Источники вторичного электропитания электронной аппаратуры

Общие сведения

Вторичные источники электропитания (ИВЭП) предназначены для получения напряжения, необходимого для непосредственного питания электрической энергией электронных и других устройств.

В свою очередь ИВЭП получают энергию от первичных источников электроэнергии (питания), вырабатывающих электричество от генераторов, аккумуляторов и т.д.

Питать электронную аппаратуру непосредственно от первичных источников обычно **НЕЛЬЗЯ** из-за их несоответствия требованиям по величине напряжения, его стабильности, форме и частоте.

ИВЭП представляют собой ***преобразователи электрической энергии***.

Преобразователи электрической энергии (ПЭЭ) – устройства, осуществляющие преобразование электрической энергии одного вида и качества в электроэнергию другого вида и качества, исходя из требований, предъявляемых к источнику питания конкретного электрического или электронного устройства.

В большинстве случаев ИВЭП преобразуют энергию переменного напряжения электрической сети в постоянные напряжения требуемого уровня и стабильности

Мощность ИВЭП, используемых в маломощных электронных устройствах и установках информационно-измерительной техники и автоматики, как правило находится в пределах от долей до нескольких сотен ватт.

Источники вторичного электропитания электронной аппаратуры

Общие сведения

ИВЭП является одним из важных улов ЭА, поэтому часто к ИВЭП предъявляют требования:

1. Минимальные массогабаритные показатели
2. Высокая надежность при получении заданной выходной мощности.

Надежность того или иного устройства электроники зависит от надежности его ИВЭП.

Опыт эксплуатации электронных устройств разного назначения показал, что один из наиболее часто встречающихся дефектов является выход из строя функциональных узлов ИВЭП.

Это обусловлено тем, что входящие в их состав компоненты электроники зачастую работают в предельных режимах (в том числе из-за ошибок в проектировании), а электромагнитные и тепловые нагрузки во многих случаях доведены до физических пределов.

Простейшие структуры ИВЭП, состоящие из сочетания сетевого трансформатора, выпрямителя, сглаживающего фильтра и стабилизатора непрерывного действия все больше вытесняются сложными преобразовательными устройствами, работающими на частотах в десятки-сотни кГц. При этом обеспечиваются рекордно малые массогабаритные показатели, но появляются свои специфичные проблемы.

Основные показатели ИВЭП

- условия эксплуатации;
- параметры входной и выходной ЭЭ;
- выходная мощность;
- коэффициент полезного действия;
- удельные показатели;
- время непрерывной работы;
- время готовности к работе;
- число каналов и пр.

Электрические показатели ИВЭП делятся на две группы:

- **статические**, определяемые при медленном изменении во времени возмущающих факторов

- **динамические**, определяемые при быстром появлении возмущающих факторов.

Статические электрические показатели ИВЭП

В общем случае выделяют следующие характеристики:

1. Номинальное значение питающего напряжения $U_{ном.пит.}$
2. Допускаемые отклонения питающего напряжения.
3. Номинальная частота питающего напряжения $f_{ном.}$
4. Номинальные значения входных напряжений.
5. Номинальные токи нагрузки.
6. Суммарная мощность, отдаваемая в нагрузку.
7. Активная и полная мощности, потребляемые ИВЭП от первичной сети.
8. Нестабильность выходного напряжения:
    - при изменении напряжения питания $U_{пит}$;
    - при изменениях тока нагрузки;
    - во времени;
    - от температуры – температурный коэффициент выходного напряжения;
    - при одновременном воздействии всех возмущающих факторов.
9. Точность стабилизации выходного напряжения с помощью ИВЭП (коэффициент стабилизации):
    - по напряжению питания;
    - при изменении тока нагрузки;
    - при изменении температуры окружающей среды.
10. Выходное сопротивление стабилизирующего ИЭВП.
11. Пульсации выходного напряжения (**коэффициент пульсаций**).
12. Способность стабилизированного источника уменьшать переменную составляющую на выходе (**коэффициент сглаживания**).

Рассмотрим перечисленные показатели подробно

Статические электрические показатели ИВЭП

1) Номинальное значение входного питающего напряжения первичной сети, **$U_{вх}$ (чаще всего ~220В или ~380В).**

2) Допускаемые отклонения напряжения первичной питающей сети от номинального значения (в процентах или абсолютных величинах).

Пример: ГОСТ 29322-92 (МЭК) напряжение питающ. сети 220/380В ±10%
ГОСТ 29322-2014 (IEC 60038:2009) напряжение питающ. сети 230/400В ±10%

Однако возможны ситуации, когда напряжение питающей сети может изменяться в диапазоне +15% ÷ (-)20% при падении нагрузки, например в сельской местности.

3) Номинальная частота питающего напряжения **ГОСТ 29322-2014 (IEC 60038:2009)** – введен с 01.10.2015 f = 50 Гц ± 0,2 Гц.

4) Номинальные значения входных напряжений.

5) Номинальные токи нагрузки.

6) Суммарная мощность, отдаваемая в нагрузку.

7) Активная и полная мощности, потребляемые ИВЭП первичной сети.

Статические электрические показатели ИВЭП

8) Нестабильность выходного напряжения

а) Нестабильность выходного напряжения **при изменении напряжения питания** (выражается в % или в относительных единицах)

$$\delta_{U\text{н}(U)} = \frac{\pm\Delta U_{\text{н}(U)}}{U_{\text{н}}} \cdot 100\%$$

$\pm\Delta U_{\text{н}(U)}$ – изменение выходного напряжения (отклонение от номинального $U_{\text{н}}$) ;

$U_{\text{н}}$ – номинальное значение выходного напряжения при изменениях напряжения питания в заданных пределах при неизменном токе нагрузки и температуре.

б) Нестабильность выходного напряжения **при изменении тока нагрузки** (выражается в % или в относительных единицах)

$$\delta_{U\text{н}(I)} = \frac{\pm\Delta U_{\text{н}(I)}}{U_{\text{н}}} \cdot 100\%$$

$\pm\Delta U_{\text{н}(I)}$ – изменение выходного напряжения (отклонение от номинального) ;

$U_{\text{н}}$ – номинальное значение выходного напряжения при изменениях тока нагрузки в заданных пределах при постоянном напряжении питания и температуре.

Статические электрические показатели ИВЭП

в) Нестабильность выходного напряжения **во времени**

$$\delta_{U\text{н}(t)} = \frac{\pm\Delta U_{\text{н}(t)}}{U_{\text{н}}} \cdot 100\%$$

$\pm\Delta U_{\text{н}(t)}$ – изменение выходного напряжения в течение заданного промежутка времени;

$U_{\text{н}}$ – номинальное значение выходного напряжения при неизменном напряжении питания, тока нагрузки и температуры окружающей среды.

г) **Температурный коэффициент выходного напряжения (ТКН)**

$$\text{ТКН} = \frac{\pm\Delta U_{\text{н}(T)}}{U_{\text{н}} \cdot \Delta T} \cdot 100\%$$

$\pm\Delta U_{\text{н}(T)}$ – изменение выходного напряжения при изменении температуры;

$U_{\text{н}}$ – номинальное значение выходного напряжения;

ΔT – приращение температуры окружающей среды относительно номинальной.

Статические электрические показатели ИВЭП

г) Нестабильность выходного напряжения **при одновременном воздействии всех возмущающих факторов**, определяется как алгебраическая сумма нестабильностей для каждого фактора в отдельности.

$$\delta_{U\text{н}} = \delta_{U\text{н}(U)} + \delta_{U\text{н}(I)} + \delta_{U\text{н}(t)} + \text{ТКН} \cdot \Delta T$$

9) Точность стабилизации выходного напряжения с помощью ИВЭП характеризуется **коэффициентом стабилизации**, который показывает во сколько раз относительное приращение выходного напряжения ИВЭП меньше относительного приращения данного возмущающего фактора.

а) Коэффициент стабилизации по напряжения питания (при постоянных значения тока нагрузки $I_\text{н}$ и $t_\text{о.с.}$) равен:

$$\text{К}_{\text{ст}(U)} = \frac{\dfrac{\Delta U_\text{п}}{U_\text{п}}}{\dfrac{\Delta U_\text{н}}{U_\text{н}}}$$

$\Delta U_\text{п}, \Delta U_\text{н}$ – изменение соответсвующих напряжений относительно номинальных значений.

Статические электрические показатели ИВЭП

б) Коэффициент стабилизации выходного напряжения при изменении тока нагрузки.

$$\boxed{К_{ст(I)} = \frac{\dfrac{\Delta I_п}{I_п}}{\dfrac{\Delta I_н}{I_н}}}$$

в) Коэффициент стабилизации выходного напряжения при изменении температуры окружающей среды

$$\boxed{К_{ст(T)} = \frac{\dfrac{\Delta T}{T}}{\dfrac{\Delta U_н}{U_н}}}$$

10) Выходное сопротивление $R_{вых}$ стабилизированного ИВЭП.

$$\boxed{R_{вых} = \frac{\Delta U_н}{I_н}}$$

$\Delta U_н$ – изменение выходного напряжения к вызвавшему это изменение току нагрузки при постоянных напряжении питания и температуре окружающей среды.

Статические электрические показатели ИВЭП

11) Пульсации выходного напряжения (**коэффициент пульсации**)

$$\boxed{К_{пл} = \delta_{нп} = \frac{U_{нп}}{U_н} \cdot 100\%}$$

$U_{нп}$ – изменение выходного напряжения к вызвавшему это изменение току нагрузки при постоянных напряжении питания и температуре окружающей среды.

$U_н$ – номинальное выходное напряжение при постоянном токе нагрузки, напряжении питания и температуры окружающей среды.

12) Способность стабилизированного источника уменьшить переменную составляющую на выходе $U_{нп}$ по отношению к его значению на входе $U_{нп}$. Характеризуется **коэффициентом сглаживанием пульсаций**.

$$\boxed{К_{сгл} = \frac{\frac{U_{пп}}{U_п}}{\frac{U_{нп}}{U_н}}}$$

$\frac{U_{нп}}{U_н}$ – относительное значение пульсаций на входе,

$\frac{U_{пп}}{U_п}$ – относительное значение пульсаций на выходе.

Основные показатели и характеристики ИВЭП (как ПЭЭ)

Статические показатели ИВЭП
Динамические показатели
Энергетические показатели
Удельные показатели
Показатели надежности

1. Коэффициент полезного действия (КПД)

$$\eta = \frac{P_н}{P_0} = \frac{P_н}{P_н + P_{потерь}} < 1$$

η = 0,8 ÷ 0,95 – имеют современные ИП

$P_н$ – мощность, выделяемая в нагрузку;
P_0 – потребляемая мощность;
$P_{потерь}$ – суммарные потери мощности в самом ИВЭП

2. Коэффициент мощности – характеризует качество потребляемой энергии из сети переменного тока.

$$\chi = \frac{P}{S}$$

P – активная мощность; *S* – полная мощность;
P и *S* потребляются из первичного источника питания

Коэффициент мощности χ **показывает долю активной мощности от полной мощности**, потребляемых от первичного источника питания

Основные показатели и характеристики ИВЭП (как ПЭЭ)

2. Коэффициент мощности – характеризует качество потребляемой энергии из сети переменного тока.

$$\chi = \frac{P}{S}$$

P – активная мощность; *S* – полная мощность;
P и *S* потребляются из первичного источника питания.

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)\cdot i(t)dt$$

Мгновенные значения напряжения и тока, потребляемых от питающей сети

$$S = U_д \cdot I_д = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}$$

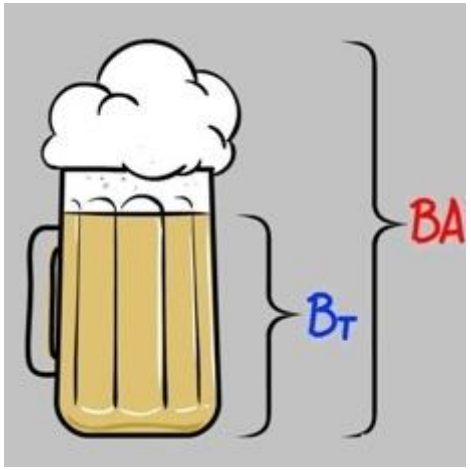
Действующие значения напряжения и тока, потребляемых от питающей сети

Реактивная мощность

Мощность искажения тока

Составляющая реактивной мощности *Q* обусловлена наличием реактивных элементов, накапливающих электромагнитную энергию.

Составляющая мощности искажения *T* появляется в случае отличия потребляемого от питающей сети тока от синусоидальной формы питающего напряжения.



Аналогия с пивом

https://www.youtube.com/watch?v=Yj7aSejVZHY

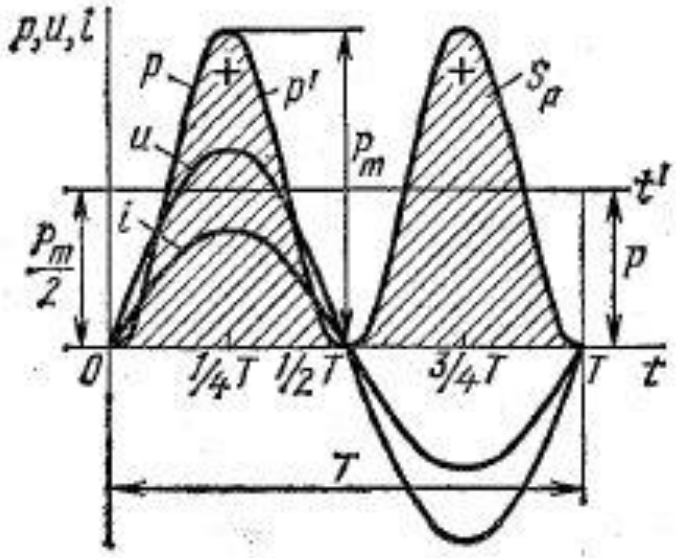
Основные показатели и характеристики ИВЭП (как ПЭЭ)

2. Коэффициент мощности

$$\chi = \frac{P}{S}$$

P – активная мощность; *S* – полная мощность;
P и *S* потребляются из первичного источника питания.

