

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

А. Г. САМОЙЛОВ С. А. САМОЙЛОВ

УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Учебное пособие



Владимир 2021

УДК 621.37/39:311.6

ББК 32.84

С17

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой конструирования и технологии радиоэлектронных средств
Арзамасского политехнического института (филиала) Нижегородского
государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева
Н. П. Ямпурин

Доктор технических наук
профессор кафедры радиотехники и радиосистем
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
П. А. Полушин

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой информатики и защиты информации
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
М. Ю. Монахов

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Самойлов, А. Г. Устройства электропитания : учеб. посо-
С17 бие / А. Г. Самойлов, С. А. Самойлов ; Владим. гос. ун-т
им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. –
160 с. – ISBN 978-5-9984-1183-0.

Рассмотрены принципы работы источников и устройств электропитания. Представлены методики расчета основных узлов и пути практического использования источников питания в радиотехнике, системах связи и передачи информации. Приведены рекомендации по использованию изложенного материала в практической деятельности при разработке и эксплуатации как аналоговых, так и цифровых устройств электропитания радиотехнической аппаратуры.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направлений 11.03.01 – Радиотехника и 11.03.02 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи, будет полезно специалистам в области проектирования радиотехнических устройств и систем.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 2. Ил. 110. Библиогр.: 30 назв.

УДК 621.37/39:311.6

ББК 32.84

ISBN 978-5-9984-1183-0

© ВлГУ, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Глава 1. ПЕРВИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	7
1.1. Химические источники электропитания	7
1.1.1. Свинцово-кислотные аккумуляторы.....	8
1.1.2. Щелочные никель-кадмиевые аккумуляторы.....	15
1.1.3. Щелочные никель-железные аккумуляторы.....	17
1.1.4. Никель-металлогидридные аккумуляторы.....	19
1.1.5. Никель-цинковые аккумуляторы.....	20
1.1.6. Серебряно-цинковые и серебряно-кадмиевые аккумуляторы	21
1.1.7. Никель-водородные аккумуляторы.....	22
1.1.8. Литий-ионные аккумуляторы	23
1.1.9. Литий-полимерные аккумуляторы.....	25
1.1.10. Перезаряжаемые марганцево-цинковые источники тока	26
1.2. Термогенераторы.....	27
1.3. Топливные элементы	28
1.4. Солнечные батареи	29
1.5. Радиоизотопные источники энергии.....	32
1.6. Электрические машины.....	39
Контрольные вопросы.....	44
Глава 2. ВТОРИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	46
2.1. Основные характеристики вторичных источников электропитания	46
2.2. Трансформаторы.....	52
2.3. Дроссели.....	61

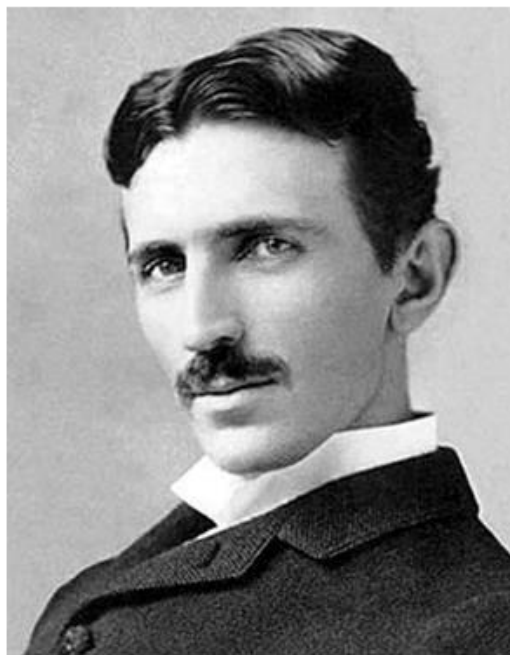
2.4. Выпрямители	67
2.4.1. Основные сведения	67
2.4.2. Однополупериодные выпрямители	70
2.4.3. Двухполупериодные выпрямители	73
2.4.4. Трехфазные выпрямители	76
2.4.5. Управляемые выпрямители.....	79
2.5. Сглаживающие фильтры	84
2.6. Устройства стабилизации напряжения	87
2.7. Устройства стабилизации тока	98
2.8. Инверторы и преобразователи напряжения	99
2.9. Инверторы с самовозбуждением	108
2.10. Силовые ключи.....	112
2.11. Умножители напряжения	117
Контрольные вопросы.....	122
Глава 3. РАСЧЕТ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ	126
3.1. Расчет трансформаторов.....	126
3.2. Расчет двухполупериодного выпрямителя с емкостным фильтром	136
3.3. Расчет индуктивных фильтров	138
3.4. Расчет индуктивно-емкостных фильтров.....	141
3.5. Активно-емкостный фильтр.....	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	147
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	148
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	151

ПРЕДИСЛОВИЕ

В начале XIX века великий ученый Алессандро Вольта из двух металлических пластин и раствора соли создал первый источник постоянного тока, который стал прародителем современных батарей электропитания. На основе этого открытия в 1821 году англичанин Майкл Фарадей впервые реализовал непрерывное преобразование электрической энергии в механическую, т. е. создал первый электродвигатель, а позднее и трансформатор. В 1880 году австрийский ученый, серб по национальности, Никола Тесла запатентовал первый генератор переменного тока.



Алессандро Вольта (1745 – 1827)



Никола Тесла (1856 – 1943)

Открытие источников электропитания совершило революцию в развитии общества, позволив создать тысячи новых направлений в науке и технике. Электропитание в настоящее время определяет широкий круг возможностей от освещения и автоматизации в быту и промышленности до инфотелекоммуникаций и освоения космоса. Устройства электропитания непрерывно развиваются, и перед авторами стояла задача описать известные устройства электропитания, показать методы их разработки и расчета, указать перспективы их развития. По-

этому в книгу, кроме теории устройств электропитания, включены практические вопросы по современной схемотехнике устройств и их расчету.

