

**ГЛАВА 3**  
**ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ: ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Составитель:  
к.т.н., доцент кафедры РЛ1  
Родин М.В.

Москва – 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>3.1 Введение.....</b>	<b>3</b>
<b>3.2 Основные характеристики и показатели качества.....</b>	<b>4</b>
<b>3.3 Классификация источников электропитания .....</b>	<b>10</b>
<b>3.4 Нестабилизирующие источники электропитания .....</b>	<b>13</b>
<b>3.5 Стабилизирующие источники электропитания .....</b>	<b>16</b>
3.5.1 Общие сведения о стабилизаторах напряжения (тока) .....	–
3.5.2 Параметрические стабилизаторы напряжения (тока) .....	29
3.5.3 Компенсационные стабилизаторы напряжения (тока).....	41
3.5.3.1 Непрерывного действия .....	–
3.5.3.2 Импульсного действия .....	51
<b>3.6 Сравнение линейных и импульсных источников электропитания .....</b>	<b>62</b>
<b>3.7 Устройства гарантированного и бесперебойного электропитания .....</b>	<b>66</b>
<b>3.8 Беспроводные источники электропитания .....</b>	<b>75</b>
<b>Контрольные вопросы и задачи .....</b>	<b>84</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>85</b>

### 3.1 Введение

Источники электропитания (ИЭП) являются неотъемлемой составной частью радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), определяющей её работоспособность. Они преобразуют электроэнергию, поступающую от первичных источников, в электроэнергию требуемого вида и качества, потребляемую тем или иным узлом РЭА.

Структура любого ИЭП может быть представлена в виде, приведенном на рисунке 3.1.

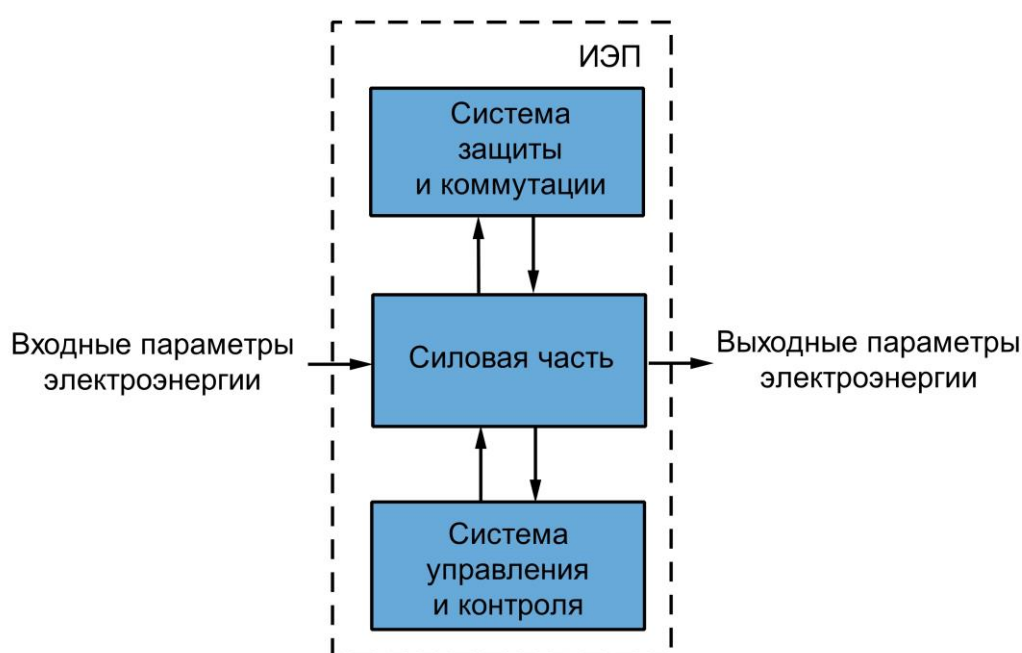


Рисунок 3.1 – Структура типового ИЭП

В любом ИЭП, как правило, можно выделить три составляющие (рисунок 3.1):

- силовую часть, в которой осуществляются все основные энергетические преобразования и передача энергии от первичного источника в нагрузку;
- систему управления (СУ), в которой формируются сигналы управления работой элементов силовой части;
- систему защиты и коммутации, которая позволяет сохранить работоспособность ИЭП как в штатном режиме, так и при возникновении

различных нестандартных режимов (короткого замыкания в нагрузке, её внезапного отключения, превышения входного напряжения, резкого повышения температуры окружающей среды и т. д.).

Поскольку через силовую часть ИЭП осуществляется основная энергопередача, то ее элементы (активные регулирующие – транзисторы или тиристоры; энергоёмкие элементы – трансформаторы, дроссели и конденсаторы сглаживающих фильтров) имеют относительно большую установленную мощность и потому определяют габариты всего ИЭП.

В СУ происходит информационная обработка сигналов. Поэтому выделяющиеся в её элементах мощности и, следовательно, габариты значительно меньше, чем в силовой части.

В общем случае ИЭП должен отвечать следующим основным техническим требованиям:

- обеспечивать РЭА электрической энергией того или иного вида и качества, удовлетворяющего ее;
- обеспечивать требуемые параметры надёжности подачи электрической энергии, удовлетворяющие желаемой надёжности работы РЭА (ни одна РЭА не может быть надёжнее её ИЭП);
- обладать высокими энергетическими характеристиками;
- проектироваться с максимальным использованием типовых унифицированных компонентов и быть экономичным в эксплуатации.

### 3.2 Основные характеристики и показатели качества

Основными характеристиками ИЭП являются:

1. Номинальные выходные напряжения и токи.
2. Нестабильность выходных напряжений в процессе эксплуатации

$$\delta U = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\% , \quad (3.1)$$

где  $U$  – действительное значение напряжения;  $U_{ном}$  – номинальное значение напряжения.

В электрических сетях переменного однофазного тока действительное значение напряжения определяют как действующее значение напряжения основной частоты  $U_{(1)}$ , без учёта гармонических составляющих напряжения, а в электрических сетях переменного трёхфазного тока – как действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты, вычисляемое приближённо как

$$U_{1(1)} = \frac{U_{AB(1)} + U_{BC(1)} + U_{AC(1)}}{3}, \quad (3.2)$$

где  $U_{i(1)}$  – действующие значения фазных напряжений основной частоты.

Напомним, что *действующим* (эффективным) значением напряжения переменного тока является такое значение напряжения постоянного тока, который, проходя по сопротивлению нагрузки за тот же промежуток времени, выделит такое же количество тепла, что и переменный ток. В современной литературе чаще используют математическое определение этой величины – *среднеквадратичное* значение напряжения  $U_{RMS}$ :

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}, \quad (3.3)$$

где  $T$  – период напряжения. Для синусоидального напряжения  $U_{RMS} \approx 0,707U_a$ , где  $U_a$  – амплитуда напряжения (рисунок 3.2).

Отметим, что электрические приборы для измерения переменного напряжения и тока отградуированы на отображение действующих значений напряжения и тока. В бытовой электросети действующее напряжение переменного тока равно 230 В, а амплитудное – 324,3 В.

3. Максимальная, минимальная и номинальная мощность по каждой из выходных цепей. Для ИЭП с выходом на переменном токе задаются максимальное, минимальное и номинальное значения полной мощности

(в вольт-амперах)  $S = U^2/Z$  (где  $U$  – действующее значение напряжения на нагрузке,  $Z$  – модуль полного сопротивления нагрузки).

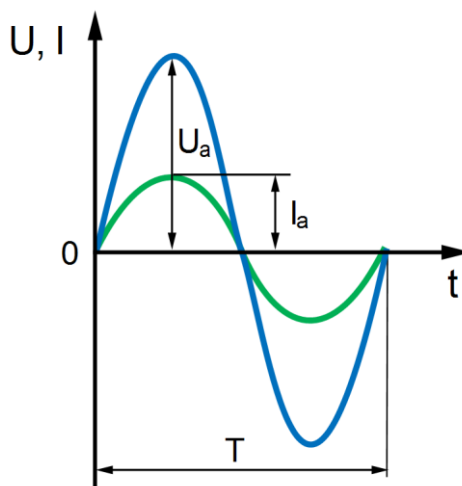


Рисунок 3.2 – К определению действующего и максимального значения напряжения переменного тока

4. Номинальное значение тока, потребляемого ИЭП от первичной сети. Для ИЭП, работающего в режиме изменяющейся нагрузки, задаются номинальное, максимальное и минимальное значения мощности, потребляемой от первичной сети.

5. Для ИЭП, питающихся от сети (или источника) переменного тока, коэффициент мощности  $\cos \varphi = P/S$ , где  $P$  – активная составляющая полной мощности, потребляемой ИЭП от первичной сети. Для нагрузок постоянного тока  $\cos \varphi = 1$ , так как  $P = S$ .

6. Коэффициент полезного действия (КПД) в номинальном режиме

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^m P_{ni.ном}}{P_{n.ном}} \cdot 100\% , \quad (3.4)$$

где  $n$  – число выходов (выходных цепей) ИЭП,  $P_{ni.ном}$  – номинальная мощность, передаваемая в нагрузку по  $i$ -му выходу,  $P_{n.ном}$  – номинальная потребляемая мощность.

7. Внутреннее сопротивление ИЭП, равное численному значению отношения изменения выходного напряжения  $\Delta U_{\text{вых}}$  к вызвавшему его изменению тока нагрузки (выходного тока)  $\Delta I_{\text{вых}}$ . Внутреннее сопротивление определяет нагрузочную характеристику ИЭП (рисунок 3.3).

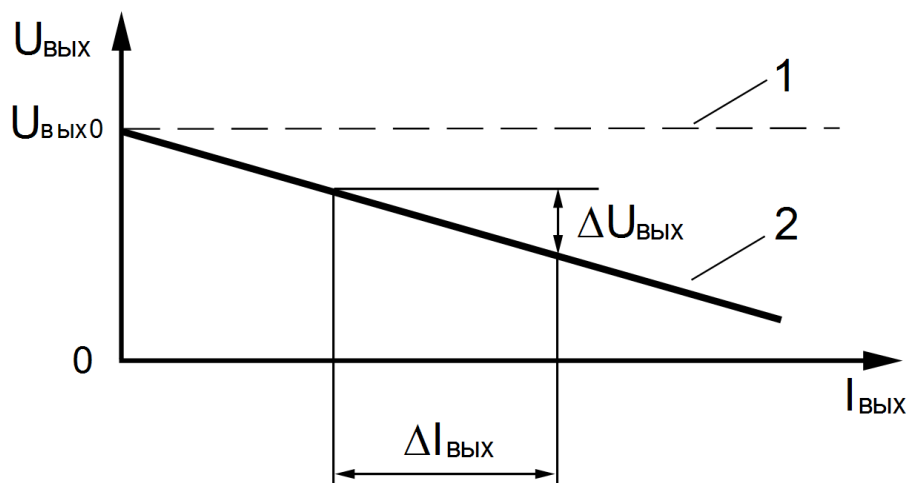


Рисунок 3.3 – Нагрузочная характеристика ИЭП

1 – идеального ИЭП; 2 – реального ИЭП

8. Коэффициент пульсаций  $K_{\Pi}$ :

$$K_{\Pi} = \frac{U_{\sim}}{U_0}, \quad (3.5)$$

где  $U_{\sim}$  и  $U_0$  – переменная и постоянная составляющие выходного напряжения ИЭП (рисунок 3.4). Коэффициент пульсаций характеризует степень приближения кривой выпрямленного напряжения к прямой линии.

9. Наличие гальванической развязки между входом и выходом.

10. Удельная мощность:

$$P_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{ном}}}{V}, \quad (3.6)$$

где  $P_{\text{ном}}$  – номинальная мощность, отдаваемая в нагрузку;  $V$  – объем ИЭП (измеряют обычно в  $\text{дм}^3$ ).

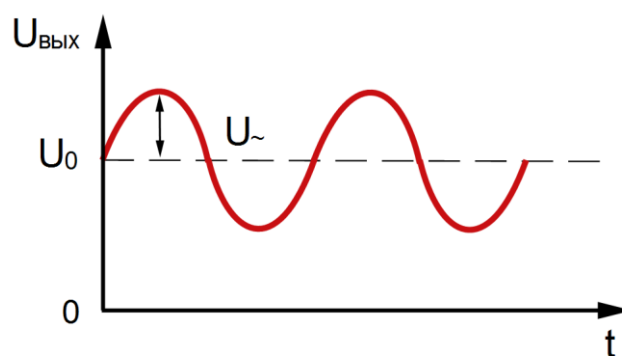


Рисунок 3.4 – К определению пульсации выходного напряжения ИЭП

11. Эксплуатационные характеристики (диапазон рабочих температур, допустимой относительной влажности, давления, надёжность и т. д.).

Как правило, эксплуатационные характеристики ИЭП согласованы с назначением РЭА, в которой применяются ИЭП. Если РЭА размещается в отапливаемом помещении, то она рассчитывается на температуру окружающей среды от  $5^{\circ}\text{C}$  до  $40^{\circ}\text{C}$ , атмосферное давление не ниже 460 мм рт. ст. и относительную влажность воздуха 95% при температуре  $30^{\circ}\text{C}$ . Если же РЭА размещается на подвижных наземных носителях, то диапазон температуры расширяется от минус  $50^{\circ}\text{C}$  до  $65^{\circ}\text{C}$ , а относительная влажность воздуха повышается до 98-100%. А при эксплуатации в составе самолетной РЭА ИЭП должны сохранять работоспособность в условиях атмосферного давления 5 мм рт. ст.

Обеспечение надёжности ИЭП обычно сводится к следующим основным действиям:

- тщательному обоснованию выбора структурной схемы ИЭП;
- обоснованному выбору элементной базы с достаточно высоким запасом по предельным режимам и параметрам;
- разработке конструкции, обеспечивающей хороший теплоотвод и легкий доступ к отдельным узлам и элементам;
- проведению всесторонних испытаний макетов по климатическим



и механическим воздействиям.

Энергетическая эффективность преобразования электрической энергии в ИЭП характеризуется энергетическими показателями электромагнитных элементов и устройства в целом.

Важнейшими из этих показателей являются следующие.

1. Коэффициенты преобразования ИЭП по напряжению и току соответственно

$$K_{H.П.} = \frac{U_{вых.н.}}{U_{вх.н.}}, K_{T.П.} = \frac{I_{вых.н.}}{I_{вх.н.}}. \quad (3.7)$$

Они определяются в режимах, соответствующих максимально возможному напряжению на выходе ИЭП, т. е. при отсутствии его регулирования, для полезных составляющих напряжения и тока. В цепях переменного тока полезными составляющими, переносящими активную мощность, являются, как правило, первые гармоники напряжения и тока, а в цепях постоянного тока – средние значения напряжения и тока.

2. Коэффициент искажения тока (аналогично и для напряжения)

$$\nu_I = \frac{I_{(1)}}{I}, \quad (3.8)$$

где  $I_{(1)}$  – действующее значение первой гармоники тока,  $I$  – действующее значение тока.

3. Коэффициент гармоник тока (коэффициент несинусоидальности)

$$K_{Г.Т} = \frac{I_{B.Г.}}{I}, \quad (3.9)$$

где  $I_{B.Г.}$  – действующее значение высших гармоник тока (отличных от первой гармоники).

4. Коэффициент сдвига тока относительно напряжения по первой гармонике

$$\cos \varphi_{(1)} = \frac{P_{(1)}}{\sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2}}, \quad (3.10)$$

где  $P_{(1)}$  – активная мощность в цепи, создаваемая первыми гармониками напряжения и тока;  $Q_{(1)}$  – реактивная мощность сдвига в цепи, создаваемая первыми гармониками напряжения и тока.

#### 5. Коэффициент мощности

$$\chi = \frac{P}{S}, \quad (3.11)$$

где  $P$  – активная мощность;  $S$  – полная мощность.

В тех случаях, когда с помощью ИЭП создается автономная система электроснабжения (борт судна, самолета, наземного транспортного средства), набор показателей качества электроэнергии и их числовые значения определяют соответствующими государственными и отраслевыми стандартами.

### 3.3 Классификация источников электропитания

ИЭП классифицируют обычно по следующим признакам:

#### 1. По типу питающей цепи (первичного источника электроэнергии):

- ИЭП, использующие электрическую энергию, получаемую от однофазной сети переменного тока;
- ИЭП, использующие электрическую энергию, получаемую от трёхфазной сети переменного тока;
- ИЭП, использующие электрическую энергию источника постоянного тока.

#### 2. По напряжению на нагрузке:

- ИЭП низкого (до 100 В) напряжения;
- ИЭП среднего (от 100 до 1000 В) напряжения;
- ИЭП высокого (свыше 1000 В) напряжения.

#### 3. По мощности, отдаваемой в нагрузку:

- микромощные ИЭП (менее 1 Вт);
- ИЭП малой мощности (до 100 Вт);
- ИЭП средней мощности (от 100 до 1000 Вт);

- ИЭП большой мощности (свыше 1000 Вт).

4. По роду тока нагрузки:

- ИЭП с выходом на переменном токе;

- ИЭП с выходом на постоянном токе;

- ИЭП с выходом на переменном и постоянном токе.

5. По числу выходов:

- одноканальные ИЭП, имеющие один выход постоянного или переменного тока;

- многоканальные ИЭП, имеющие два или более выходных напряжений постоянного или переменного тока.

6. По стабильности напряжения (или тока) в нагрузке:

- стабилизирующие ИЭП (имеют в своем составе стабилизатор напряжения или тока);

- нестабилизирующие ИЭП (не имеют в своем составе стабилизатор напряжения или тока).

*Стабилизатор* напряжения (или тока) – это устройство, входящее в состав ИЭП и осуществляющее стабилизацию выходного напряжения (тока) без изменения рода напряжения (тока).

Стабилизирующие ИЭП имеют в своем составе, по крайней мере, один стабилизатор напряжения (тока).

7. По непрерывности подачи электроэнергии в нагрузку:

- бесперебойного электропитания (подача электроэнергии к РЭА осуществляется независимо от возможных перерывов в системе электроснабжения);

- гарантированного электропитания (допускается кратковременный перерыв в подаче электроэнергии к РЭА, обусловленный переходом с одного источника электроснабжения на другой и обратно).

8. По наличию сетевого трансформатора на входе:

- с трансформаторным входом;

- с бестрансформаторным входом.

9. По возможности установки более одного номинального значения хотя бы одного выходного параметра:

- регулируемые;
- нерегулируемые.

Регулирование напряжения можно осуществлять на стороне переменного тока (входе), на стороне постоянного тока (выходе), а также в выпрямителе с помощью регулируемых вентилях. В качестве регуляторов напряжения на стороне переменного тока применяют регулируемые трансформаторы или автотрансформаторы и регулирующие дроссели (магнитные усилители). Регулирование напряжения на стороне постоянного тока осуществляется переменными резисторами, включенными как делитель напряжения.

Все ИЭП как преобразователи параметров электрической энергии можно разделить по следующим признакам преобразования:

- преобразователи переменного напряжения в переменное той же частоты;
- преобразователи переменного напряжения в переменное другой частоты;
- преобразователи числа фаз;
- преобразователи переменного напряжения в постоянное;
- преобразователи постоянного напряжения в постоянное;
- преобразователи постоянного напряжения в переменное (инверторы).

Также преобразователи могут иметь узлы промежуточного преобразования:

- преобразователи переменного напряжения в постоянное и затем снова в переменное (преобразователи частоты, фазы, числа фаз);
- преобразователи постоянного напряжения в постоянное с промежуточным звеном переменного тока (конвертор).

В сложных радиоэлектронных комплексах ИЭП совместно с

устройствами защиты и коммутации образуют, как правило, *систему электропитания* (СЭП). Под СЭП здесь и далее будем понимать функциональную часть РЭА, обеспечивающую совокупностью своих составных частей электрическую совместимость параметров электропитания функциональных узлов РЭА с параметрами электрической энергии, поступающей от её источника, а также другие заданные виды совместимости с функциональными узлами РЭА, внешними техническими средствами, условиями эксплуатации и применения. При этом функциональные узлы и элементы СЭП могут входить в состав функциональных узлов РЭА, а также представлять собой внешние самостоятельные изделия.

Различают централизованную, децентрализованную и комбинированную СЭП.

В *централизованной* СЭП электропитание нескольких устройств осуществляется от общих для них ИЭП через устройство распределения (рисунок 3.5а).

В *децентрализованной* СЭП каждое устройство обеспечивается электропитанием от своего собственного ИЭП (рисунок 3.5б).

В *комбинированной* СЭП электропитание устройства производится как от общего (централизованного), так и от ИЭП, принадлежащего данному устройству (рисунок 3.5в).

### 3.4 Нестабилизирующие источники электропитания

В зависимости от конкретного вида РЭА к ИЭП могут предъявлять различные требования. В ряде случаев требуются высокостабильные и надежные ИЭП, стоимость которых приближается к стоимости питаемой ими РЭА или даже превышает ее. В других случаях к ИЭП не предъявляют серьезных требований.

В современной силовой электронике принято выделять два больших класса ИЭП – *линейные* и *импульсные*. Однако такое разделение ИЭП носит условный характер, потому как подразумевается, что такие ИЭП содержат

стабилизатор напряжения (тока). Однако в ряде случаев применяют и нестабилизирующие ИЭП – такие ИЭП нельзя назвать ни линейными, ни импульсными, потому что они не содержат в своем составе стабилизатора напряжения (тока).

