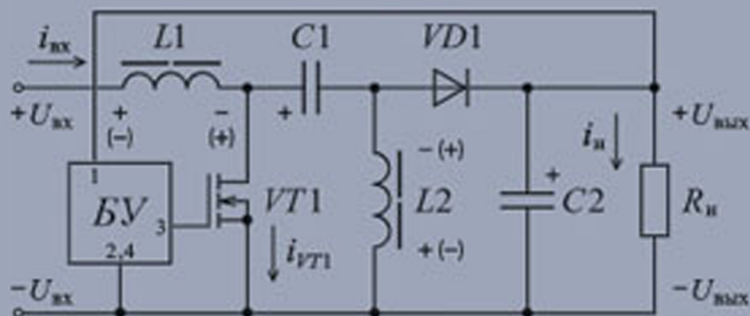


В. К. Битюков, Д. С. Симачков,
В. П. Бабенко

ИСТОЧНИКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

4-е издание



«И» «Инфра-Инженерия»

УДК 621.311.6(075)
ББК 31.252я73
Б66

Битюков, В. К.

Б66 **Источники вторичного электропитания : учебник / В. К. Битюков, Д. С. Симачков, В. П. Бабенко. – 4-е изд. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 376 с.**
ISBN 978-5-9729-0471-6

Рассмотрены базовые вопросы физики и схемотехники современных источников вторичного электропитания, включающих выпрямительные устройства, стабилизаторы напряжения, инверторы тока и напряжения и преобразователи постоянного тока. Значительное внимание уделено современной элементной базе, а также формированию у читателя метрологической культуры и навыков экспериментального, аналитического и метрологического исследования характеристик как отдельных устройств электропитания, так и источника вторичного электропитания в целом.

Для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата 11.03.01 «Радиотехника», 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», магистратуры 11.04.01 «Радиотехника» и специалитета 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы», для углубленного изучения дисциплин «Источники вторичного электропитания» и «Физические основы преобразовательной техники». Также учебник будет полезен студентам других технических и инженерно-физических специальностей при изучении дисциплин «Электропреобразовательные устройства РЭС», «Промышленная электроника», «Аналоговая схемотехника» и аналогичных.

УДК 621.311.6(075)
ББК 31.252я73

ISBN 978-5-9729-0471-6

© В. К. Битюков, Д. С. Симачков, В. П. Бабенко, 2020
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1.	
КЛАССИФИКАЦИЯ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ИСТОЧНИКОВ	
ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	9
§ 1.1. Классификация источников вторичного электропитания	9
§ 1.2. Структурная схема современного источника вторичного электропитания.....	10
§ 1.3. Условные обозначения отечественных полупроводниковых приборов	15
§ 1.4. Трансформаторы и дроссели	17
Контрольные вопросы	30
ГЛАВА 2.	
ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКОВ	
ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	31
§ 2.1. Нагрузочная характеристика и динамическое сопротивление.....	31
§ 2.2. Передаточная характеристика и коэффициент стабилизации	
выходного напряжения по входному напряжению	35
§ 2.3. Коэффициенты стабилизации стабилизаторов тока источников	
вторичного электропитания	37
§ 2.4. Регулировочная характеристика.....	40
§ 2.5. Энергетические и эксплуатационные параметры	40
§ 2.6. Применение метода наименьших квадратов для обработки	
экспериментальных данных	43
§ 2.7. Методы уменьшения массогабаритных параметров источников	
вторичного электропитания	51
§ 2.8. Метрологическая культура представления результатов экспериментальных	
и расчетных исследований	56
§ 2.9. Расчет систематических погрешностей измерений.....	58
2.9.1. Расчет систематической погрешности аналоговых	
измерительных приборов.....	59
2.9.2. Расчет систематической погрешности цифровых	
измерительных приборов	59
2.9.3. Оформление результатов измерений	61
Контрольные вопросы	66
ГЛАВА 3.	
УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	
В ЭНЕРГИЮ ПОСТОЯННОГО ТОКА (АС/ДС-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ)	69
§ 3.1. Классификация выпрямительных устройств	69
§ 3.2. Неуправляемые выпрямительные устройства	72
3.2.1. Структурная схема выпрямительного устройства.....	74
3.2.2. Типовые схемы построения неуправляемых	
выпрямительных устройств	75
3.2.2.1. Работа неуправляемого выпрямительного устройства	
на резистивную нагрузку	75

3.2.2.2. Работа неуправляемого выпрямительного устройства на резистивно-емкостную нагрузку	90
3.2.3. Методы определения угла отсечки	103
3.2.4. Работа неуправляемого выпрямителя на резистивно-индуктивную нагрузку	114
§ 3.3. Умножители напряжения	121
§ 3.4. Сглаживающие фильтры	128
§ 3.5. Управляемые выпрямители	129
3.5.1. Работа управляемого выпрямителя на резистивную нагрузку	132
3.5.2. Работа управляемого выпрямителя на резистивно-индуктивную нагрузку	138
3.5.3. Коммутация тока в управляемых выпрямительных устройствах	144
3.5.4. Исследование формы токов тринисторов в процессе коммутации их токов	151
§ 3.6. Управляемые выпрямители с вольтодобавкой	154
Контрольные вопросы	173

ГЛАВА 4.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА (DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ).....

