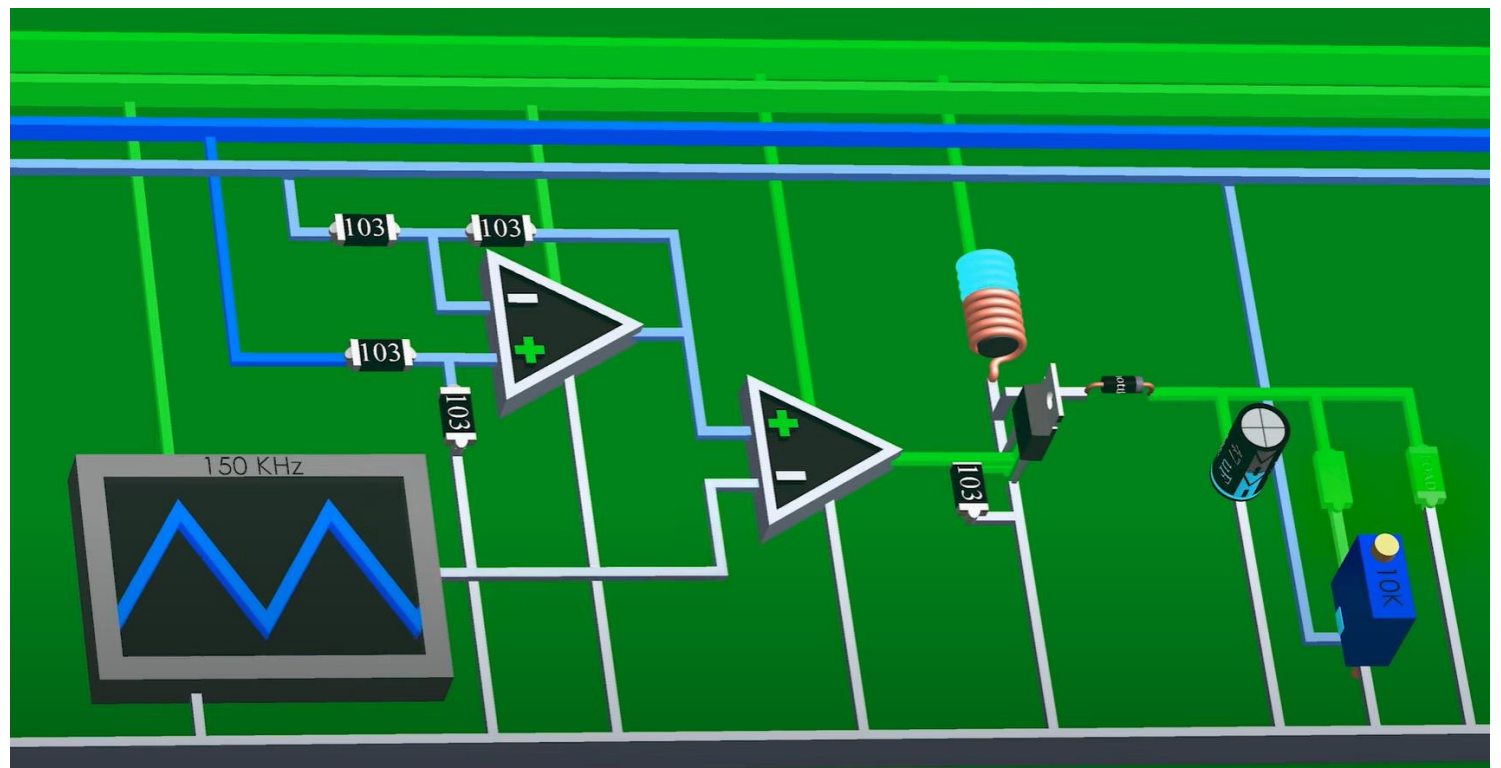
Выходное напряжение повышающего преобразователя зависит от скважности ШИМ (duty cycle):

- Увеличение скважности ШИМ увеличивает выходное напряжение.
- Уменьшение скважности снижает напряжение.