Книга состоит из трех глав, приложений и библиографического списка и обобщает материал лекционных курсов, читаемых авторами во Владимирском государственном университете, а также результаты научных работ авторов по проектированию мощных генераторов сигналов.

В первой главе рассмотрены известные первичные источники электропитания от химических аккумуляторов и электрических машин до солнечных и атомных батарей. Изложены принципы работы различных источников электроэнергии, описаны их свойства и характеристики. Указаны достоинства и недостатки каждого типа рассматриваемых источников электропитания, что позволит специалистам при проектировании радиотехнических систем и устройств создавать источники питания и другую радиотехническую аппаратуру, учитывая известные риски.

Вторая глава посвящена вторичным источникам электропитания, преобразующим электроэнергию в необходимую форму с нужными характеристиками. Подробно изложены методы преобразования электроэнергии как традиционные аналоговые, так и современные импульсные. Рассмотрена отечественная элементная база устройств электропитания и даны рекомендации по ее применению на практике.

В соответствии с учебным планом изучение дисциплины «Устройства электропитания» сопровождается курсовой работой. Поэтому в третьей главе изложены известные методики расчета устройств электропитания и их основных узлов.

Авторы выражают глубокую благодарность Николаю Петровичу Ямпурину, доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой конструирования и технологии радиоэлектронных средств Арзамасского политехнического института (филиала) Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, Петру Алексеевичу Полушину, доктору технических наук, профессору кафедры радиотехники и радиосистем Владимирского государственного университета и Михаилу Юрьевичу Монахову, доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой информатики и защиты информации Владимирского государственного университета за обсуждение материала и ценные советы по улучшению содержания учебного пособия.

Глава 1. ПЕРВИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Источники электропитания разделяют на первичные и вторичные. Первичные источники электропитания – это устройства, перерабатывающие энергию любого вида (механическую, химическую, световую, ядерную, тепловую) в электрическую энергию. Вторичные источники электропитания преобразуют электрическую энергию в электрическую энергию другого вида, необходимую для нагрузки потребителя, поэтому их часто называют инверторами, или преобразователями.

К первичным источникам электропитания относят [1]:

- химические источники;
- термогенераторы;
- солнечные батареи;
- атомные батареи;
- топливные элементы;
- электрические машины (постоянного и переменного тока).

1.1. Химические источники электропитания

Растворы солей и кислот в воде или в другом растворителе называют электролитами. При растворении солей и кислот в растворителе (им может быть вода, спирт, бензол и др.) часть молекул распадается на ионы, имеющие положительный заряд, и электроны, имеющие отрицательный заряд.

Если в сосуд с электролитом погружены две различные по составу металлические пластины, которые присоединены к нагрузке, то на пластинах возникают потенциалы. Из-за разности потенциалов между электродами через электролит и нагрузку будет протекать ток. Химический процесс при прохождении тока через электролит называется электролизом. При электролизе положительные ионы двигаются к катоду, а отрицательные к аноду. При зарядке химические источники накапливают электроэнергию и их называют аккумуляторами. Незаряжаемые химические источники часто называют гальваническими элементами. Для повышения выходного напряжения их объединяют в батареи. Основными характеристиками гальванических элементов и

аккумуляторов являются электрическая емкость и номинальное напряжение [1].

Электрической емкостью гальванических элементов и аккумуляторов называют произведение длительности полного разряда источника на ток разряда, она измеряется в ампер-часах. Электрическая емкость химических источников питания зависит от температуры химического процесса. Номинальное напряжение аккумулятора – это напряжение на выводах полностью заряженного аккумулятора в течение первого часа разряда током десятичасового режима разряда при комнатной температуре электролита 20 °С.

Разновидностей химических аккумуляторов очень много [2]. Наиболее часто используются кислотные, щелочные и литий-ионные аккумуляторы, примеры которых показаны на рис. 1.



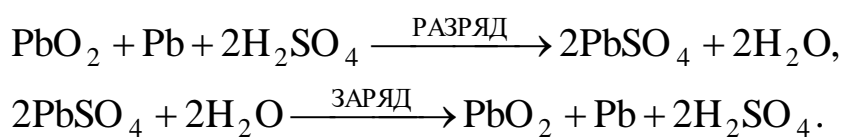
Рис. 1. Химические источники питания: а – кислотные; б – щелочные; в – литий-ионные

1.1.1. Свинцово-кислотные аккумуляторы

Свинцово-кислотный аккумулятор – это химический источник тока многократного действия. В свинцово-кислотных аккумуляторах вступают в реакцию свинец Pb и диоксид свинца PbO₂, электролитом является раствор серной кислоты. Такие источники называют свинцовыми аккумуляторами. Они могут длительно сохранять, накапливать, и отдавать электрическую энергию, полученную от внешнего источника постоянного тока [Там же]. Свинцовый аккумулятор представляет собой последовательное соединение химических элементов с номинальным напряжением $U = 2\text{В}$ при температуре 20 °С.

Аккумулятор содержит положительные и отрицательные пластины, погруженные в раствор серной кислоты [1]. Концентрация кислоты определяет плотность электролита. Материалом электродов служит свинец, но после заряда аккумулятора на положительном электроде образуется двуокись свинца PbO_2 , а на отрицательном электроде остается губчатый свинец Pb [2].