§ 4.1. Классификация стабилизаторов напряжения и тока	175
§ 4.2. Физика и схемотехника параметрических стабилизаторов напряжения и тока.....	177
4.2.1. Вольт-амперная характеристика стабилитронов	177
4.2.2. Параметрические стабилизаторы напряжения постоянного тока, построенные по схеме делителя напряжения	184
4.2.3. Параметрические стабилизаторы тока	191
4.2.4. Параметрические стабилизаторы напряжения постоянного тока, построенные по мостовой схеме	197
§ 4.3. Стабилитронные интегральные микросхемы.....	201
Контрольные вопросы	202

ГЛАВА 5.

КОМПЕНСАЦИОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕПРЕРЫВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ (DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ).....

§ 5.1. Элементная база стабилизаторов напряжения и тока	204
5.1.1. Биполярные транзисторы	207
5.1.2. Полевые транзисторы	222
5.1.3. Комбинированные биполярно-полевые транзисторы IGBT	243
§ 5.2. Схемотехника компенсационных стабилизаторов напряжения постоянного тока с непрерывным регулированием.....	252
§ 5.3. Аналитический вывод соотношений для определения основных параметров стабилизаторов	263
§ 5.4. Схемотехника компенсационных стабилизаторов тока с непрерывным регулированием	266
§ 5.5. Интегральные стабилизаторы с непрерывным регулированием	268
§ 5.6. Пример использования схемотехнических особенностей при разработке линейных стабилизаторов напряжения постоянного тока	276
Контрольные вопросы	279

ГЛАВА 6.

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ЭНЕРГИЮ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (DC/AC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ).....	282
§ 6.1. Силовая часть инверторов.....	283
§ 6.2. Автономные инверторы с самовозбуждением.....	286
6.2.1. Принцип действия.....	287
6.2.2. Вывод формулы для определения частоты коммутации	292
6.2.3. Запускающие цепочки	295
§ 6.3. Автономные инверторы тока и напряжения	299
Контрольные вопросы.....	307

ГЛАВА 7.

ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ).....	309
§ 7.1. Преобразователи постоянного тока с гальванической развязкой входа и выхода.....	310
7.1.1. Прямоходовые DC/DC-преобразователи	311
7.1.2. Обратноходовые DC/DC-преобразователи.....	316
§ 7.2. Преобразователи постоянного тока с гальванической связью входа и выхода.....	320
7.2.1. КСН с ИР, силовая часть которого построена по схеме понижающего типа	323
7.2.2. КСН с ИР, силовая часть которого построена по схеме повышающего типа	334
7.2.3. КСН с ИР, силовая часть которого построена по схеме полярно-инвертирующего типа.....	339
7.2.4. DC/DC-преобразователи повышающе-понижающего типа.....	343
7.2.4.1. DC/DC-преобразователи по топологии SEPIC.....	343
7.2.4.2. DC/DC-преобразователи по топологии с накачкой заряда	346
§ 7.3. Принципиальная электрическая схема компенсационного стабилизатора напряжения постоянного тока с импульсным регулированием	352
Контрольные вопросы.....	355

ГЛАВА 8.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ В СЕТЕВЫХ ИСТОЧНИКАХ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	358
§ 8.1. Обобщенная схема сетевого бестрансформаторного источника вторичного питания.....	358
§ 8.2. Распределенная система электропитания.....	362
§ 8.3. Сетевой адаптер для зарядки телефонов	364
§ 8.4. Сетевой адаптер на микросхеме LNK362P	366
§ 8.5. Бестрансформаторные AC/DC ROHM.....	369
Контрольные вопросы.....	371

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	372
-------------------------	-----

ЛИТЕРАТУРА	373
-------------------------	-----

ГЛАВА 1.

КЛАССИФИКАЦИЯ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ИСТОЧНИКОВ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

§ 1.1. Классификация источников вторичного электропитания

Источники вторичного электропитания РЭС в зависимости от назначения классифицируют по следующим основным признакам.

По виду входной электрической энергии:

- ИВЭ, работающие от однофазной или многофазной сети переменного тока;
- ИВЭ, работающие от сети постоянного тока;
- ИВЭ, работающие от сетей постоянного и переменного тока.

По виду выходной электрической энергии:

- ИВЭ с выходным напряжением переменного тока;
- ИВЭ с выходным напряжением постоянного тока;
- ИВЭ с выходным напряжением переменного и постоянного тока.

По величине выходной мощности $P_{\text{вых}}$:

- ИВЭ микромощные ($P_{\text{вых}} < 1 \text{ Вт}$);
- ИВЭ малой мощности ($P_{\text{вых}} = 1 \dots 10 \text{ Вт}$);
- ИВЭ средней мощности ($P_{\text{вых}} = 10 \dots 100 \text{ Вт}$);
- ИВЭ повышенной мощности ($P_{\text{вых}} = 100 \dots 1\,000 \text{ Вт}$);
- ИВЭ большой мощности ($P_{\text{вых}} > 1\,000 \text{ Вт}$).

По номинальному значению выходного напряжения $U_{\text{вых}}$:

- ИВЭ на низкое выходное напряжение ($U_{\text{вых}} < 100 \text{ В}$);
- ИВЭ на среднее выходное напряжение ($U_{\text{вых}} = 100 \dots 1\,000 \text{ В}$);
- ИВЭ на высокое выходное напряжение ($U_{\text{вых}} > 1\,000 \text{ В}$).

По допустимому отклонению выходного напряжения:

- низкой точности (более 5 %);
- средней точности (1...5 %);
- высокой точности (0,1...1,0 %);
- прецизионные (менее 0,1 %).

По уровню пульсации выходного напряжения постоянного тока:

- малый уровень (менее 0,1 %);
- средний уровень (0,1...1,0 %);
- большой уровень (более 1 %).