Добавление обратной связи:

Для поддержания стабильного выходного напряжения, независимо от изменения нагрузки, используется обратная связь. Она включает делитель напряжения, операционные усилители и генератор треугольной волны.

Любое изменение нагрузки изменяет напряжение на выходе, что корректирует скважность ШИМ и стабилизирует напряжение.



Ограничения и меры предосторожности

1. Высокое выходное напряжение:

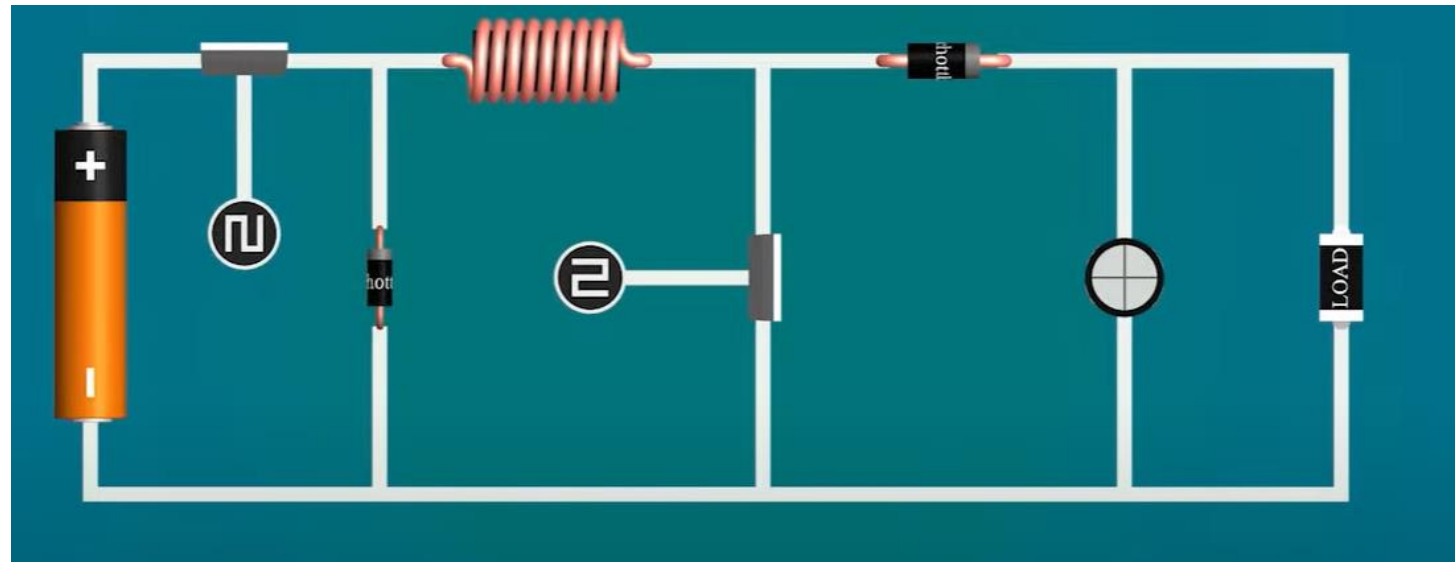
Выходное напряжение может значительно превышать входное, вплоть до сотен вольт, если скважность ШИМ слишком велика. Это опасно для компонентов и пользователя.

2. Диод:

Должен выдерживать напряжение выше максимального выходного напряжения, иначе он выйдет из строя.

Понижающий-Повышающий преобразователь (Buck-Boost Converter)

- Для возможности как повышения, так и понижения напряжения можно объединить понижающий и повышающий преобразователи.
- В этой схеме два ключа управляются отдельными ШИМ-сигналами.