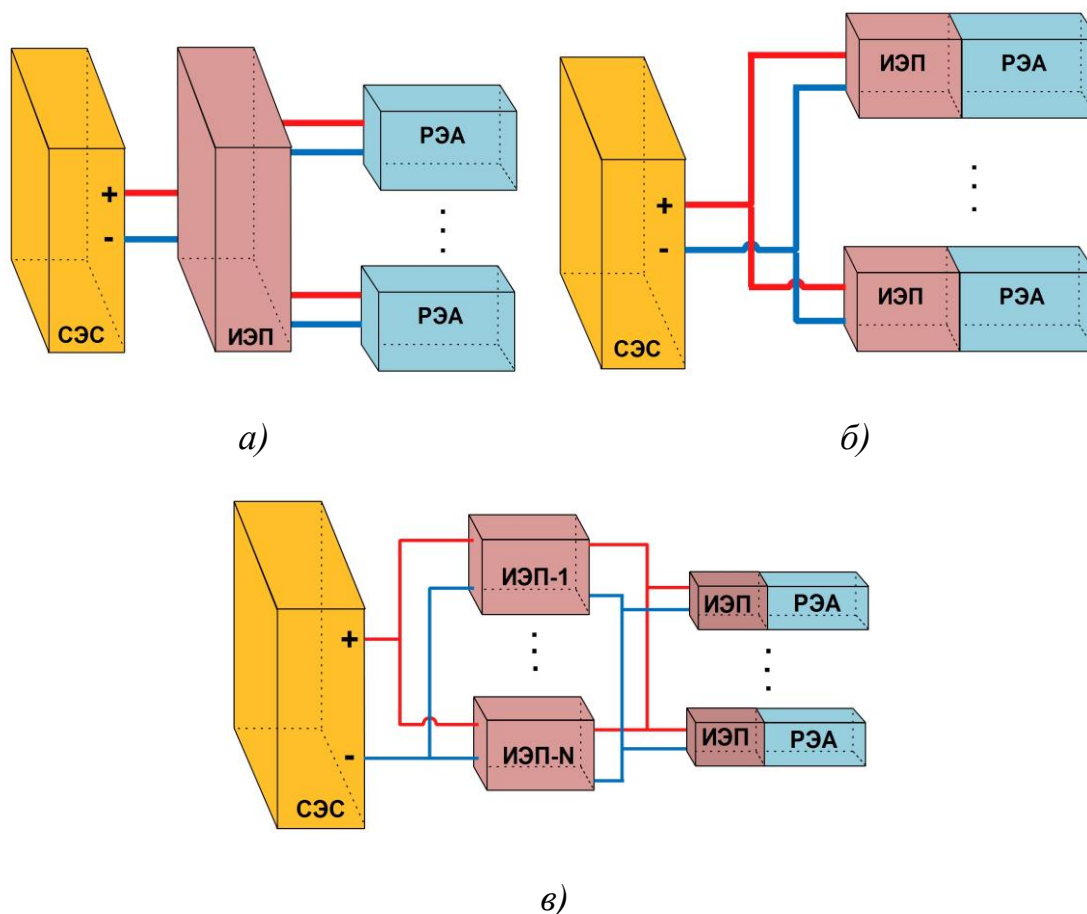


Рисунок 3.5 – Структурные схемы централизованной (а), децентрализованной (б) и комбинированной (в) систем электропитания

СЭС – система электроснабжения; ИЭП – источник электропитания;

РЭА – радиоэлектронная аппаратура

Структура типового трансформаторного нестабилизирующего ИЭП, на входе которого действует стандартная промышленная электрическая сеть, приведена на рисунке 3.6.

*Трансформатор* преобразует переменное напряжение сети в переменное напряжение меньшей (или большей) амплитуды, а также гальванически

развязывает сеть и нагрузку. Последнее обстоятельство, обеспечивая беспроводную связь (только через электромагнитное поле трансформатора) входных и выходных цепей ИЭП, исключает возможность опасного попадания напряжения со стороны, имеющей более высокий потенциал, на сторону, имеющую более низкий потенциал при отключении трансформатора на одной из сторон.

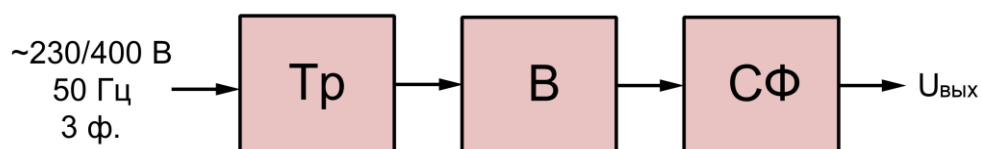


Рисунок 3.6 – Структурная схема трансформаторного нестабилизирующего ИЭП

Тр – трансформатор; В – выпрямитель; СФ – сглаживающий фильтр;  $U_{\text{вых}}$  – напряжение на выходе ИЭП

*Выпрямитель* преобразует переменное напряжение на выходе трансформатора в постоянное (пульсирующее) напряжение. *Сглаживающий фильтр* сглаживает пульсацию в выпрямленном напряжении. В нестабилизирующих ИЭП нагрузка подключается непосредственно к выходу сглаживающего фильтра.

В общем говоря, структура нестабилизирующего ИЭП, приведенная на рисунке 3.6, далеко не единственная. Выбор той или иной структуры нестабилизирующего ИЭП зависит от требований к виду и параметрам выходного напряжения, а также от вида и параметров входного напряжения. Так, например, если требуется получить на выходе ИЭП переменное напряжение меньшей амплитуды относительно входа – то такой ИЭП может быть выполнен буквально на одном гасящем конденсаторе.

Нестабилизирующие ИЭП находят ограниченное применение в современной РЭА. Например, в некоторых аудиоусилителях или в комбинированных СЭП.

### 3.5 Стабилизирующие источники электропитания

#### 3.5.1 Общие сведения о стабилизаторах напряжения (тока)

Очевидный недостаток нестабилизирующих ИЭП – низкое качество выходного напряжения, обусловленное, прежде всего, неудовлетворительной стабильностью, в то время как практически все виды РЭА предъявляют довольно жесткие требования к постоянству питающих напряжений (токов).

Основными факторами, вызывающими изменение выходного напряжения ИЭП, являются: колебания напряжения и частоты источника первичной электроэнергии (обычно промышленной сети переменного тока), изменения сопротивления нагрузки, температуры, нестабильности элементов ИЭП и т. д.

Обычно в сетях переменного тока наблюдаются изменения напряжения двух видов: медленные, происходящие в течение длительных промежутков времени (от нескольких минут до нескольких часов) и быстрые (длительностью порядка долей секунды). Первые вызываются постепенным увеличением или уменьшением общей нагрузки сети, а вторые – включением или выключением отдельных нагрузок (как правило, мощных). В обоих случаях колебания входного напряжения ИЭП обусловлены наличием внутреннего сопротивления питающей сети.

При изменении сопротивления нагрузки напряжение на выходе ИЭП будет изменяться даже при неизменном входном напряжении вследствие изменения падения напряжения на внутреннем сопротивлении ИЭП.

В зависимости от типа питаемого устройства относительное изменение

напряжения электропитания  $\frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%$  может измениться в пределах от

0,005 до 3% и более. Однако большинство РЭА требует постоянного напряжения электропитания, величина которого колебалась бы в очень незначительных пределах. Некоторые устройства (например, лампы бегущей волны) принципиально не могут работать без стабилизации напряжения



электропитания. Стабилизация напряжения необходима для повышения точности работ некоторых измерительных приборов и многих другой современной РЭА.

Отдельные элементы радиоэлектронных систем требуют поддержания неизменной величины тока. Например, фокусирующие катушки клистронов радиолокационных передающих устройств или светодиодное освещение.

Так как выходное напряжение любого реального ИЭП при включении нагрузки падает на некоторое значение, часто ИЭП характеризуют так называемой нагрузочной характеристикой.

На рисунке 3.7а приведена нагрузочная характеристика, из которой следует, что в отсутствии нагрузки ( $R_H = \infty$ ) напряжение на выходе ИЭП максимальное и при  $I_H = 0$  является напряжением холостого хода  $U_{ХХ}$ . При подаче тока в нагрузку напряжение уменьшается из-за влияния внутреннего сопротивления ИЭП, которое складывается из сопротивлений его элементов (рисунок 3.7б).

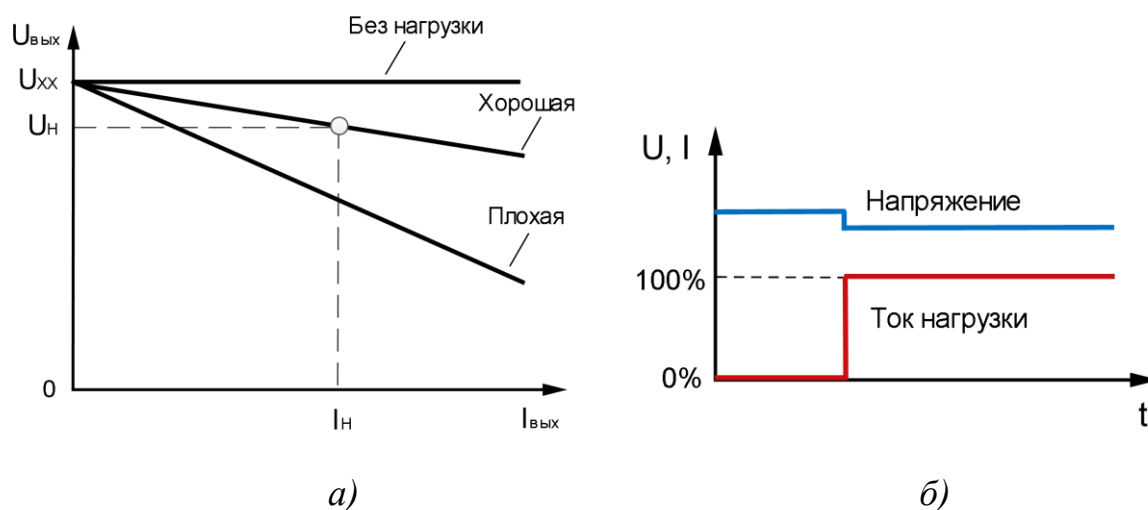


Рисунок 3.7 – Нагрузочная характеристика ИЭП (а) и снижение напряжения стабилизатора при токовой нагрузке (б)

Увеличение тока, потребляемого от ИЭП, приводит к уменьшению его выходного напряжения. Напряжение на выходе ИЭП при установленной

полной нагрузке называют номинальным выходным напряжением ИЭП  $U_{вых.ном.}$

Для улучшения нагрузочной характеристики ИЭП применяют стабилизаторы напряжения (тока).

Структура типового стабилизирующего ИЭП с электропитанием от сети переменного тока приведена на рисунке 3.8.

В стабилизирующем ИЭП сетевой трансформатор выполняет ровно те же функции, что и в нестабилизирующем. Обычно трансформатор является понижающим.

Согласно схеме на рисунке 3.8 выпрямитель преобразует трёхфазное переменное напряжение промышленной электрической сети ( $\sim 230/400$  В 50 Гц) в напряжение одной полярности (пульсирующее). Сглаживающий фильтр уменьшает пульсации напряжения на выходе выпрямителя. Стабилизатор уменьшает изменения напряжения на нагрузке (стабилизирует напряжение), вызванные изменением напряжения сети и изменением тока, потребляемого нагрузкой.

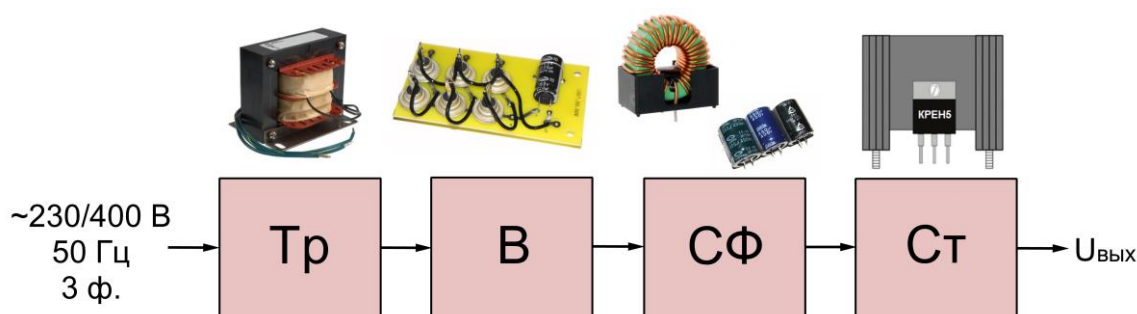


Рисунок 3.8 – Структура одного из вариантов сетевого стабилизирующего ИЭП

Тр – трансформатор; В – выпрямитель; СФ – сглаживающий фильтр; Ст – стабилизатор напряжения;  $U_{вых}$  – напряжение на выходе ИЭП

Стабилизаторы подразделяют в зависимости от рода стабилизируемой величины на *стабилизаторы переменного напряжения (тока)* и *постоянного напряжения (тока)*.

По принципу действия стабилизаторы делят на *параметрические*, *компенсационные* и *комбинированные*.

*Параметрический* стабилизатор напряжения (тока) – это стабилизатор, в котором отсутствует цепь обратной связи (ОС), и стабилизация напряжения (тока) осуществляется за счет использования нелинейных свойств компонентов, входящих в его состав.

На рисунке 3.9а приведена структура параметрического стабилизатора напряжения (тока), состоящего из двух элементов: линейного ЛЭ и нелинейного НЭ. Если стабилизатор работает в цепи постоянного тока, то в качестве линейного и нелинейного элементов используют активные сопротивления. При работе стабилизатора в цепи переменного тока, как правило, применяют реактивные сопротивления (индуктивные или ёмкостные).

На рисунке 3.9б изображены вольтамперные характеристики (ВАХ) линейного 1 и нелинейного сопротивления 2, а также характеристика всей схемы в целом 3.

Из графика видно, что при изменении напряжения на входе стабилизатора от некоторого значения  $U_{вх.мин}$  до  $U_{вх.макс}$  напряжение на выходе стабилизатора изменяется в значительно более узких пределах, чем на входе. Это объясняется тем, что большая часть приращения выходного напряжения падает на линейном элементе, обладающем более крутой ВАХ.

В качестве параметрических стабилизаторов используют специальные нелинейные элементы (стабилитроны, стабилоры, бареттеры и т. д.), ВАХ которых имеют участки, параллельные либо оси токов (для стабилизаторов напряжения), либо оси напряжений (для стабилизаторов тока). Ввиду относительно малой установленной мощности стабилитронов параметрические стабилизаторы наиболее часто используют в источниках опорного напряжения (ИОН) и микромощных ИЭП (для нагрузок от нескольких единиц до десятков миллиампер).

*Компенсационный* стабилизатор напряжения (тока) – это стабилизатор, в котором стабилизация напряжения (тока) осуществляется за счет воздействия изменения выходного напряжения (тока) на его регулирующий элемент через

цепь ОС. Эффект стабилизации достигается за счет изменения параметров регулирующего элемента (РЭ), как правило, транзистора, при воздействии на него сигнала ОС. В компенсационных стабилизаторах напряжения сигнал ОС является функцией выходного напряжения, а в стабилизаторах тока – функцией выходного тока.

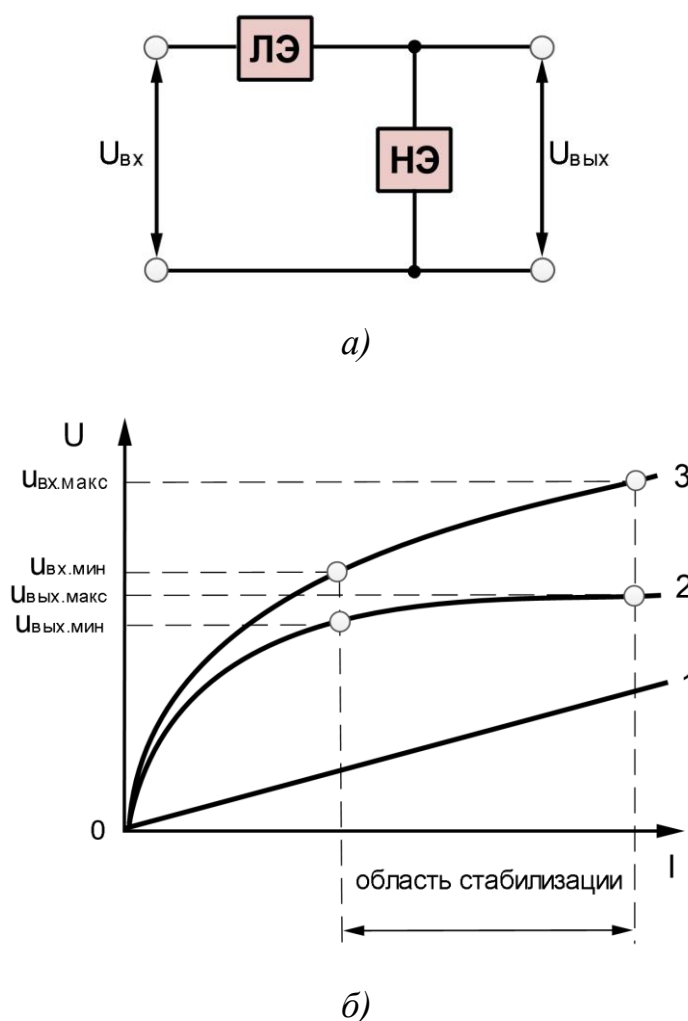


Рисунок 3.9 – Структура параметрического стабилизатора напряжения (а) и его ВАХ (б)

ЛЭ – линейный элемент; НЭ – нелинейный элемент;

$U_{вх}$  – напряжение на входе стабилизатора;  $U_{вых}$  – напряжение на выходе стабилизатора

На рисунке 3.10 приведена структура компенсационного стабилизатора напряжения (тока), состоящего из трех элементов: регулирующего РЭ, измерительного ИЭ и усилительного УЭ.

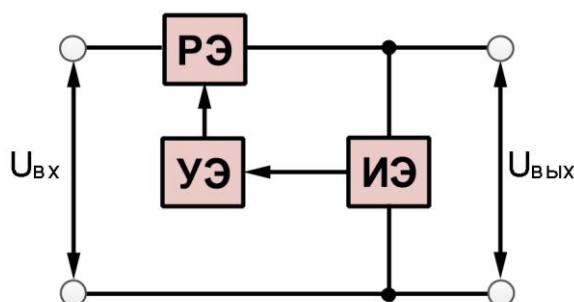


Рисунок 3.10 – Структура компенсационного стабилизатора напряжения

РЭ – регулирующий элемент; ИЭ – измерительный элемент; УЭ – усилительный элемент

$U_{вх}$  – напряжение на входе стабилизатора;  $U_{вых}$  – напряжение на выходе стабилизатора

РЭ представляет собой регулируемое активное (для стабилизаторов постоянного тока) или реактивное нелинейное (для стабилизаторов переменного тока) сопротивление. ИЭ фиксирует отклонение напряжения на выходе стабилизатора от некоторого эталонного напряжения (ИОН). УЭ усиливает изменение выходного напряжения и воздействует на РЭ, изменяя его сопротивление и поддерживая тем самым постоянство выходного напряжения с той или иной степенью точности.

В *комбинированном* стабилизаторе напряжения (тока) стабилизация осуществляется и за счет нелинейных свойств компонентов, входящих в его состав, и за счет воздействия изменения выходного напряжения (тока) на его РЭ через цепь ОС.

В зависимости от способа включения РЭ относительно сопротивления нагрузки стабилизаторы напряжения (тока) делят на *последовательные* и *параллельные* (рисунок 3.11).

При параллельной стабилизации РЭ подключают параллельно нагрузке. Параллельная стабилизация основана на принципе разделения тока, в соответствии с которым сумма тока нагрузки  $I_H$  и тока РЭ  $I_{РЭ}$  поддерживается постоянной.

В схеме параллельного стабилизатора через гасящий резистор  $R$ ,

включенный последовательно с нагрузкой, протекает постоянный ток

$$I_R = I_{PЭ} + I_H, \quad (3.12)$$

а падение напряжения на том же резисторе

$$U_R = U_{вх} - U_{PЭ}. \quad (3.13)$$

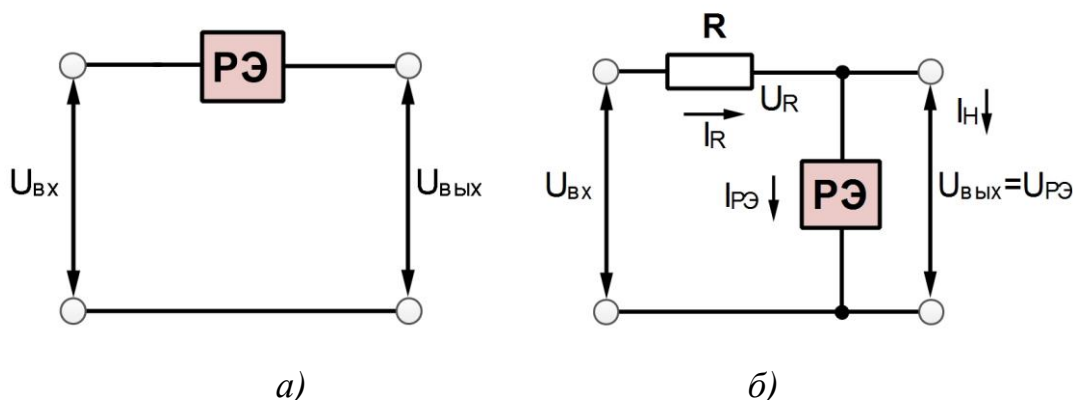


Рисунок 3.11 – Структуры последовательного (а) и параллельного (б) стабилизаторов напряжения

РЭ – регулирующий элемент;  $R$  – ограничивающий резистор;  $U_{вх}$  – напряжение на входе стабилизатора;  $U_{вых}$  – напряжение на выходе стабилизатора

На холостом ходу, когда  $I_H = 0$ , весь полный ток  $I_R$  будет протекать через РЭ, то есть  $I_R = I_{PЭ}$ . Таким образом, независимо от того, подключена ли или отключена нагрузка, ИЭП постоянно потребляет максимальный ток, а, следовательно, стабилизатор имеет малый КПД, что является его недостатком. К достоинствам такого стабилизатора следует отнести высокую надежность при перегрузках и коротких замыканиях на выходе, то есть защита по току такому стабилизатору не нужна.