По степени постоянства выходного напряжения:

- ИВЭ без стабилизации;
- ИВЭ со стабилизацией.

По числу выходов:

- одноканальные (один выход) ИВЭ;
- многоканальные (два и более выходов) ИВЭ.

По наличию на входе сетевого трансформатора:

- с сетевым входным трансформатором;
- без сетевого входного трансформатора.

По принципу организации электропитания РЭС:

- централизованное электропитание;
- децентрализованное электропитание.

По способу стабилизации:

- параметрические;
- компенсационные.

Параметрические стабилизаторы имеют в своем составе нелинейный элемент, и стабилизация напряжения и/или тока осуществляется за счет нелинейности вольт-амперной характеристики (ВАХ) элемента.

Компенсационные стабилизаторы представляют собой систему автоматического регулирования, в которой постоянство, например, выходного напряжения при изменении входного напряжения, температуры ИВЭ, сопротивления нагрузки обеспечивается за счет изменения падения напряжения на регулирующем элементе (РЭ). По способу управления регулирующим элементом компенсационные стабилизаторы подразделяются на компенсационные стабилизаторы напряжения с непрерывным регулированием (КСН с НР) и компенсационные стабилизаторы напряжения с импульсным регулированием (КСН с ИР). Компенсационные стабилизаторы напряжения или тока с непрерывным регулированием часто называют линейными, а компенсационные стабилизаторы напряжения с импульсным регулированием — импульсными или ключевыми.

§ 1.2. Структурная схема современного источника вторичного электропитания

Источники вторичного электропитания преобразуют энергию одного рода тока в энергию другого рода тока или в энергию того же рода тока, но другого количества и/или качества (табл. 1.1).

На рис. 1.1 показана структурная схема современного источника вторичного электропитания РТС, работающего от однофазной сети переменного тока.

Напряжение u_c переменного тока питающей промышленной сети (как правило, напряжением 220 В и частотой $f = 50$ Гц) подвергается

последовательно соответствующим преобразованиям в помехоподавляющем фильтре ($\Phi_{\text{ПП}}$), сетевом (низкочастотном) выпрямительном устройстве (НВУ), токоограничивающем резисторе (ТОР) и низкочастотном сглаживающем фильтре (НСФ).

Помехоподавляющий фильтр выполняет две функции. Во-первых, он защищает сеть от помех, создаваемых самим ИВЭ. Во-вторых, защищает ИВЭ от помех, создаваемых сетью.

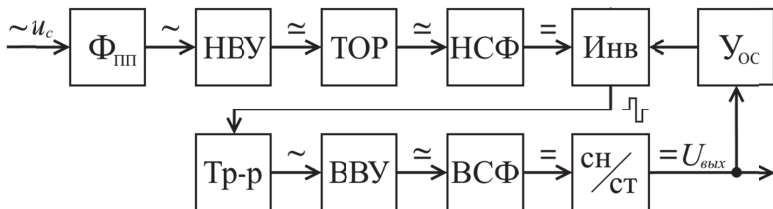


Рис. 1.1. Структурная схема современного источника вторичного электропитания, построенного по бестрансформаторной схеме и использующего энергию промышленной сети переменного тока

Т а б л и ц а 1.1

**Виды преобразований энергии постоянного и переменного токов
и устройства для их реализации**

№ п.п.	Род тока, из энергии которого выполняется преобразование	Род тока, в энергию которого выполняется преобразование	Название процесса	Устройства, осуществляющие преобразование
1	Переменный	Постоянный	Выпрямление	Выпрямительные устройства: преобразователи AC/DC (англ. Alternating Current / Direct Current Converter)
2	Постоянный	Постоянный	Преобразование постоянного тока в постоянный (стабилизация, преобразование)	Стабилизаторы и преобразователи DC/DC (англ. Direct Current / Direct Current Converter)
3	Постоянный	Переменный	Инвертирование	Инверторы: преобразователи DC/AC (англ. Direct Current / Alternating Current Converter)
4	Переменный	Переменный	Преобразование переменного тока в переменный (стабилизация, трансформация)	Трансформаторы, стабилизаторы и преобразователи AC/AC (англ. Alternating Current / Alternating Current Converter)

Затем выпрямленное и сглаженное сетевое напряжение подается на инвертор (Инв), на выходе которого формируется, как правило, напряжение высокой частоты ($f = 10 \dots 4000$ кГц) прямоугольной формы, которое преобразуется трансформатором (Тр-р). Напряжение с выхода трансформатора подается на последовательно включенные высокочастотное выпрямительное устройство (ВВУ), высокочастотный сглаживающий фильтр (ВСФ) и стабилизатор напряжения (СН) и/или стабилизатор тока (СТ). На рис. 1.1 показано, что в ИВЭ на выходе может быть использован либо СН, либо СТ, либо одновременно стабилизатор напряжения и стабилизатор тока ($^{СН/СТ}$).

На выходе ИВЭ формируется стабилизированное напряжение $U_{\text{вых}}$ постоянного тока.

Основными устройствами ИВЭ, на которых теряется значительная мощность и от которых зависит КПД, масса и объем источника вторичного электропитания, являются стабилизатор напряжения, низкочастотный сглаживающий фильтр и сетевой низкочастотный трансформатор. КПД стабилизатора главным образом определяется мощностью, рассеиваемой на его регулирующем элементе. Величина этой мощности зависит как от пределов изменения входного напряжения, так и от диапазонов регулирования выходного напряжения и тока нагрузки.