Пример цепи с активным сопротивлением

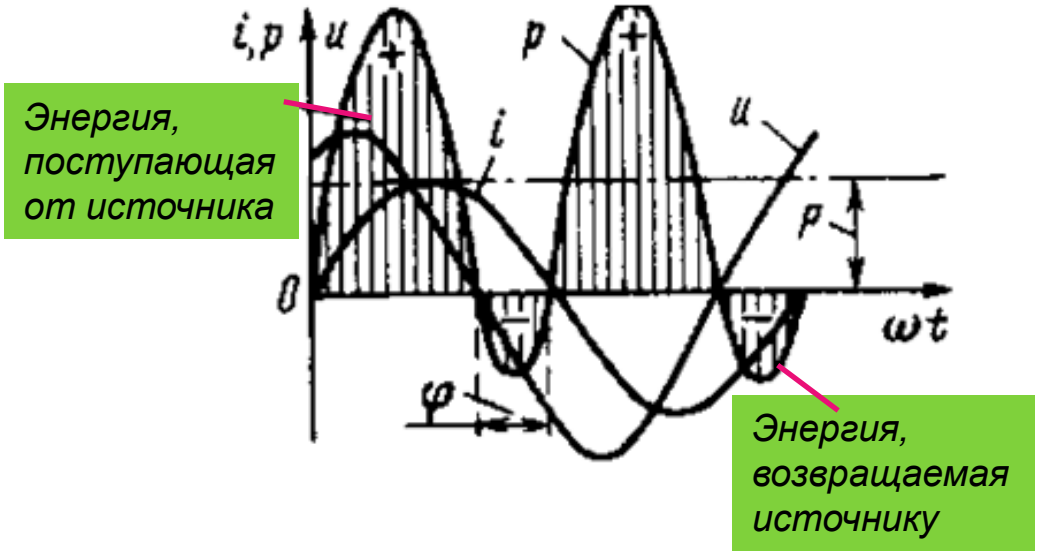


При работе на **чисто активную нагрузку** входные синусоидальные ток и напряжение синфазны. Энергия непрерывно потребляется от входного (первичного) источника питания и поэтому **мгновенная мощность положительная**, т.е. $p(t) = u(t)\cdot i(t) > 0$, следовательно

$$\boxed{\chi = \frac{P}{S} = 1}$$

Основные показатели и характеристики ИВЭП (как ПЭЭ)

2. Коэффициент мощности



Из-за присутствия реактивных элементов *L* или *C* входные синусоидальные ток и напряжение имеют фазовый сдвиг φ.

При этом от входного (первичного) источника питания потребляется не только активная мощность *P*, но и реактивная мощность *Q*.

Энергия, накопленная в реактивных элементах, отдается обратно в источник питания.

Поэтому мгновенная мощность будет как **положительная** (энергия поступает от источника), так и **отрицательная** $p(t) = u(t)\cdot i(t) < 0$ (энергия возвращается источнику).

$$P = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} U_m \sin\upsilon \cdot I_m \sin(\upsilon+\varphi)d\upsilon = \frac{U_m \cdot I_m}{2}\cos\varphi; \qquad S = \frac{U_m \cdot I_m}{2};$$

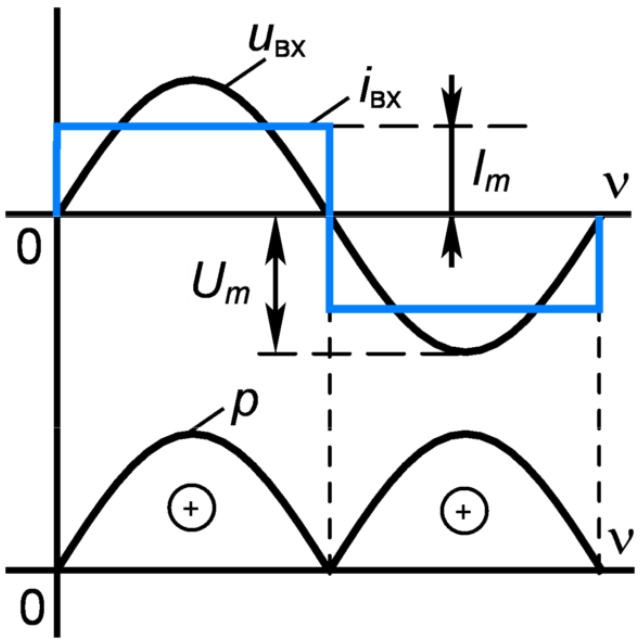
$$\chi = \frac{P}{S} = \cos\varphi$$

Предложите способы улучшения коэффициента мощности!

Основные показатели и характеристики ИВЭП (как ПЭЭ)

2. Коэффициент мощности

На рисунке показан случай, когда форма тока, потребляемого преобразователем, отличается от напряжения сети.



В данном случае реактивная мощность *Q* отсутствует.

$$P = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} U_m \sin\upsilon \cdot I_m \cdot d\upsilon = \frac{U_m \cdot I_m}{2};$$

$$S = \frac{U_m \cdot I_m}{\sqrt{2}};$$

$$\boxed{\chi = \frac{P}{S} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \simeq 0,9}$$

В данном примере мгновенная мощность будет только **положительная** (энергия поступает от источника), так $p(t) = u(t)\cdot i(t) > 0$.

Удельные характеристики

Для характеристики эффективности того или иного технического решения ИВЭП используют удельные показатели, характеризуемые выходной мощностью P (Вт), приходящейся на единицу массы m (кг), объема V (дм^3) или стоимости S (руб.)

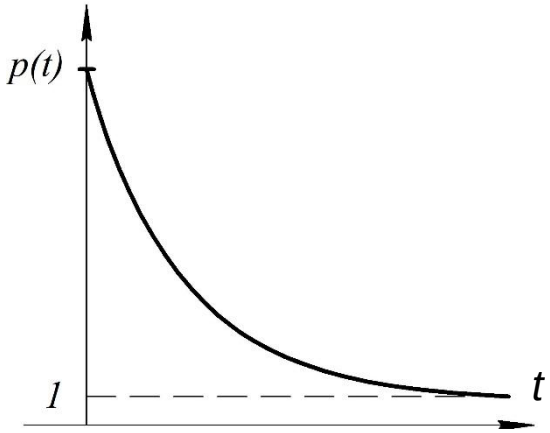
$$\gamma_m = \frac{P_н}{m} \qquad \gamma_V = \frac{P_н}{V} \qquad \gamma_S = \frac{P_н}{S}$$

Показатели надежности

Показатели надежности характеризуются или значением вероятности безотказной работы в течение заданного промежутка времени или средним временем наработки на отказ $T_{ист}$

При расчете этих показателей обычно принимаются экспоненциальный закон распределения отказов радиоэлементов, входящих в состав ИВЭП

$$p(t) = e^{-t/T_{ист}} = e^{\lambda_{ист} \cdot t}$$



$\lambda_{ист}$ – суммарная интенсивность отказа радиоэлементов, t – время работы,

$$\lambda_{ист} = \frac{1}{T_{ист}}$$

Основные способы повышения надежности ИВЭП:

- максимально возможное упрощение схемы;
- сокращение количества компонентов;
- применение наиболее надежных компонентов;
- использование компонентов в облегченных режимах работы (тепловых, электрических) ;
- использование различных видов защиты от аварийных режимов (в том числе и быстродействующей электронной) ;
- резервирование (поэлементное, узловое, блочное и пр.) ИВЭП. (**Касается не только ИВЭП!)**

Вследствие противоречий между характеристиками, **невозможно получить всех хороших показателей ИВЭП**
В каждом конкретном случае уточняется, какие из показателей являются наиболее важными, а какими можно пренебречь.

Оптимальным решением обычно считается такое, которое позволяет реализовать ИВЭП с требуемыми параметрами при максимальных значениях удельных показателей, КПД и надежности.

Базовые узлы ИВЭП

ИВЭП представляют собой сочетание различных функциональных узлов электроники, выполняющих различные виды преобразования электрической энергии, а именно:

- **выпрямление;**
- **фильтрацию;**
- **трансформацию (масштабирование);**
- **регулирование (с целью стабилизации определенного параметра);**
- **усиление сигналов;**
- **стабилизацию (с целью получения опорных сигналов);**
- **защиту.**

Базовые функциональные узлы ИВЭП различного назначения:

- **выпрямительные устройства (выпрямители);**
- **трансформаторы;**
- **инверторы;**
- **стабилизаторы;**
- **регуляторы определенного электрического параметра;**
- **устройства защиты от перегрузок и аварийных режимов.**

Рассмотрим назначение каждого узла ИВЭП.

Базовые узлы ИВЭП

В

- **выпрямитель** – преобразователь переменного напряжения любой формы в однополярное пульсирующее напряжение.

Состоит из одного или нескольких нелинейных элементов (диодов), соединенных в одну из известных схем выпрямления электрического сигнала.

Ф

- **сглаживающий фильтр** – устройство, предназначенное для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения (сглаживания), а также для защиты потребителя электроэнергии от помех, поступающих из первичной сети (помехоподавление).

Помимо сглаживающих фильтров, в состав ИВЭП входят ***помехоподавляющие фильтры***. Их основное назначение – предотвращение электромагнитных сигналов, создаваемых ИВЭП в сеть первичного источника электропитания.

Фильтры выполняются на основе дросселей и конденсаторов и резисторов. Роль сглаживающих фильтров часто выполняют непрерывные стабилизаторы.

Тр

- **трансформатор** применяется для получения из напряжения одного значения группы напряжений, пропорциональных друг другу.

В составе современных ИВЭП они работают на частоте первичной сети (50Гц, 400Гц), так и на высоких частотах от нескольких сотен Гц до сотен кГц.

Трансформатор на сегодняшний день – единственное устройство, обеспечивающее гальваническую развязку потребителя от источника электрической энергии (при большом значении последней).

Базовые узлы ИВЭП

И - **инвертор** – статический преобразователь напряжения постоянного тока в переменный. Он выполняется на ключевых элементах (тиристорах, транзисторах).

СН - **стабилизатор напряжения** – устройство, поддерживающее неизменным напряжение постоянного или переменного тока при воздействии на ИВЭП различных возмущающих факторов.

СТ - **стабилизатор тока** – выполняет ту же функцию, что и стабилизатор напряжения, только применительно к электрическому току.

РН - **регулятор напряжения (или тока РТ)** – устройство, изменяющее напряжение (ток) на нагрузке по требуемому закону в заданном диапазоне регулирования.

В большинстве случаев отдельные узлы ИВЭП осуществляют совмещение нескольких функций. В результате существенно упрощается принципиальная схема ИВЭП и улучшаются её отдельные показатели.

Базовые узлы ИВЭП

ВДУ

- **вольтодобавочное устройство** – дополнительный регулируемый источник напряжения постоянного или переменного тока.

Введение его позволяет облегчить работу регулирующего элемента и управлять не всей электрической мощностью, а только частью, необходимой для выполнения операции регулирования напряжения в заданных пределах. Его питание может быть осуществлено как от основного сетевого первичного источника, так и от вспомогательного дополнительного.

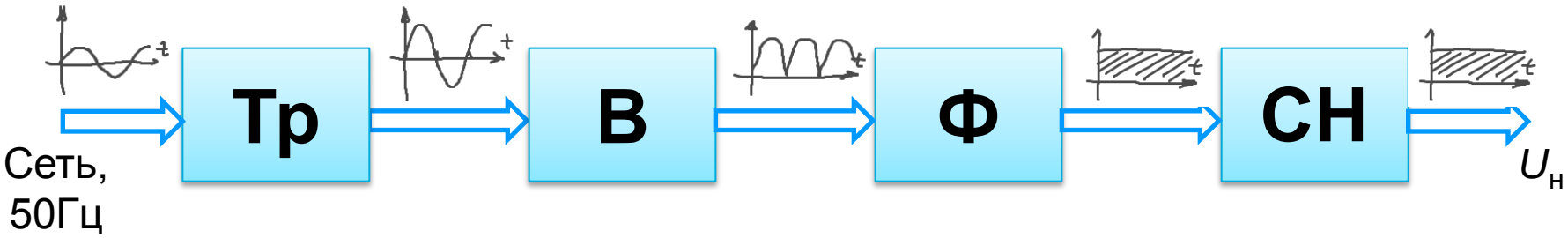
ТДУ

Аналогичную функцию, только применительно к электрическому току выполняет **токодобавочное устройство** (ТДУ)

В большинстве случаев отдельные узлы ИВЭП осуществляют несколько функций. В результате существенно упрощается принципиальная схема ИВЭП и улучшаются ее отдельные показатели.

Структурные схемы простейших ИВЭП

Структурные схемы ИП, получающих энергию от промышленной сети 50Гц



Структурная схема ИП с трансформаторным входом (без преобразования частоты)

Принцип действия по структурной схеме

При трансформаторном напряжение первичной сети трансформируется (обычно понижается с помощью трансформатора **Тр** в напряжения требуемых номиналов и затем выпрямляется выпрямителем **В**. Пульсации выпрямленного напряжения сглаживаются фильтром **Ф**, а его величина стабилизируется стабилизатором напряжения **СН**.

Достоинства:

- простота получения требуемых значений выходных напряжений;
- гальваническая развязка входного и выходных напряжений (в т.ч. между выходными напряжениями).