Лучшими параметрами характеризуются последовательные стабилизаторы – схемы с последовательным включением РЭ. Однако они требуют дополнительной защиты при перегрузках и коротких замыканиях, так как РЭ постоянно находится в цепи нагрузки.

В зависимости от типа РЭ компенсационные стабилизаторы делят на ламповые, транзисторные, тиристорные, дроссельные. В некоторых случаях

стабилизаторы включают в себя несколько РЭ разного типа, например транзистор или дроссель, транзистор и тиристор и т. д. В современных ИЭП широко применяют преимущественно транзисторные и тиристорные стабилизаторы напряжения (тока).

По точности поддержания выходного напряжения на нагрузке стабилизаторы подразделяют на *прецизионные* (изменение напряжения не более 0,005%), *точные* (от 0,01 до 0,005%), *средней точности* (от 0,1 до 0,01%) и *низкой точности* (от 1 до 0,1%).

По режиму работы РЭ компенсационные стабилизаторы делят на стабилизаторы *непрерывного* (РЭ работает в непрерывном режиме, его сопротивление плавно меняется под воздействием влияющих величин) действия и *импульсного* (РЭ работает в импульсном режиме, под воздействием влияющих величин изменяется длительность и периодичность его включения). В этой связи часто выделяют *линейные* и *импульсные* стабилизаторы (равно как линейные и импульсные ИЭП – в зависимости от того, стабилизатор с каким режимом работы РЭ в них применён). Иногда к линейным стабилизаторам относят и параметрические. Однако в дальнейшем будем считать, что такое деление характерно исключительно для ИЭП с компенсационными стабилизаторами.

Принцип действия стабилизирующего ИЭП можно пояснить, представляя его в виде делителя напряжения. Простейший делитель (рисунок 3.12) содержит два элемента:

- регулирующий (или "активный"), сопротивление которого  $R_{рег}$  может изменяться под воздействием управляющего сигнала  $z(t)$ ;
- нагрузочное сопротивление  $R_H$  – оно же эквивалентное сопротивление потребителя электроэнергии.

Делитель питается от источника постоянного напряжения  $U_{вх}$ , напряжение на нагрузке  $u_H$  и ток  $i_H$  определяются выражениями:

$$u_H = \frac{R_H}{R_H + R_{рег}} U_{вх}, i_H = \frac{U_{вх}}{R_H + R_{рег}} \quad (3.14)$$

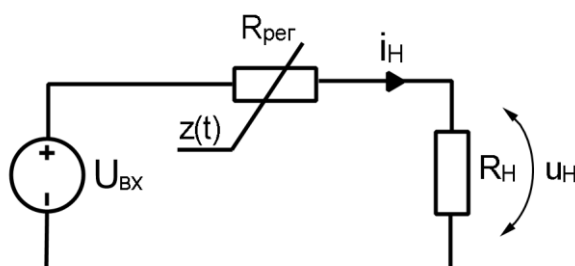


Рисунок 3.12 – Эквивалентная упрощенная схема ИЭП как делителя напряжения

$U_{вх}$  – источник входного напряжения;  $z(t)$  – управляющий сигнал;  $R_{рег}$  – сопротивление регулирующего элемента;  $R_H$  – сопротивление нагрузки

В стабилизаторе постоянного напряжения сопротивление  $R_H$  и напряжение на входе  $U_{вх}$  могут принимать различные значения в интервалах  $(R_{мин}; R_{макс})$  и  $(U_{вх} - \Delta U; U_{вх} + \Delta U)$  соответственно, а величина напряжения  $u_H$  должна оставаться постоянной. Обеспечивается такой режим за счет изменения сопротивления  $R_{рег}$  регулирующего элемента, причем  $z(t)$  является сигналом рассогласования (различия) между  $u_H$  и опорным напряжением  $U_{оп}$ , задающим уровень выходного напряжения стабилизатора. Иначе говоря, в стабилизаторе обязательно должна действовать отрицательная ОС по напряжению, обеспечивающая минимальное различие  $u_H$  и  $U_{оп}$ .

Стабилизатор постоянного тока  $i_H$  через нагрузку функционирует сходным образом. Разница состоит в том, что здесь должна действовать отрицательная ОС по току, и потому  $z(t)$  формируется как разность между напряжением  $U_i$ , снимаемым с датчика выходного тока, и  $U_{оп}$ , задающим теперь уровень этого тока.

В стабилизаторах рассмотренного типа ОС являются внешними, так как обеспечиваются они специальными цепями управления. Влияние на стабилизируемую величину любого изменения внешнего фактора (напряжения



$U_{вх}$  и сопротивления  $R_H$ ) компенсируется за счет соответствующего изменения  $R_{рег}$ . Поэтому такие стабилизаторы называются компенсационными.

Наиболее важными электрическими параметрами стабилизаторов напряжения (тока) являются.

1. Коэффициент стабилизации по напряжению:

$$(K_{ст})_U = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх.ном}} : \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых.ном}}, \quad (3.15)$$

где  $\Delta U_{вх} = U_{вх.макс} - U_{вх.мин}$ ;  $\Delta U_{вых} = U_{вых.макс} - U_{вых.мин}$ ;  $U_{вх.мин}$  и  $U_{вх.макс}$  – минимальное и максимальное значение входного напряжения соответственно;  $U_{вых.мин}$  и  $U_{вых.макс}$  – минимальное и максимальное значение выходного напряжения соответственно;  $U_{вх.ном}$  и  $U_{вых.ном}$  – входное и выходное номинальное напряжения стабилизатора соответственно.

В общем случае коэффициентом стабилизации напряжения называют частное от деления относительного изменения напряжения на входе на относительное изменение напряжения на выходе стабилизатора. Чем больше коэффициент стабилизации, тем меньше изменяется выходное напряжение при изменении входного. У простейших стабилизаторов величина  $K_{ст}$  составляет единицы, а у более сложных – сотни и тысячи.

В некоторых случаях качество стабилизации напряжения оценивают по статической ошибке  $\delta$  от изменения в определённых пределах величины входного напряжения. Она представляет собой отношение приращения выходного напряжения к его номинальному значению:  $\delta = \Delta U_{вых} / U_{вых.ном}$ .

Статическая ошибка, как и коэффициент стабилизации, определяется при неизменном токе нагрузки стабилизатора ( $R_H = const$ ).

Коэффициент стабилизации по току определяют как:

$$(K_{ст})_I = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх.ном}} : \frac{\Delta I_{вых}}{I_{вых.ном}}, \quad (3.16)$$

где  $\Delta I_{\text{вых}} = I_{\text{вых.макс}} - I_{\text{вых.мин}}$ ;  $I_{\text{вых.мин}}$  и  $I_{\text{вых.макс}}$  – минимальное и максимальное значение тока через нагрузку соответственно;  $I_{\text{вых.ном}}$  – номинальное значение тока через нагрузку.

Различают интегральный и дифференциальный коэффициенты стабилизации. Интегральный  $K_{\text{ст}}$  определяет стабилизацию в заданном диапазоне изменения дестабилизирующего фактора (входного напряжения), дифференциальный  $K_{\text{ст}}$  – в бесконечно малом диапазоне изменения этой величины. Практическое значение имеет интегральный  $K_{\text{ст}}$ .

2. Коэффициент неустойчивости по напряжению определяется как отношение производной выходного напряжения по входному напряжению к выходному напряжению:

$$(K_H)_U = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} \cdot \frac{1}{U_{\text{вых.ном}}}. \quad (3.17)$$

Коэффициент неустойчивости по току определяется как относительное изменение выходного напряжения при изменении выходного тока в заданных пределах:

$$(K_H)_I = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых.ном}}} \bigg|_{\Delta I_{\text{вых}}}. \quad (3.18)$$

3. Выходное (внутреннее) сопротивление:

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вых}}}. \quad (3.19)$$

Выходным сопротивлением стабилизатора называют отношение изменения напряжения на выходе стабилизатора к вызвавшему его изменению тока нагрузки при постоянном входном напряжении. Чем меньше выходное сопротивление, тем меньше изменяется выходное напряжение при изменении тока нагрузки. У простейших стабилизаторов величина  $R_{\text{вых}}$  составляет единицы Ом, а у более совершенных – сотые и тысячные доли Ома.

4. Коэффициент подавления (сглаживания) пульсации — отношение напряжения пульсации на входе стабилизатора к напряжению пульсации на его выходе:

$$K_{CG} = \frac{U_{\sim m.вх}}{U_{0вх}} : \frac{U_{\sim m.вых}}{U_{0вых}}, \quad (3.20)$$

где  $U_{\sim m.вх}$  и  $U_{\sim m.вых}$  — соответственно амплитуды пульсаций напряжений на входе и выходе стабилизатора;  $U_{0вх}$  и  $U_{0вых}$  — постоянные составляющие напряжения на входе и выходе стабилизатора соответственно.

Для некоторых стабилизаторов коэффициент подавления пульсаций примерно равен коэффициенту стабилизации напряжения.

5. КПД определяют как отношение мощности, отдаваемой стабилизатором в нагрузку, к мощности, потребляемой самим стабилизатором:

$$\eta = \frac{P_{вых}}{P_{вх}} = \frac{U_{вых} I_{вых}}{U_{вх} I_{вх}}. \quad (3.21)$$

В зависимости от принципа построения, схемотехнических решений и элементной базы КПД стабилизатора может составлять от единиц до 98% для лучших современных образцов.

6. Номинальное выходное напряжение  $U_{вых.ном}$ .

7. Диапазон изменения входного напряжения ( $U_{вх.мин} \dots U_{вх.макс}$ ).

8. Диапазон изменения тока нагрузки ( $I_{вых.мин} \dots I_{вых.макс}$ ).

9. Температурный коэффициент напряжения характеризует степень стабильности выходного напряжения при изменении температуры окружающей среды и неизменных напряжении на входе и токе нагрузки:

$$\theta = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta t^{\circ}}, \quad (3.22)$$

где  $\Delta t^{\circ}$  — изменение температуры окружающей среды ( $^{\circ}\text{C}$ ).

10. Быстродействие характеризует способность стабилизатора быстро отрабатывать скачкообразные изменения входного напряжения или тока

нагрузки. Обычно быстродействие определяют временем установления выходного напряжения при заданном скачкообразном изменении напряжения на входе или тока нагрузки.

11. Время переходного отклонения характеризует длительность отклонения выходного напряжения в переходном режиме работы стабилизатора от предельно допустимого значения для установившегося режима работы (рисунок 3.13).

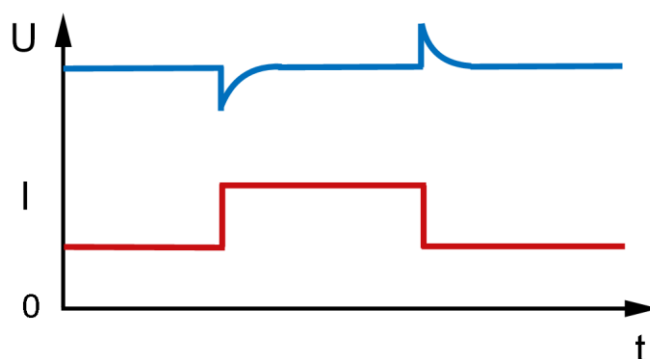


Рисунок 3.13 – К определению времени переходного отклонения

12. Время выхода на режим показывает, за какое время на выходе стабилизатора устанавливается требуемое напряжение (рисунок 3.14а). Время выключения показывает, за сколько времени напряжение на выходе стабилизатора становится равным нулю.

В зависимости от назначения ИЭП и вида нагрузки к стабилизаторам предъявляют следующие требования:

- высокий КПД;
- высокий коэффициент стабилизации  $K_{ст}$ ;
- возможность плавной или ступенчатой регулировки выходного напряжения (тока);
- минимальные габариты и масса;
- минимальные пульсации выходного напряжения.

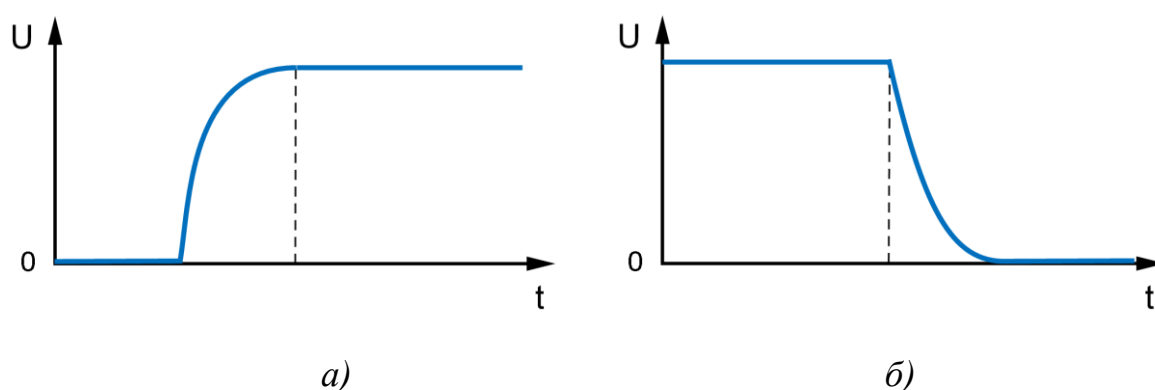


Рисунок 3.14 – Время выхода на режим (а) и время выключения стабилизатора (б)

### 3.5.2 Параметрические стабилизаторы напряжения (тока)

В параметрических стабилизаторах напряжения (тока), как правило, используют участок ВАХ того или иного элемента, имеющий большую крутизну.

Широкое распространение получили параметрические стабилизаторы на стабилитронах и стабисторах, которые осуществляют стабилизацию напряжения постоянного тока за счет нелинейности ВАХ стабилитрона или стабистора, т. е. когда зависимость между током и напряжением не подчиняется закону Ома. При этом стабилитрон работает на обратной ветви ВАХ, а стабистор – на прямой. Наибольшее распространение получили именно стабилитроны, у которых при определенном напряжении развивается лавинный пробой  $p$ - $n$ -перехода. Их напряжение пробоя нормируется в диапазоне 3-200 В.

Простейшая схема стабилизатора со стабилитроном приведена на рисунке 3.15а, а ВАХ кремниевого стабилитрона – на рисунке 3.16. Принцип работы такого стабилизатора заключается в том, что при увеличении напряжения на входе стабилизатора ток через стабилитрон  $VD$  резко возрастает, вследствие чего увеличивается падение напряжения на гасящем резисторе  $R_0$ . Приращение напряжения на резисторе  $R_0$  примерно равно приращению напряжения на входе стабилизатора, а напряжение на выходе

стабилизатора, равное напряжению стабилизации кремниевого стабилитрона, при этом почти не изменяется.

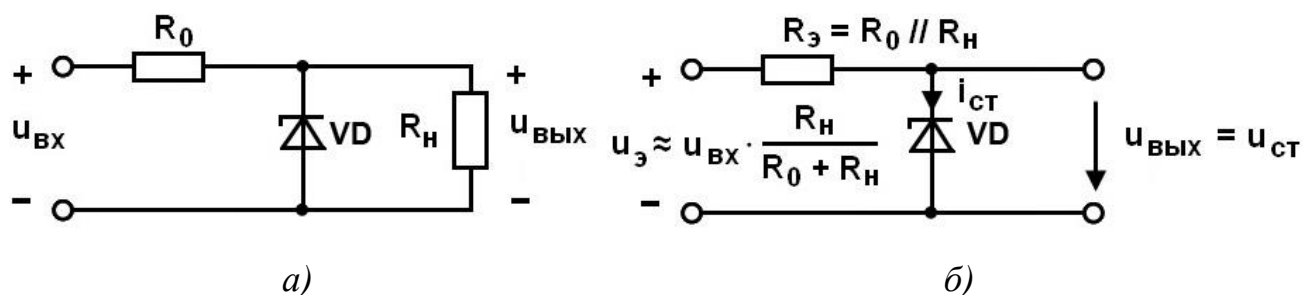


Рисунок 3.15 – Схема простейшего параметрического стабилизатора (а) и его эквивалентная схема (б)

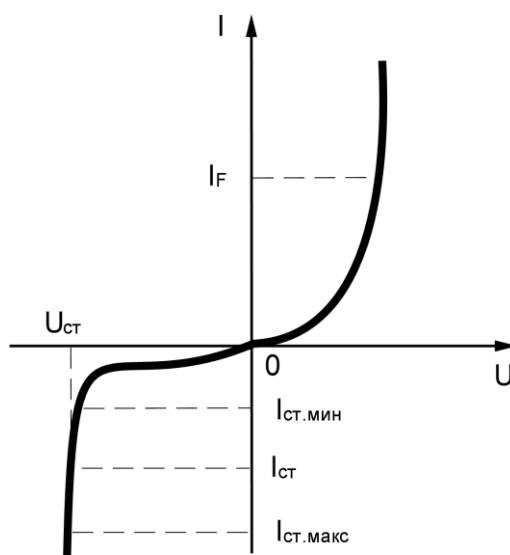


Рисунок 3.16 – ВАХ кремниевого стабилитрона

Проанализируем данную схему, для чего вначале ее преобразуем, используя теорему об эквивалентном генераторе (рисунок 3.15б).

Построим на ВАХ стабилитрона линии нагрузки для различных значений эквивалентного напряжения, соответствующих различным значениям входного напряжения (рисунок 3.17).

Из графических построений очевидно, что при значительном изменении эквивалентного напряжения  $u_3$  (на  $\Delta u_3$ ), а значит, и входного напряжения  $u_{ВХ}$ , выходное напряжение изменяется на незначительную величину  $\Delta u_{ВЫХ}$ . Причем,

чем меньше дифференциальное сопротивление стабилитрона (т. е. чем более горизонтально идет характеристика стабилитрона), тем меньше  $\Delta u_{\text{вых}}$ .

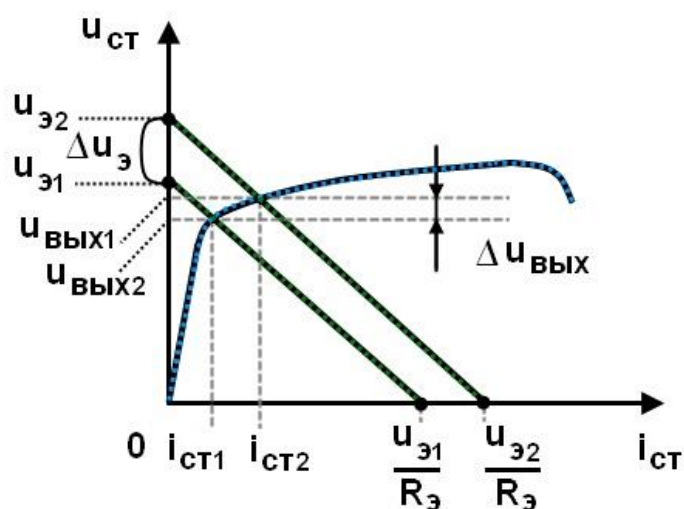


Рисунок 3.17 – Линии нагрузки на ВАХ стабилитрона

Определим основные параметры такого стабилизатора, для чего в исходной схеме стабилитрон заменим его эквивалентной схемой и введём во входную цепь (рисунок 3.18) источник напряжения, соответствующий изменению входного напряжения  $\Delta u_{\text{вх}}$ :

$$R_{\text{вых}} = r_{\text{д}} \parallel R_0 \approx r_{\text{д}}, \quad (3.23)$$

так как  $R_0 \gg r_{\text{д}}$ ,

$$\eta = \frac{u_{\text{вых}} I_{\text{H}}}{u_{\text{вх}} I_{\text{вх}}}. \quad (3.24)$$

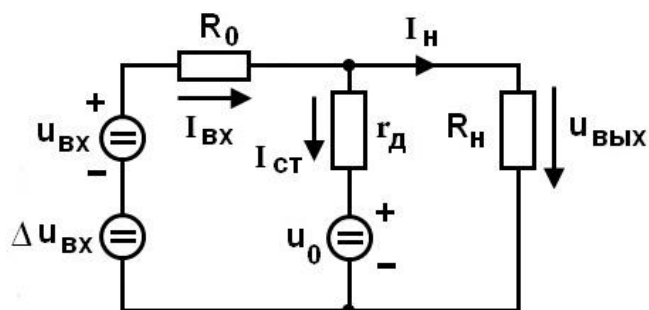


Рисунок 3.18 – К определению параметров параметрического стабилизатора

Принимая во внимание закон Кирхгофа, можно записать:

$$\begin{cases} \Delta I_{\text{ex}} = \Delta I_{\text{cm}} + \Delta I_{\text{блх}}, \\ \Delta u_{\text{ex}} = \Delta U_{R_0} + \Delta u_{\text{блх}}. \end{cases} \quad (3.25)$$

Тогда коэффициент стабилизации можно найти как

$$\begin{aligned} K_{\text{cm}} &= \frac{\Delta U_{R_0} + \Delta u_{\text{блх}}}{u_{\text{блх}}} : \frac{\Delta u_{\text{блх}}}{u_{\text{ex}}} = \left( 1 + \frac{\Delta U_{R_0}}{\Delta u_{\text{блх}}} \right) \frac{u_{\text{блх}}}{u_{\text{ex}}} = \\ &= \left( 1 + R_0 \frac{\Delta I_{\text{cm}} + \Delta I_{\text{блх}}}{\Delta u_{\text{блх}}} \right) \frac{u_{\text{блх}}}{u_{\text{ex}}} = \left[ 1 + R_0 \left( \frac{1}{R_H} + \frac{1}{r_o} \right) \right] \frac{U_{\text{блх.ном}}}{U_{\text{ex.ном}}}. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Поскольку  $R_H \gg r_o$  и  $\frac{R_0}{r_o} \gg 1$ , то

$$K_{\text{cm}} \approx \frac{u_{\text{блх}}}{u_{\text{ex}}} \frac{R_0}{r_o}. \quad (3.27)$$

$K_{\text{cm}}$  увеличивается при уменьшении  $r_o$  и увеличении  $R_0$ . Но при увеличении  $R_0$  нужно увеличивать  $U_{\text{ex}}$ . Поэтому нельзя получить очень высокий  $K_{\text{cm}}$ : обычно он не превышает нескольких десятков.