При низких уровнях выходного напряжения ИВЭ КПД стабилизатора мал, а на его регулирующем элементе рассеивается значительная мощность, часто превышающая полезную мощность, отдаваемую им в нагрузку. При повышении уровня выходного напряжения КПД стабилизатора возрастает.

Устройство защиты и диагностики ($U_{\text{защ}}$) связано со всеми функциональными блоками ИВЭ. Для этого в ИВЭ вводят дополнительные устройства, воздействующие своими сигналами на соответствующие узлы при аварийных режимах работы ИВЭ. Устройство защиты и диагностики выполняет широкую гамму вспомогательных функций в ИВЭ. Например, индикация состояния всего ИВЭ и его отдельных блоков, защита от короткого замыкания в нагрузке и от превышения тока нагрузки, защита от превышения выходного напряжения и от понижения выходного напряжения. Все это существенно упрощает взаимодействие человека и источника вторичного электропитания.

Инвертор осуществляет преобразование энергии постоянного тока в энергию переменного тока высокой частоты, равной $f = 10 \dots 4000$ кГц и значительно превышающей частоту питающей сети, равной $50 \dots 800$ Гц. За счет повышения частоты преобразуемого тока трансформатор современного ИВЭ имеет массу и объем значительно меньшие, нежели сетевой низкочастотный трансформатор той же мощности.

В схеме стабилизирующего источника вторичного электропитания (рис. 1.2, а), в отличие от предыдущей схемы, показанной на рис. 1.1, нет стабилизатора напряжения.

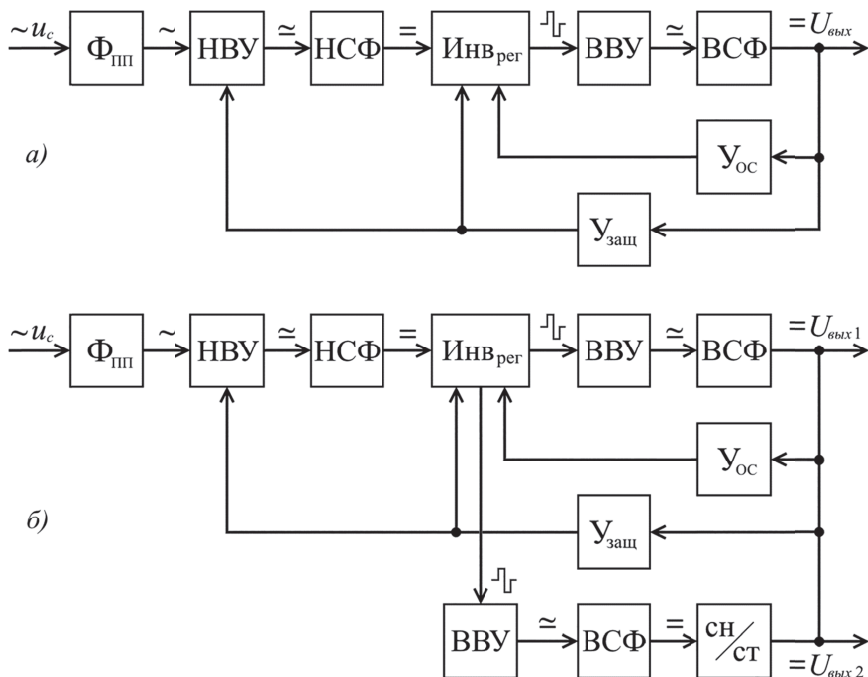


Рис. 1.2. Структурные схемы современных источников вторичного электропитания, построенных по бестрансформаторной схеме

Функцию регулятора выходного напряжения ИВЭ выполняет инвертор, на выходе которого имеется трансформатор. При изменении выходного напряжения ИВЭ сигнал обратной связи через устройство обратной связи (Y_{oc}) воздействует на регулируемый инвертор ($Инв_{рег}$), что приводит к изменению длительности импульсов на его выходе.

В данной схеме ИВЭ стабилизация его выходного напряжения осуществляется за счет широтно-импульсного регулирования (ШИМ) напряжения инвертора. С точки зрения уменьшения объема и массы ИВЭ эта схема наиболее предпочтительна, так как функции преобразования и регулирования напряжения в ней совмещены.

На рис. 1.2, б показана схема двухканального бестрансформаторного источника вторичного электропитания.

Сигнал обратной связи первого канала, формирующего выходное напряжение $U_{вых1}$, через устройство обратной связи поступает на вход регулируемого инвертора ($Инв_{рег}$).

При вариации напряжения $U_{вых1}$ на выходе первого канала ИВЭ (рис. 1.2, б) изменяется и сигнал обратной связи, что изменяет длительность выходных импульсов регулируемого инвертора, а следовательно,

возвращает выходное напряжение ИВЭ к своему первоначальному значению. Одновременно с этим осуществляется стабилизация напряжения на выходе последовательно включенных высокочастотных выпрямительном устройстве и сглаживающем фильтре второго канала. При изменении тока нагрузки первого канала стабилизация выходного напряжения $U_{\text{вых } 1}$ осуществляется регулируемым инвертором (Инв_{рег}), а стабилизация выходного напряжения второго канала $U_{\text{вых } 2}$ — стабилизатором (C^H/C^T), включенным в цепь этого канала.

В настоящее время значительное число РЭС использует батарейное питание. В значительной степени это относится к автономным потребителям.