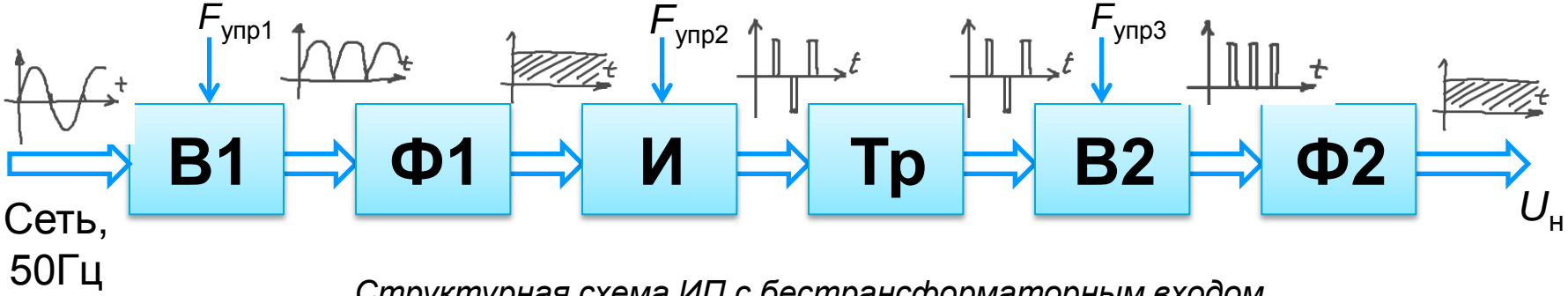
Недостатки:

- (главный) большие массогабаритные показатели ИВЭП.

При низкой частоте питающей сети **масса** силового трансформатора неоправданно **большая**, в сглаживающих фильтрах применяются **конденсаторы и дроссели с большими номиналами**. В результате такие ИВЭП занимают **объемы** существенно **большие** или соизмеримые с объемом остальной части всего устройства, и в основном определяют массу всей конструкции.

Структурные схемы ИП, получающих энергию от промышленной сети 50Гц

В связи с недостатками предыдущей структурной схемы применяют ИВЭП с **бестрансформаторным входом**, здесь **энергия** первичного источника (питающей сети) **преобразуется в высокую частоту** с помощью электронного инвертора, а затем **трансформируется** и **сглаживается** фильтром низкой частоты.



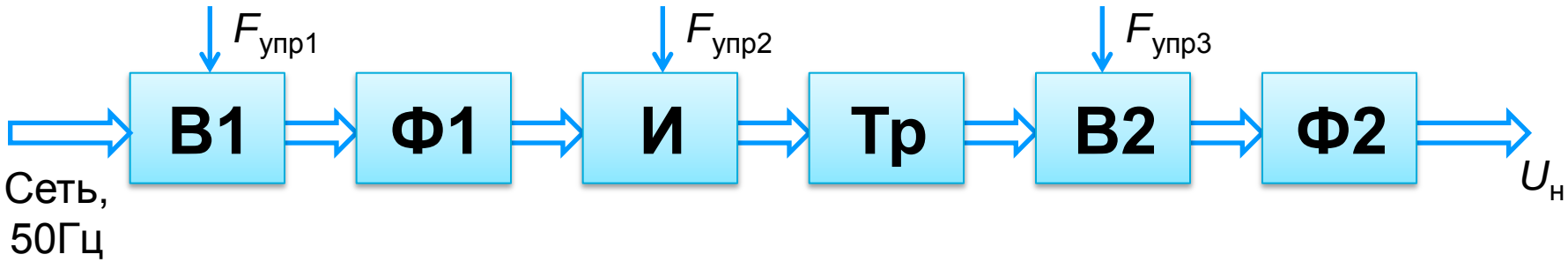
Структурная схема ИП с бестрансформаторным входом (с промежуточным преобразованием частоты)

Принцип действия по структурной схеме

При бестрансформаторном входе напряжение питающей сети выпрямляется выпрямителем **В1**, а его пульсации уменьшаются с помощью фильтра **Ф1**. Полученное постоянное напряжение преобразуется в высокочастотное переменное напряжение инвертором **И**. Далее оно трансформируется в нужные напряжения трансформатором **Тр**. Высокочастотные переменные напряжения выпрямляются выпрямителями **В2** и пульсации сглаживаются фильтрами **Ф2**.

$F_{упр1}$, $F_{упр2}$, $F_{упр3}$ – законы управления преобразователями.

В инверторе используются транзисторы (иногда тиристоры) в ключевом режиме и поэтому источники питания называют ***импульсными***. Однако в ИП с трансформаторным входом могут использоваться импульсные стабилизаторы, в которых транзисторы работают в **импульсном режиме**.



Достоинства:

- малые (ничтожные) массогабаритные показатели, вследствие работы трансформаторов на повышенных частотах (единицы – сотни кГц);
- малые номиналы конденсаторов и дросселей, => малые массогабаритные показатели (с ростом частоты номиналы *C* и *L* снижаются).

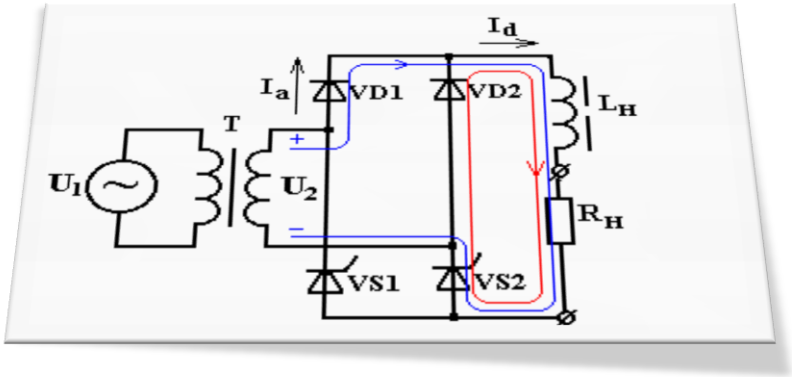
Недостатки:

- сложность;
- меньшая надёжность.

Также источники питания называют ***с промежуточным преобразованием частоты***.

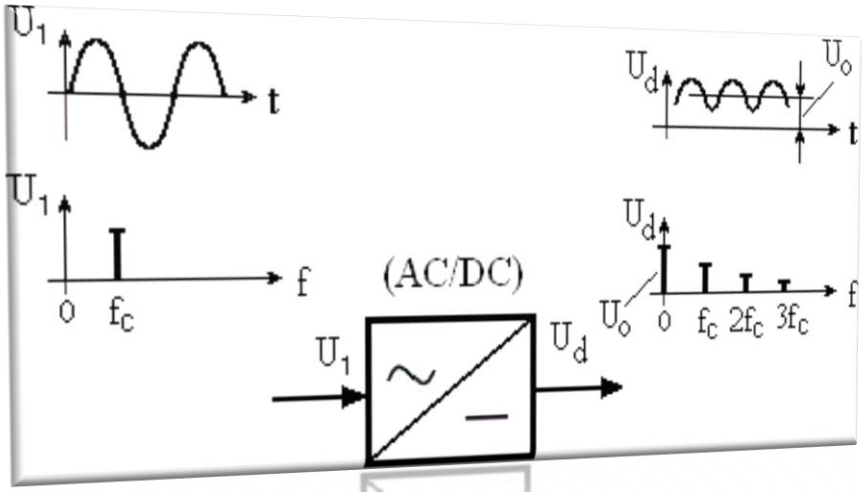
Рассматриваемые источники питания широко используются в современных устройствах электроники, в частности в компьютерах.

Перейдём к рассмотрению отдельных функциональных элементов структурных схем.



Источники вторичного электропитания

Выпрямители



Выпрямители

В

AC/DC

или

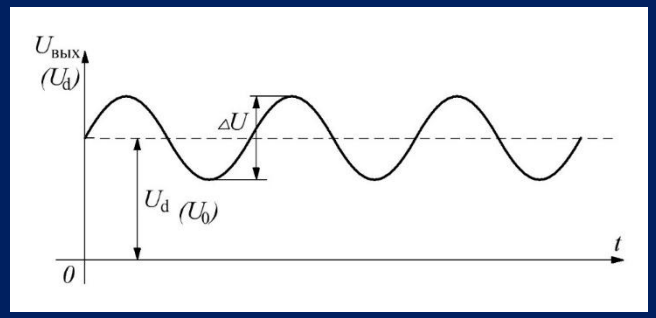
~/=

Выпрямитель – это преобразователь переменного напряжения в однополярное пульсирующее (постоянное) напряжение.

$U_{вых}$ содержит переменную (пульсации) и постоянную составляющую.

Величина пульсаций оценивается коэффициентом пульсаций:

$$K_{пл} = \frac{\Delta U}{2U_0}$$



Как правило, пульсация состоит из набора гармоник, поэтому часто $K_{пл}$ определяется по первой гармонике.

$K_{пл1} = \frac{U_{m1}}{U_0}$, где *Um1* – амплитуда 1-ой гармоники переменной составляющей выходного напряжения.

Данный метод вычисления *Кпл1* используется для упрощения последующих расчетов.

Основные показатели выпрямителей

1. Управляемость:

а) неуправляемый – в качестве вентилей используются диоды;

– невозможно регулировать выходное напряжение.

б) управляемый – в качестве вентилей полностью или частично используются транзисторы;

– регулирование Uвых осуществляется изменением угла включения вентиля (фазовая регулирование).

2. Фазность:

а) однофазные – питаются от однофазной сети ~ тока;

б) трёхфазные – от 3-х фазной сети ~ тока.

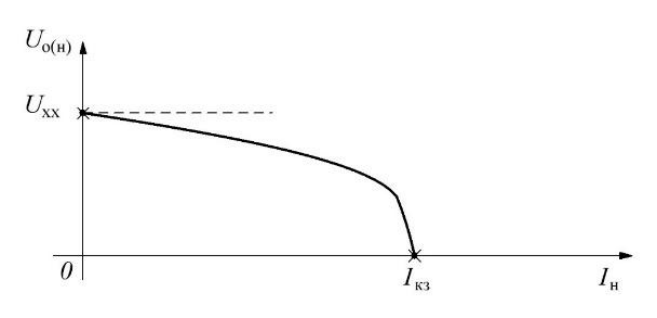
3. η – коэффициент полезного действия;

4. ϰ – коэффициент мощности;

5. $K_u = \frac{U_0}{U_m}$ - коэффициент передачи усилителя, где *Um* – амплитуда входного сетевого напряжения

6. Внешняя характеристика выпрямителя $U_{0(н)} = f(I_н)$

Если характеристика имеет существенный спад, то это говорит о мягкой внешней характеристике, в противном случае говорит о жесткой характеристике



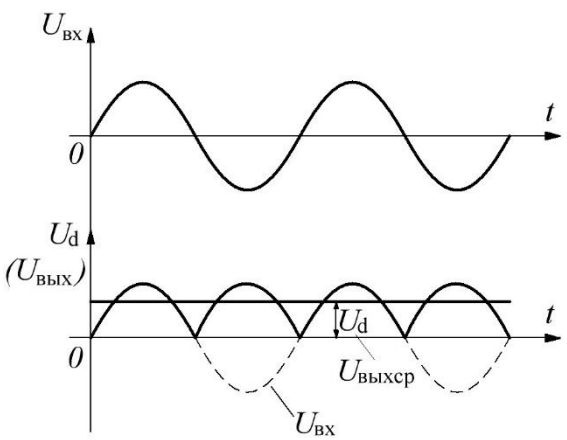
Выпрямитель – устройство, предназначенное для преобразования энергии источника переменного напряжения в постоянный ток

В нашем курсе будем рассматривать схемы выпрямителей с потребляемой нагрузкой мощностью *Рн* ≤ неск. сотен Вт, в связи с чем их относят к классу маломощных выпрямителей.

Такие выпрямители предназначены для питания постоянным током различных систем и устройств электротехники.

При указанной мощности задачу преобразования ЭЭ переменного тока в постоянный решают с помощью однофазных выпрямителей, питающихся от однофазной сети переменного тока.

Принцип выпрямления основывается на получении с помощью диодной схемы из двуполярной синусоидальной кривой напряжения однополярных полуволн напряжения



$U_{вых}$, U_d, $U_d(t)$ – кривая выпрямленного напряжения выпрямителя

$U_{выхср}$, U_d – постоянная составляющая, среднее значение выпрямленного напряжения

Кривая выпрямленного напряжения содержит как постоянную, атак и переменную (пульсирующую) составляющие.

В большинстве случае наличие переменной составляющие является нежелательным!

Устраняется переменная составляющая пропусканием через сглаживающий фильтр. Но об этом чуть позже подробнее.

Выпрямители

AC/DC converters

Выпрямитель – устройство, предназначенное для преобразования энергии источника переменного тока в постоянный ток.

В маломощных источниках питания (до нескольких сотен ватт) используют однофазные выпрямители.
В мощных источниках целесообразно применять трёхфазные выпрямители.

При проектировании выпрямителя применяются параметры, характеризующие его внутренние особенности:

А) действующее значение $U_{вх}$ входного напряжения выпрямителя;

Б) максимальное обратное напряжение $U_{обр\ макс}$ на вентиле;

В) среднее значение $I_{д\ ср}$ тока отдельного вентиля;

Г) максимальное (амплитудное) значение $I_{д\ макс}$ тока отдельного вентиля.

Значение $U_{обр\ макс}$ используется для выбора вентиля по напряжению.
Значения $I_{д\ ср}$ и $I_{д\ макс}$ необходимы для выбора вентиля по току.

Основные параметры выпрямителей

Среднее значение выходного напряжения $u_{вых}$:

$$U_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T u_{вых}(t)dt,$$

где T – период напряжения питающей сети.