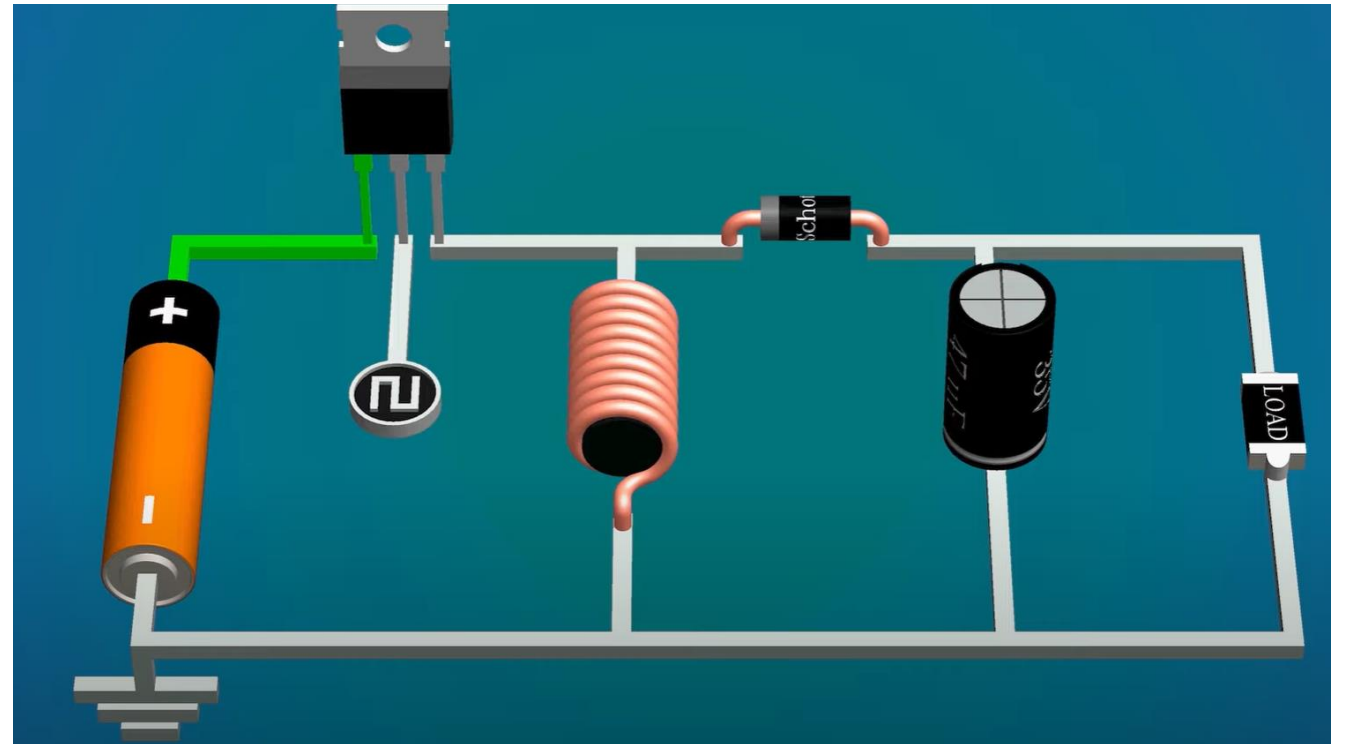
Инвертированный Buck-Boost Converter:

Существует конфигурация с одним ключом, которая позволяет получать отрицательное выходное напряжение.

• Принцип работы:

Когда ключ замкнут, ток накапливается в индукторе.

Когда ключ разомкнут, ток продолжает течь через нагрузку и конденсатор, формируя отрицательное напряжение. Регулировка скважности ШИМ позволяет изменять разность потенциалов, увеличивая или уменьшая выходное напряжение.