Если первичным источником энергии является аккумуляторная батарея, то в схеме ИВЭ отсутствует сетевой низкочастотный выпрямитель и низкочастотный сглаживающий фильтр (рис. 1.3).

Такие ИВЭ находят широкое применение для электропитания устройств телекоммуникации, где первичными источниками энергии являются источники напряжения постоянного тока на 24, 48 и 60 В.

Рассмотренные схемы ИВЭ реализуют централизованный принцип электропитания РЭС.

Электропитание ряда современных РЭС, например, радиотехнических и инфокоммуникационных автономных систем, строится по децентрализованному принципу.

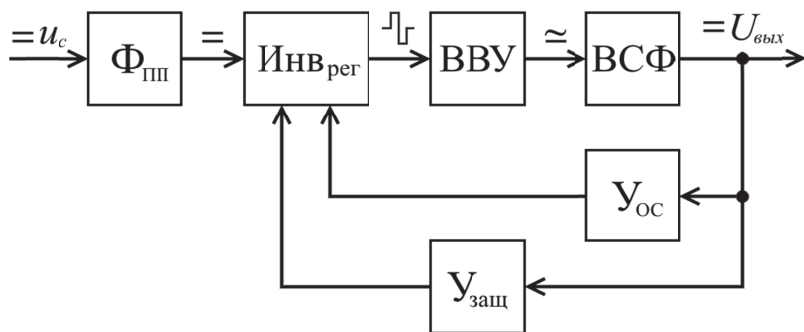


Рис. 1.3. Структурная схема современного источника вторичного электропитания, питающегося от источника постоянного тока

При этом к печатным платам или функционально законченным блокам подводится нестабилизированное напряжение постоянного тока, а индивидуальный стабилизатор напряжения устанавливается на каждой плате или в блоке (рис. 1.4).

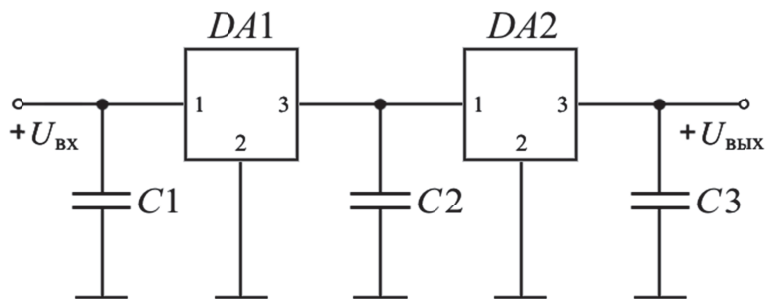


Рис. 1.4. Структурная схема современного ИБЭ, использующего энергию постоянного тока и реализующего децентрализованный принцип электропитания РЭС

Стабилизаторы напряжения реализуются на интегральных микросхемах (ИМС) $DA1$ и $DA2$. Причем ИМС $DA1$, как правило, представляет собой импульсный стабилизатор напряжения, на выходе которого имеются значительные пульсации напряжения. Конденсатор $C2$ не может их существенно подавить. Поэтому дополнительно установлена ИМС $DA2$, представляющая собой линейный стабилизатор напряжения и выполняющая роль активного сглаживающего фильтра. Выбор емкости конденсаторов $C1$, $C2$ и $C3$ осуществляется по рекомендациям производителей микросхем. Обычно в качестве конденсаторов $C1$, $C2$ и $C3$ используются керамические конденсаторы емкостью из диапазона от 0,1 мкФ до 1 мкФ.

§ 1.3. Условные обозначения отечественных полупроводниковых приборов

В основу системы обозначений отечественных полупроводниковых приборов положен буквенно-цифровой код, который состоит из пяти элементов.

Первый элемент (буква или цифра) обозначает исходный полупроводниковый материал, на базе которого создан полупроводниковый прибор. Для приборов общегражданского применения используются четыре буквы: Г, К, А и И, являющиеся начальными буквами в названии полупроводника или полупроводникового соединения. Для приборов специального применения вместо этих букв используются цифры от 1 до 4. Таким образом, для обозначения исходного материала используются следующие символы:

- Г или 1 — для германия или его соединения;
- К или 2 — для кремния или его соединения;
- А или 3 — для соединений галлия (например, арсенид галлия);
- И или 4 — для соединений индия.

Второй элемент (буква) обозначает подкласс полупроводниковых приборов. Обычно буква выбирается из названия прибора как первая буква названия:

- Т — транзисторы биполярные;
- П — транзисторы полевые;
- Д — диоды (выпрямительные, импульсные, магнитодиоды, термо-диоды);
- Ц — выпрямительные столбы и блоки;
- В — варикапы;
- Н — диодные тиристоры (динисторы);
- У — триодные тиристоры (тринисторы);
- С — стабилитроны;
- О — оптопары;
- Л — излучающие оптоэлектронные приборы;
- Г — генераторы шума.

Для обозначения наиболее характерного признака полупроводниковых приборов служит *третий элемент* (цифра), который определяет основные функциональные возможности прибора. У различных подклассов приборов характерные возможности описываются разными величинами. Для транзисторов это рабочая частота и рассеиваемая мощность, для выпрямительных диодов — максимальное значение прямого тока, для тиристоров — значение тока в открытом состоянии, для стабилитронов — напряжение стабилизации и рассеиваемая мощность.