Среднее значение выходного тока $i_{вых}$:

$$I_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T i_{вых}(t)dt.$$

Коэффициент пульсаций выходного напряжения:

$$K_{пл} = \frac{U_{m1г}}{U_{ср}} \cdot 100\%,$$

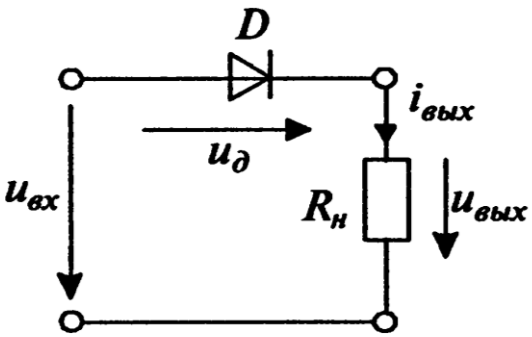
где U_m – амплитуда низшей (основной) гармоники выходного напряжения.

Данные параметры наиболее важны при использовании выпрямителей.

Однофазные неуправляемые выпрямители

Однополупериодный выпрямитель

В данном выпрямителе ток через нагрузку протекает лишь в течение полупериода входного напряжения.



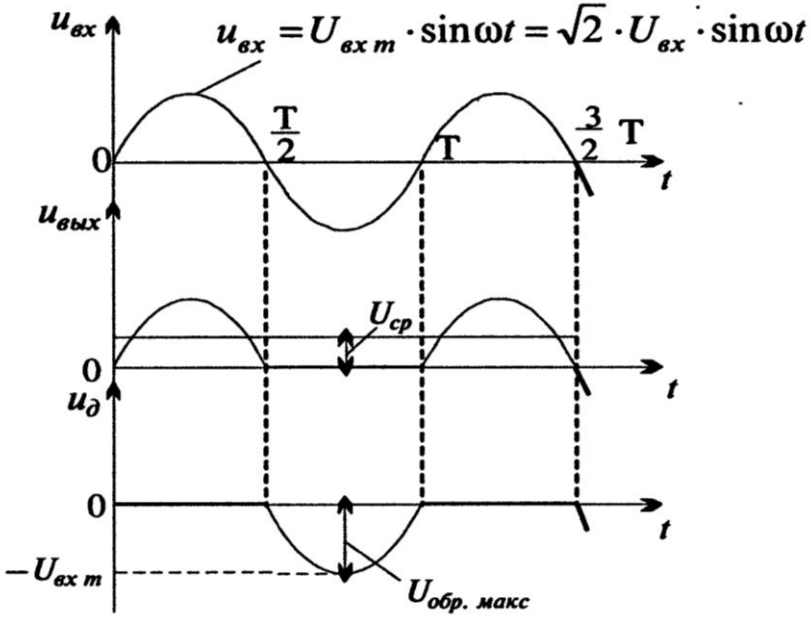
Основные параметры выпрямителя:

$$U_{ср} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{вх} \approx 0,45 \cdot U_{вх},$$

$$U_{вх} \approx 2,22 \cdot U_{ср},$$

$$I_{ср} = \frac{U_{ср}}{R_н},$$

$$K_{пл} = \frac{U_{m1г}}{U_{ср}} = \frac{U_{ср} \cdot \pi/2}{U_{ср}} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57,$$

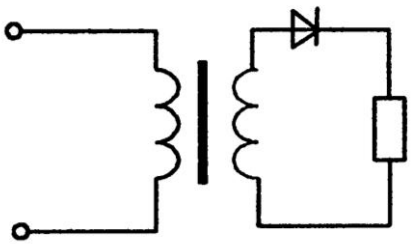


Однополупериодный выпрямитель

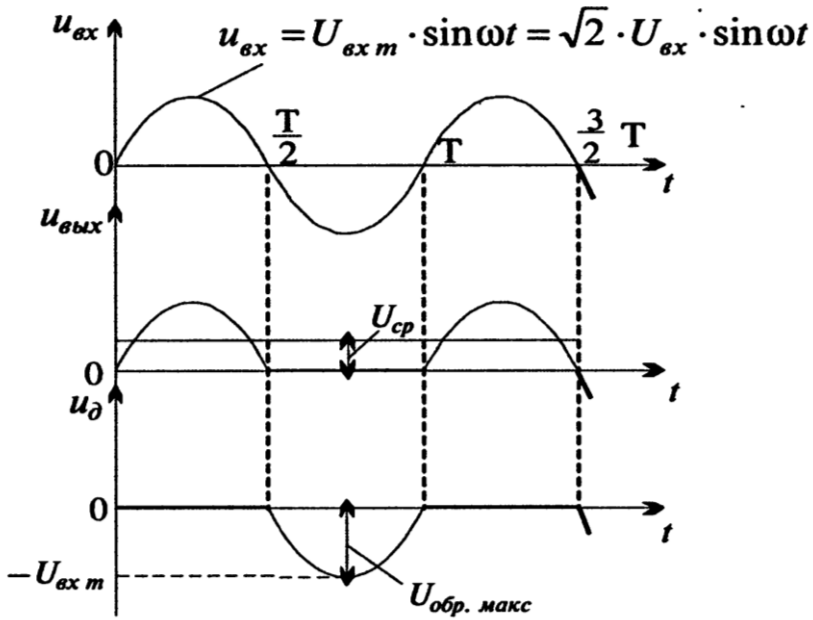
$$U_{\text{обр макс}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{вх}} = \pi \cdot U_{\text{ср}},$$

$$I_{\text{д ср}} = I_{\text{ср}},$$

$$I_{\text{д макс}} = \frac{\sqrt{2}}{R_{\text{н}}} U_{\text{вх}} = \pi \cdot I_{\text{ср}}.$$



в



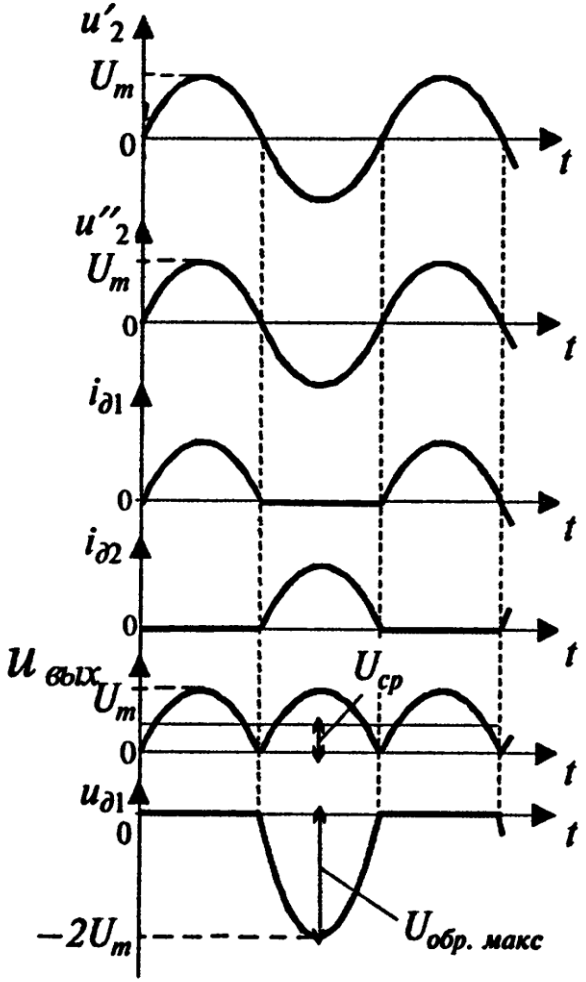
б

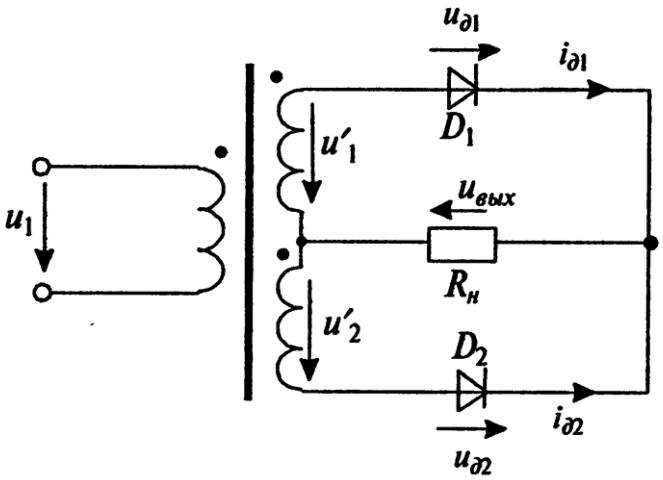
Выпрямитель ограниченно применяется в маломощных устройствах.

Недостаток схемы – протекание постоянной составляющей тока во входной цепи. Если выпрямитель питается через трансформатор (рис. *в*), то её наличие вызывает подмагничивание сердечника трансформатора, что приводит к необходимости учитывать его габаритные размеры.

Однофазные неуправляемые выпрямители

Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой





Данный выпрямитель представляет собой параллельное соединение двух однополупериодных выпрямителей и используется только с трансформатором, имеющим вывод от середины вторичной обмотки.
Диоды проводят ток поочередно, каждый в течение полупериода.

Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой

Основные параметры выпрямителя:

$$U_{ср} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,9 \cdot U_2,$$

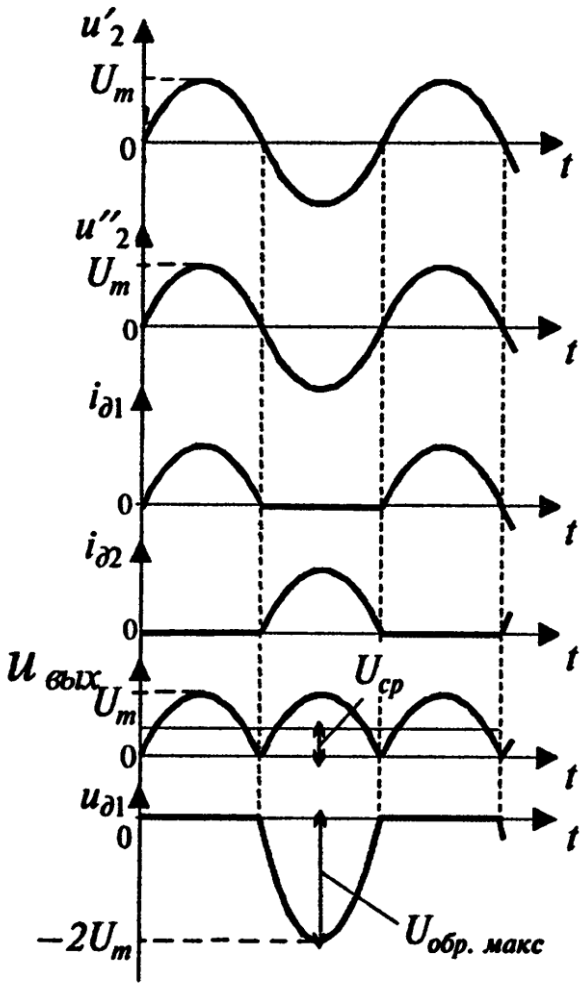
где U_2 – действующее значение напряжения каждой половины вторичной обмотки;

$$U_2 \approx 1,11 \cdot U_{ср},$$

$$I_{ср} = \frac{U_{ср}}{R_н},$$

$$K_{пл} = \frac{U_{m1г}}{U_{ср}} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{3} \approx 0,67,$$

где m – эквивалентное число фаз выпрямления (для данной схемы m = 2);



Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой

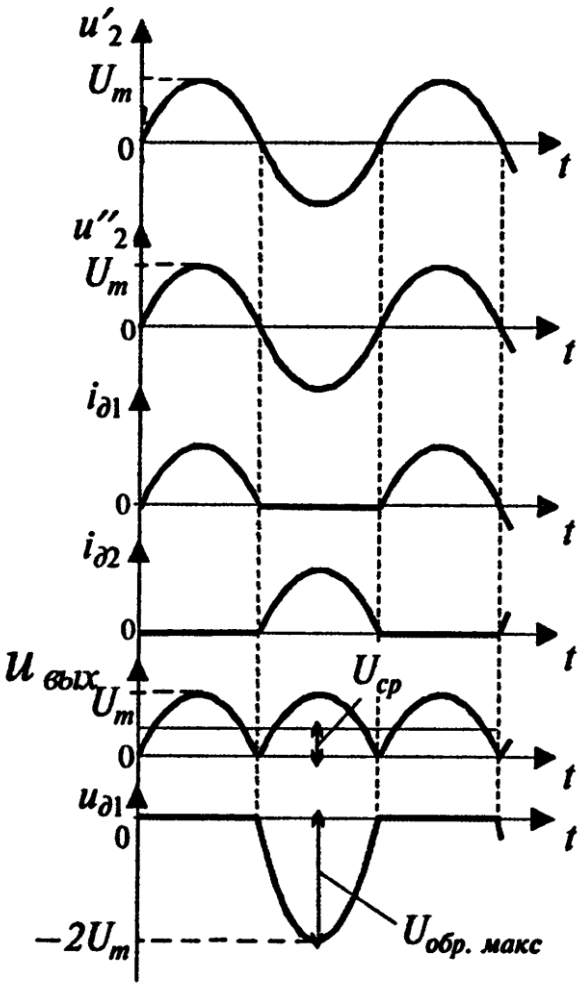
$$U_{\text{обр макс}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_2 = \pi \cdot U_{\text{ср}},$$

$$I_{\text{д ср}} = \frac{1}{2} I_{\text{ср}},$$

$$I_{\text{д макс}} = \frac{\sqrt{2}}{R_{\text{н}}} U_2 = \frac{\pi}{2} \cdot I_{\text{ср}}.$$

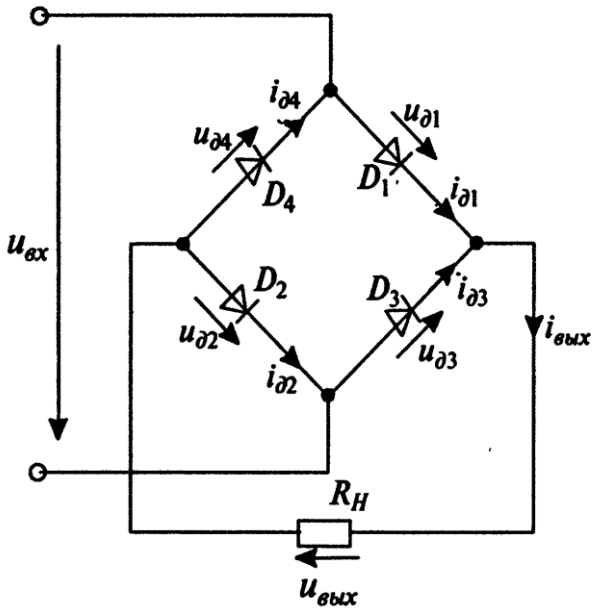
Выпрямитель характеризуется достаточно высокими технико-экономическими показателями и широко используется на практике.