Вместе с тем при увеличении  $U_{\text{ex}}$  возрастают  $U_{R_0}$  и потери мощности – и снижается КПД.

Основными особенностями таких стабилизаторов являются: простота, невысокий КПД (особенно при переменном сопротивлении нагрузки), малый коэффициент стабилизации, трудность получения точного значения выходного напряжения и регулирования его без использования дополнительного проходного транзистора. Минимальное  $I_{\text{ст.мин}}$  и максимальное  $I_{\text{ст.макс}}$  значение тока стабилизации определяются типономиналом стабилитрона.

В случае уменьшения обратного тока стабилизации ниже  $I_{\text{ст.мин}}$  режим стабилизации нарушается. При превышении обратным током значения  $I_{\text{ст.макс}}$  обратимый пробой стабилитрона переходит в необратимый тепловой пробой.

Ограничение тока стабилизации осуществляется с помощью балластного резистора  $R_0$ . На этом же сопротивлении падает излишек напряжения  $\Delta U = U_{\text{ex}} - U_{\text{блх}}$ . Выбор значения сопротивления  $R_0$  производится с учетом



диапазонов изменения: тока нагрузки, входного напряжения и тока стабилизации выбранного стабилитрона.

Коэффициент стабилизации по напряжению стабилизатора приближенно может быть определен как отношение значений сопротивлений балластного резистора  $R_0$  и дифференциального сопротивления стабилитрона  $r_\partial$ . Для повышения  $K_{ст}$  целесообразно повышать значение сопротивления  $R_0$  и выбирать стабилитрон с малым изменением напряжения стабилизации во всем диапазоне изменения  $I_{ст}$ . Типовые значения  $K_{ст}$  находятся в интервале от 5 до 20 единиц.

Как пример, рассчитаем параметрический стабилизатор, приведённый на рисунке 3.15а.

*Задание:*

Исходными данными для расчета являются:

- выходной ток  $I_{ст} = I_{вых} = 12,5$  мА;
- выходное напряжение  $U_{вых} = 5$  В;
- нестабильность входного напряжения:  $\frac{U_{вх2} - U_{вх1}}{U_{вх}} = \pm 10\%$ .

*Решение:*

1. По напряжению стабилизации выбираем стабилитрон типа 2С156А с дифференциальным сопротивлением  $r_\partial = 25$  Ом.

2. Выбираем ориентировочное сопротивление резистора  $R_0 = 500$  Ом с учётом приемлемого КПД. Значение сопротивления резистора  $R_0$  должно обеспечивать падение напряжения на нём  $(0,5 \dots 3,0)U_{вых}$ . Тогда КПД стабилизатора будет составлять 20...30%.

3. Определяем необходимое входное напряжение:

$$U_{вх} = U_{вых} + R_0(I_{вых} + I_{ст}) = 5 + 500(12,5 + 12,5) \cdot 10^{-3} = 17,5 \text{ В}.$$

4. Вычисляем коэффициент стабилизации:

$$K_{cm} \approx \frac{u_{вых}}{u_{вх}} \frac{R_0}{r_0} = \frac{5}{17,5} \cdot \frac{500}{25} \approx 5,7.$$

5. Находим нестабильность выходного напряжения:

$$\frac{U_{cm2} - U_{cm1}}{U_{вых}} = \frac{U_{вх2} - U_{вх1}}{K_{cm} U_{вх}} = \pm \frac{10\%}{K_{cm}} = \pm 1,67\%.$$

Одним из недостатков простейших стабилизаторов является зависимость величины выходного напряжения (или напряжения пробоя) от температуры. Температурные изменения  $U_{вых}$  могут быть уменьшены за счет применения прецизионных стабилитронов с малым температурным коэффициентом напряжения или использованием схем термокомпенсации. Так, например, в качестве термокомпенсирующих элементов используют термисторы, имеющие отрицательный температурный коэффициент напряжения, или двунаправленные стабилитроны серии КС. Также на практике очень часто для термокомпенсации используют кремниевые диоды, включаемые последовательно со стабилитроном. Недостатком указанных решений является повышение динамического сопротивления цепи из диодов и стабилитрона, что отрицательно сказывается на коэффициенте стабилизации.

Если напряжение стабилизации недостаточное, то последовательным включением нескольких стабилитронов можно обеспечить его увеличение в два и более раз.

Коэффициент стабилизации можно повысить, используя многокаскадное включение стабилитронов. Для этого на выходе схемы, показанной на рисунке 3.15а, включают еще один гасящий резистор и стабилитрон с более низким напряжением стабилизации. Общий коэффициент стабилизации в этом случае будет равен произведению коэффициентов стабилизации отдельных стабилизаторов, однако при этом резко уменьшается КПД стабилизатора.

Параметрический стабилизатор можно усилить, включив стабилитрон в базовую цепь эмиттерного повторителя (рисунок 3.19а). Таким образом,

мощность нагрузки увеличена, а нестабильность снижена, так как базовый ток изменяется очень слабо в процессе стабилизации.

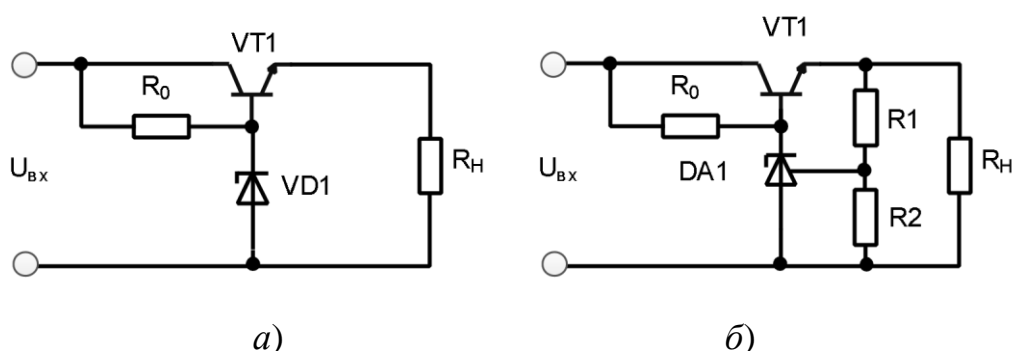


Рисунок 3.19 – Схемы уомощнения стабилизатора напряжения на стабилитроне (а) и интегральном стабилитроне (б)

Традиционные стабилитроны не охватывают весь диапазон напряжений. Для получения требуемого  $U_{вых} > U_{ст}$  используют операционные усилители.

Также были разработаны стабилитронные интегральные схемы, которые имеют два (или три) вывода и выполнены как обычный стабилитрон, хотя в действительности они являются микросхемами, содержащими пассивные и активные элементы. Широко применяют, например, регулируемый интегральный стабилитрон типа 142ЕН19 (аналог зарубежного TL431) с параметрами гораздо лучшими, чем у прецизионных стабилитронов. Обычно их применяют как составную часть компенсационных стабилизаторов (рисунок 3.19б).

Среди прочего интегральные стабилитроны используют как стабилизаторы тока (рисунок 3.20). Ток нагрузки протекает через резистор  $R2$ . Как только напряжение на резисторе превысит 2,5 В, ток через микросхему  $DA1$  и резистор  $R1$  возрастёт. Напряжение на нагрузке уменьшится до такого значения, при котором напряжение на входе управления микросхемы  $DA1$  установится равным 2,5 В.

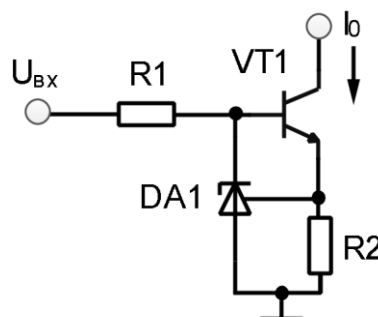


Рисунок 3.20 – Стабилизатор тока на интегральном стабилитроне

Стабилизируемый ток задается резистором  $R2$ , сопротивление которого определяют как

$$R2 = \frac{2,5}{I_H}, \quad (3.28)$$

где 2,5 В – падение напряжения на резисторе (для микросхемы TL431), а  $I_H$  – ток через нагрузку, который определяется возможностями транзистора  $VT1$ .

Зная напряжение  $U_{вх}$  и максимальный ток нагрузки  $I_H$ , подсчитывают сопротивление резистора  $R1$  как

$$R1 = \frac{U_{вх} - 2,5}{I_H}. \quad (3.29)$$

Примечательно, что в настоящее время для стабилизации напряжения и тока применяют исключительно полупроводниковые стабилизаторы. Однако некоторое время назад для стабилизации тока применяли, например, *бареттер* – заполненный водородом стеклянный баллон, внутрь которого помещена тонкая платиновая, железная или вольфрамовая проволока (нить), обычно свёрнутая в спираль. По сути, это специальная разновидность лампы накаливания с водородным наполнением. Такое устройство имеет нелинейную ВАХ, на которой в некотором диапазоне изменений напряжения ток изменяется в незначительных пределах. Нелинейность ВАХ обусловлена положительным температурным коэффициентом сопротивления металлической нити, при увеличении напряжения на приборе увеличивается тепловыделение в нити, что

увеличивает её температуру и, соответственно, увеличивает сопротивление, что сохраняет ток цепи приблизительно одинаковым. Таким образом, бареттер, включенный последовательно с нагрузкой, поддерживает в ней относительно стабильный ток при изменениях напряжения электропитания.

В цепях же переменного тока применяли, как правило, параметрические *феррорезонансные стабилизаторы* (ФРС). В СССР они имели широкое распространение: обычно через них подключали телевизоры. В телевизорах первых поколений применялись сетевые ИЭП с линейными стабилизаторами напряжения (а некоторые цепи и вовсе питались нестабилизированным напряжением), которые не всегда справлялись с колебаниями напряжения сети, особенно в сельской местности, что требовало предварительной стабилизации напряжения. С появлением телевизоров, имевших импульсные ИЭП, необходимость в дополнительной стабилизации напряжения сети отпала.

ФРС представляет собой устройство, принцип работы которого основан на использовании резонансных явлений и нелинейных свойств насыщенных стальных магнитопроводов. ФРС состоит из двух дросселей: с ненасыщаемым сердечником (имеющим магнитный зазор) и насыщенным, а также конденсатора. Особенность ВАХ насыщенного дросселя в том, что напряжение на нём мало изменяется при изменении тока через него. Подбором параметров дросселей и конденсаторов можно обеспечить стабилизацию напряжения при изменении входного напряжения в достаточно широких пределах, но незначительное отклонение частоты питающей сети очень сильно влияет на характеристики стабилизатора.

Рассмотрим устройство и работу наиболее часто применявшегося ФРС с магнитным шунтом (рисунок 3.21). Магнитопровод этого стабилизатора представляет собой трёхстержневой сердечник с различными сечениями. На среднем стержне с большим сечением расположена первичная обмотка  $w_1$  и компенсационная  $w_k$ , на крайнем стержне с меньшим сечением – вторичная

обмотка  $w_2$  и резонансная  $w_p$  обмотки. Третий стержень, отделённый от среднего стержня воздушным зазором, является магнитным шунтом. На обмотку  $w_1$  подаётся напряжение сети переменного тока.

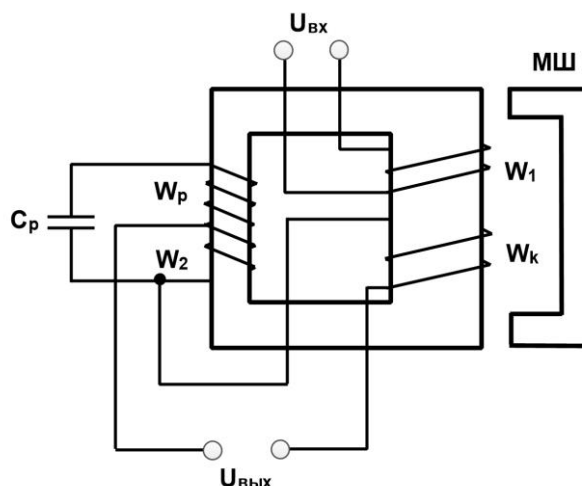


Рисунок 3.21 – Конструкция ФРС с магнитным шунтом

МШ – магнитный шунт

Ток, проходящий по обмотке  $w_1$ , создаёт в среднем стержне основной магнитный поток, который замыкается через крайние стержни. Так как средний стержень имеет большое сечение, то магнитодвижущая сила (МДС) обмотки  $w_1$  не насыщает его. Стержень с обмотками  $w_2$  и  $w_p$  оказывается насыщенным, так как он имеет меньшее по сравнению со средним стержнем сечение. Изменением величины воздушного зазора между шунтом и средним стержнем создается необходимое распределение магнитного потока между шунтом и стержнем с меньшим сечением, что является дополнительным средством для более точной настройки ФРС.

Конденсатором  $C_p$ , включенным параллельно с последовательно соединенными вторичной и резонансной обмотками, создан резонансный контур (резонанс токов), в ветвях которого протекают очень значительные токи, которые ещё больше насыщают стержень с меньшим сечением.

ФРС работает следующим образом. При повышении входного напряжения возрастает и магнитный поток в среднем стержне. В связи с тем,

что сталь крайнего стержня с меньшим сечением уже насыщена, магнитный поток в нём возрастает незначительно и выходное напряжение ФРС мало изменяется. При этом избыток потока замыкается через магнитный шунт и частично рассеивается через воздух.

Стабильность выходного напряжения повышается ещё больше благодаря компенсационной обмотке  $w_k$ , так включенной последовательно с обмоткой  $w_2$ , что её напряжение вычитается из напряжения вторичной обмотки. Напряжение компенсационной обмотки пропорционально напряжению сети, но оно значительно меньше напряжения обмотки  $w_2$ . Напряжение на нагрузке ФРС равно разности напряжений вторичной и компенсационной обмоток, поэтому небольшое приращение напряжения, которое всё же получается на вторичной обмотке  $w_2$ , будет скомпенсировано увеличившимся напряжением обмотки  $w_k$ .

Из-за явления резонанса ФРС чувствителен к колебаниям частоты питающей сети. Изменение частоты сети на 1% вызывает изменение стабилизированного напряжения на 1,5-2%, что является основным недостатком ФРС. К другим недостаткам относятся искажение формы кривой выходного напряжения и зависимость выходного напряжения от характера нагрузки. Достоинствами ФРС являются небольшая стоимость, большой срок службы и надёжность в работе, простота конструкции и простота в обслуживании, высокая стабильность напряжения.

Внутреннее устройство и внешний вид ФРС изображены на рисунке 3.22.

Другой пример параметрического стабилизатора переменного тока, практически не используемого в настоящее время, – *дроссельный*.

Дроссель, работающий в режиме насыщения магнитопровода, обладает нелинейной ВАХ для переменного тока (рисунок 3.23а). Типовая схема дроссельного стабилизатора приведена на рисунке 3.23б.

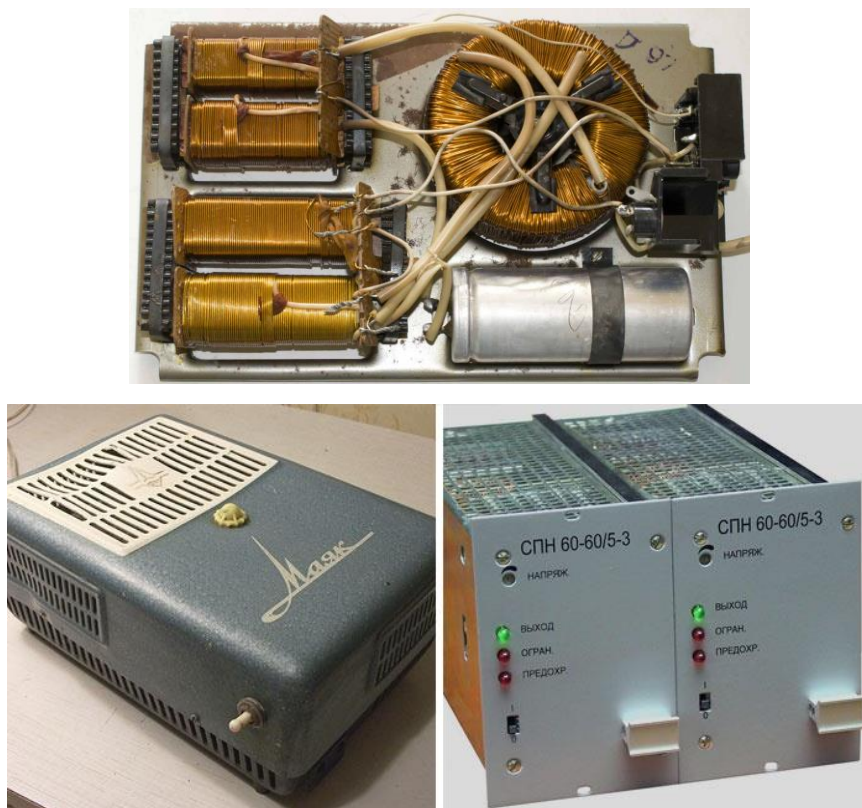


Рисунок 3.22 – Устройство и внешний вид феррорезонансных стабилизаторов

В схеме стабилизатора насыщенный дроссель  $L2$  включается параллельно нагрузке  $Z_H$ . В качестве балластного сопротивления применяется дроссель  $L1$ , работающий в режиме насыщения магнитопровода и имеющий линейную ВАХ.

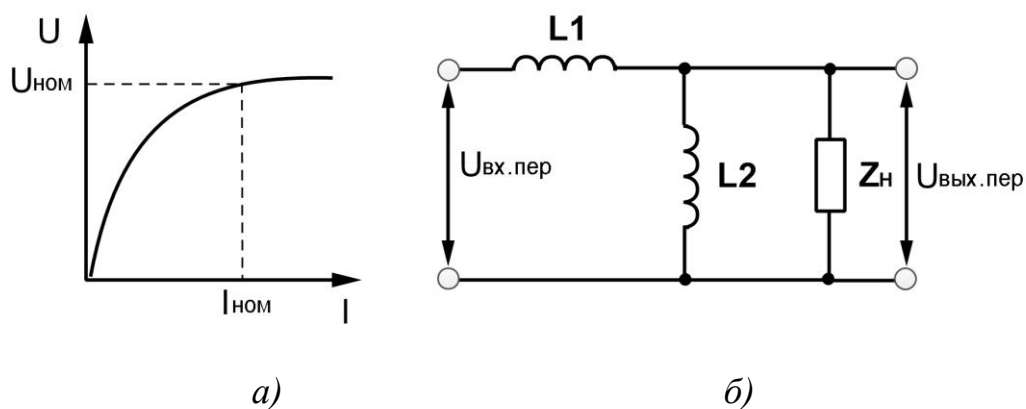


Рисунок 3.23 – ВАХ дросселя переменного тока (а) и схема простейшего дроссельного стабилизатора (б)



Принцип действия схемы состоит в следующем. При увеличении переменного напряжения на входе стабилизатора  $U_{вх.пер}$  увеличится напряжение на выходе  $U_{вых.пер}$  и балластном линейном дросселе  $L1$ . Ток через насыщенный дроссель резко возрастёт. Но при этом падение напряжения на дросселе  $L1$  тоже возрастёт, а на дросселе  $L2$  и нагрузке  $Z_H$  увеличится незначительно. При уменьшении входного напряжения процессы стабилизации происходят аналогично.

Достоинства такого стабилизатора:

- простота устройства;
- большой диапазон рабочих напряжений.

Недостатки:

- низкий КПД (0,4-0,6), так как стабилизаторы работают при больших токах;
- малый коэффициент мощности – 0,6;
- малый коэффициент стабилизации из-за большого динамического сопротивления:  $K_{ст} < 10$ ;
- искажения формы кривой переменного напряжения на нагрузке;
- большие масса и габариты.

### 3.5.3 Компенсационные стабилизаторы напряжения (тока)

#### 3.5.3.1 Непрерывного действия

В компенсационных стабилизаторах ИЭП осуществляется непрерывное или импульсное регулирование: последовательно или параллельно с нагрузкой включается РЭ (обычно транзистор), управляемый сигналом ОС, за счет чего выходное напряжение ИЭП поддерживается на постоянном уровне.

На рисунке 3.24а приведена функциональная схема типового линейного ИЭП со стабилизатором, у которого РЭ (транзистор) включен последовательно с нагрузкой. В частности, на схеме показано, что эквивалентом транзистора в схеме стабилизатора является резистор с переменным управляемым

сопротивлением. На рисунке 3.24б приведены формы напряжений на входе и выходе стабилизатора.