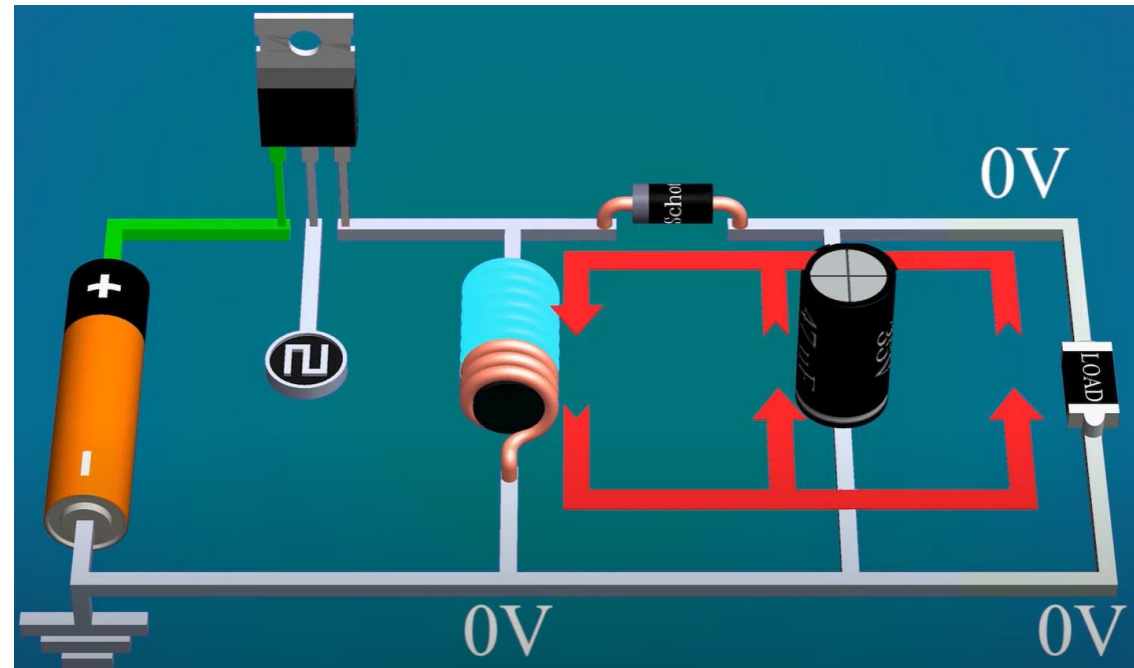
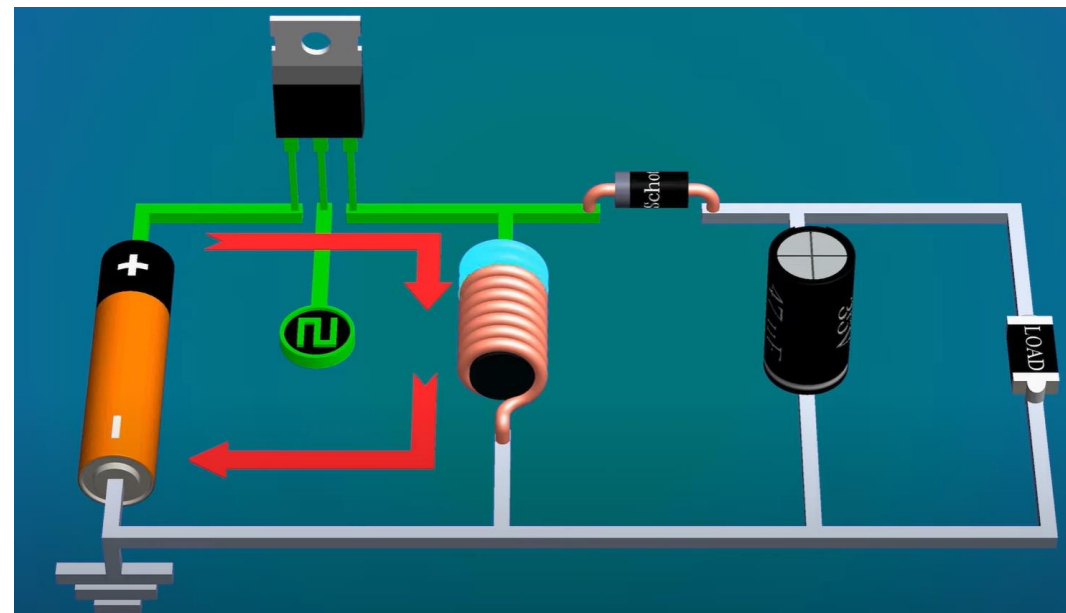
С его помощью можно получать напряжение от 0 до -100 В и ниже с источника питания на 5 В.