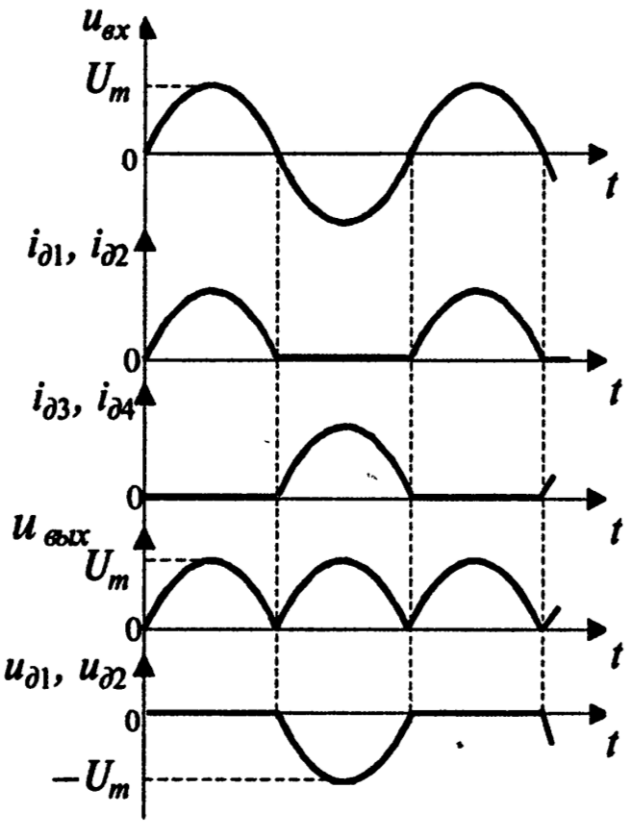
Недостаток схемы – сравнительно большое обратное напряжение прикладывается к диодам.



Однофазные неуправляемые выпрямители

Двухполупериодный мостовой выпрямитель





Наиболее совершенная схема из однофазных выпрямителей, которые могут использоваться без трансформатора, поскольку в ней наиболее рационально используются диоды.

В схеме диоды включаются и парами. Одна пара – диоды D_1 и D_2, а другая – D_3 и D_4. Если одна пара включена, в это время другая пара выключена.

Двухполупериодный мостовой выпрямитель

Основные параметры выпрямителя:

$$U_{ср} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{вх} \approx 0,9 \cdot U_{вх},$$

$$U_{вх} \approx 1,11 \cdot U_{ср},$$

$$I_{ср} = \frac{U_{ср}}{R_н},$$

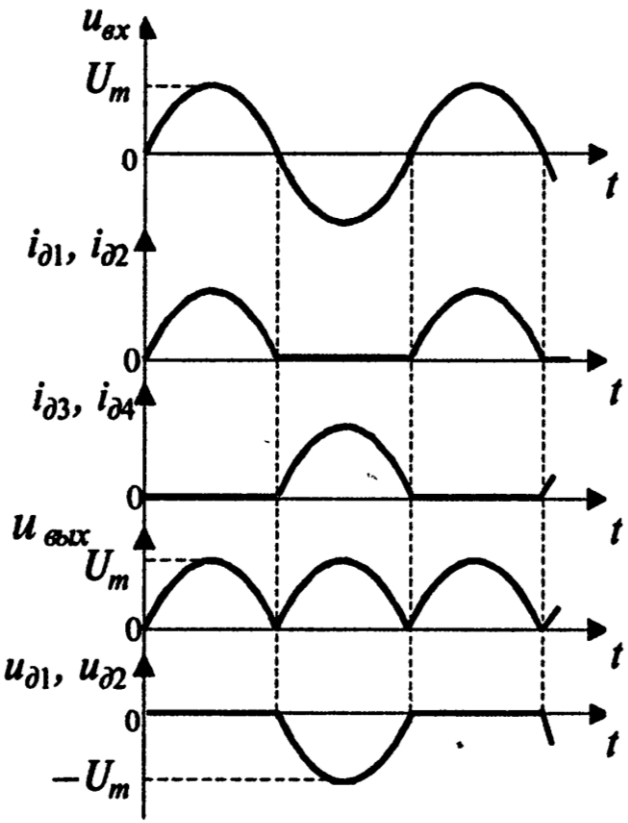
$$K_{пл} = \frac{U_{m1г}}{U_{ср}} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{3} \approx 0,67,$$

где m – эквивалентное число фаз выпрямления (для данной схемы m = 2);

$$U_{обр\ макс} = \sqrt{2} \cdot U_{вх} = \frac{\pi}{2} \cdot U_{ср},$$

$$I_{д\ ср} = \frac{1}{2} I_{ср},$$

$$I_{д\ макс} = \frac{\sqrt{2}}{R_н} U_{вх} = \frac{\pi}{2} \cdot I_{ср}.$$

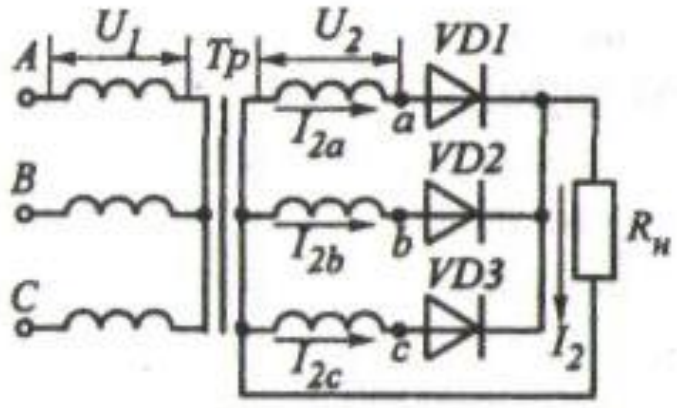


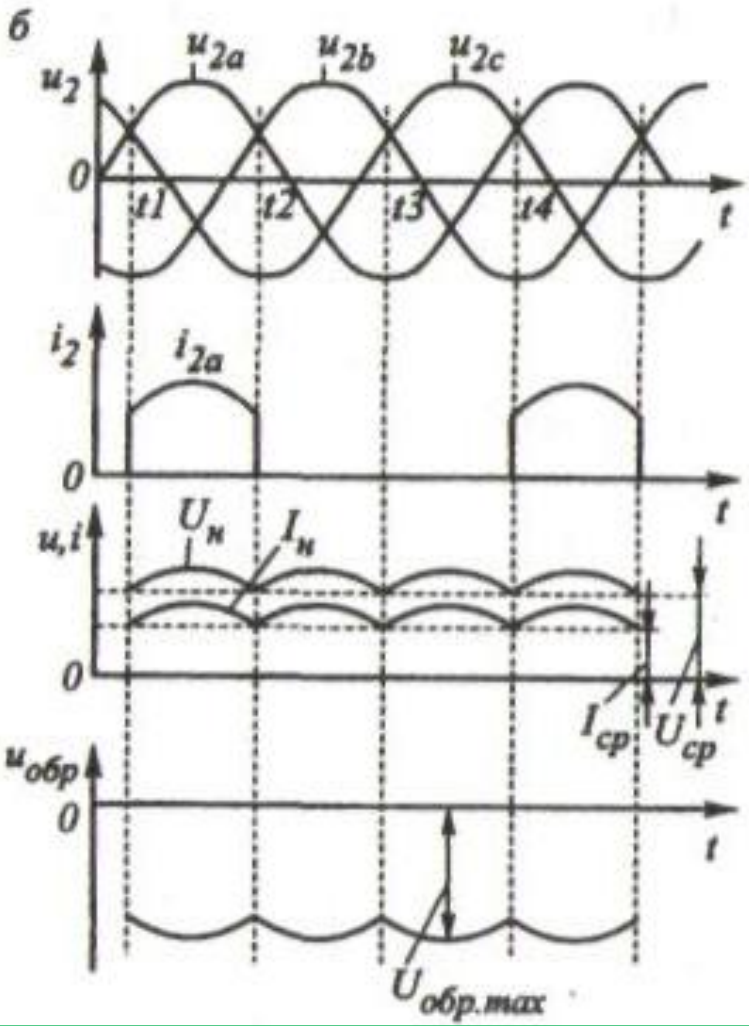
Выпрямитель характеризуется достаточно высокими технико-экономическими показателями и широко используется на практике.

Часто все четыре диода выпрямителя помещают в один корпус.

Трехфазные неуправляемые выпрямители

Трехфазный выпрямитель с нулевым выводом





Основные параметры выпрямителя:

$$U_{ср} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{2m} = 0{,}827\ U_{2m} \approx 1{,}17 U_2$$

$$I_{ср} = \frac{U_{ср}}{R_H} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U_{2m}}{R_H} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{2m} \approx 0{,}827 I_m$$

$$U_{обр.max} = \sqrt{3}\ U_{2m} \approx 2{,}1 U_{ср}$$

$$U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{3}} = 0{,}855\ U_{ср} \qquad I_2 = 0{,}48\ I_{2m} = 0{,}58\ I_{ср}$$

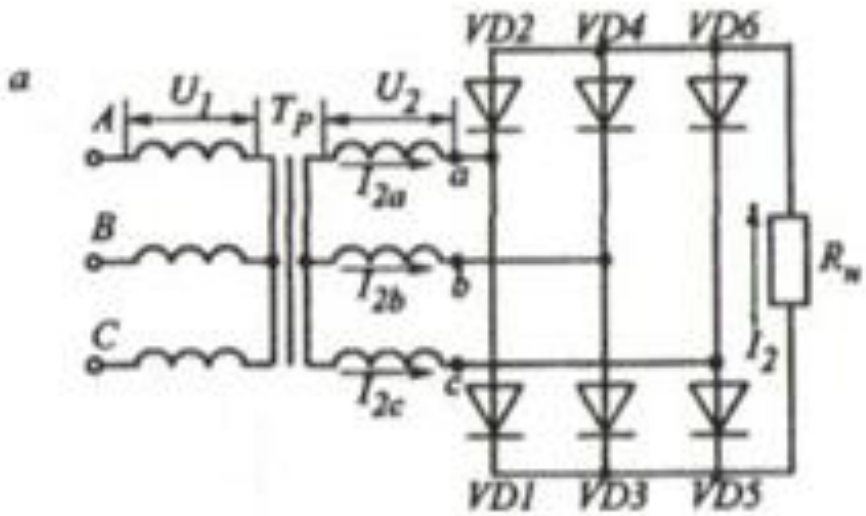
$$\boxed{K_{пл} = \frac{U_{m1г}}{U_{ср}} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{8} \approx 0{,}25,}$$

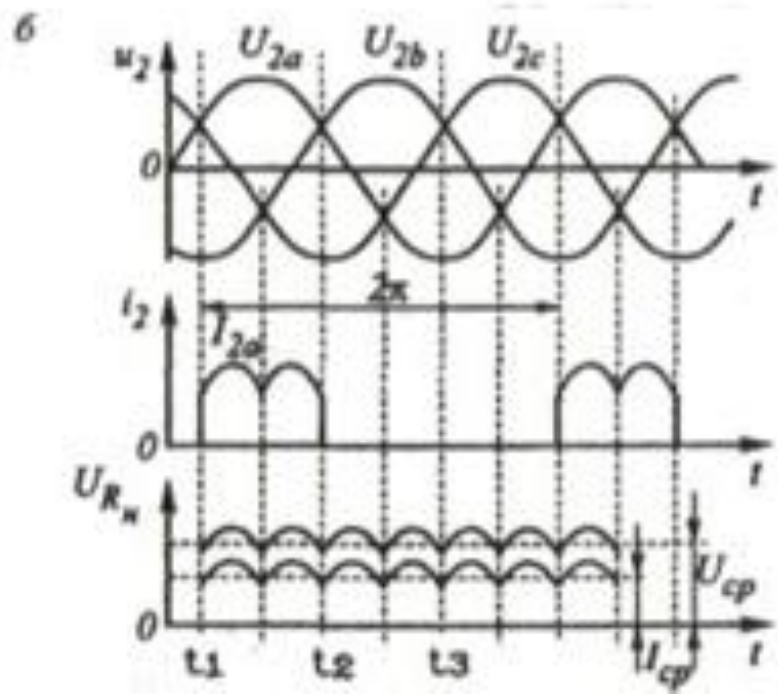
где m – эквивалентное число фаз выпрямления (для данной схемы m = 3).