Отличительная особенность линейных ИЭП заключается в том, что их выходное напряжение всегда ниже нестабилизированного входного напряжения. Кроме этого, выходное напряжение  $U_0$  всегда имеет одинаковую полярность с входным напряжением  $U_{сф}$ , а сам стабилизатор непрерывно рассеивает мощность  $P_{рас} = I_H(U_{сф} - U_0)$ .

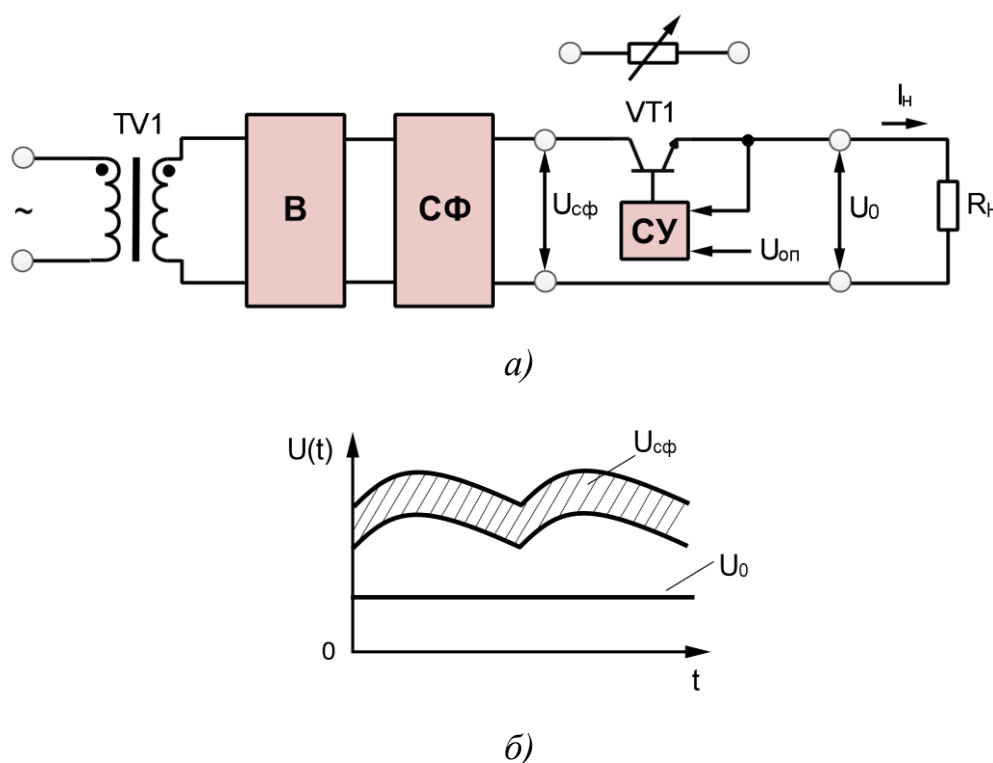


Рисунок 3.24 – Функциональная схема (а) типового линейного сетевого ИЭП и формы его напряжений (б)

В – выпрямитель; СФ – сглаживающий фильтр; СУ – схема управления

Ряд линейных ИЭП, помимо своей основной функции, способны:

- следить за значением входного напряжения и формировать контрольный сигнал, предназначенный для предупреждения об аварийной просадке напряжения на входе;

- изменять выходное напряжение и выходной ток под действием управляющего сигнала;

- совместно с резервным источником электроэнергии (аккумулятором или гальванической батареей) обеспечивать бесперебойное электропитание РЭА.

Современная тенденция развития линейных ИЭП такова, что они строятся в основном с применением интегральных стабилизаторов, а доля дискретных активных элементов в них постоянно уменьшается. Первый интегральный стабилизатор увидел свет в 1966 г. (микросхема LM100 разработки Р. Видлара из "National Semiconductor"). LM100 позволяла стабилизировать напряжения от 2 до 30 В с совокупной ошибкой в диапазоне температур от минус 55°C до 125°C не более 1%. Источником опорного напряжения выступал стабилитрон на 6,3 В, регулирующим элементом – относительно маломощный составной транзистор, поэтому на практике микросхема LM100 использовалась не как законченный стабилизатор, а как схема управления внешним силовым транзистором.

Первый в мире интегральный трехвыводной стабилизатор – LM109 – появился в первой половине 1970 г. Новая микросхема отличалась от LM100 не только предельными значениями тока и мощности и удобством применения, но и тем, что источником опорного напряжения в нём служил не стабилитрон, а так называемый *бандгап Видлара* – транзисторный источник опорного напряжения, примерно равного ширине запрещённой зоны кремния (около 1,2 В). Принцип действия бандгапа сформулировал ещё в 1964 г. Д. Хилбибер, но первую практическую схему, работающую на этом принципе, спроектировал именно Р. Видлар. Первой микросхемой со встроенным бандгапом и стала LM109. Замена "высоковольтного" (около 6 В) стабилитрона на низковольтный (1,2 В) бандгап сделала возможным создание экономичных стабилизаторов на низкие выходные напряжения (3,3 В, 2,5 В и ниже), однако в 1969 г. эта ниша ещё не была востребована промышленностью.

Современные интегральные стабилизаторы непрерывного действия имеют лучшие электрические параметры, имеют широкий спектр

функциональных возможностей, но построены на тех же принципах, что и ранние стабилизаторы.

Отечественная и зарубежная промышленность в настоящее время выпускает большое число интегральных стабилизаторов непрерывного действия, рассчитанных как на фиксированное значение выходного напряжения, так и предназначенных для регулирования величины выходного напряжения в достаточно широких пределах. Например, выходное напряжение недорогой отечественной микросхемы 142ЕН12 (АО "НПП "Элтом") может изменяться в пределах от 1,25 до 36 В, при этом она может отдавать ток в нагрузку до 1,5 А. Популярная зарубежная микросхема LT1085 ("Linear Technology") обеспечивает в нагрузке до 7,5 А, а пределы изменения выходного напряжения для неё составляют от 0 до 35 В.

Следует отметить, что в линейных ИЭП нет преобразования частоты. Такие ИЭП ранее использовались широко, однако в последнее время вместо них все чаще используют ИЭП с преобразованием частоты. Причиной этого является то, что в ИЭП без преобразования частоты масса и габариты трансформатора, работающего на частоте 50/400 Гц, а также сглаживающего фильтра оказываются довольно большими. Тем не менее, линейные ИЭП используют и в настоящее время в ряде приложений (рисунок 3.25).

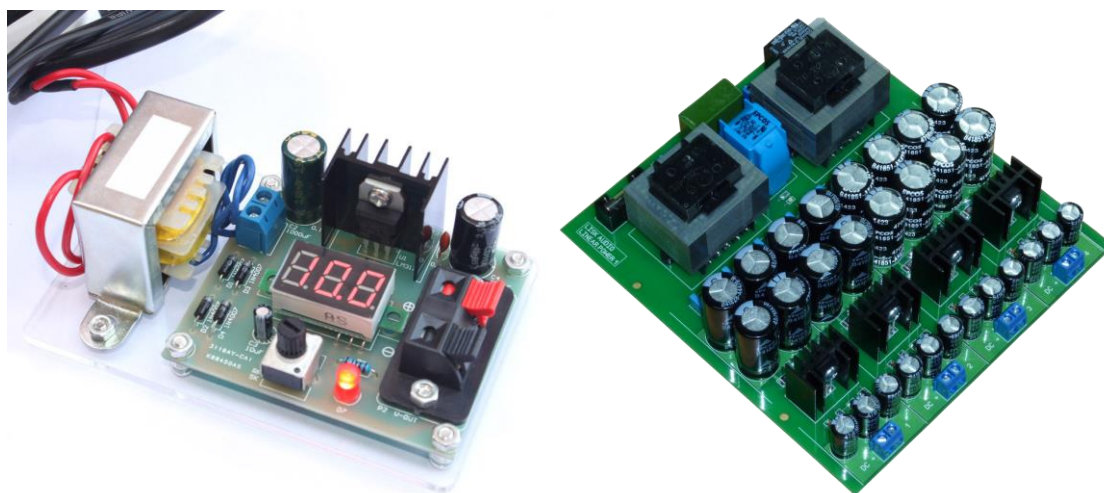


Рисунок 3.25 – Современные линейные ИЭП с сетевым трансформатором

Вместе с тем наличие сетевого трансформатора в линейном ИЭП вовсе не обязательно. В современной РЭА значительно чаще применяют так называемые "point of load" стабилизаторы (POL стабилизаторы) непрерывного действия – их устанавливают, как правило, в непосредственной близости от нагрузки. Они представляют собой микросхему с небольшим "обвесом" – дополнительными пассивными компонентами (резисторы, конденсаторы). Входным напряжением для таких стабилизаторов является постоянное напряжение низкого качества.

Линейные ИЭП занимают значительную нишу в приложениях, где невысокий КПД таких источников не играет особой роли. К таким приложениям относится стационарное наземное оборудование, для которого принудительное воздушное охлаждение – не проблема. Сюда же относятся приборы, в которых измеритель настолько чувствителен к электрическому шуму, что требует электрически "тихого" ИЭП. Среди таких приборов можно назвать аудио- и видеоусилители, радиоприемники и т. д. Линейные ИЭП популярны также в качестве локальных, встроенных в плату.

Обычно линейные ИЭП особенно полезны для приложений, требующих не более 10 Вт выходной мощности. При выходной мощности более 10 Вт обязательный теплоотвод становится столь громоздким и дорогостоящим, что более привлекательными становятся импульсные ИЭП.

Отметим, что в качестве РЭ в компенсационных стабилизаторах непрерывного действия применяют и дроссель. Другой пример ранее рассмотренного дроссельного стабилизатора – стабилизатор с дросселем насыщения, представляющим собой устройство, индуктивное сопротивление которого изменяется в зависимости от величины подмагничивающего постоянного тока. Дроссель насыщения имеет обмотку переменного тока, или рабочую обмотку, и одну или несколько обмоток подмагничивания, или обмоток постоянного тока. Магнитная цепь его состоит из стального

замкнутого магнитопровода. Магнитный поток дросселя насыщения создаётся одновременно переменным и постоянным магнитными потоками.

Дроссели насыщения могут быть включены последовательно либо с первичной обмоткой силового трансформатора, либо с вторичной его обмоткой. На рисунке 3.26 представлен стабилизатор, в котором дроссель насыщения включен последовательно с первичной обмоткой силового трансформатора.

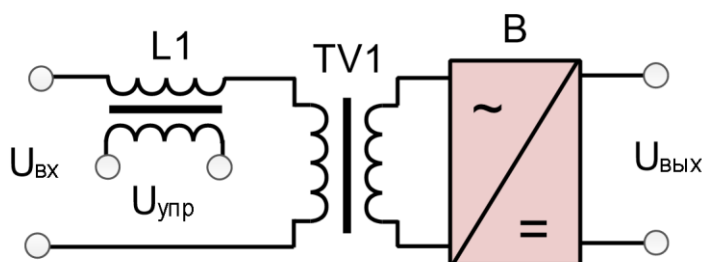


Рисунок 3.26 – Схема стабилизатора напряжения с управляемым дросселем насыщения

$L$  – дроссель насыщения;  $TV$  – трансформатор;  $B$  – выпрямитель;

$U_{вх}$  – входное напряжение ИЭП;  $U_{вых}$  – выходное напряжение ИЭП;

$U_{упр}$  – управляющее напряжение дросселя

Принцип действия такого стабилизатора заключается в том, что рабочая обмотка дросселя насыщения  $L$  и первичная обмотка силового трансформатора  $TV$  образуют делитель для входного напряжения  $U_{вх}$ , причём сопротивление обоих плеч этого делителя имеет преимущественно индуктивный характер. Напряжение первичной обмотки трансформатора  $TV$  и, следовательно, выходное напряжение выпрямителя  $B$  зависят от величины индуктивного сопротивления дросселя  $L$ , которое может регулироваться за счёт изменения напряжения на управляющей обмотке. Чем больше величина постоянного напряжения  $U_{упр}$ , приложенного к обмотке управления, тем меньше сопротивление дросселя  $L$  и, следовательно, больше выходное напряжение выпрямителя  $B$ .

Таким образом, для переменного тока катушка со стальным сердечником обладает реактивным (индуктивным) сопротивлением. Ток в нагрузке будет зависеть от суммы индуктивного и активного сопротивлений, а падение напряжения на каждом из них будет пропорционально их величинам.

При стабилизации напряжения (тока) с помощью дросселей насыщения применяется система регулирования, получившая название "следающая система", при которой ток в обмотке подмагничивания изменяется автоматически в зависимости от изменения напряжения или тока на выходе выпрямительного устройства. Регулирование осуществляется с помощью специального стабилизатора, включенного между выходом выпрямительного устройства и обмоткой подмагничивания и питающегося от сети переменного тока. В случае стабилизации напряжения на вход стабилизатора поступает напряжение с выхода выпрямительного устройства, а в случае стабилизации тока – сигнал, пропорциональный выпрямленному току выпрямительного устройства. Но так как выпрямленный ток пропорционален переменному току выпрямительного устройства, то в режиме стабилизации тока на вход стабилизатора контролируемый сигнал поступает со вторичной обмотки трансформатора тока через выпрямитель. Вход стабилизатора переключается на напряжение выхода выпрямительного устройства или же на напряжение трансформатора тока вручную или автоматически с помощью контактов реле.

Если напряжение на выходе выпрямительного устройства по каким-либо причинам (например, из-за колебания напряжения в сети или изменения тока нагрузки) отклонится от заданной величины, то стабилизатор сразу же отреагирует на это отклонение, автоматически изменив ток подмагничивания до необходимой величины и восстановив этим заданную величину выпрямленного напряжения.

В настоящее время стабилизаторы с дросселями насыщения в цепях переменного тока находят ограниченное применение. В цепях же постоянного

тока они широко встречаются в компьютерных блоках электропитания.

Также для стабилизации напряжения переменного тока применяют (или когда-то применяли) следующие способы:

- электромеханический и электродинамический;
- релейный;
- электронный;
- гибридный;
- накопительный.

*Электромеханический и электродинамический стабилизаторы* представляют собой вольтодобавочные трансформаторы. В них напряжение преобразуется за счёт перемещения узла, снимающего ток у входа, по трансформаторной обмотке. В результате коэффициент стабилизации меняется мягко до той величины, которая нужна для выходного напряжения.

В электромеханическом выравнителе управление реализуется щётками, которые быстро изнашиваются, поскольку это подвижные элементы. Снизить изнашиваемость удаётся в электродинамическом аналоге, в котором щётки заменены роликом. Внешний вид такого стабилизатора приведён на рисунке 3.27.

Это единственные стабилизаторы переменного тока, которые не только обеспечивают гладкую его трансформацию, но и формируют из него синусоиду. На выводе значение относительно неизменно, максимальное отклонение от номинала не превышает 3%. Такая подача энергии оптимальна для бытовой и производственной техники.

Преимущества:

- широкий диапазон входного напряжения (130-260 В);
- отсутствие помех на выводе;
- возможность перегрузки до 200% на полсекунды;
- бесшумная работа (если нет перегрузки);



- отличная помехоустойчивость.



Рисунок 3.27 – Электродинамический стабилизатор переменного тока

Недостатки:

- нельзя применять при морозах (конструкция может работать только при непродолжительных лёгких заморозках и до 40°C);

- низкая скорость стабилизации (проблема решается путём добавления количества щёток).

К преимуществам электродинамического аналога стоит отнести его способность работать при отрицательных температурах (не более минус 15°C). Ещё один плюс: конструкция выдерживает перегрузки на 200% до 120 с.

Принцип работы релейного стабилизатора напряжения переменного тока схож с работой других автотрансформаторных стабилизаторов с регулировкой по ступеням за счёт включения/выключения отдельных обмоток силового трансформатора с помощью электромеханических реле. Поэтому повышение и понижение выходного напряжения – это параллельный процесс повышения и понижения на вводе поддерживающего устройства.

Особенность релейного стабилизатора – выводимое значение всегда меняется в пределах ступени. Например, задан диапазон допустимых значений от 215 до 220 В. Это значит, что напряжение будет постоянно меняться в этих

рамках, в то время как на входе этот диапазон может составлять 200-230 В. Размах ступени зависит от количества обмоток: чем их больше, тем меньше диапазон, и тем более ровное будет напряжение на выходе.

Преимущества:

- высокая скорость стабилизации;
- небольшие размеры;
- большой диапазон напряжения на входе (140-270 В);
- допустимая перегрузка в 110% на 4 секунды;
- бесшумная работа;
- возможность работы от минус 20°C до 40°C.

Недостатки:

- ступенчатая (а не плавная) стабилизация;
- скорость стабилизации зависит от точности выходного напряжения: чем точнее напряжение, тем меньше скорость.

*Электронный стабилизатор* напряжения переменного тока – это аналог релейного стабилизатора. Разница между ними заключается только в способе смены включенных в нагруженную цепь трансформаторных обмоток (рисунок 3.28).



Рисунок 3.28 – Электронные стабилизаторы напряжения сети

В данном стабилизаторе переключение происходит не благодаря наличию реле, а за счёт полупроводниковых приборов (обычно симисторов или тиристоров). Так как механические детали отсутствуют, срок службы

устройства резко возрастает. В сочетании с приемлемой стоимостью этот вариант для бытовой техники является оптимальным. В остальном преимущества и недостатки совпадают с теми, что указаны для релейного стабилизатора.

В 2012 г. в продаже появился новый вид стабилизаторов – *гибридный*. Он представляет собой электромеханическое устройство, в конструкцию которого дополнительно входят два релейных устройства. Максимальный диапазон входного напряжения такого стабилизатора составляет 105-280 В. Они подходят для бесперебойного энергоснабжения потребителей электроэнергии в частном доме, квартире, офисе.

Примером накопительных стабилизаторов переменного тока являются системы типа "*двигатель-генератор*". Принцип их работы заключается в преобразовании электрической энергии в кинетическую с помощью электродвигателя. Затем генератор обратно преобразует её из кинетической в электрическую, но ток уже обладает конкретными и постоянными характеристиками.

Ключевой элемент системы – маховик, который накапливает в себе кинетическую энергию и стабилизирует выводимое напряжение. Маховик жёстко соединён с подвижными частями двигателя и генератора. Он очень массивный и обладает большой инерцией, сохраняющей скорость, которая зависит только от фазной частоты. Поскольку скорость вращения маховика относительно постоянна, напряжение остаётся постоянным даже при значительных провалах и скачках напряжения на входе.

### 3.5.3.2 Импульсного действия

В импульсных ИЭП обязательно наличие стабилизатора напряжения (тока) импульсного действия. Как пример, рассмотрим сетевой импульсный ИЭП, структурная схема которого приведена на рисунке 3.29.

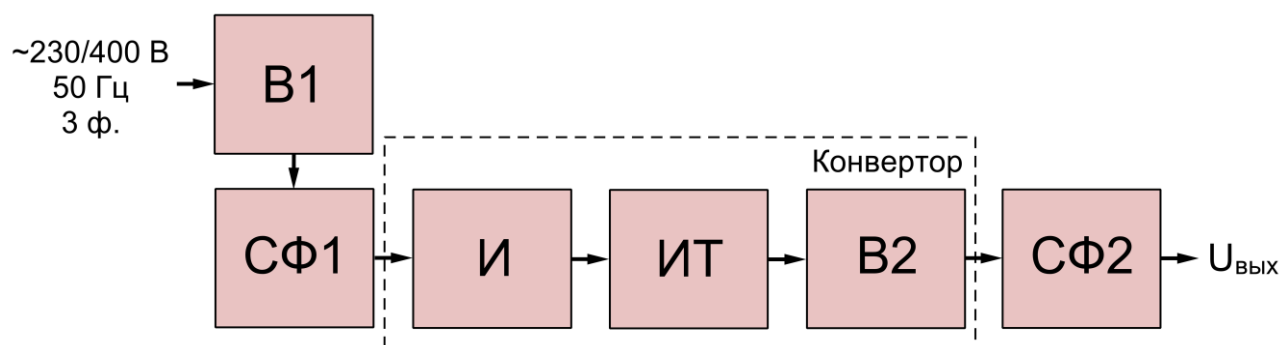


Рисунок 3.29 – Типовая структура сетевого импульсного ИЭП

$B1$  – первый выпрямитель;  $C\Phi1$  – первый сглаживающий фильтр;  $И$  – инвертор напряжения;  $ИТ$  – импульсный трансформатор;  $B2$  – второй выпрямитель;  $C\Phi2$  – второй сглаживающий фильтр;  $U_{вых}$  – напряжение на выходе ИЭП

Трехфазное напряжение питающей сети переменного тока подаётся непосредственно на выпрямитель  $B1$  без использования силового трансформатора, который для частоты 50/400 Гц имеет значительные массу и габариты. На выходе сглаживающего фильтра  $C\Phi1$  создается постоянное напряжение, которое вновь преобразуется в переменное с помощью инвертора  $И$ . Полученное переменное напряжение имеет частоту, значительно превышающую 50 Гц (в настоящее время часто используют частоты от сотен килогерц до единиц мегагерц). Затем напряжение передаётся через импульсный трансформатор  $ИТ$  (понижается или повышается до требуемого номинала), выпрямляется и фильтруется в  $B2$  и  $C\Phi2$  соответственно. Так как трансформатор  $ИТ$  работает на повышенной частоте, то его вес и габариты, а также вес и габариты сглаживающего фильтра  $C\Phi2$  оказываются очень незначительными. Инвертор  $И$ , трансформатор  $ИТ$  и выпрямитель  $B2$  образуют *конвертор* – устройство для изменения уровня постоянного напряжения.