Когда переключатель включается, ток течёт через индуктивность по этому контуру.

Он не может течь по другому контуру, так как этот диод находится в состоянии обратного смещения.

Теперь, когда переключатель выключается, этот контур разрывается, и ток начинает течь через другой контур.

Этот терминал соединён с землёй, поэтому он всегда будет находиться на нулевом потенциале.



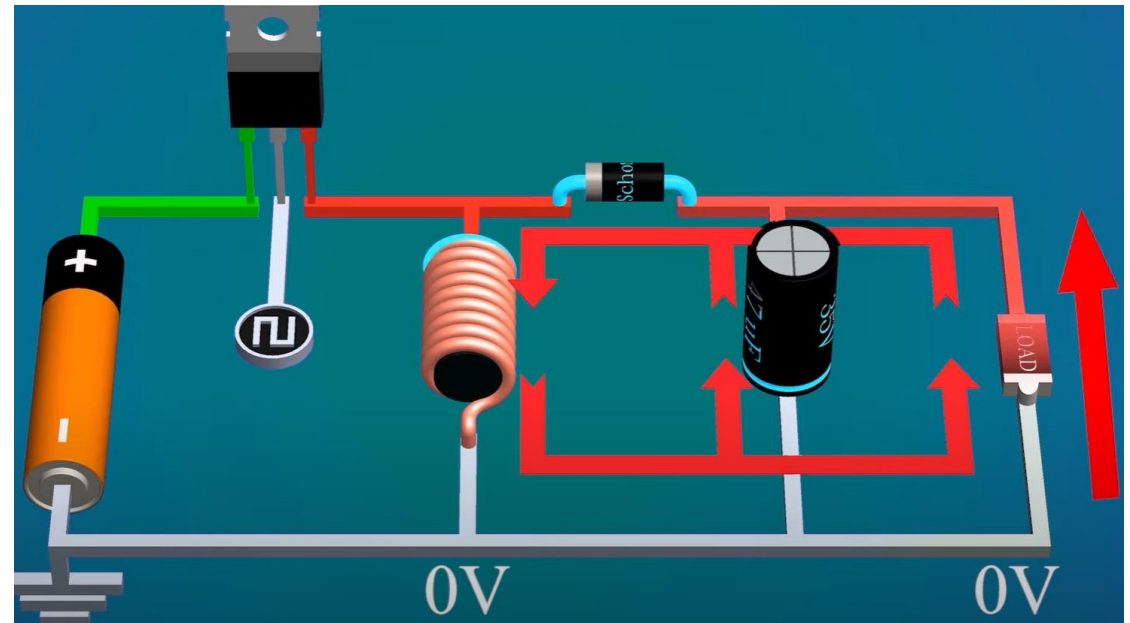
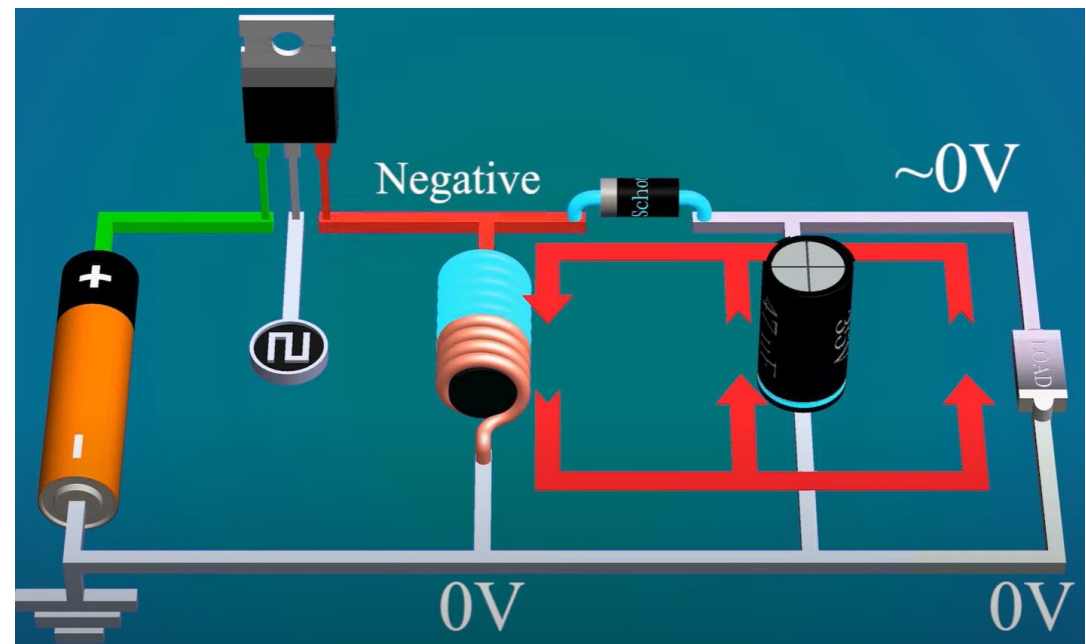
Теперь, если индуктивность хочет продолжить ток в этом направлении, другой терминал должен стать отрицательным.