Свойство накапливать энергию позволяет заряжать аккумуляторы, в результате чего происходит химическая реакция, которая противоположна реакции, происходящей при разряде аккумулятора. Реакции в свинцовом аккумуляторе описываются двумя уравнениями:



Во время заряда при химической реакции сульфат свинца на отрицательных пластинах восстанавливается до губчатого свинца, а на положительных пластинах превращается в двуокись свинца [1]. При этом образуется серная кислота, но расходуется вода, а плотность электролита повышается. Если заряд продолжать дальше, то возникает разложение воды с бурным выделением водорода и кислорода [2].

Во время заряда электрическая энергия источника превращается в химическую энергию, в результате которой идет преобразование веществ в аккумуляторе. Если аккумулятор заряжен, то в растворе электролита будет высокая концентрация серной кислоты и электролит при этом имеет высокую плотность.

Аккумулятор разряжается на сопротивление нагрузки. При этом накопленная химическая энергия преобразуется в электрическую, которая и расходуется нагрузкой. Во время процесса разряда двуокись свинца и губчатый свинец превращаются в сульфат свинца $PbSO_4$ [Там же]. Если к аккумулятору не подключена нагрузка, то он все равно теряет часть своей емкости из-за саморазряда, скорость которого зависит от типа электролита, параметров электродов и температуры хранения аккумулятора. Устройство свинцовых аккумуляторов показано на рис. 2.

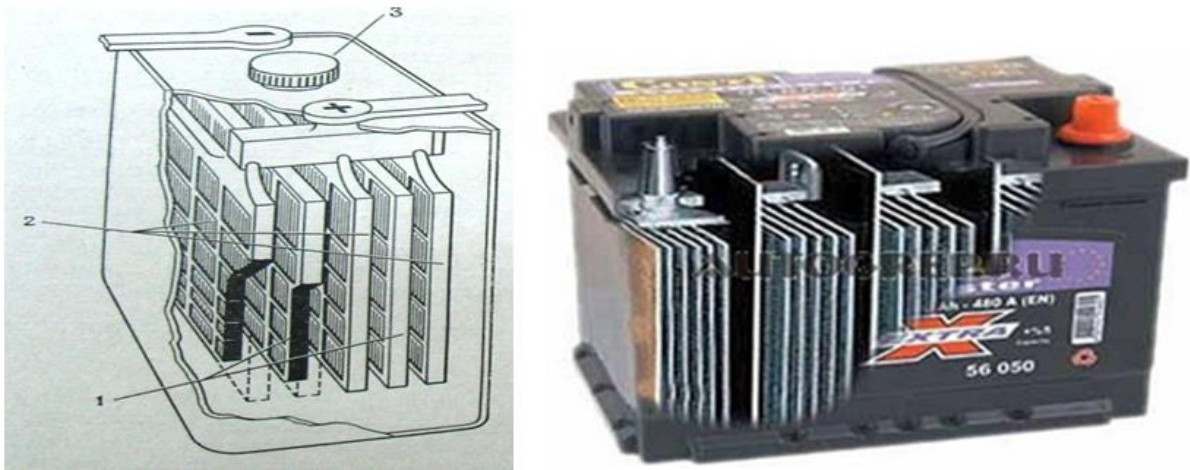


Рис. 2. Свинцовые аккумуляторы: 1 – отрицательные пластины из губчатого свинца; 2 – положительные решетчатые пластины, заполненные PbO_2 ; 3 – отверстие для добавления H_2O или H_2SO_4

Емкость аккумулятора измеряется в ампер-часах ($A \cdot ч$). Ампер-часы – это то количество электричества, которое можно получить от аккумулятора при определенных условиях разряда. Емкость аккумулятора измеряют при температуре среды в $t_{cp} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Номинальная емкость аккумуляторов, приведенная к десятичасовому режиму разряда при температуре среды [2], зависит от многих факторов: тока разряда I_p , времени разряда t_p , коэффициента отдачи по емкости η_Q , температуры окружающей среды t_{cp}

$$Q_{\text{ном}} = \frac{I_p t_p}{\eta_Q [1 + 0,008(t_{cp} - 20^0)]}$$

При операциях заряда или разряда напряжение одного элемента аккумуляторной батареи изменяется на $\pm 0,2 - 0,22 \text{ В}$ [1]. Количество элементов в батарее в два раза меньше требуемого напряжения U_a , поскольку номинальное напряжение одного элемента свинцового аккумулятора равно 2 В .

$$N = \frac{U_a}{U_{\text{эл. ном}}} = \frac{U_a}{2}$$

Напряжение одного элемента батареи в конце разряда равно $U = (1,75 - 1,8) \text{ В}$. При разряде аккумулятора большими токами

напряжение в процессе разряда доходит до уровня 1,8 В, когда аккумулятор еще не израсходует свою емкость. В таких случаях показателем окончания разряда будет величина напряжения элемента [2].

Напряжение на элементе свинцового аккумулятора при заряде должна быть больше 2 В, так как зарядному току приходится преодолевать внутреннее сопротивление аккумулятора $U_3 = (2,3 - 2,35)$ В. Плотность электролита заряженного свинцового аккумулятора составляет $(1,25 - 1,3)$ г/см³, а в состоянии разряда – 1,05 г/см³.

Внутреннее сопротивление аккумулятора R образуется из сопротивлений пластин, сепараторов и электролита. По мере разряда оно растет из-за снижения плотности электролита и образования сульфата свинца, плохо проводящего ток. Омическое сопротивление полностью заряженного аккумулятора составляет примерно 0,0036 Ом, а в состоянии полного разряда – 0,007 Ом [Там же].

Закрытые негерметичные аккумуляторы выпускают в настоящее время многие отечественные и зарубежные фирмы. Основными представителями рынка негерметичных аккумуляторов для электросвязи следует назвать CHLORIDE INC., VARTA GmbH, HAGEN GmbH, YUASA Corp., OLDHAM France [1].