В качестве примера можно отметить, что для обозначения функциональных возможностей (третий элемент буквенно-цифрового кода) стабилитронов используются следующие цифры:

- 1 — для стабилитронов мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;
- 2 — для стабилитронов мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации от 10 до 100 В;
- 3 — для стабилитронов мощностью не более 0,3 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В;
- 4 — для стабилитронов мощностью от 0,3 до 5 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;
- 5 — для стабилитронов мощностью от 0,3 до 5 Вт с номинальным напряжением стабилизации от 10 до 100 В;
- 6 — для стабилитронов мощностью от 0,3 до 5 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В;
- 7 — для стабилитронов мощностью от 5 до 10 Вт с номинальным напряжением стабилизации менее 10 В;
- 8 — для стабилитронов мощностью от 5 до 10 Вт с номинальным напряжением стабилизации от 10 до 100 В;
- 9 — для стабилитронов мощностью от 5 до 10 Вт с номинальным напряжением стабилизации более 100 В.

Четвертый элемент — число (две либо три цифры), означающее порядковый номер технологической разработки прибора; изменяется от 01 до 999.

Пятый элемент (буква) в буквенно-цифровом коде системы условных обозначений указывает разбраковку по отдельным параметрам приборов, изготовленных в единой технологии. Для обозначения используются заглавные буквы русского алфавита от А до Я, кроме З, О, Ч, Ё, Ш, Щ, Я, схожих по написанию с цифрами.

Пример записи в буквенно-цифровом коде системы условных обозначений полупроводниковых приборов — КС433А: кремниевый стабилитрон средней мощности (от 0,3 до 5 Вт) общегражданского применения, предназначенный для стабилизации напряжений менее 10 В и имеющий особенность, определяемую группой разбраковки А.

§ 1.4. Трансформаторы и дроссели

Важным пассивным компонентом ИВЭ является трансформатор, который в значительной степени определяет массогабаритные параметры всего источника вторичного электропитания.

Согласно установленному определению, *трансформатор* — это статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

Трансформаторы имеют две или более индуктивно связанные обмотки и позволяют:

- преобразовывать одну или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока;
- согласовывать сопротивления источника сигнала и нагрузки;
- осуществлять гальваническую (электрическую) развязку электрических цепей;
- изменять форму переменного напряжения (тока), а также число фазных напряжений.

На принципиальных электрических схемах трансформаторы обозначаются буквой *T* (рис. 1.5).

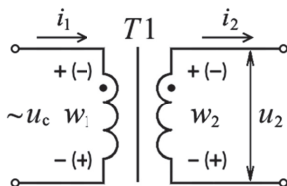


Рис. 1.5. Принципиальная электрическая схема двухобмоточного трансформатора с согласно включенными обмотками

Первичной обмоткой трансформатора называют обмотку w_1 , к которой приложено сетевое (входное) напряжение u_c , а *вторичной обмоткой* называют обмотку w_2 , с которой снимают выходное напряжение u_2 . Современные трансформаторы, как правило, имеют две первичные и несколько (до 15 ... 20) вторичных обмоток. С этой точки зрения трансформатор, схема которого приведена на рис. 1.5, является двухобмоточным. Общие вопросы удобно рассмотреть именно на таком трансформаторе.

Первичная и вторичная обмотки трансформатора могут быть включены либо согласно (как на рис. 1.5), либо встречно. Начало обмотки указывается точкой, размещаемой у соответствующей обмотки. При согласном включении обмоток один и тот же магнитный поток наводит на них ЭДС одинаковой полярности. Из рис. 1.5 видно, что если ток i_1 первичной обмотки w_1 втекает в начало обмотки, то ток i_2 вторичной обмотки w_2 вытекает из ее начала. При этом полярность напряжений u_c и u_2 на обмотках совпадает. Аналогично, если ток i_1 втекает в конец первичной обмотки, то ток i_2 вытекает из конца вторичной обмотки, при этом полярность напряжений u_c и u_2 на обмотках совпадает.

Сетевые трансформаторы ИВЭ используются, как правило, для связи с сетевым источником питания переменного тока. Трансформаторы работают в ненасыщенном режиме, обладают большой индуктивностью и большой мощностью. Все это приводит к тому, что эти трансформаторы обладают самыми большими массогабаритными параметрами среди всех видов трансформаторов.

В конструкторской документации приводится полное условное обозначение трансформатора, которое состоит из слова «трансформатор», сокращенного обозначения типа трансформатора, условного порядкового номера в ряду выбранного типа трансформаторов, номинального питающего напряжения, частоты питающей сети и вида климатического исполнения.

Маркировка сетевых трансформаторов выполняется по следующему правилу:

$$TXXY — U_1/U_2 — \Gamma — B,$$

где T — принадлежность данного элемента к группе трансформаторов;
 XX — одна или группа букв, обозначающих принадлежность к типу силовых трансформаторов:

- А — анодный, для питания цепей с повышенным напряжением;
- Н — накальный, для питания цепей с пониженным напряжением;
- АН — анодно-накальный, для совместного питания цепей с повышенным и пониженным напряжением;
- ПП — для питания устройств полупроводниковой техники;
- С — для питания бытовой аппаратуры;

Y — заводской номер серии данного типа трансформатора в ряду трансформаторов;

U_1/U_2 — номинальное напряжение сетевого питания, выраженное в В (может быть использовано напряжение либо U_1 , либо U_2),

Γ — рабочая частота сетевого напряжения, выраженная в Гц;

B — буквенное обозначение климатического исполнения:

- В — всеклиматическое;
- ТС — тропическое с сухим климатом;
- ТВ — тропическое с влажным климатом;
- УХЛ — для умеренного и холодного климата.