Необходимо отметить, что в такой схеме инвертор выполняет роль преобразователя и стабилизатора напряжения (система управления РЭ инвертора на рисунке 3.29 не показана). В качестве РЭ в инверторе используют

обычно транзисторы (биполярные или полевые), иногда применяют тиристоры. В любом случае РЭ работают в импульсном (ключевом) режиме.

Таким образом, преобразование электрической энергии в инверторе осуществляется с помощью резко нелинейных элементов – вентилях, которые могут находиться только в одном из двух состояний – включенном (проводящем) или выключенном (запертом). В результате как потребление электроэнергии из питающей сети, так и передача ее потребителю происходит дискретно, что в общем случае приводит к снижению качества преобразуемой и преобразованной электроэнергии.

Для ослабления и сглаживания последствий дискретности процесса преобразования электроэнергии в импульсных ИЭП предназначены фильтры на входе и выходе конвертора. Другими словами, эти фильтры обеспечивают электромагнитную совместимость конвертора с питающей сетью и нагрузкой. Под *электромагнитной совместимостью* в электротехнике понимают способность различных электротехнических устройств, связанных сетями электроснабжения и электрораспределения, одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации при наличии непреднамеренных помех в этих сетях и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим устройствам, присоединённым к этой сети. Образно говоря, ситуация схожа с человеческой совместимостью многих жильцов в одной квартире: они должны пользоваться коммунальными услугами, не создавая недопустимых помех друг другу.

Как правило, в структуру импульсного ИЭП также дополнительно включают схемы защиты, сигнализации, индикации и т. д. (на рисунке 3.29 не показаны).

Типовая структурная схема стабилизатора напряжения, РЭ (силовой ключ) которого работает в импульсном режиме (режиме переключения), показана на рисунке 3.30. Такой стабилизатор состоит из силовой цепи

(силовым ключом  $K$  и фильтр  $\Phi$ ) и схемы управления  $СУ$ .

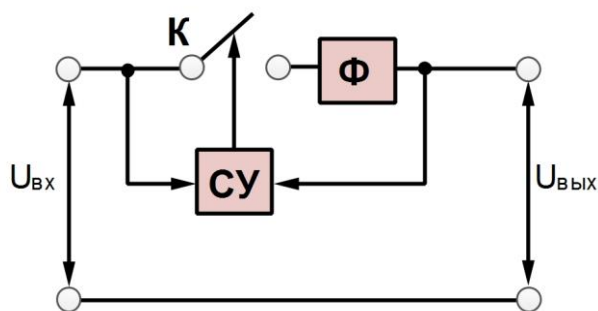


Рисунок 3.30 – Структура стабилизатора импульсного ИЭП

$СУ$  – схема управления;  $K$  – силовой ключ;  $\Phi$  – фильтр;  $U_{вх}$  – напряжение на входе стабилизатора;  $U_{вых}$  – напряжение на выходе стабилизатора

В качестве силового ключа обычно применяют транзистор, который быстро переходит из области закрытого состояния (отсечки) в область открытого состояния (насыщения).

При импульсном регулировании источник напряжения  $U_{вх}$  периодически подключается к нагрузке и отключается от неё, т. е. РЭ преобразовывает напряжение постоянного тока в последовательность импульсов напряжения (рисунок 3.31). Периодичность переключения обеспечивается схемой управления  $СУ$ . Сигнал рассогласования преобразуется в последовательность импульсов с изменяющимися временными параметрами, которые затем воздействуют на РЭ таким образом, чтобы поддержать неизменным выходное напряжение. На выходе стабилизатора имеется демодулирующее устройство, например  $LC$ -фильтр, который вновь преобразует полученные импульсы в напряжение постоянного тока.

Как правило, временными параметрами импульсов, воздействующих на РЭ, являются: длительность  $t_{вкл}$ , период  $T$ , скважность  $D$  (рисунок 3.32). При этом

$$D = \frac{t_{вкл}}{T}. \quad (3.30)$$

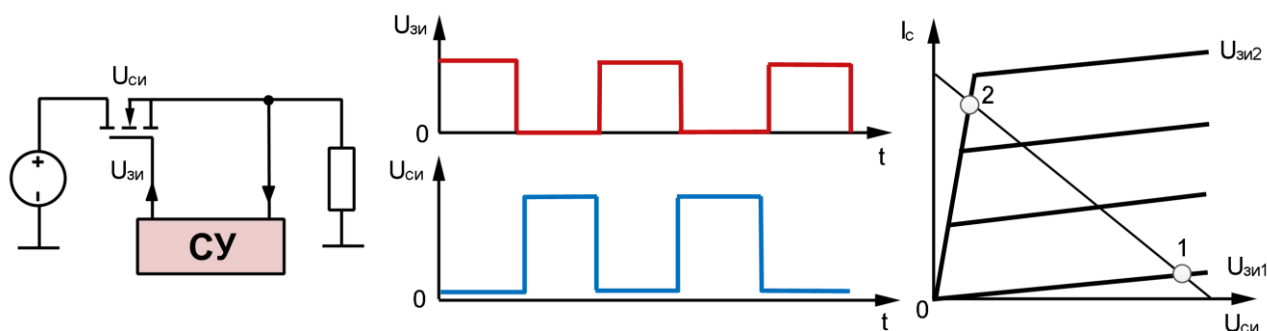


Рисунок 3.31 – Работа транзистора в режиме переключения

СУ – схема управления;  $U_{зи}$  – напряжение затвор-исток;  $U_{си}$  – напряжение сток-исток;

$I_c$  – ток стока

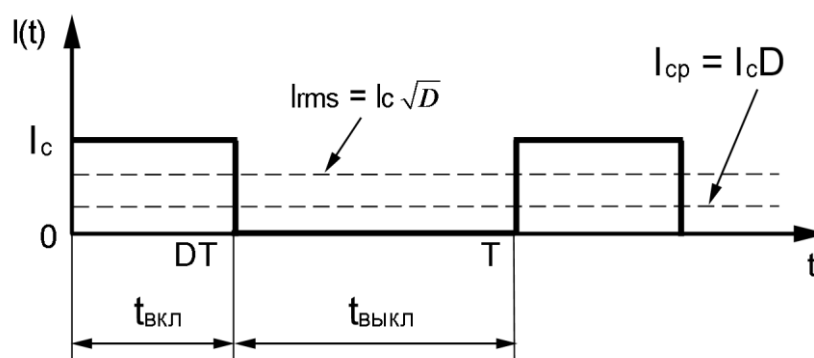


Рисунок 3.32 – Последовательность импульсов тока через регулирующий элемент

Достоинством импульсных ИЭП является высокий КПД – 60-95% (КПД линейных ИЭП, как правило, не превышает 40-50%). Также они имеют меньшие габариты и массу по сравнению с линейными ИЭП.

Недостатками импульсных ИЭП являются: сложность электрической схемы из-за большого числа элементов; высокий уровень электромагнитных помех, получающийся за счёт крутых фронтов импульсов тока и напряжения на РЭ (рисунок 3.33), а также пульсаций выходного напряжения. Для сравнения на рисунке 3.34 приведены типовые формы выходных напряжений линейного и импульсного ИЭП.

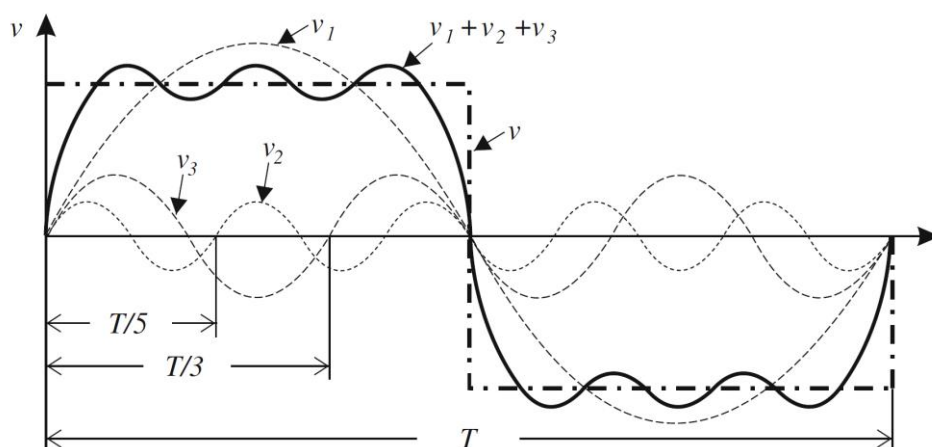


Рисунок 3.33 – К проблеме возникновения электромагнитных помех  
в импульсных ИЭП

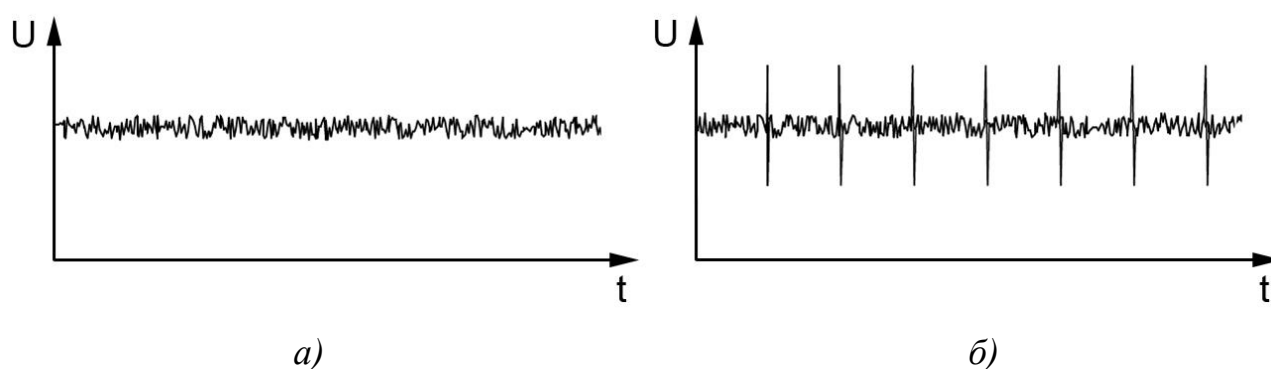


Рисунок 3.34 – Типовые формы выходных напряжений линейного (а) и  
импульсного (б) ИЭП

Для электропитания РЭА широко используют, по крайней мере, три типа импульсных ИЭП:

- с преобразователем типа переменный ток/постоянный ток (AC-DC преобразователи);
- с преобразователем типа постоянный ток/постоянный ток (DC-DC преобразователи);
- с преобразователем типа постоянный ток/переменный ток (DC-AC преобразователи или инверторы).

Каждый тип устройств имеет собственные определенные области применения.



Следует отметить, что DC-DC преобразователи, в отличие от линейных ИЭП, могут:

- обеспечивать выходное напряжение, превышающее по величине входное напряжение;
- инвертировать входное напряжение (полярность выходного напряжения становится противоположной полярности входного напряжения).

Импульсные ИЭП широко используют в современной РЭА (они занимают практически 90% мирового рынка всех изготавливаемых ИЭП), в частности в компьютерах, мобильных телефонах, промышленном оборудовании, телекоммуникационных системах, а также в специальных радиоэлектронных комплексах (рисунок 3.35).

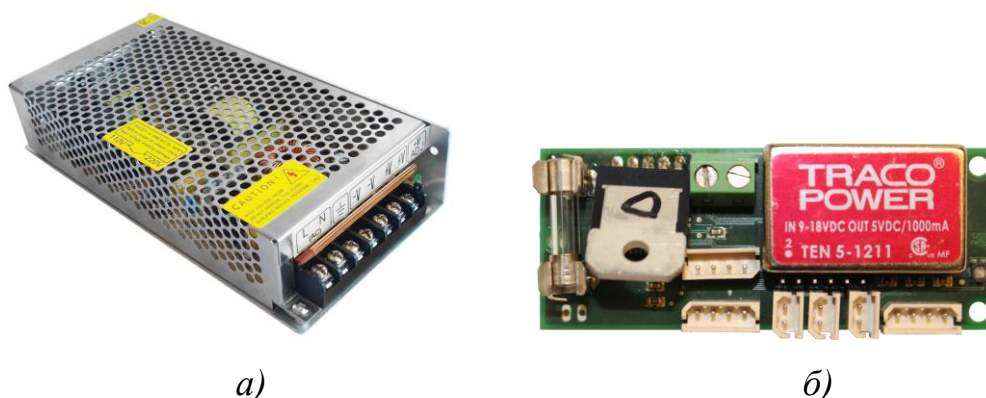


Рисунок 3.35 – Импульсный ИЭП типа AC-DC (a) и модуль электропитания типа DC-DC, встроенный в плату ИЭП (б)

Следует отметить, что зачастую в современной РЭА используют ИЭП, в которых применяют и линейные стабилизаторы, и импульсные – *комбинированные ИЭП*.

Принципы построения импульсных ИЭП используют вот уже более 100 лет. Система зажигания для двигателя внутреннего сгорания представляет собой ни что иное, как самый первый вариант импульсного ИЭП. Затем такие источники использовали в высоковольтных блоках телевизоров.

Упоминания о некоторых видах импульсных ИЭП относят к 1930-1940-м гг. В то время, в частности, в маломощных ИЭП

с электропитанием от гальванических батарей и аккумуляторов в качестве силовых ключей использовали электромагнитный прерыватель-вибратор. На его основе создавали вибрационные преобразователи. Чаще всего вибраторы изготавливали на частоту 100 Гц, но иногда и на повышенную частоту (200-400 Гц). По своей структуре такие ИЭП представляли собой ключевые преобразователи, предназначенные для получения более высокого напряжения постоянного или переменного тока. Естественно, их массогабаритные показатели и надежность были низкие. В то время РЭА, включая электронно-вычислительные машины, выполнялась на электронных лампах, а значит, требовала для электропитания ИЭП с выходным напряжением в сотни вольт, но при сравнительно небольших токах (десятки миллиампер, иногда единицы ампер).

В 1950-х гг. в ИЭП повышенной и большой мощности с успехом использовали преобразователи на тиратронах, которые работали уже на повышенной частоте: до единиц килогерц. Тиратрон – трехэлектродный управляемый ионный прибор дугового разряда с положительной пусковой характеристикой. В качестве диодов использовали селеновые и электровакуумные (кенотроны) выпрямители. КПД, массогабаритные показатели и надёжность таких ИЭП также оставляли желать лучшего. Однако такие ИЭП применялись преимущественно в военной РЭА как альтернатива линейным ИЭП, применявшимся в бытовой технике.

После разработки промышленных образцов транзисторов в РЭА вместо электронных ламп стали все более широко использоваться полупроводниковые приборы: вначале германиевые, а затем кремниевые. Применение полупроводниковых приборов потребовало изменения номенклатуры ИЭП, которые обеспечивали бы на выходе низкие напряжения (до 60 В), но на большие токи (до десятков ампер). "Pioneer Magnetics" начала производить

импульсные ИЭП в 1958 г. "General Electric" выпустила ранний проект транзисторного ИЭП в 1959 г.

В 1960-е гг. НАСА и аэрокосмическая индустрия стала основной движущей силой в развитии импульсных ИЭП, поскольку для аэрокосмических нужд преимущества малого размера и высокой эффективности ИЭП имели приоритет перед большой стоимостью. К примеру, в 1962-м г. спутник "Telstar" (первый спутник, начавший передачу телевидения) и ракета "Минитмен" использовали импульсные ИЭП. Годы шли, цены падали, и импульсные ИЭП начали встраивать в бытовую технику. К примеру, в 1966 г. "Tektronix" использовала импульсные ИЭП в портативном осциллографе, что позволяло ему работать как от розетки, так и от батареек.

Примерно в это время индустрия компьютеров начала также использовать импульсные ИЭП. Среди ранних примеров – микрокомпьютер PDP-11/20 от "Digital Equipment" 1969 г., и микрокомпьютер 2100A от "Hewlett-Packard" 1971 г. Среди компаний, использующих импульсные ИЭП, отметились все главные игроки рынка: "IBM", "Honeywell", "Univac", "DEC", "Burroughs" и "RCA".

Импульсные ИЭП часто освещались в журналах той эпохи, как в виде рекламы, так и в статьях. Ещё в 1964 г. "Electronic Design" рекомендовал использовать импульсные ИЭП из-за более высокой эффективности.

Роберт Бошерт, уволившийся с работы и начавший собирать ИЭП у себя на кухне в 1970-м г., был одним из ключевых разработчиков технологии импульсных ИЭП. Он концентрировался на упрощении схем, чтобы сделать импульсные ИЭП конкурентными по цене с линейными, и к 1974 г. уже выпускал недорогие ИЭП для принтеров в промышленных количествах, а потом в 1976 г. выпустил и недорогие ИЭП на 80 Вт.

К 1977 г. "Boschert" выросла до компании из 650 человек. Она делала ИЭП для спутников и истребителя Grumman F-14, а позже – компьютерные ИЭП для "HP" и "Sun".

Вместе с тем массовое применение импульсных ИЭП вплоть до конца 1960-х гг. было ограничено функциональными возможностями трёх главных компонентов ИЭП: магнитопровода, силового ключа и выпрямителя. Лишь в 1970-е гг. достижения в разработке всех категорий компонентов кардинально изменили ситуацию на рынке ИЭП, особенно в тех секторах, где применение линейных стабилизаторов было невозможно вследствие их неспособности обеспечить требуемый уровень мощности.

Появление недорогих высоковольтных высокочастотных транзисторов в конце 1960-х гг. и начале 1970-х гг., выпускаемых такими компаниями, как "Solid State Products", "Siemens Edison Swan" и "Motorola", помогло вывести импульсные ИЭП в мейнстрим.

Ещё один заметный прорыв случился в 1976 г., когда Роберт Маммано, сооснователь "Silicon General Semiconductors", представил первую интегральную схему для управления ИЭП. Его контроллер SG1524 кардинально упростил разработку импульсных ИЭП и уменьшил их стоимость, что вызвало всплеск продаж.

Отметим также, что эволюция импульсных ИЭП в основном определялась эволюцией силового ключа. Опуская первый элемент (электровакуумный), их можно расположить в следующей очередности:

- магнитный усилитель (дрессель насыщения), используемый в основном в цепях переменного или пульсирующего тока;
- двухслойные и трехслойные полупроводниковые приборы: диоды и транзисторы, применимые в однополярных цепях;
- четырехслойные приборы: тиристоры, симисторы;
- интегральные приборы.

В настоящее время в той или иной степени применяют почти все виды силовых ключей. Только каждый из них занял свою нишу. Так, и мощные, и запираемые тиристоры могут применяться в системах электропривода на 100-

1000 кВт и более. В меньшей степени используются высокочастотные магнитные усилители, в ряде случаев применимые в мощных низковольтных (2-5 В) цепях на выходные токи 500-1000 А. В основной массе импульсных ИЭП различной мощности (от десятков до тысяч ватт) применяются полевые транзисторы.

Со временем стоимость одного ватта импульсных ИЭП упала на столько, что разработчикам стало невыгодно проектировать и изготавливать собственные ИЭП. Поэтому на рубеже XX и XXI веков многие компании представили на рынок линейки импульсных ИЭП со стандартными выходными напряжениями.

В настоящее время сильна тенденция улучшения различных показателей качества импульсных ИЭП: растут выходная мощность, КПД, надёжность, улучшаются и массогабаритные показатели, электромагнитная совместимость. В частности, диапазон выходных мощностей современных импульсных ИЭП с сетевым входом (AC-DC) составляет от 5-10 Вт до 5-10 кВт и более. Величина КПД реально достигает 80-96% в зависимости от структуры и типа первичной сети. Максимальные значения удельной мощности у AC-DC преобразователей составляют до 7500 Вт/дм<sup>3</sup> и 50 кВт/дм<sup>3</sup> у DC-DC преобразователей (данные на 2018 г.).

Отметим явные тенденции, которые имеют место при разработке современных импульсных ИЭП.

1. Диапазон выходных мощностей DC-DC преобразователей, для которых применяемая элементная база не требует использования специальных схемотехнических решений для повышения КПД и надежности, неуклонно повышается.

2. При компоновке печатных плат, с целью увеличения плотности упаковки, используют многослойные печатные платы, а не увеличивают их площадь.

3. Для полноты использования возможностей современной элементной базы электромагнитные компоненты интегрируются в основную многослойную печатную плату.

4. Все более широко используют открытые ИЭП для монтажа на печатную плату с последующей герметизацией (защитой) в составе РЭА, что в перспективе может привести к исчезновению ИЭП как отдельного устройства.

### **3.6 Сравнение импульсных и линейных источников электропитания**

Для всех линейных ИЭП требуется входное напряжение, которое выше выходного на определённую минимальную величину, которая называется "падением" напряжения.

Возьмём для примера устройство, работающее от 6 В и потребляющее максимальный ток 2 А. Типичный линейный ИЭП будет иметь "падение" напряжения 2 В. Если мы будем использовать аккумуляторную батарею, то она будет разряжаться до напряжения примерно 1,9 В на элемент. Так как для корректной работы требуется напряжение минимум 8 В (6 В для нагрузки и плюс 2 В на "падение" напряжения), для получения требуемого напряжения понадобится как минимум 5 элементов. Следовательно, при разряженной батарее минимальное входное напряжение равно 9,9 В. Поступающая в нагрузку мощность при токе 2 А равна 12 Вт, а стабилизатор должен рассеивать при разряженной батарее 7,8 Вт. Отсюда КПД равен 60%. При полностью заряженной батарее напряжение каждого элемента равно 2,26 В – и батарея выдаёт 11,3 В. Мощность нагрузки по-прежнему равна 12 Вт. Но стабилизатор теперь должен рассеивать 10,6 Вт, откуда КПД получается равным 53%.