Для корпуса кислотных аккумуляторов широко применяют прозрачные коробки. Корпус аккумулятора изготавливается из ударопрочного материала. Сверху корпуса устанавливают заливные пробки, которые обеспечивают газообмен внутренней полости аккумулятора с окружающей средой [2]. Пробки отвинчиваются, что обеспечивает доступ к электролиту и верхним частям пластин.

Такая конструкция свинцового аккумулятора считается типовой и благодаря ей можно:

- контролировать уровень электролита в каждом элементе батареи и его чистоту;
- определять сульфатацию торцов пластин;
- наблюдать кипение электролита при заряде;
- проверять ареометром плотность электролита;
- делать отбор электролита на лабораторный анализ.

Состав электролита, сульфатация и деформация пластин внутри аккумулятора различны, но в закрытых негерметичных аккумуляторах

наблюдать сульфатацию и коробление внутренних пластин или делать анализ глубинных слоев электролита не удается.

Конструкция с избыточным объемом электролита имеет запас на испарение и выкипание при заряде, поэтому частый долив электролита не требуется. Дистиллированную воду доливают не чаще чем 1 раз в год. Имеются конструкции аккумуляторов с автоматическим доливом воды, содержащие резервуар с дистиллированной водой, снабженный мерным клапаном. При понижении уровня электролита клапан открывается и вода доливается в электролит. Плотность электролита при этом снижается, а из-за испарений серной кислоты происходит разбавление электролита и снижение емкости. Все негерметичные конструкции свинцовых аккумуляторов не рассчитаны на разборку и ремонт [1].

Герметичные аккумуляторы с рекомбинацией газа (ГА) и регулированием газовой выделением. В зарубежной литературе они получили название VRLA (Valve Regulated Lead Acid). Герметичные аккумуляторы обладают в 8 – 9 раз большей энергией на единицу массы по сравнению с негерметичными. Их изготавливают из непрозрачной пластмассы в отличие от негерметичных [2]. На верхней крышке аккумулятора кроме клемм имеется регулирующий клапан. Иногда он скрыт защитной панелью. Регулирующий клапан отличается от пробок негерметичного аккумулятора, хотя внешне они похожи.

Контроль плотности электролита и его пополнение в ГА невозможны, поэтому герметичные аккумуляторы относятся к неремонтопригодным. Регулирующий клапан осуществляет одностороннее пропускание газов из аккумулятора наружу и препятствует проникновению примесей внутрь. Избыточное давление, создаваемое внутри аккумулятора, стравливается через клапан, который выполняет защитную функцию, предохраняя аккумулятор от разрушения от повышенного давления при кипении электролита [2].

Герметичные аккумуляторы различаются способом абсорбции (связывания) электролита и газов. Применяются два типа связывания электролита [1]:

1. Пропитка микропористого сепаратора сернокислотным электролитом. В качестве материала сепаратора используют стекловолокон-

но. Капиллярная структура сепаратора не позволяет электролиту вытекать. Так строятся аккумуляторы многих фирм.

2. Электролит с желеобразным силиконом нетекучей и вязкой консистенции. Микропористый сепаратор при этом не требуется.

При изготовлении аккумулятора стекловолоконный микропористый сепаратор устанавливают так, чтобы он прилегал к пластинам, не давая им осыпаться. Желеобразный электролит применяют вместе с сепараторами сетчатой или гофрированной формы, поэтому осыпание пластин в аккумуляторах с желеобразным электролитом более интенсивно. Желеобразная технология дешевле микропористой, но параметры аккумуляторов при этом уступают аккумуляторам с микропористым сепаратором [2]. В настоящее время используются в основном аккумуляторы, не требующие ухода.

Для контроля заряда многие аккумуляторы имеют встроенный индикатор заряда. Это зеленый шарик-поплавок,двигающийся в прозрачной колбе. При достаточном уровне и плотности электролита шарик поднимается вверх и виден его зеленый цвет. При малой плотности шарик тонет и его не видно. В этом случае нужно проверить электролит и подзарядить аккумуляторную батарею (АКБ).

Можно измерить напряжение на клеммах вольтметром. На полностью заряженной АКБ должно быть не менее 12,6 В. Напряжение 12,42 В соответствует 80 % заряда; 12,2 В – 60 %; 11,9 В – 40 %; 11,58 В – 20 %; 10,5 В – 0 % [1]. Мощные аккумуляторы проверяют нагрузочной вилкой, которая показывает падение напряжения под нагрузкой, т. е. реальный уровень заряда и емкость.

Различают два основных метода зарядки: постоянным током; постоянным напряжением [2].

Первый метод эффективнее, но требует процедуры заряда в несколько этапов и постоянного контроля. Второй проще, однако обеспечивает зарядку АКБ лишь до 80 % [Там же].

Процедура зарядки постоянным током состоит в следующем.

1. Устанавливаем ток величиной, равной 10 % от номинальной емкости аккумулятора (аккумулятор емкостью 60 А · ч нужно заряжать током не более 6 А). Таким током заряжаем до тех пор, пока напряжение на АКБ не поднимется до 14,3 – 14,4 В.

2. Затем уменьшаем ток в два раза, снижая интенсивность кипения, и продолжаем зарядку.

3. Когда напряжение вырастет до 15 В, снова уменьшаем ток в два раза и заряжаем аккумулятор до того момента, когда значения напряжения и тока перестанут изменяться.