Пример условного обозначения трансформатора для питания полупроводниковых устройств с порядковым номером 323, номинальным питающим напряжением сети 127 или 220 В, частотой 50 Гц и всеклиматического исполнения: *Трансформатор ТПП 323–127/220–50 В*.

Принципиальная электрическая схема нескольких типов трансформаторов показана на рис. 1.6.

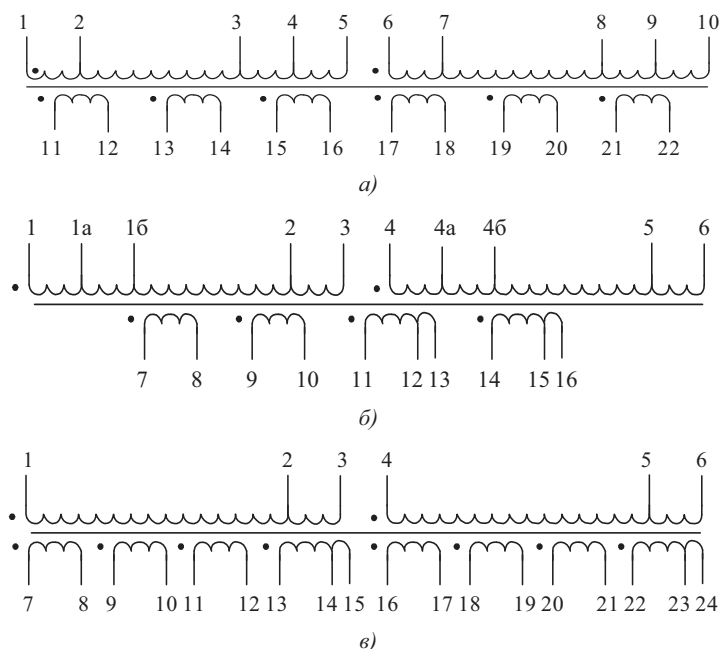


Рис. 1.6. Схемы принципиальные ряда типов сетевых трансформаторов:
а — ТА, ТПП; б — ТН; в — ТАН

Сетевые трансформаторы всех типов, как правило, имеют две первичные обмотки, которые работают с питающим напряжением 220 В

или 127 В. Иногда с целью снижения массогабаритных параметров при использовании сетевого напряжения 220 В частотой 50 Гц делают одну первичную обмотку без отводов.

Схема включения обмоток, приведенная на рис. 1.6, а, используется в трансформаторах типа ТА и ТПП.

У трансформаторов типа ТА имеется большое число вторичных обмоток с достаточно большим напряжением и небольшим током, которое после выпрямления и стабилизации применяют как анодное напряжение ламповых конструкций. У трансформаторов типа ТПП тоже имеется большое число обмоток для сравнительно малого напряжения, но достаточно большого тока. Данный тип трансформаторов используется в ИВЭ для питания полупроводниковых устройств, где не требуется высоких напряжений, но должен быть обеспечен достаточный ток.

Схема включения обмоток, приведенная на рис. 1.6, б, используется в трансформаторах типа ТН. У этих трансформаторов имеется небольшое число вторичных обмоток с достаточно большими токами, но маленькими напряжениями. Такие трансформаторы предназначены для питания катодных цепей ламповых устройств.

Схема, приведенная на рис. 1.6, в, соответствует трансформаторам типа ТАН. У этих трансформаторов имеются вторичные обмотки с достаточно большими напряжениями и небольшим током, а также несколько обмоток с маленькими напряжениями, но большими токами. Номиналы напряжений и токов обмоток трансформаторов, а также их соединение можно найти в справочниках.

Для получения необходимых напряжений вторичные обмотки трансформаторов соединяют либо согласно, либо встречно.

В справочной литературе приводится исчерпывающая информация о трансформаторах. Например, для малогабаритных трансформаторов типа ТА с частотой питающей сети 400 Гц указано следующее: конструкция и размеры; назначение; габаритные и установочные размеры; условия эксплуатации.

Конструкция трансформаторов способна противостоять механическим и климатическим воздействиям, сохранять работоспособность при повышенной влажности и во всех случаях тепловых воздействий обеспечивать необходимый запас электрической прочности изоляции обмоток.

На рис. 1.7 показана электрическая схема малогабаритного трансформатора типа ТА, предназначенного для питания анодных цепей РЭС промышленного назначения с номинальным напряжением питающей сети 40, 115 или 220 В и частотой 400 Гц.

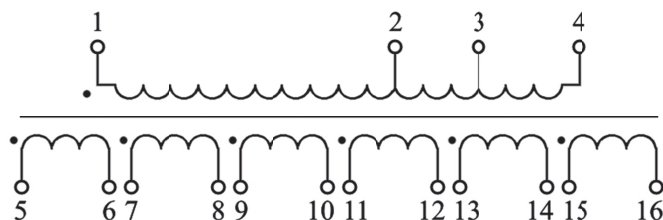


Рис. 1.7. Электрическая схема трансформатора

В табл. 1.2 приведены напряжения на отводах первичной обмотки трансформаторов типа ТА с частотой питающей сети 400 Гц.

Т а б л и ц а 1.2

Напряжения на отводах первичной обмотки трансформаторов типа ТА с частотой питающей сети 400 Гц

Тип трансформатора	Номинальное напряжение сети, В	Выводы	Напряжение на отводах, В	
			1–2	1–4
ТА	40	1–3	37,6	42,4
	115	1–3	108	122
	220	1–3	200	233

Основные электрические параметры малогабаритных трансформаторов типа ТА с частотой питающей сети 400 Гц в номинальном режиме приведены в табл. 1.3.