Частота пульсаций в данном выпрямителе в три раза выше частоты питающей сети.

Трехфазные неуправляемые выпрямители

Трехфазный мостовой выпрямитель (схема Ларионова)





Основные параметры выпрямителя:

$$U_{ср} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{2л} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \approx 2{,}34\, U_2$$

$$U_{обр.max} = \sqrt{3} \cdot U_{2m} \approx 1{,}05\, U_{ср}$$

$$K_{пл} = \frac{U_{m1г}}{U_{ср}} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{35} \approx 0{,}057,$$

где m – эквивалентное число фаз выпрямления (для данной схемы m = 6).

Частота пульсаций в данном выпрямителе в шесть раз выше частоты питающей сети.

Коэффициент пульсаций очень мал, что позволяет в некоторых случаях не использовать выходной фильтр.

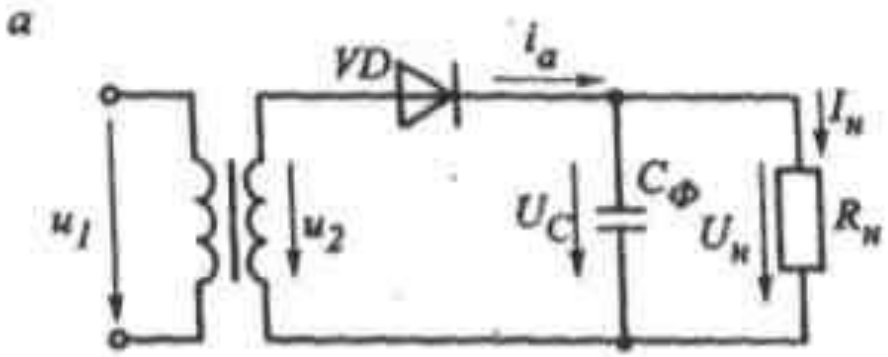
Параметры схем выпрямления

Схемы выпрямления	Параметры схемы выпрямления				
	$K_п$	$U_{обр}/U_{ср}$	$I_2/I_{ср}$	$S_{тр}/P_{ср}$	$\eta=P_{ср}/S$
Однополупериодная однофазная	1,57	3,14	1,57	3,5	0,4
Двухполупериодная с выводом от средней точки	0,0667	3,14	0,78	1,48	0,8
Однофазная мостовая	0,667	1,57	1,11	1,23	0,8
Трехфазная однополупериодная	0,25	2,09	0,58	1,35	0,97
Трехфазная мостовая	0,057	1,05	0,82	1,05	0,99

3 СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

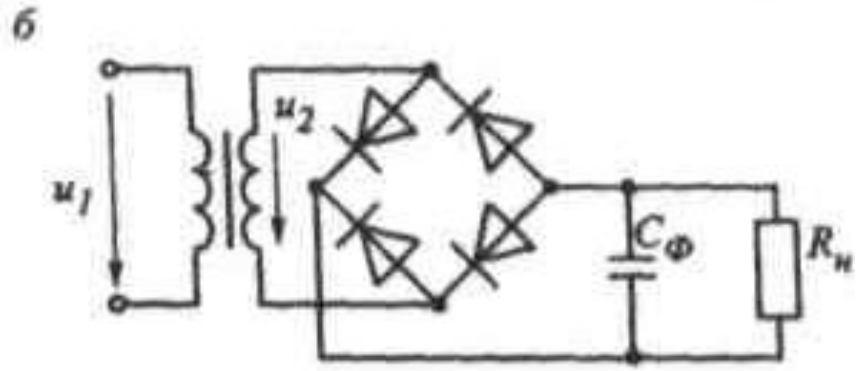
Емкостные фильтры

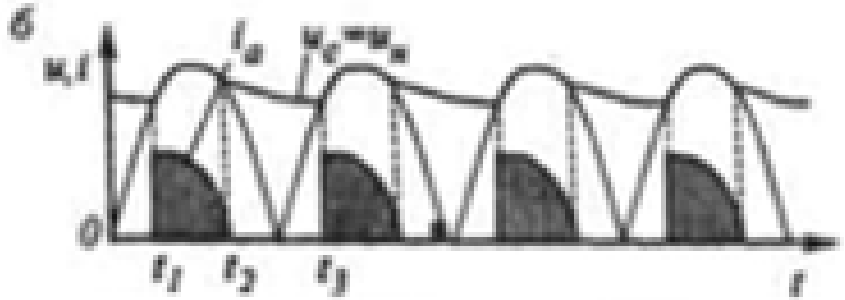
Однополупериодная схема



$$K_{пСф} = \frac{1}{2\pi f C_ф R_н}$$

Мостовая схема



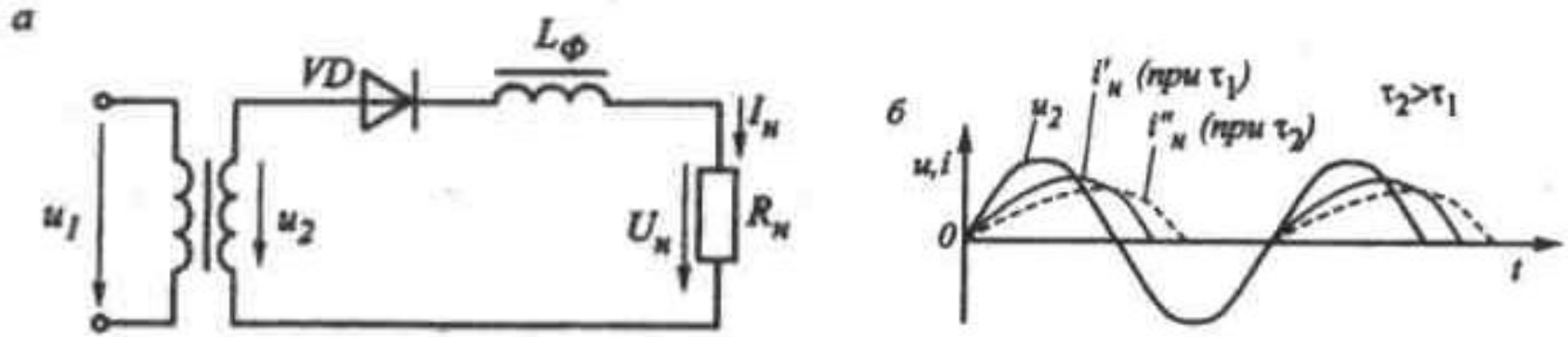


$$x_c = \frac{1}{2\pi f C_ф} \ll R_н$$

3 СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Индуктивные фильтры

с однополупериодным выпрямителем



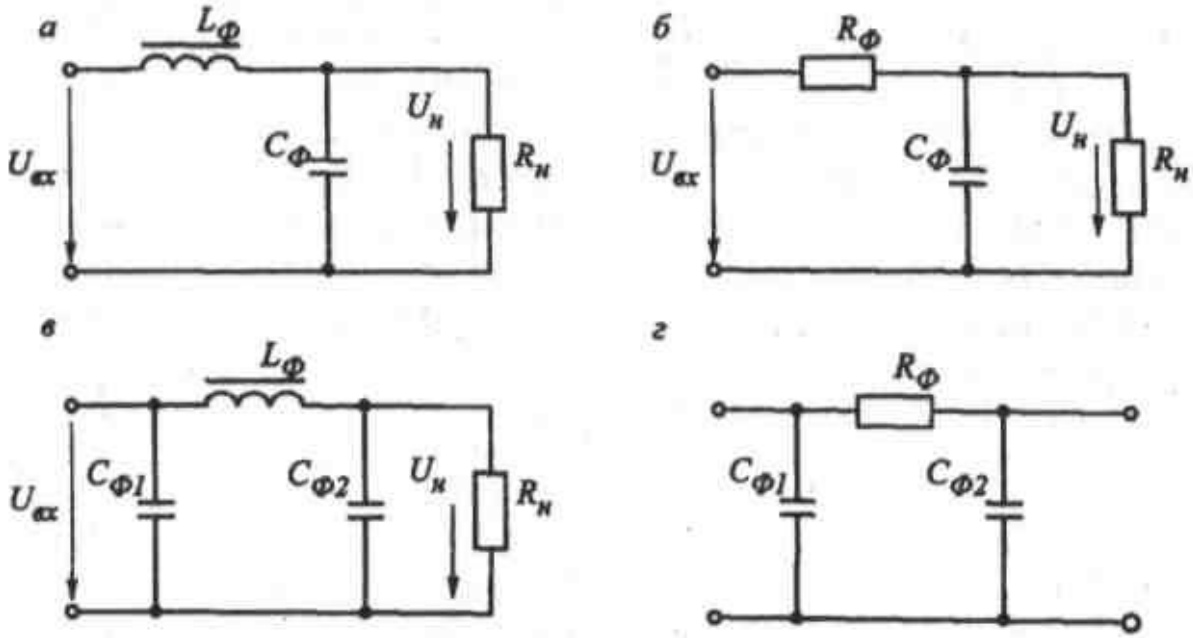
$$x_L = 2\pi f L_ф \ll R_н$$

$$K_п L_ф = 2\pi f L_ф / R_н$$

Индуктивные фильтры применяются в выпрямителях средней и большой мощнос-ти, т.е. в выпрямителях, работающих на нагрузочные устройства с большими тока-ми.

3 СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

RC- , LC - фильтры



Схемы Г-образных LC-фильтра *(а)* и RC-фильтра (б) и П-образных LC-фильтра (в) и RC-фильтра (г)

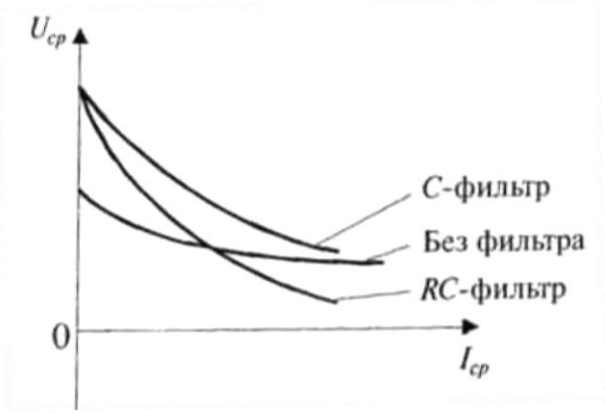
$$K_{сг} = \omega^2 L_ф C_ф$$

$$K_{сг} = (0{,}5 \div 0{,}9) 2\pi f R_ф C_ф$$

$$L_ф = \frac{K_{сг}}{(2\pi f_{1г})^2 C_ф}$$

$$R_{вых} = \left| \frac{dU_{ср}}{dI_{ср}} \right|_{I_{ср} - \text{заданный}}$$

$$K_{сг} \approx K_{сг.Cф} \cdot K_{сг.г}$$



Сглаживающие фильтры

Кривая выпрямленного напряжения содержит: постоянную составляющую и переменную (пульсирующую) составляющую, которая определяется разностью напряжений:

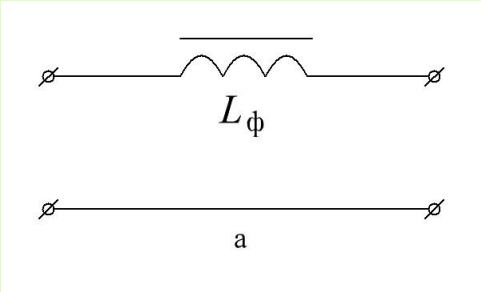
$$U_{вых}(t) - U_{выхср}$$

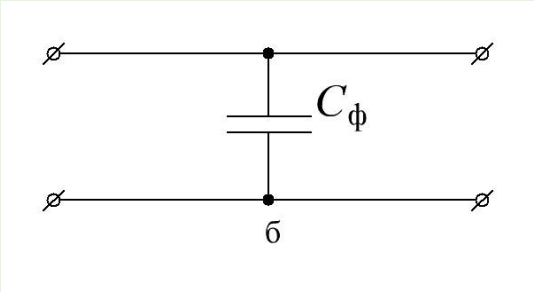
Наличие переменной составляющей в большинстве случаев недопустимо! Поэтому осуществляют фильтрацию выпрямленного напряжения с помощью сглаживающих фильтров.

Сглаживающие фильтры выполняют на основе реактивных элементов – дросселей и конденсаторов, которые оказывают соответственно большое и малое сопротивления переменному тока и наоборот – для постоянного тока.

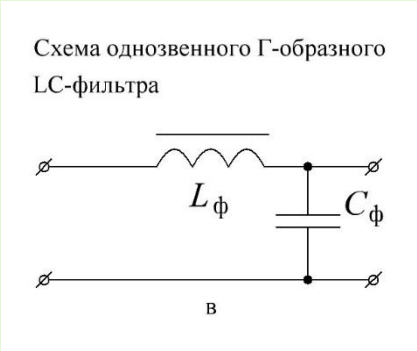
Указанные свойства этих элементов используют при построении простейших сглаживающих фильтров: сглаживающий дроссель включают последовательно с нагрузкой, а конденсатор – параллельно ей.

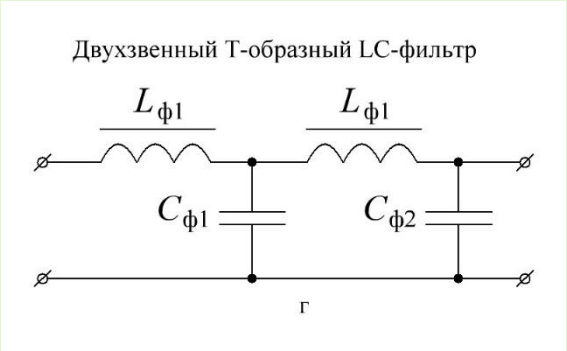
На рисунках представлены схемы простейших одноэлементных сглаживающих фильтров.