Процедура зарядки постоянным напряжением наиболее простая. Напряжение устанавливается в пределах 14,4 – 14,5 В и аккумулятор начинает заряжаться. Зарядка аккумулятора постоянным напряжением длится около суток и позволяет восполнить емкость аккумулятора лишь на 80 %. Первый метод дает возможность полностью зарядить АКБ за несколько часов (около 10 часов).

Свинцовые аккумуляторы разделяют на четыре группы: стартерные, стационарные, тяговые и портативные [2].

Стартерные аккумуляторы используют в автомобилях для запуска двигателей внутреннего сгорания и дизельных двигателей (прил. 1).

Стационарные аккумуляторы используют в телекоммуникационных системах, в качестве аварийных источников и т. д. Обычно их применяют, обеспечивая непрерывный подзаряд.

Тяговые аккумуляторы создали для электрокаров, подъемников, шахтных электровозов, электромобилей и других машин, где нужно запитывать электродвигатели. Они работают в режимах глубокого разряда, имеют большой ресурс и низкую стоимость.

Портативные, или герметизированные, свинцовые аккумуляторы применяют для питания приборов, ручного инструмента, аварийного освещения. У них широкий интервал рабочих температур, а стоимость ниже по сравнению со стоимостью других аккумуляторов.

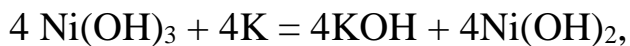
Свинцовые аккумуляторы чаще всего используют как стартерные для запуска двигателей внутреннего сгорания. Недостатками свинцовых аккумуляторов являются невысокая удельная энергия и наработка, низкая сохранность заряда и выделение взрывоопасного водорода. Дополнительными недостатками всех кислотных аккумуляторов признаны невозможность хранения в разряженном состоянии и трудность изготовления аккумуляторов малых размеров [1].

1.1.2. Щелочные никель-кадмиевые аккумуляторы

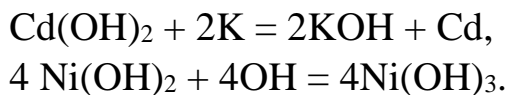
Щелочные никель-кадмиевые аккумуляторы (Ni-Cd) изобретены в 1899 году Вальдемаром Юнгнером и получили широкое распространение в 1980-х годах. Химическая реакция в никель-кадмиевых аккумуляторах происходит между гидроксидом никеля и кадмием, а электролитом выступает раствор щелочи КОН [1]. Поэтому они именуются щелочными аккумуляторами.

Скорость разряда никель-кадмиевых аккумуляторов выше, чем кислотных, но они работают при низких температурах, хотя дороже, имеют эффект памяти, способны к тепловому разгону и применяются достаточно широко [2]. Их используют во многих практических приложениях, например, для питания шахтных электровозов, подъемников, стационарного оборудования, средств связи и различных электронных приборов, для запуска дизелей и авиационных двигателей и т. п.

При разряде никель-кадмиевых аккумуляторов происходит химическая реакция



а при заряде другая



Разность потенциалов на одном элементе составляет $U = 1,25 \text{ В}$. Никель-кадмиевые аккумуляторы требуется полностью разряжать перед каждым зарядом, так как возникающие на электродах при работе аккумулятора кристаллы кадмия приводят к потере емкости аккумулятора. Это назвали эффектом памяти аккумулятора.

Герметичные Ni-Cd аккумуляторы характеризуются большой скоростью разряда и способностью работать при низких температурах. Однако они дороже герметизированных свинцовых аккумуляторов и отличаются эффектом памяти, снижающим их эффективность [Там же].

Методы заряда Ni-Cd и никель-металлогидридных (Ni-MH) аккумуляторов. Существуют различные методы заряда Ni-Cd или Ni-MH аккумуляторов. Их можно разделить на четыре группы [Там же]:

– обычный заряд постоянным током, равным 1/10 от величины номинальной емкости аккумулятора, в течение примерно 10 – 15 ч;

- быстрый заряд постоянным током, равным $1/3$ от величины номинальной емкости аккумулятора, в течение 5 ч;
- реверсивный заряд импульсным током, при котором короткие импульсы разряда распределяются между длинными зарядными импульсами;
- ускоренный заряд с начальным током, равным по величине номинальной емкости аккумулятора. При этом на аккумуляторе непрерывно измеряется напряжение и заряд заканчивается после того, как аккумулятор полностью заряжен. Время заряда ориентировочно один час.

Внешний вид малогабаритных никель-кадмиевых аккумуляторов показан на рис. 3.



Рис. 3. Малогабаритные никель-кадмиевые аккумуляторы

Ni-Cd аккумуляторы всегда заряжаются при постоянном токе в одну десятую от величины емкости. Этим они отличаются от свинцово-кислотных, которые заряжаются при постоянном напряжении. Они имеют длительный срок службы и допускают до 1000 циклов заряда/разряда. Характеризуются стабильной работой в широком диапа-

зоне температур (от -20 до $+50$ °C) и имеют низкое внутреннее сопротивление. Применяются для питания сотовых телефонов, магнитофонов, компьютеров, цифровых фотоаппаратов и других бытовых приборов.

Достоинства никель-кадмиевых аккумуляторов [2]:

- дешевый тип аккумуляторов при пересчете на цикл;
- способны отдавать большой ток;
- допускают до 1000 циклов заряда/разряда;
- имеют длительный срок хранения в разряженном состоянии (перед использованием необходимо активировать);
- эффективны при разных температурах (от -50 до $+40$ °C);
- могут заряжаться при температуре ниже 0 °C.

Недостатки никель-кадмиевых аккумуляторов [Там же]:

- применение высокотоксичного кадмия;
- наличие эффекта памяти (необходимо полностью разряжать перед зарядкой);
- высокая степень саморазряда (нужно заряжать после хранения, иначе теряется до 10 % за первый месяц);
- периодически требуется «тренировка» аккумулятора (3 – 4 цикла заряда/разряда для восстановления);
- низкое напряжение (1,5 – 1,2 В), что требует много элементов для достижения высокого напряжения.