Этот вывод диода отрицателен, а этот находится на нулевом потенциале, поэтому диод находится в состоянии прямого смещения, и это замкнутый контур для тока.

Вы знаете, что ток течёт от более высокого потенциала к более низкому.

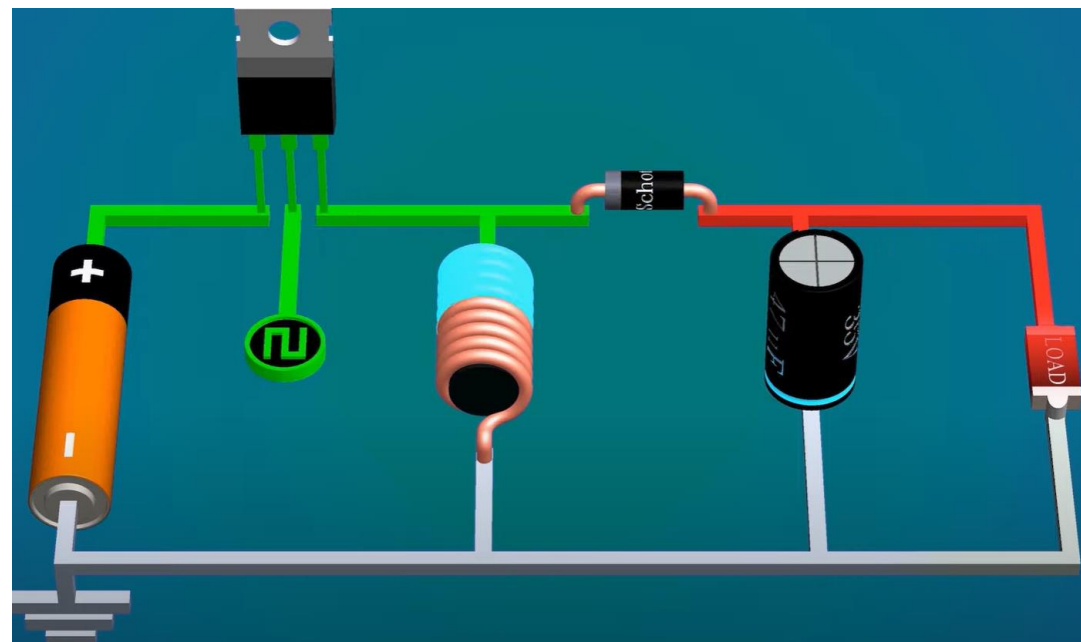
Здесь ток течёт в этом направлении, а этот вывод находится на нулевом потенциале, следовательно, другой вывод имеет отрицательный потенциал.

Кроме того, конденсатор заряжается с аналогичной полярностью.



Теперь, когда переключатель снова включается, этот контур замыкается, а диод снова находится в состоянии обратного смещения.

В этот момент ток через нагрузку подаётся конденсатором.



Если уменьшить скважность сигнала ШИМ, разность потенциалов уменьшается, а если увеличить скважность, разность потенциалов увеличивается.