Т а б л и ц а 1.3

Электрические параметры некоторых трансформаторов типа ТА с частотой питающей сети в номинальном режиме

Типономинал трансформатора	Мощность, В·А		Ток первичной обмотки, А	Напряжение вторичной обмотки, В				Ток вторичной обмотки, А		
	Номинальная	Максимальная		Выводы обмоток						
				5–6 7–8	9–10 11–12	13–14	15–16	5–6 7–8	9–10 11–12	13–14 15–16
ТА1–40–400	7,5	10	0,400	28	28	6	6	0,056	0,064	0,064
ТА1–115–400			0,140							
ТА1–220–400			0,073							

Окончание таблицы 1.3

Типономинал трансформатора	Мощность, В·А		Ток первичной обмотки, А	Напряжение вторичной обмотки, В				Ток вторичной обмотки, А		
	Номинальная	Максимальная		Выводы обмоток						
				5–6 7–8	9–10 11–12	13–14	15–16	5–6 7–8	9–10 11–12	13–14 15–16
ТА61–40–400 ТА61–115–400 ТА61–220–400	67	80	2,250 0,800 0,410	80	56	20	12	0,210	0,230	0,230
ТА329–40–400 ТА329–115–400 ТА329–220–400	357	380	10,0 3,5 1,9	115	6,3	6,3	—	2,80	2,80	2,80

В табл. 1.4 показана зависимость КПД η трансформаторов от их мощности, измеряемой в В·А.

Т а б л и ц а 1.4
Зависимость КПД трансформаторов от их мощности

Р, В·А	До 0,5	0,5...1,5	1,5...4,0	4...10	10...10 ²	10 ² ...10 ³	Более 10 ³
η	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,90...0,95	0,95...0,98

Важным параметром трансформатора является коэффициент трансформации, который нормируется рядом: 0,012; 0,018; 0,025; 0,035; 0,05; 0,07; 0,1; 0,12; 0,14; 0,17; 0,2; 0,28; 0,34; 0,4; 0,48; 0,56; 0,67; 0,8; 0,85; 1,0; 1,05; 1,25; 1,5; 1,8; 2,1; 2,5; 3,0; 3,5; 4,2; 5,0; 6,0; 7,0; 8,5; 10,0; 14,0; 20,0; 28,0.

Магнитопроводы трансформаторов выполняют либо пластинчатыми, либо ленточными, либо прессованными. На рис. 1.8 и рис. 1.9 приведены конструкции магнитопроводов (сердечников) трансформаторов, различающиеся по способу формирования структуры магнитопровода.

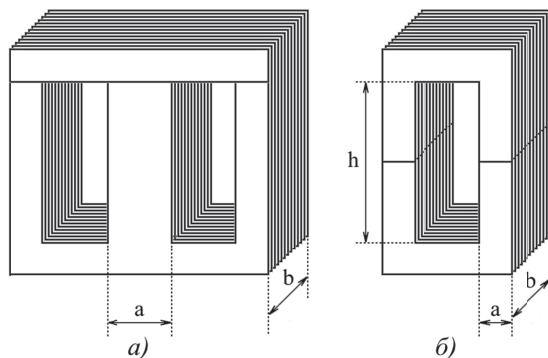


Рис. 1.8. Пластинчатые магнитопроводы трансформаторов:
 а — броневые; б — стержневые

Наиболее простым и дешевым способом изготовления сердечника является штамповка пластин и сборка их в пакеты магнитопровода. Чтобы исключить зазор между пластинами, магнитопровод собирают «вперекрышку». Если в обмотках трансформатора протекает постоянный ток, то делают в магнитопроводе немагнитный зазор, где помещают изолирующий материал. Для уменьшения потерь в магнитопроводе на вихревые токи пластины изолируют тонким слоем лака или окисла, который образуется при отжиге пластин. Пластины после сборки магнитопровода трансформатора стягивают специальными обжимами или шпильками с гайками. Пластины штампуют из листовой электротехнической стали марок 1511 и 1512 толщиной 0,35...0,50 мм или 3411...3413 толщиной 0,20...0,35 мм. Другой способ сборки магнитопровода основан на навивке из полос электротехнической стали марок 3411...3413 толщиной 0,20...0,35 мм тороидальных сердечников.

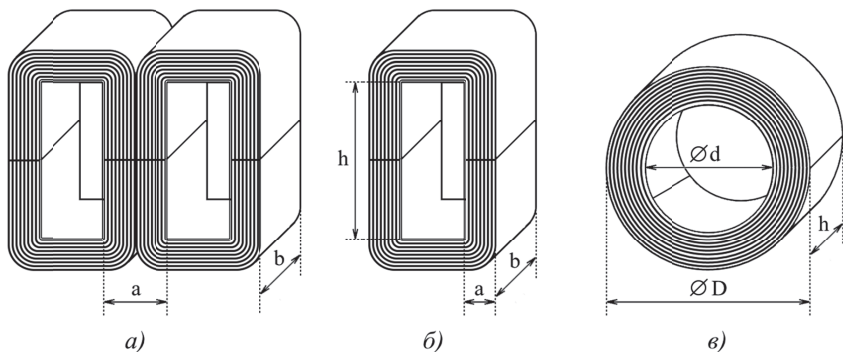


Рис. 1.9. Ленточные магнитопроводы трансформаторов:
 а — броневые; б — стержневые, в — тороидальные