1.1.3. Щелочные никель-железные аккумуляторы

Никель-железный аккумулятор был независимо изобретен Томасом Эдисоном в 1901 году и использовался как источник энергии для первых электромобилей [1]. Пятидесятивольтовая никель-железная батарея была основным источником питания в немецкой боевой ракете Фау-2. Вместо кадмия в этих аккумуляторах используется железо. Аккумуляторы при работе выделяют водород, поэтому производят их только в негерметичном варианте. Они существенно дешевле никель-кадмиевых аккумуляторов, не содержат ядовитый кадмий и имеют большой срок службы [Там же]. Их недостатки в том, что они обладают высоким саморазрядом, низкой отдачей по энергии и практически неработоспособны при температуре ниже -10 °C. Выпускаются никель-железные аккумуляторы в виде прямоугольных коробок

и используются в основном как тяговые источники в шахтных электровозах, электрокарах и промышленных подъемниках [1]. Внешний вид никель-железных аккумуляторов показан на рис. 4.



Рис. 4. Батареи никель-железных аккумуляторов

Никель-железные аккумуляторы относятся к группе щелочных и по объему выпуска в нашей стране занимают второе место после свинцовых батарей. Этот тип батарей имеет длительный срок службы (до 3 тыс. циклов заряд-разряд), быстро заряжаются, стоят дешевле никель-кадмиевых, для них проще приобрести составляющие [2]. Поэтому в отечественной промышленности они широко используются в электровозах и на другом железнодорожном транспорте, складской технике, электрокарах. Один из основных недостатков – высокий саморазряд, но при эксплуатации их в режиме тяговых это не важно.

Никель-железные аккумуляторы являются одними из часто применяемых для использования в электромобилях благодаря трем основным преимуществам: доступности исходного сырья, малой стоимости и большому сроку службы. Основными проблемами при их применении следует назвать плохое использование тока (сопровожающееся выделением водорода при заряде), невозможность герметизации и связанная с этим необходимость корректировки электролита.

1.1.4. Никель-металлогидридные аккумуляторы

Активным материалом отрицательного электрода никель-металлогидридных аккумуляторов (Ni-MH) служит интерметаллид, обратимо сорбирующий водород. Таким образом, отрицательный электрод является водородным электродом, у которого восстановленная форма водорода находится в абсорбированном состоянии. Разрядная кривая Ni-MH аккумулятора, как и у Ni-Cd аккумулятора, горизонтальная [2]. Малогабаритные Ni-MH аккумуляторы показаны на рис. 5.



Рис. 5. Никель-металлогидридные аккумуляторы

Удельная емкость и энергия никель-металлогидридных аккумуляторов в 1,5 – 2 раза выше удельной энергии никель-кадмиевых аккумуляторов, и главное они не содержат ядовитый кадмий. Не менее важная характеристика никель-металлогидридных аккумуляторов заключается в слабо выраженном эффекте памяти, поэтому часто заряжать такие аккумуляторы не придется. Изготавливаются никель-металлогидридные аккумуляторы в герметичном исполнении цилиндрической, призматической и дисковой форм. Применяются для питания портативной аппаратуры.

Достоинства Ni-MH аккумуляторов [Там же]:

- высокая удельная емкость до 40 % больше стандартной емкости Ni-Cd и меньший вес;
- отсутствует эффект памяти, частота обслуживания снижена в 2 – 3 раза;
- не содержат вредных металлов кадмия, ртути, свинца и вредных химических веществ;

– эффективны при отрицательных температурах, но в меньшей степени, чем Ni-Cd.

Недостатки Ni-MH аккумуляторов [2]:

- дороже, чем Ni-Cd;
- сложный алгоритм зарядки, требуется особое зарядное устройство (со стадийным алгоритмом и контролем перезаряда);
- излишнее тепловыделение (при быстрой зарядке и во время разрядки на высокой нагрузке);
- меньшая производительность при экстремальных температурах в сравнении с Ni-Cd;
- малый срок службы (до 500 циклов и значительно сокращается из-за глубокого разряда);
- высокая скорость саморазряда.

1.1.5. Никель-цинковые аккумуляторы

Никель-цинковые (Ni-Zn) щелочные аккумуляторы имеют цинковый отрицательный электрод. Их удельная энергия примерно в 2 раза выше, чем у Ni-Cd аккумуляторов. Они характеризуются горизонтальной разрядной кривой, высокой удельной мощностью и невысокой ценой. Однако ресурс их мал, поэтому массового применения никель-цинковые щелочные аккумуляторы не нашли [1]. Применяются в основном для питания портативной аппаратуры. Пример таких аккумуляторов приведен на рис. 6.



Рис. 6. Никель-цинковые аккумуляторы

При правильной эксплуатации и подзарядки Ni-Zn аккумуляторы могут прослужить на несколько лет дольше, чем другие виды щелочных аккумуляторов. Стабильные характеристики по напряжению и высокая плотность заряда – их основные преимущества.

Достоинства Ni-Zn источников питания [1]:

- напряжение на одном элементе питания составляет 1,6 – 1,7 В, максимальное по величине по сравнению с другими щелочными аккумуляторами;

- отсутствие в составе токсичных веществ и простота утилизации элементов;

- сохранение высокого напряжения в процессе разряда в широком диапазоне нагрузок по току от 4 до 300 А;

- срок службы составляет 5 лет или до 370 циклов «заряд-разряд»;

- допустимость переплюсовки;

- высокий уровень пожаробезопасности в случае возникновения короткого замыкания.