На рисунке приведены:





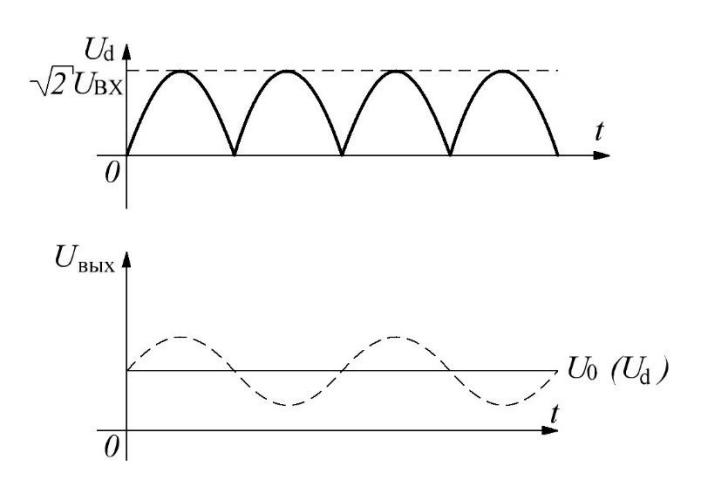
Сглаживающий фильтр является нагрузкой для выпрямителя, поэтому наличие сглаживающего фильтра существенным образом влияет на режим работы выпрямителя и его элементов. Существенным при этом является характер входной цепи сглаживающего фильтра, определяющий совместно с внешней нагрузкой вид нагрузки выпрямителя. Так для а, в, г нагрузка выпрямителя носит активно-индуктивный характер, а для фильтра рис. Б – носит активно-емкостной характер.

Величины коэффициентов пульсаций выпрямленных напряжений значительно повышает те значения, которые допустимы для напряжений питания различной аппаратуры.

Например:

Для питания выходных усилительных каскадов возможно лишь постоянным напряжением с коэффициентом пульсации, не превышающим 10^{-4}...10^{-5}, а для выходных каскадов измерительных устройства – 10^{-6}...10^{-7}.

Как видно из рис. Выпрямленные напряжение пульсирует. Его мгновенные значения $U_{вых}$ изменяются в течение полупериода от максимального значения $\sqrt{2}U_{вх}$ до нуля.



$U_{вых}$ содержит постоянную $U_0(U_d)$ и переменную составляющие. Переменная составляющая представляет собой сумму гармонических составляющих.

Разложение в ряд Фурье кривой $U_{вых}$ позволяет определить амплитуду высших гармоник:

$$U_{d\nu m} = \frac{2U_d}{(\nu \cdot m)^2 - 1}$$ (1) (для каждого случая m=2)

где ν=1,2,3… - номера гармоник;
m – эквивалентное число фаз выпрямителя (или пульсность – произведение числа фаз на число выпрямленных полупериодов)

Для оценки качества выпрямленного напряжения пользуются коэффициентов пульсации $K_{ПЛv}$:

$$K_{плv} = \frac{U_{mv}}{U_d}$$

Коэффициент пульсации обычно определяют по амплитуде первой (основной) гармоники (v=1), как наибольшей из всех остальных и наиболее трудно поддающейся фильтрации:

$$K_{пл1} = \frac{U_{d1m}}{U_d} = \frac{2}{m^2 - 1} \qquad (2)$$

В данном случае частота пульсации: $f_П(1) = 2f_c = 100$ Гц, где $f_c = 50$ Гц – сетевая наводка.

При m=2 коэффициент пульсации первой гармоники:

$K_{пл1} = 0,67$, то есть амплитуда первой гармоники в данном случае составляет 67% от $U_{вх}$

Используя формулы (1) и (2), можно рассчитать значения $K_{ПЛ}$ для любых схем выпрямителей (кроме однополупериодного)

Сглаживающая способность фильтров характеризуется коэффициентом сглаживания $K_{СГЛ}$, который определяется отношением коэффициента пульсации на входе фильтра $K_{ПЛвх}$ к коэффициенту пульсации на его выходе $K_{ПЛвых}$:

$$K_{СГЛ} = \frac{K_{ПЛвх}}{K_{ПЛвых}}$$

Расчет КСГЛ по первой (основной) гармонике производят по формуле:

$$K_{СГЛ1} = \frac{K_{ПЛвх1}}{K_{ПЛвых1}} = \frac{U_{d1m}}{U_d} \Big/ \frac{U_{dн1m}}{U_{dн}} \qquad (3)$$

где U_{d1m}, $U_{dн1m}$ – амплитуды напряжений первых гармоник пульсаций соответственно на входе и выходе фильтра;

U_d (U_0), $U_{dн1m}$ $(U_{0н})$ – постоянные составляющие напряжения на входе и выходе фильтра.

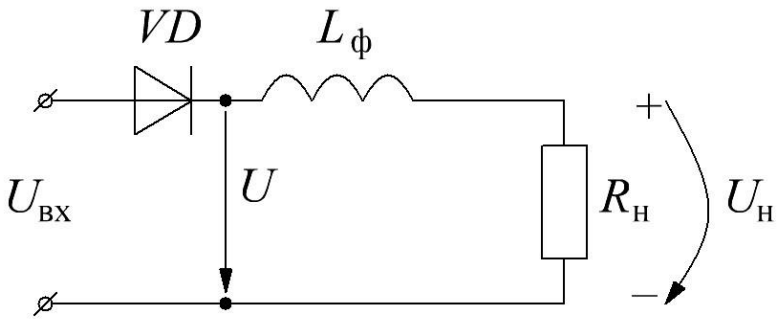
Пренебрегая падением напряжения по постоянке в фильтре, $U_{dн} = U_d$ => выражение (3) можно переписать в виде:

$$K_{СГЛ1} = \frac{U_{d1m}}{\cancel{U_d}} \Big/ \frac{U_{dн1m}}{\cancel{U_{dн}}} = \frac{U_{d1m}}{U_{dн1m}} \qquad (4)$$

Индуктивные фильтры

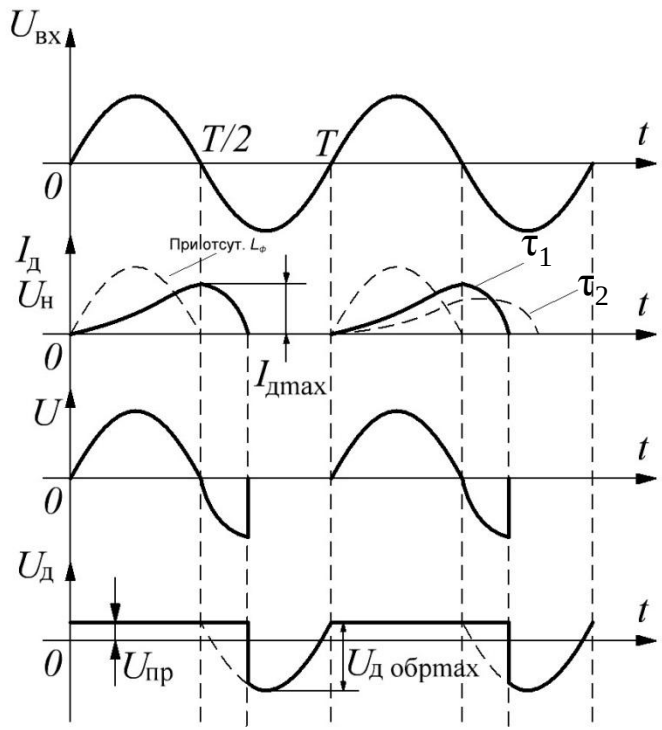
Применение индуктивных фильтров эффективно при **больших токах нагрузки** (т. е. при больших мощностях).

Индуктивный фильтр представляет собой дроссель $L_ф$, включенный последовательно с нагрузкой. Однако $L_ф$ может являться током нагрузки, т. е. $L_ф = L_н$.



$$\tau = \frac{L_ф}{R_н}$$

$$\tau_2 > \tau_1$$



Получим выражение для коэффициента сглаживания простейшего индуктивного фильтра.

Индуктивные фильтры

U_{d1m} и $U_{dн1m}$ определим, как падение напряжения от протекания первой (основной) гармоники тока пульсации $I_{п(1)}$:

$$U_{dн1m} = I_{п(1)} \cdot R_н, (5)$$

$$U_{d1m} = I_{п(1)} \cdot \sqrt{(\omega_{п(1)} \cdot L_ф)^2 + R_н^{\ 2}} = I_{п(1)} \cdot Z_{вх}, (6)$$

$$\frac{U_{d1m}}{U_{dн1m}} = K_{сгл1} = \frac{\sqrt{(\omega_{п(1)} \cdot L_ф)^2 + R_н^{\ 2}}}{R_н} (7) \Rightarrow \left| \text{обычно } \omega_{п(1)} \cdot L_ф \gg R_н \right| \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{тогда пренебрегаем.}$$

$$K_{сгл1} = \frac{\omega_{п(1)} \cdot L_ф}{R_н} = \frac{2\pi \cdot mfc \cdot L_ф}{R_н} (8)$$

Анализ формулы:

Из выражения (8) следует, что сглаживающая способность фильтра повышается с увеличением числа фаз выпрямления m и индуктивности $L_ф$ и уменьшении $R_н$.

$$K_{сгл1} \uparrow \text{при } m \uparrow, f_c \uparrow, L_ф \uparrow, R_н \downarrow$$

Индуктивные фильтры

$$K_{\text{сгл1}} \uparrow \text{при } m \uparrow, f_c \uparrow, L_{\text{ф}} \uparrow, R_{\text{н}} \downarrow$$

Отсюда следует, что с увеличением $P_н$ (т.е. $R_н \downarrow \Rightarrow K_{\text{сгл1}}\uparrow$), то использование простейшего индуктивного фильтра эффективно **в выпрямителях средней и большой мощности.**

Таким образом в маломощных выпрямителях применение простейшего индуктивного фильтра менее эффективно, поскольку $R_{\text{н}}$ здесь относительно велико.

Для получения необходимого $K_{\text{сгл}}$ пришлось бы с целью выполнения условия

$$\omega_{\text{п}(1)} \cdot L_{\text{ф}} \gg R_{\text{н}}$$

значительно завышать индуктивность сглаживающего фильтра

Поэтому в выпрямителях небольшой мощности эту задачу решают не увеличением $L_{\text{ф}}$, а уменьшением сопротивления цепи нагрузки переменному току путем включения параллельно нагрузке конденсатора фильтра, т. е. использование Г-образного *LC*-фильтра

Индуктивные фильтры

Г-образный *LC*-фильтр

Включение конденсатора создает самостоятельную цепь протекания переменной составляющей тока, обусловленную переменной составляющей выходного напряжения, минуя цепь нагрузки (для уменьшения сопротивления нагрузки по переменной составляющей).

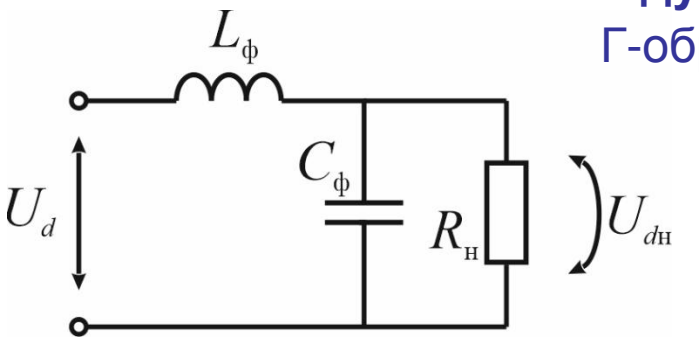
Уменьшение пульсации напряжения $U_{вых}$ достигается за счет того, что **сопротивление конденсатора переменному току мало**, **падение напряжения** на конденсаторе от переменной составляющей тока **также мало** ⇒ напряжение пульсации $\boldsymbol{U_{вых}}$ **меньше**.

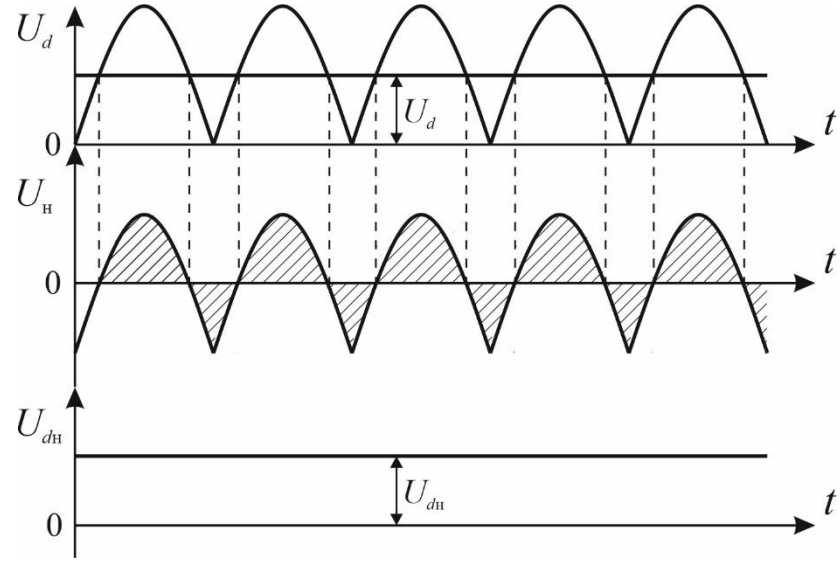
Таким образом в *LC*-фильтре:

- Сглаживающий дроссель уменьшает переменную составляющую $U_{вых}$ (задерживает);
- Конденсатор эффективно разделяет переменную и постоянную составляющие в выходной цепи выпрямителя – через конденсатор замыкается переменная составляющая тока нагрузки.