Ситуацию можно улучшить, если не полностью разряжать каждый элемент. Можно увеличить производительность и снизить стоимость батареи (ценой более частой подзарядки, например), если будем прекращать работу, когда напряжение на каждом элементе упадёт до 2 В. При этом понадобится только 4 элемента. Мощность, рассеивая в стабилизаторе, при разряженной

батарее, составит 4 Вт – поэтому КПД возрастёт до 75%. При полной зарядке КПД увеличится до 67%.

В первом примере 2 из 5 элементов расходуют всю свою энергию на нагрев окружающей среды. Во втором примере на такой нагрев полностью работает 1 из 4 элементов. Выходит, что линейная стабилизация – слишком дорогой способ получения постоянного напряжения в системе, работающей от батарей.

Для вышеприведённого случая можно применить импульсный стабилизатор – в первом приближении КПД при полной зарядке составит 92%, а при разряженной батарее окажется близок к 99%. Другое преимущество – с линейным стабилизатором батарея должна состоять минимум из 4 элементов. С импульсным стабилизатором достаточно и 1 элемента.

Примерно так же обстоят дела и с сетевыми ИЭП. Для сетевого линейного ИЭП мощностью 1000 Вт потребуется трансформатор массой около 50 кг, массивные радиаторы с вентиляторами, по объёму он займёт около полукубометра. Для сравнения импульсный ИЭП будет иметь массу около 5 кг и стоит будет гораздо дешевле.

Основными преимуществами импульсных ИЭП перед линейными являются:

- значительное уменьшение размеров и массы за счет меньшего понижающего трансформатора (высокочастотный трансформатор имеет значительно меньшие габариты и массу по сравнению с трансформатором промышленной частоты той же мощности);
- возможность работы в очень широком диапазоне изменения входного напряжения;
- значительно более высокий КПД (до 90-95% против 40-70% для линейных ИЭП);
- большое время удержания, то есть время, в течение которого выходное

напряжение ИЭП остаётся в допустимых пределах при пропадании входного напряжения (особую актуальность это приобретает в цифровой технике).

Следует отметить, что КПД является важным показателем, если речь идет о мощном ИЭП, а не об ИЭП с выходной мощностью 25-100 Вт. Высокий КПД и отсутствие заметного выделения тепла может быть важно в миниатюрном переносном ИЭП полностью закрытого исполнения. Во множестве других случаев, например, в ИЭП контроллеров и электронных реле промышленного назначения вопрос о КПД ИЭП не является актуальным.

К недостаткам импульсных ИЭП можно отнести наличие высокого уровня шумов на выходе. В отличие от линейных ИЭП со слабой пульсацией сетевого напряжения, пульсации выходного напряжения в импульсных ИЭП, как правило, имеют значительно бóльшую амплитуду и лежат в диапазоне от нескольких килогерц до нескольких мегагерц, что создает проблемы распространения излучений в цепях собственной РЭА, а также (по проводам и через эфир) в цепях совершенно посторонней РЭА. Кроме того, в импульсных ИЭП приходится принимать специальные меры для предотвращения проникновения высокочастотных излучений в питающую сеть путем использования специальных фильтров.

Наличие высокочастотной составляющей в выходном напряжении и в промежуточных узлах схемы предъявляет повышенные требования к многочисленным электролитическим конденсаторам, имеющимся в схеме ИЭП, которые, к сожалению, редко учитываются разработчиками. Как правило, типы этих конденсаторов выбираются лишь по емкости, рабочему напряжению и габаритам, без учета их характеристик на высокой частоте. А между тем, далеко не все типы конденсаторов способны длительно работать под воздействием напряжения высокой частоты, а лишь имеющие низкий импеданс на высоких частотах. В результате не учета этого обстоятельства электролитические конденсаторы заметно нагреваются из-за повышенных



диэлектрических потерь на высокой частоте. Повышенная температура электролита интенсифицирует химические реакции в конденсаторе что, в свою очередь приводит к ускоренному растворению элементов корпуса конденсатора и вытеканию электролита прямо на печатную плату, что при очень плотном монтаже приводит к коротким замыканиям между разнопотенциальными выводами или, наоборот, к обрыву цепей вследствие растворения медных дорожек печатной платы.

Несмотря на то, что линейные ИЭП имеют много достоинств, таких как простота, малые уровни пульсаций выходного напряжения и шума, отличные значения неустойчивости по напряжению и току, малое время восстановления нормативного уровня выходного напряжения после скачкообразного изменения тока нагрузки, главными их недостатками, ограничивающими их применение, являются: низкий КПД (а значит, повышенное тепловыделение) и значительные масса и габариты (для мощных стабилизаторов).

Импульсные ИЭП находят широкое применение главным образом благодаря их большой удельной мощности и энергетической эффективности.

Обобщённые результаты сравнения линейных и импульсных ИЭП представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

№ п/п	Параметр	Линейный ИЭП	Импульсный ИЭП
1	КПД, %	30-50	80-98
2	Удельная мощность, Вт/дм <sup>3</sup>	50-100	до 175000
3	Нестабильность по напряжению, %	0,01...0,05	0,05...0,1
4	Время нарастания переходной характеристики, мкс	20-50	100-500
5	Возможность инвертирования	нет	есть
6	Возможность увеличения входного напряжения	нет	да
7	Электромагнитные помехи	не значительны	требуют подавления

### 3.7 Устройства гарантированного и бесперебойного электропитания

Для электроснабжения ответственной РЭА, которая не допускает перерывов в электропитании, широко используют устройства бесперебойного электропитания (УБЭ). Без таких УБЭ была бы не возможна работа телефонных станций, систем сигнализации на железной дороге, современных производств с непрерывным технологическим процессом, систем космической, радиорелейной, дальней связи и многих других.

Качественный скачок в индустрии УБЭ напрямую связан с областью информационных технологий. Широкое распространение компьютерных сетей кардинально увеличило возможности обработки и использования информации. Для реализации этих возможностей сетевая инфраструктура должна функционировать надёжно, и одну из основных ролей в этом играет бесперебойное электропитание.

Согласно результатам исследований, проведённых в США фирмами "Bell Labs" и "IBM", в течение месяца в электросети фиксируется около 120 нештатных ситуаций. Наиболее часто встречающиеся сбои электропитания – это провалы напряжения (85% случаев); возможны также высоковольтные импульсы (7,4%), полное отключение напряжения (4,7%) и слишком большое напряжение (0,7%).

В России ситуация выглядит не лучшим образом. К "стандартному" набору добавились аномалии другого рода, специфичные для отечественных сетей электроснабжения и редкие для стран Запада. Например, нестабильность частоты, искажения синусоидальной формы напряжения вследствие перегрузок и повышенное напряжение.

По мере развития рынка информационной техники экспоненциально возросли ценность и объём создаваемых, передаваемых и хранимых данных; следовательно, требуется не только обеспечить сохранность оборудования и предотвратить его выход из строя, но и принять меры, позволяющие избежать

потери жизненно важных для бизнеса компании данных и, как следствие, финансовых убытков. По данным "Information Week", в финансовой отрасли один час простоя может обойтись компании в 8,4 млн. долл.

Среди основных последствий некачественного электропитания сетевого оборудования можно выделить следующие: временные перебои в работе сети (а следовательно, недоступность сетевых ресурсов), потеря данных, хранящихся в оперативной памяти сетевых устройств, и выход оборудования или отдельных его узлов из строя.

Таким образом, УБЭ (в зарубежной терминологии UPS – Uninterruptable Power Supply) – значительный шаг к повышению независимости выходных напряжений ИЭП от состояния сети электроснабжения. С этой целью в УБЭ встраивается аккумуляторная батарея (АБ), электрическая ёмкость которой при необходимости может быть увеличена конструктивно рядом размещённой дополнительной АБ.

При уменьшении сетевого напряжения ниже допустимого значения или полном его пропадании подключается АБ на время от 5 до 30 минут и более. В этом режиме от АБ работает преобразователь напряжения (инвертор). В обычном режиме АБ подзаряжается от зарядного устройства, которое также входит в состав УБЭ.

Технические требования, предъявляемые к УБЭ, определяются условиями эксплуатации с учётом необходимого для потребителя качества питающего напряжения. Обычно УБЭ должно обеспечивать:

- требуемую величину действующего значения выходного напряжения и его стабильность;
- требуемую величину частоты выходного напряжения и её стабильность;
- требуемое значение выходной мощности;
- требуемое значение коэффициента гармоник выходного напряжения во всём диапазоне изменения выходной мощности;

- высокую надёжность работы, как при наличии напряжения питающей сети, так и при переходе на электропитание от АБ;
- достаточно большой срок службы при возможности дальнейшего развития и модернизации без замены основного силового оборудования;
- гальваническую развязку входной и выходной цепей;
- минимальное время перехода на электропитание от резервного источника электроэнергии при пропадании напряжения питающей сети или его снижении ниже допустимого значения (относится к устройствам гарантированного электропитания);
- достаточно высокие энергетические показатели, т.е. требуемые значения КПД и коэффициента мощности;
- минимальные массу и габариты устройства;
- защиту от атмосферных разрядов (молний и тому подобных явлений), выбросов напряжения в сети электропитания и других факторов, оказывающих отрицательное влияние на качество поставляемой электроэнергии;
- допустимый уровень электромагнитных помех и акустических шумов, сопутствующих работе;
- ресурс АБ, обеспечивающей надёжное электроснабжение потребителя в течение заданного времени автономной работы при номинальной нагрузке;
- невысокую стоимость.

Дополнительно к перечисленным выше требованиям предъявляют и ряд специфических, таких как:

- наличие стандартного последовательного асинхронного интерфейса связи RS-232, использующего протокол обмена информацией (например, ASC II), совместимый с такими программными системами, как "Power Chute". Этот протокол организует передачу информации об основных параметрах электропитания, включая текущее значение напряжения сети, уведомление питаемой РЭА о переходе на работу от резервного ИЭП, температура

окружающей среды и корпуса ИЭП, потребляемая мощность и т. д.;

- возможность работы с нелинейными импульсными потребителями.

Выполнение второго дополнительного требования обусловлено тем, что импульсные ИЭП, входящие в состав РЭА, представляют собой нелинейную импульсную нагрузку для УБП.

По уровню надежности поставляемое потребителю электропитание можно классифицировать:

- *гарантированное* электропитание/электроснабжение – такое, при котором переход на источник резервного снабжения электроэнергией происходит с кратковременным перерывом во времени;

- *бесперебойное* электропитание/электроснабжение – такое, при котором при переход на источник резервного снабжения энергией происходит без перерыва во времени.

До недавнего времени УБЭ строились на основе громоздких выпрямителей с большими потерями и АБ открытого типа, требующих вентиляции и больших эксплуатационных расходов. Например, на телефонных станциях УБЭ размещались в выпрямительных и аккумуляторных залах с мощной вентиляцией тепла и вредных выбросов.

В настоящее время малогабаритные УБЭ на основе импульсных ИЭП и герметизированных АБ устанавливают в аппаратных залах, где они занимают незначительную часть от общей площади. Зарубежной и отечественной промышленностями выпускается унифицированный ряд УБЭ как переменного, так и постоянного тока в широком диапазоне мощностей, выходных напряжений и времени работы от АБ.

В зависимости от состава УБЭ и схемы соединения его составных частей имеют место различные структуры УБЭ. Использование той или иной структуры определяется исходя из требований надёжности, стоимости и других технико-экономических показателей.

УБЭ могут работать в режиме "оффлайн" (off-line) – когда инвертор подключается к АБ только в том случае, если сеть электроснабжения пропадает, либо в режиме "онлайн" (on-line), когда инвертор постоянно питается от АБ в буферном режиме, в то время как АБ непрерывно подзаряжается от сети.

На заре появления УБЭ, при отсутствии мощных высоковольтных полупроводниковых приборов, УБЭ разрабатывались и производились по схеме "off-line" (другое название – "standby"). Структурная схема "off-line" УБЭ показана на рисунке 3.36.

При наличии входного напряжения  $U_{вх}$  сети ключ  $K$  находится в положении 1 – и входное напряжение транслируется на выход. При этом на входе и выходе могут быть установлены различного рода фильтры  $\Phi$ .

Одновременно с помощью зарядного устройства ЗУ производится заряд аккумуляторной батареи АБ. Инвертор И выключен или работает на холостом ходу.

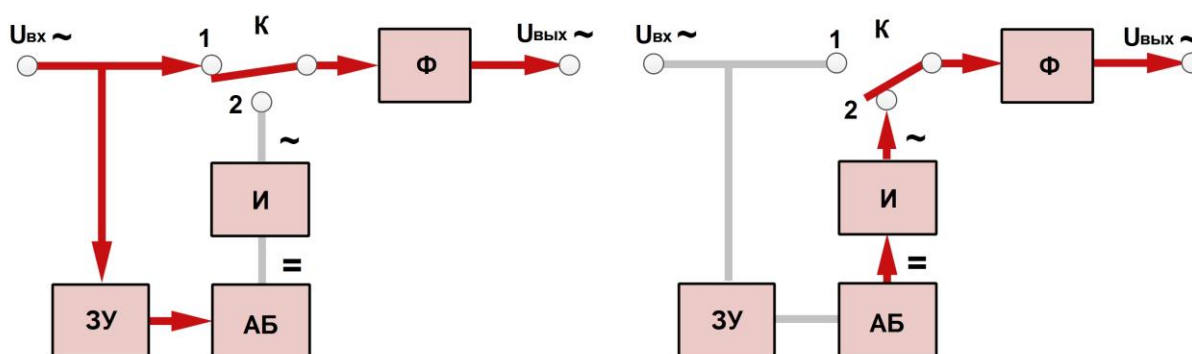


Рисунок 3.36 – Структурная схема "off-line" УБЭ

АБ – аккумуляторная батарея; ЗУ – зарядное устройство; И – инвертор; К – ключ;

$\Phi$  – фильтр;  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  – напряжения на входе и выходе УБЭ

При пропадании или существенном понижении входного напряжения  $U_{вх}$  сети ключ  $K$  автоматически переводится в положение 2 – и на выход поступает напряжение от инвертора  $И$ , который потребляет электроэнергию, запасённую в аккумуляторной батарее  $АБ$ .

Одним из основных качественных недостатков, не говоря об отсутствии стабилизации при работе от входного напряжения, является наличие перерыва подачи напряжения на нагрузку от 2-3 мс до 5-7 мс при переходе на электропитание от АБ и обратно. Это явление часто вызывает сбои и помехи в работе чувствительной РЭА и крайне нежелательно для потребителя. Кроме того, при частых перебоях в сети электроснабжения АБ достаточно быстро разряжается, не успевая восстановить заряд за время ждущего режима, в результате чего УБЭ теряет способность обеспечить аварийное электропитание нагрузки в течение требуемого времени. Также частое повторение циклов разряд/заряд сокращает срок службы АБ.

Постепенно на смену "off-line" УБЭ пришли различные модификации, однако на основе той же структурной схемы ("standby-ferro", "standby on-line", "line-interactive" и т. д.).

Наиболее интересной и современной сегодня является модификация, получившая название "line-interactive".

Пример функционирования устройства аналогичен ранее рассмотренному УБЭ типа "off-line". Однако при работе от входной сети 220 В 50 Гц и колебаниях напряжения происходит автоматическое переключение отводов трансформатора бустера (автоматического ступенчатого регулятора напряжения) и на выходе УБЭ поддерживается напряжение с точностью  $\pm 10\%$ .

Однако наличие контактных переключателей и низковольтного инвертора не позволило УБЭ классов "off-line" и "line-interactive" в массовом порядке перейти рубежи мощностей 3...6 кВт.

С появлением соответствующей полупроводниковой элементной базы появилась новая структура УБЭ, которая получила название "on-line". В таких УБЭ вся электроэнергия, необходимая для нагрузки, дважды преобразуется на пути следования от входа к выходу. Первое – преобразование из переменного входного в постоянное напряжение заряда АБ и электропитания инвертора. Второе – постоянное напряжение электропитания инвертора преобразуется в

синусоидальное стабилизированное выходное напряжение УБЭ. Структурная схема УБЭ, построенного по этому принципу, приведена на рисунке 3.37.

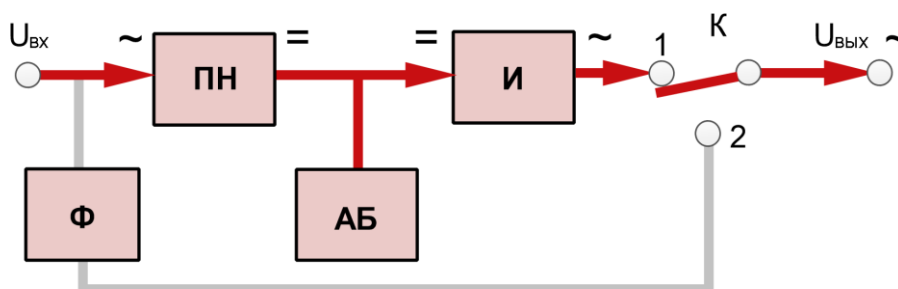


Рисунок 3.37 – Структурная схема "on-line" УБЭ

АБ – аккумуляторная батарея; ПН – преобразователь напряжения (AC-DC); И – инвертор; К – обходной переключатель; Ф – фильтр;  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  – напряжения на входе и выходе УБЭ

В штатном режиме работы преобразователь напряжения ПН типа AC-DC обеспечивает поддержание на батарее АБ напряжения, необходимого для поддержания её в заряженном состоянии. На входе инвертора И – постоянное напряжение, равное напряжению на батарее АБ. Инвертор И, как уже говорилось, формирует на выходе синусоидальное стабильное напряжение.

В случае пропадания входного напряжения  $U_{вх}$  переменного тока инвертор И продолжает питаться от батареи АБ и в его работе никаких изменений, как и в выходном напряжении УБЭ  $U_{вых}$ , не происходит.

Таким образом, практически любые аварийные ситуации или возмущения во входных сетях переменного тока никак не сказываются на выходном напряжении УБЭ класса "on-line", а значит, и подключенной к нему нагрузке.

Дополнительным звеном УБЭ является обходной переключатель К (bypass). Его замыкание приводит к непосредственной передаче на выход входного отфильтрованного сетевого напряжения. Это необходимо в нескольких случаях.

Во-первых, при наличии двух входных сетей и подключения входа преобразователя ПН к первой, а обходного переключателя К – ко второй. При выходе из строя первой сети и разряде батареи АБ обходной переключатель К



устанавливается в положение 2 – и подаёт на нагрузку напряжение от второй сети.

Во-вторых, при аварии преобразовательной части УБЭ нагрузка продолжает получать электропитание через замкнутый обходной переключатель *K*.

В настоящее время по мере развития полупроводниковых технологий, особенно в части мощных высокочастотных приборов, появляются новые, чрезвычайно интересные схемотехнические и идеологические решения.

За счёт высокочастотного преобразования напряжения, быстродействующих полупроводниковых обходных ключей и развитого микропроцессорного управления резко сокращены габариты УБЭ, но самое главное, реализована возможность программного включения/выключения принципиально нового экономичного режима работы.

Суть его в том, что при удовлетворительных параметрах входного сетевого напряжения электропитание нагрузки осуществляется через обходной ключ. Мощный быстродействующий процессор непрерывно анализирует параметры входной сети и при отклонении их без перерыва электропитания нагрузки подключает на выход УБЭ напряжение с выхода инвертора, а УБЭ переходит в стандартный режим "on-line".

Работа УБЭ в экономичном режиме позволяет, с учётом кратковременных переходов в стандартный режим "on-line", получать КПД до 99%, чрезвычайно низкую тепловую выделяемую мощность и соответственно повышенную надёжность УБЭ. Управление режимами работы УБЭ производится программно через порт PS-232.

Необходимо одновременно отметить, что практически все УБЭ, выпускаемые в настоящее время ведущими фирмами-производителями, независимо от типа оснащены микропроцессорным контролем и способны

работать во взаимодействии с компьютерными сетями и отдельными компьютерами.

В общем случае можно выделить два основных подхода к электропитанию: организация защиты жизненно важных узлов сети и организация централизованной системы защиты.

В первом случае от аномалий электросети защищается только жизненно важное для функционирования сети оборудование. Часть оборудования остаётся незащищённой, поэтому при неполадках в сети электроснабжения возможна потеря оперативных данных и частичная недоступность сетевых ресурсов. Тем не менее, перебои в работе незащищённых устройств не вызывают остановки всей сети (считается, что такой подход обеспечивает минимально необходимую защиту и в некоторых случаях этого вполне достаточно). На самом деле потеря данных всё-таки происходит, возможен также выход из строя незащищённого оборудования, и нельзя определить точно, какие данные и в каком объёме потеряны и была ли потеря данных вообще. На практике эта стратегия реализуется путём установки нескольких УБЭ небольшой мощности, защищающих конкретные устройства или группы устройств.

Организация централизованной системы защиты оборудования требует более серьёзного подхода. Может сложиться так, что при реализации данной стратегии заказчику придётся переделать инфраструктуру сети электроснабжения. Кроме того, затраты на приобретение и подключение одного мощного или нескольких параллельно работающих УБЭ могут быть выше, чем в предыдущем случае.

Вместе с тем все перечисленные минусы окупаются значительно более высоким уровнем защиты и более низкой совокупной стоимостью владения подобной системой, а также возможностью наращивания мощности и времени

резервирования, причём не только за счёт установки дополнительных АБ, но и путём подключения к автономным системам электроснабжения.