Недостатки Ni-Zn аккумуляторов:

- время жизни аккумулятора меньше, чем у многих современных типов аккумуляторов (литий-ионных, литий-полимерных);

- невозможность дозарядить не до конца разряженные элементы.

1.1.6. Серебряно-цинковые и серебряно-кадмиевые аккумуляторы

Первую батарейку с элементами из серебра и цинка создал итальянский ученый Вольта в 1800 году. Положительным электродом служит оксид серебра, а отрицательным – цинк или кадмий. Электролитом является раствор щелочи. Характеризуются высокими удельными энергиями и мощностью, низким саморазрядом, но очень дороги. Серебряно-цинковые батарейки по своим техническим показателям превосходят аналогичные устройства других типов. Они обладают высокой энергоемкостью, отличаются постоянством напряжения, длительными сроками хранения, отсутствием токсичности. Примеры таких аккумуляторов приведены на рис. 7.

Серебряно-цинковые аккумуляторы имеют незначительный ресурс. Выпускаются в форме призм или дисков, применяются для питания портативных приборов и аппаратов в военной технике. Эти элементы не получили большого применения из-за высокой цены на серебро.



Рис. 7. Серебряно-цинковые аккумуляторы

Однако они используются там, где необходимы компактные размеры и экологическая безопасность. Они обеспечивают питание наручных часов, материнских плат ноутбуков и компьютеров, миниатюрных фонариков, калькуляторов, лазерных указок и др.

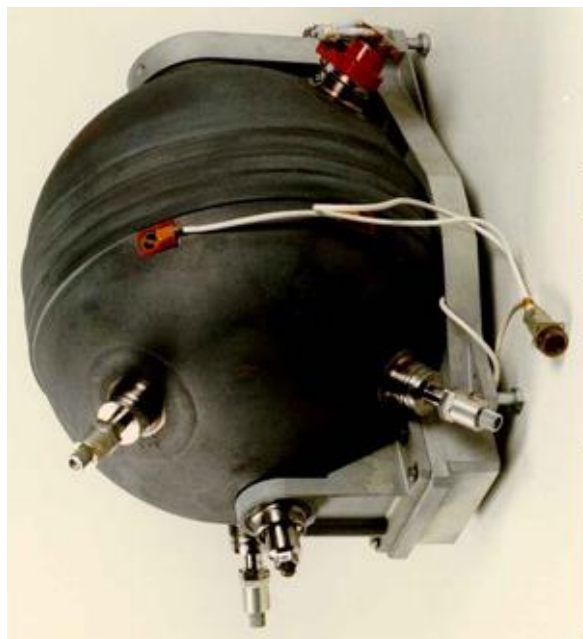
1.1.7. Никель-водородные аккумуляторы

Никель-водородные аккумуляторы впервые были созданы в СССР. Аккумулятор имеет никелевый и водородный электроды. Он отличается от никель-металлогибридного аккумулятора тем, что в его конструкции используется водород в газообразной форме, хранящейся в сжатом состоянии при давлении в 82,7 бар (1 Бар = 0,987 атм) [2]. В качестве отрицательного электрода служит пористый газодиффузионный электрод с платиновым катализатором. Образцы никель-водородных аккумуляторов приведены на рис. 8 и 9.



Рис. 8. Никель-водородные аккумуляторы

Никель-водородные аккумуляторы обладают высокой удельной энергией и большим ресурсом, но имеют значительный саморазряд и очень дороги. Применяется в космической технике.



Технические характеристики:	
номинальная электрическая ёмкость, А	80
напряжение конца заряда, В	27,8
напряжение конца разряда, В	18
ток заряда, А	15
ток разряда, А	70
масса, кг	43
ресурс, лет/цикло	10/150

Рис. 9. Аккумуляторная никель-водородная батарея 18НВ-80

С 1986 года никель-водородными батареями оснащено более 100 космических аппаратов. На рис. 9 показана современная никель-водородная батарея, которая предназначена для систем энергопитания космических аппаратов. Две батареи такого типа использовались на геостационарном спутнике связи Ямал-100.

1.1.8. Литий-ионные аккумуляторы

В качестве отрицательного электрода у литий-ионных (Li-ion) аккумуляторов применен углеродистый материал, в который обратимо внедряются ионы лития. Положительный электрод выполнен из оксида кобальта, в который также обратимо внедряются ионы лития [2]. Электролит состоит из раствора соли лития. Li-ion аккумуляторы имеют высокую удельную энергию, большой ресурс и способны работать при низких температурах [Там же]. Благодаря высокой удельной энергии их производство в последние годы резко возросло. Li-ion

аккумуляторы выпускаются в форме цилиндров и призм, как показано на рис. 10. Они активно применяются в сотовых телефонах, фотоаппаратах, ноутбуках и других портативных устройствах.



Рис. 10. Литий-ионные аккумуляторы

Правильным способом заряда литиевых аккумуляторов считается заряд в два этапа. На первом этапе должен обеспечиваться постоянный ток заряда. Величина тока составляет $0,2 - 0,5 C$. Для ускоренного заряда допускается увеличение тока до $0,5 - 1,0 C$ (где C – это емкость аккумулятора). Для обеспечения постоянного зарядного тока заданной величины схема зарядного устройства (ЗУ) должна поднимать напряжение на клеммах аккумулятора. По сути, на первом этапе ЗУ работает как классический стабилизатор тока. Когда напряжение на аккумуляторе поднимется до значения $4,2 В$, аккумулятор наберет приблизительно $70 - 80 \%$ своей емкости. Этот момент является окончанием первого этапа заряда и служит сигналом для перехода ко второму (и последнему) этапу.