Индуктивные фильтры

Г-образный *LC*-фильтр





Это явление наглядно демонстрирует временные диаграммы, построенные в предположении $L_ф \to \infty$; $C \to \infty$.

Расчет коэффициента сглаживания $K_{сгл1}$ Г-образного *LC*-фильтра проводят по выражению (4).

Соотношения, аналогичные (5), (7) с учетом неравенства

$$x_{C_п} = \frac{1}{\omega_{п(1)} \cdot C_ф} \ll R_н$$

имеет вид:

$$U_{dн1m} = I_{п(1)} \cdot \frac{1}{\omega_{п(1)} \cdot C_ф}, (9)$$

$$U_{d1m} = I_{п(1)} \cdot \left(\omega_{п(1)} \cdot L_ф - \frac{1}{\omega_{п(1)} \cdot C_ф} \right) = Z_{вх\,ф}. (10)$$

$$K_{сгл1} = \frac{\omega_{п(1)} \cdot L_ф - \dfrac{1}{\omega_{п(1)} \cdot C_ф}}{\dfrac{1}{\omega_{п(1)} \cdot C_ф}} = \omega_{п(1)}^2 \cdot L_ф \cdot C_ф - 1, (11)$$

или в выражении через f_c:

$$K_{сгл1} = \left(2\pi \cdot m \cdot f_c\right)^2 \cdot L_ф \cdot C_ф - 1, (11a)$$

Индуктивные фильтры

Г-образный *LC*-фильтр

Для однофазных двухполупериодных выпрямителей $m = 2$, в связи с чем расчет $K_{сгл1}$ здесь проводят по формуле

$$K_{сгл1} = \left(4\pi \cdot f_c\right)^2 \cdot L_ф \cdot C_ф - 1, (11б)$$

Расчет $L_ф$ и $C_ф$ фильтра производят из необходимости, получения требуемого $K_{сгл1}$ (задаются $K_{сгл1}$). Из выражения (11*б*) получаем расчетное соотношение для однофазных выпрямителей ($m = 2$):

$$L_ф \cdot C_ф = \frac{K_{сгл1} + 1}{\left(4\pi \cdot f_c\right)^2}, \quad (12)$$

Основными критериями правильного выбора величин $L_ф$ и $C_ф$ являются массо-габаритные и стоимостные показатели фильтра.

На выходное сопротивление $Z_{вых}$ и постоянную времени τ сглаживающего фильтра обращают особое внимание, когда нагрузка потребляет от выпрямителя ток, содержащий не только постоянную, но и переменную составляющую (усилители, генераторы, импульсные формирователи и т.д.).

Большое сопротивление $Z_{вых}$ сглаживающего фильтра может привести к нарушению нормальной работы указанных устройств (самовозбуждению питаемых систем, искажению формы их сигналов).

Индуктивные фильтры

Г-образный *LC*-фильтр

При проектировании *LC*-фильтров необходимо избегать явления резонанса. Для этого необходимо, чтобы собственная частота фильтра

$$\omega_{ф} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

была меньше частоты основной гармоники пульсации $\omega_{п(1)}$ и не кратна ей.

При расчете фильтра обычно является достаточным обеспечение условий:

$$\omega_{п(1)} \cdot L = (5 \div 10) \cdot R_{н}, (13)$$

$$\frac{1}{\omega_{п(1)} \cdot C} = (0{,}1 \div 0{,}2) \cdot R_{н}, (13a)$$

Для получения лучшего сглаживания выпрямленного напряжения применяют многогозвенные Г-образные *LC*-фильтры, состоящие из 2-,3- и более отдельных фильтров. Их применяют при S_1 >100.

Расчет производят по суммарному коэффициенту сглаживания с учетом коэффициента сглаживания входящих звеньев $S_{1(1)}$, $S_{1(2)}$, $S_{1(3)}$…

$K_{сгл1(1)}$, $K_{сгл1(2)}$, $K_{сгл1(3)}$…

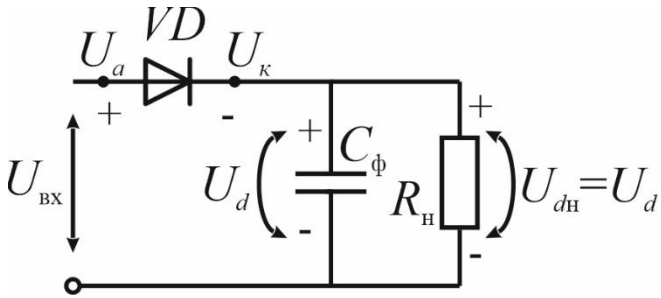
$$S_1 = S_{1(1)} \cdot S_{1(2)} \cdot S_{1(3)} ..., (14)$$

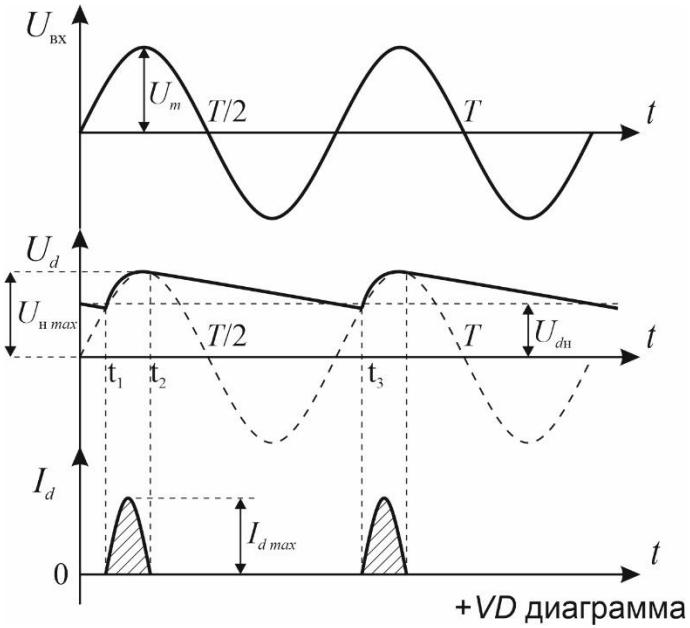
$$K_{сгл1} = K_{сгл1(1)} \cdot K_{сгл1(2)} \cdot K_{сгл1(3)} ...$$

Емкостные фильтры

Емкостной фильтр – это фильтр, относящийся к однозвенным фильтрам. Представляет собой конденсатор $C_ф$, подключенный параллельно нагрузочному резистору $R_н$.

Работа емкостного фильтра основана на различных постоянных времени цепей зарядки и разрядки конденсатора.





+*VD* диаграмма

На интервале (t_1 - t_2) $U_a > U_k$ (т.е. $U_{вх} > U_{dн}$) диод открыт и конденсатор $C_ф$ заряжается через малое внутреннее сопротивление r_i выпрямителя почти до амплитудного значения выпрямленного напряжения с постоянной времени $\tau_{зар} = r_i \cdot C_ф$

При $U_{вх} < U_{Cф}$ ($U_a > U_k$ на интервале $t_2 – t_3$) конденсатор разряжается через $R_н$ с постоянной времени $\tau_{раз} = R_н \cdot C_ф$. Так как $R_н \gg r_i$, то $\tau_{раз} \gg \tau_{зар}$, и разрядка конденсатора проходит более медленно, чем его зарядка.

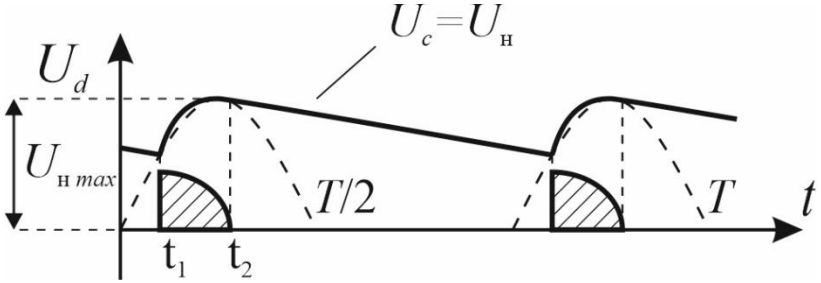
В результате амплитуда пульсаций выпрямленного напряжения при наличии конденсатора $C_ф$ оказывается значительно меньше, чем без такого конденсатора.

Включение конденсатора параллельно $R_н$ изменяет режим работы выпрямителя по сравнению с работой при чисто активной и активно-индуктивной нагрузках.

Поведение схемы, обусловленное процессами заряда и разряда конденсатора, характеризуется импульсным режимом её работы.

Емкостные фильтры

В идеальном случае, когда можно пренебречь r_i и падением на диодах (сопротивлением диодов) ток заряда конденсатора (он же ток диода) имеет следующий вид:



Ток конденсатора меняется скачком (в момент t_1). Однако наличие r_i и потерь в диодах приводит к плавному нарастанию тока диода.

Кривая напряжения U_d отличается от аналогичной кривой при чисто активной нагрузке. Наличие конденсатора на VD:

$$U_{VD} = U_a - U_k = U_{вх} - U_{dн} = \text{const}$$

При подключении $C_ф$ параллельно $R_н$ выпрямитель приобретает (работает на) активно-емкостную нагрузку. Делает её сглаженной.

При постоянной времени разряда:

$$\tau_{разр} = C_ф \cdot R_н = (4 \div 8) / f_c$$

коэффициент пульсации выходного напряжения не превышает 2 ÷ 4%.

Его расчет проводят по формуле:

$$q_1 = \frac{1}{2\pi \cdot f_c \cdot \tau}$$

или

$$q_1 = \frac{1}{2\pi \cdot f_c \cdot C_ф \cdot R_н} \Rightarrow C_ф = \frac{1}{2\pi \cdot f_c \cdot R_н \cdot K_{пл1}}$$

Емкостные фильтры

Для лучшего сглаживания X_c должно быть значительно меньше активного сопротивления нагрузки

$$X_C \ll R_н,$$

$$\text{т.е. } X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f_с \cdot C_ф} \ll R_н$$

При использовании емкостного фильтра необходимо учитывать влияние на коэффициент пульсации сопротивления $R_н$.

Поскольку эффективность фильтра повышается с увеличением $R_н$ (см. формулу), его целесообразно применять при мощности нагрузки **не более нескольких десятков ватт.**

Внешние характеристики маломощного выпрямителя однофазного тока

Рассмотрение принципа действия и режимов работы маломощных выпрямителей однофазного тока проводится в предположении, что активные сопротивления обмоток трансформатора, подводимых проводов, сглаживающего дросселя, а также падения на диодах равны нулю! В связи с этим приведенные сопротивления следует считать приближенными для реальных схем, поскольку вследствие падений напряжений на элементах от протекания токов реальное среднее значение выпрямленного напряжения U_d получается меньше и уменьшается с ростом тока нагрузки I_d. Это явление отражает внешняя характеристика выпрямителя – зависимость

$$U_d = f(I_d)$$

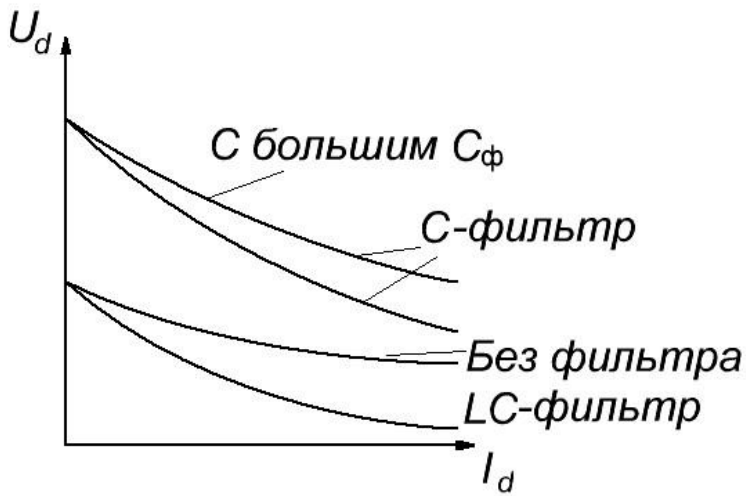
Полученные выше выражения следует считать приближенными.

В реальной схеме на величину выпрямленного напряжения U_d влияют:

- Активное сопротивление обмоток трансформатора
- Сопротивления подводимых проводов
- Активное сопротивление сглаживающего дросселя
- Падения напряжения на диодах

Под действием протекающего тока на них падает напряжение, что приводит к уменьшению реального среднего значения выпрямленного напряжения.

Тенденция: чем больше ток $I_н$ нагрузки, тем меньше U_d.



Рассмотрим типичные внешние характеристики, которые получают, изменяя сопротивление нагрузки, подключенное к выходу фильтра.

Наклон внешней характеристики при том или ином токе I_d характеризуют выходным сопротивлением $R_{вых}$, которое определяется следующим выражением:

$$R_{вых} = \left|\frac{\Delta U_d}{\Delta I_d}\right|, \text{ по аналогии с } RC\text{-усилителем на транзисторе}$$

$$I_d = const - \text{задан.}$$

Чем меньше величина $R_{вых}$, тем меньше выходное напряжение зависит от входного тока, что обычно и требуется.

Как видно из рисунка, *LC*-фильтр характеризуется повышенным выходным сопротивлением, вследствие большего падения напряжения на активном сопротивлении дросселя фильтра.

В настоящее время все чаще стали применяться электрические фильтры, в которых вместо индуктивных дросселей включают транзисторы. Такая замена позволяет избавиться от переходных процессов, отрицательно влияющих на работу нагрузки и самого выпрямителя, при этом снижаются габариты, масса и стоимость выпрямителя.