Следует дополнительно отметить, что требование круглосуточной работы заставляет использовать методы обработки и хранения данных, основанные на избыточности, и применять кластеризацию и зеркальное отображение серверов. В этом случае УБЭ может стать самым слабым звеном во всей системе, поэтому логичное направление дальнейшего развития индустрии УБЭ – это создание резервируемых систем бесперебойного электропитания, функционирование которых базируется на принципах избыточности и масштабируемости.

Если СЭП сделать модульной – модули УБЭ и модули АБ, то обеспечив избыточность класса  $n+1$  и даже выше за счёт добавления того или иного модуля можно исключить риск сбоя системы. Модули каждого типа подключаются параллельно, распределяя между собой нагрузку. Если один модуль повреждён или удалён, вся нагрузка равномерно распределяется между оставшимися. Конфигурацию можно изменять, добавляя или удаляя модули. Этот метод лежит в основе современных УБЭ, обеспечивающих высокий уровень масштабируемости, избыточности, управляемости и удобства эксплуатации.

### **3.8 Беспроводные источники электропитания**

Беспроводная передача электроэнергии – способ передачи электроэнергии без использования токопроводящих элементов в электрической цепи.

Вместе с тем беспроводные ИЭП не только позволяют избавиться от кабелей и проводов, но и обеспечивают ряд других преимуществ.

В начале нулевых годов XXI в. производители мобильной РЭА (в частности, мобильные телефоны, планшетные компьютеры) приступили к интеграции технологии беспроводной зарядки. Ожидалось, что в скором

времени эта функция получит столь широкое распространение, как и технологии Wi-Fi и Bluetooth.

Уже в 2008 г. зародился рынок беспроводных зарядок для смартфонов, однако его стремительный рост начался только с 2015 г.

В 2008 г. компания "Palm" впервые выпустила смартфон с беспроводной зарядкой. Позже производитель исчез с рынка электроники и это изобретение не получило должного распространения. В это же время компания "WildCharge", выпустила зарядку-коврик для телефона "Motorola Razr". Таким образом, узконаправленно над данной технологией работала не одна фирма. Беспроводные зарядные устройства разрабатывались под конкретные модели смартфонов.

Существует несколько основных методов беспроводной передачи электроэнергии. Они приведены в таблице 3.2.

Однако на практике наиболее часто в настоящее время находит применение метод индуктивной связи (индукционный). Он обладает относительной простотой в исполнении и эксплуатации, высоким уровнем безопасности, а так же высоким КПД.

Таблица 3.2 – Методы беспроводной передачи электроэнергии

Технология	Тип передачи	Что позволяет передавать электроэнергию
Индуктивная связь	Магнитные поля	Витки провода
Индуктивная резонансная связь	Магнитные поля	Колебательные контура
Емкостная связь	Электрические поля	Пары проводящих пластин
СВЧ излучение	Волны СВЧ	Фазированные ряды антенн
Оптическое излучение	Видимый свет / инфракрасное излучение / ультрафиолетовое излучение	Лазеры, фотоэлементы

#### *Индукционный метод*

Основой данного метода служит явление взаимной индукции двух катушек индуктивности (рисунок 3.38).

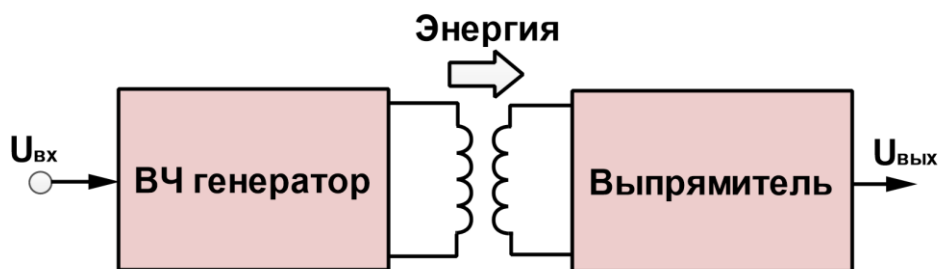


Рисунок 3.38 – Схема индуктивного метода

Благодаря явлению взаимной индукции высокочастотный электрический ток, протекающий по первичной обмотке, создает переменное магнитное поле, возбуждающее электрический ток той же частоты во вторичной обмотке. После детектирования на выходе схемы получают постоянное напряжение.

Для повышения эффективности метода к обеим обмоткам подключают конденсаторы, настраивая контура параллельного типа в резонанс с частотой переменного тока входного источника сигнала (индуктивная резонансная связь).

Недостатком метода является его относительно малая эффективность, поскольку с увеличением расстояния между обмотками коэффициент  $M$  уменьшается и значительная часть магнитного потока не охватывает вторичную обмотку. Следствием такого явления малая дистанция по передаче энергии – не более  $l < 0,1\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны первичного источника. Обычно эта длина составляет  $l < 10$  м.

На рисунке 3.39 представлена схема практической системы индуктивной зарядки в ближней зоне. Напряжение, поступающее с передатчика на приёмник, должно быть переменным. Электропитание зарядкой подставки, которая осуществляет передачу энергии, осуществляется от настенной розетки. Сетевое напряжение понижается и преобразуется в постоянное для электропитания передатчика и контроллера.

Контроллеры регулируют частоту коммутации для обратного преобразования постоянного напряжения в переменное, которое подаётся на

первичную обмотку индуктора. На приёмной стороне переменное напряжение выпрямляется и подвергается преобразованию для заряда батареи или аккумулятора.

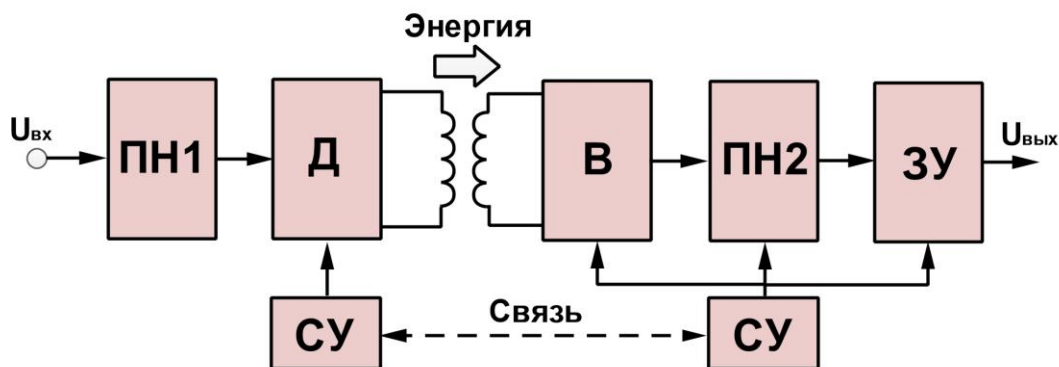


Рисунок 3.39 – Схема индуктивной зарядки в ближней зоне

ПН1 – первый преобразователь напряжения; Д – драйвер; СУ – система управления;  
В – выпрямитель; ПН2 – второй преобразователь напряжения; ЗУ – зарядное устройство

Частота напряжения индуктора изменяется в зависимости от количества энергии, необходимой приёмнику. Сигнал связи накладывается на сигнал мощности при размещении устройства на зарядной подставке. Эффективность индуктивной зарядки достаточно высока, но в значительной мере зависит от взаимного расположения индукторов. Чтобы обеспечить оптимальную передачу энергии, рабочую частоту взаимосвязанных индукторов необходимо немного отстроить от резонансной частоты.

Одним из известных стандартов индуктивной зарядки является Qi. Его разработал консорциум "Wireless Power Consortium". Ещё одним известным стандартом является AirFuel Inductive.

Другая технология зарядки в ближнем поле – это резонансный метод. Тот же принцип зарядки реализуется с помощью электромагнитного поля, но входным устройством является резонатор. Стандарт для этой технологии, разработанный альянсом "AirFuel Resonant", требует, чтобы между передатчиком и приёмником имелся небольшой воздушный зазор. Передатчик, работающий на частоте 6,78 МГц, поддерживает несколько приёмников и не

требует физического совмещения устройств. Частоты, на которых работают приёмник и передатчик, должны в точности соответствовать друг другу, что позволяет в максимальной степени увеличить расстояние при передаче энергии и уменьшить размер индуктора. Величина передаваемой мощности уменьшается с увеличением воздушного зазора и числа подключенных устройств. В этой технологии требуется отдельный Bluetooth канал для двунаправленной связи между передатчиком и каждым приёмником. На рисунке 3.40 приведена схема резонансной системы зарядки в ближней зоне.

В таблице 3.3 проведено сравнение стандартов беспроводной зарядки Qi, AirFuel Inductive и AirFuel Resonant.

Для индуктивной и резонансной зарядки требуется обеспечить минимальное расстояние между передатчиком и приёмником.

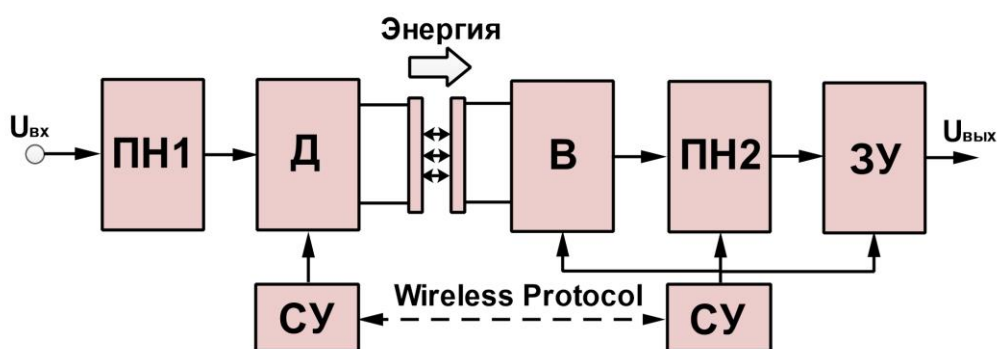


Рисунок 3.40 – Схема резонансной зарядки в ближней зоне

ПН1 – первый преобразователь напряжения; Д – драйвер; СУ – система управления;

В – выпрямитель; ПН2 – второй преобразователь напряжения; ЗУ – зарядное устройство

Таблица 3.3 – Сравнение стандартов беспроводной зарядки

Параметр	Стандарт		
	Qi	AirFuel Inductive	AirFuel Resonant
Частота	100-205 кГц	277-357 кГц	6,78 МГц
Связь	наложение сигналов	наложение сигналов	BLE
Произвольное положение приёмников	нет	нет	да
Несколько приёмников	нет	нет	да
Передача энергии	хорошая ( $\approx 5$ Вт)	слабая	слабая

В 2015 г. ряд компаний заявил о создании первой ИМС радиочастотного приёмника, которая осуществляет выпрямление напряжения. В радиочастотной системе "WattUp" используется одна или несколько антенн. Передатчик устанавливает связь с совместимыми устройствами при помощи Bluetooth. Передача сфокусированных радиочастотных сигналов выполняется на той же частоте, что и сигнал Wi-Fi. Сигнал улавливается и трансформируется в постоянный ток при помощи специальной ИМС, встроенной в мобильное устройство.

Беспроводные зарядные устройства, использующие индуктивный метод, с каждым годом все больше набирают популярность, появляются док-станции способные осуществлять заряд одновременно нескольких устройств.

В настоящее время можно выделить три формы осуществления беспроводного заряда мобильных устройств:

1. Данная функция изначально встроена в телефон. Недостаток данной формы реализации состоит в ограниченном количестве моделей, поддерживающих данную функцию, а также в существенном повышении цены смартфонов с такой функцией.

2. Напрямую к аккумулятору прикрепляют модуль беспроводного заряда. Одной из основных проблем данного типа устройств является подогрев аккумулятора, происходящий в процессе зарядки, что крайне губительно влияет на аккумулятор и срок его службы и в некоторых случаях приводит к выходу его из строя.

3. Чехол со встроенным в его корпус модулем беспроводной зарядки, подсоединяющийся к телефону с помощью USB коннектора. Данная форма реализации не является универсальной, так как подобные чехлы производятся всего для нескольких моделей телефонов, проблема же перегрева устраняется. Рынок чехлов для телефонов с функцией беспроводного заряда очень узок и не обеспечивает надлежащего качества. Производителем является Китай.



Сравнительные характеристики существующих беспроводных зарядных устройств приведены в таблице 3.4.

Рассмотрим пример применения данного метода беспроводной передачи электрической энергии для дистанционной зарядки аккумуляторов транспортных средств.

Устройство для передачи энергии без проводов состоит из двух частей: зарядной панели, которая устанавливается на специальном стенде, и принимающего блока, который прикрепляется к днищу.

Система работает следующим образом. Для того чтобы начать процесс зарядки, необходимо поставить автомобиль над панелью стенда. После активации зарядки индукционная катушка в панели начнет генерировать электромагнитное поле при поступлении переменного тока. Вторая катушка на стороне автомобиля начнет улавливать сгенерированное поле и конвертировать эту энергию в постоянный ток, питающий аккумуляторы.

Таблица 3.4 – Характеристики беспроводных зарядных устройств

Параметр анализа	РГАТУ (г. Рыбинск)	Nillkin	HomeTree	Eyon	Belkin Wireless
Комплектация	Модуль приема в универсальном чехле + док-станция	Модуль приема в чехле для конкретной модели телефона	Внешний модуль приема	Внутренний модуль приема	Док-станция
Цена (руб.)	2427	2524	690	325	3999
Скорость заряда в час	40%	40%	38%	40%	40%
Устройства измерения и отображения изменений	Индикатор заряда, индикатор соосности	Нет	Нет	Нет	Нет
Коннектор	Micro USB	Lightning	Lightning	Micro USB Lightning USB Type-C	-

Параметр анализа	РГАТУ (г. Рыбинск)	Nillkin	HomeTree	Eyon	Belkin Wireless
Универсальность	Все модели телефонов с коннектором microUSB	iPhone 6, 6Plus, 6s, 6sPlus, 7, 7Plus, SE	iPhone 6, 6Plus, 6s, 6sPlus, 7, 7Plus, SE	Все модели телефонов с коннектором microUSB, Lightning USB Type-C	Все устройства, поддерживающие Qi
Материал корпуса	Чехол: силикон, пластик; Док-станция: пластик	Пластик, искусственная кожа	Дерево	Пластик	Пластик
Способ подключения к сети	USB+евровилка тип C	-	-	-	USB

В настоящее время такие системы обеспечивают передачу мощности на транспортные средства величиной от 3,6 до 11 кВт на расстоянии 10-25 см. В процессе пополнения заряда батарей используются электромагнитные волны в диапазоне от 300 кГц до 20 МГц, которые не влияют на здоровье человека, мощность такого устройства равно 200 кВт.

#### *Лазерный метод*

Для лазерного метода используется электромагнитное излучение с длиной волны от 10 мкм до 10 нм, энергию можно передать путём её преобразования в луч лазера, который затем может быть направлен на фотоэлемент приёмника (рисунок 3.41).

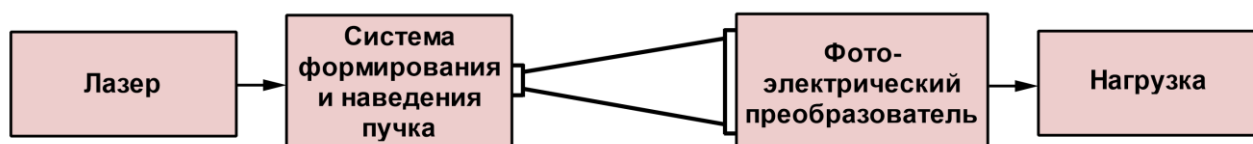


Рисунок 3.41 – Схема беспроводной передачи энергии с помощью лазера

Система беспроводной передачи лазерной энергии состоит из следующих частей:

- лазерно-оптической системы, состоящей из собственно лазера, системы наведения на мишень, системы формирования опорного пучка и системы компенсации атмосферных искажений;

- фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) мощного лазерного излучения для длин волн инфракрасного диапазона;

- емкостных накопителей энергии.

В будущем предполагается применение лазерной передачи энергии с солнечной космической электростанции (СКЭС) на Землю. Солнечная энергия преобразуется в энергию луча лазера в СКЭС. Луч лазера направляется на фотоэлемент приёмника, его энергия преобразуется в энергию постоянного тока.

Лазерная передача энергии обладает рядом преимуществ:

- передача электрической энергии на большие расстояния;
- возможность применения для небольших изделий (благодаря небольшим размерам твердотельного лазера – фотоэлектрического полупроводникового диода);

- отсутствие радиочастотных помех для существующих средств связи, таких как Wi-Fi и мобильные телефоны;

У данного метода есть и ряд недостатков:

- потери значительной части энергии в атмосфере;
- необходимость прямой видимости между передатчиком и приёмником.

### *СВЧ излучение*

Развитие радиолокации и интенсивные работы по освоению дециметровых и сантиметровых диапазонов микроволн заложили основу для использования СВЧ энергии и вызвали интерес к беспроводной передаче энергии с помощью направленного СВЧ излучения.

Одним из тех, кто внес наибольший вклад в становление способа беспроводной передачи энергии путем СВЧ излучения, является советский

ученый академик П.Л. Капица, опубликовавший в 1962 г. фундаментальный труд «Электроника больших мощностей». Приведем одну цитату из этой работы: «Мне думается, что внедрение СВЧ электроники в большую энергетику является одним из наиболее обещающих направлений развития современной электротехники».

Схема передачи электрической энергии с помощью СВЧ излучения представлена на рисунке 3.42.

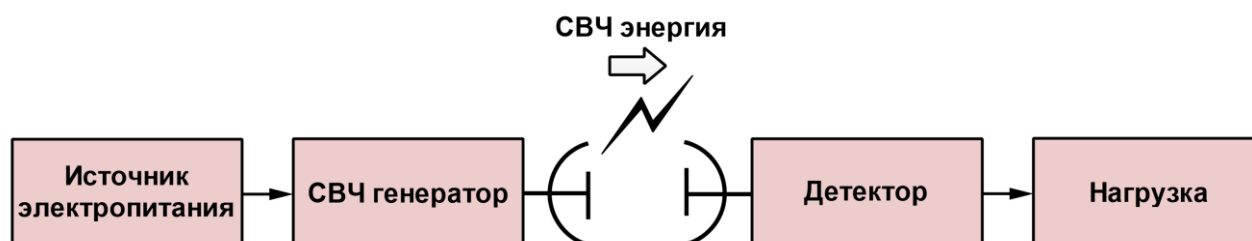


Рисунок 3.42 – Схема беспроводной передачи электроэнергии с помощью СВЧ излучения

В настоящее время в научно-технической литературе описан пример передачи электрической энергии на расстояние 1,55 км мощностью 34 кВт на частоте 2,4 ГГц.

Еще один пример: компания "Mitsubishi Heavy Industries" (Япония) заявила об успешном завершении наземных испытаний системы, призванной в конечном итоге собрать солнечную энергию на орбите и лучом передавать ее на Землю. В процессе демонстрации микроволновый поток мощностью в 10 кВт был передан с передающего устройства к расположенному на расстоянии 500 м от него приемнику.

### Контрольные вопросы и задачи

1. В чём состоит принципиальное отличие между линейными источниками электропитания и импульсными?
2. Приведите примеры использования линейных и импульсных источников электропитания в быту.

3. Почему феррорезонансные и дроссельные стабилизаторы оказались вытеснены полупроводниковыми?

4. Где находят применение нестабилизирующие источники электропитания?

5. За счёт чего стабилитрон имеет способность держать на своих зажимах постоянное напряжение?

6. Каким образом можно изменить схему стабилизатора (рисунок 3.13), чтобы получить коэффициент стабилизации по напряжению гораздо больше 50? Каким образом можно изменить схему того же стабилизатора, чтобы стабилизировать напряжение большее, чем допускает один стабилитрон?

7. Может ли выходное напряжение линейного стабилизатора быть меньше опорного напряжения?

8. Обоснуйте целесообразность применения звена повышенной частоты в импульсных источниках электропитания.

9. Приведите формы выходного напряжения линейного и импульсного источников электропитания. Чем обусловлены пульсации напряжения?

10. Каковы особенности организации электропитания радиоэлектронных устройств и систем, обладающих повышенными требованиями к надежности и бесперебойности электропитания?

### Список литературы

1. Функциональные устройства систем электропитания наземной РЭА / В.В. Авдеев, А.М. Новожилов, В.И. Чистяков; под ред. В.Г. Костикова. – М.: Радио и связь, 1990. – 192 с.

2. Проектирование источников электропитания электронной аппаратуры / О.К. Березин, В.Г. Костиков, Е.М. Парфенов и др.; под ред. В.А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 504 с.

3. Maniktala S. Switching Power Supplies A to Z. – Oxford: Elsevier, 2006. – 504 p.

4. Brown M. Power Sources and Supplies: World Class Designs. – London: Newness, 2007. – 382 p.

5. ГОСТ 52907-2008. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2008.

6. Макаров В.В., Лукин А.В. Тенденции развития DC-DC преобразователей малой и средней мощности // Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции "Электропитание-2016". – 2016. – С. 111-113.

7. Акимов А.Ф., Твердов И.В., Твердов В.И. Новый ИБП мощностью 900 Вт с микропроцессорным контролем // Электропитание. – 2018. – С. 25- 31.

8. Буй Хыу Чык. Передача электрической энергии посредством СВЧ электромагнитного излучения: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / Буй Хыу Чык. – М.: РТУ МИРЭА, 2019. – 106 с.