Второй этап заряда – это заряд аккумулятора постоянным напряжением, но постепенно снижающимся током. На этом этапе ЗУ поддерживает на аккумуляторе напряжение $4,15 - 4,25 В$ и контролирует значение тока. По мере набора емкости зарядный ток будет снижаться. Как только его значение уменьшится до $0,05 - 0,01 C$, процесс

заряда считается оконченным. Зарядная характеристика Li-ion аккумуляторов приведена на рис. 11.

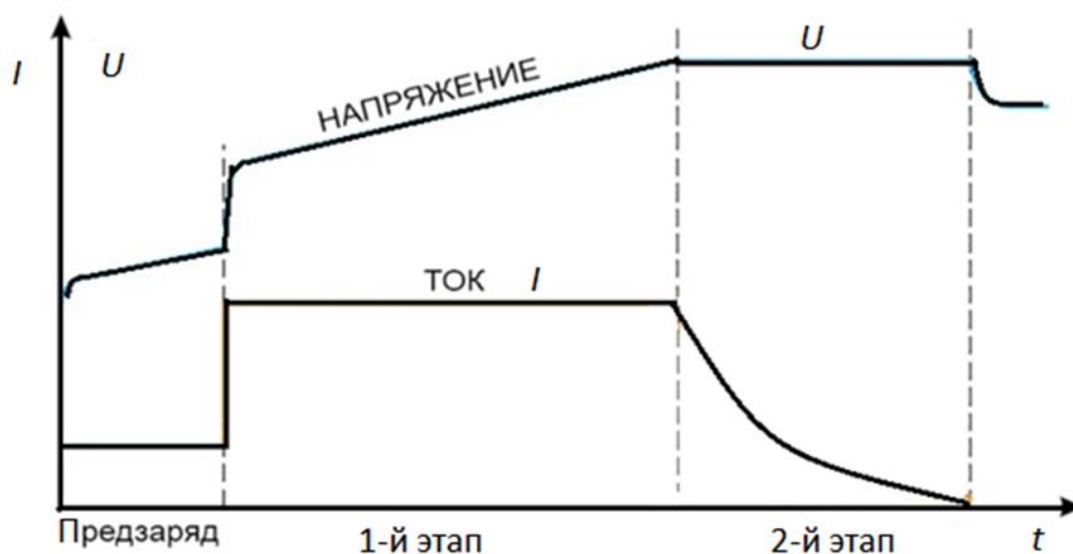


Рис. 11. Зарядная характеристика Li-ion аккумуляторов

1.1.9. Литий-полимерные аккумуляторы

Положительным электродом литий-полимерных аккумуляторов (Li-pol) является углеродистый материал, в который обратимо внедряются ионы лития [1]. Литий, самый легкий из металлов, имеет наибольший электрохимический потенциал и обеспечивает самую большую плотность энергии. Литий-полимерные аккумуляторы это усовершенствованные литий-ионные. Электролитом служит раствор соли лития в неводных апротонных растворителях, заключенный в микропористую полимерную матрицу, или полимер [2]. Примеры литий-полимерных аккумуляторов показаны на рис. 12.



Рис. 12. Образцы литий-полимерных аккумуляторов

Литий-ионные аккумуляторы постепенно вытесняются литий-полимерными. Li-ion аккумуляторы стоят дорого и имеют низкий уровень безопасности. Применение полимерных пленочных электролитов решило проблему. Литий-полимерный элемент имеет толщину около 1 мм. Для таких аккумуляторов характерны малые массогабариты, что позволяет использовать их в мобильной технике. Замена жидких электролитов полимерными пленками сделало батарею безопасной.

Область практического применения литий-полимерных аккумуляторов постоянно расширяется. Ими оснащают мобильные телефоны, цифровые фотоаппараты, ноутбуки, а также широко используют в беспилотных летательных аппаратах и других подвижных устройствах.

1.1.10. Перезаряжаемые марганцево-цинковые источники тока

Марганцево-цинковые аккумуляторы, изготовленные по специальной технологии, могут электрически перезаряжаться. Образцы марганцево-цинковых аккумуляторов приведены на рис. 13.



Рис. 13. Марганцево-цинковые батареи

Марганцево-цинковые батареи характеризуются высокой удельной энергией, малым саморазрядом и имеют невысокую стоимость, выпускаются в герметичном исполнении. Как недостаток можно отметить малый ресурс (до 25 – 50 циклов). Возможность перезаряда марганцево-цинкового источника тока отдельно оговаривается производителем [1].

1.2. Термогенераторы

Термоэлектрический генератор (или термогенератор) – это устройство, способное на прямое преобразование тепла (тепловой энергии) в электроэнергию. Термогенераторы содержат в своей конструкции термоэлементы – различные соединения материалов, которые образуют термопары. Общий принцип действия термоэлектрического генератора основан на использовании эффекта термоЭДС Зеебека.

Суть эффекта термоЭДС Зеебека заключается в трансформации тепловой энергии в электрическую из-за разности температур на различных участках устройства. При одинаковой температуре на поверхностях разных металлов преобладают либо свободные электроны, либо ионы. В результате возникает термоЭДС на клеммах термогенератора. Для получения значительной энергии термопары объединяют в последовательно-параллельные конструкции и нагревают.

Величина термоЭДС определяется выражением

$$E = \alpha(t_1 - t_2),$$

где $(t_1 - t_2)$ – разность температур холодного и горячего концов термопары; α – коэффициент термоЭДС, зависящий от материала термопар.

Термогенераторы имеют малый коэффициент полезного действия (КПД), не превышающий единиц процентов. Поэтому для производства электрической энергии в больших количествах их применение невыгодно. Их используют как автономные зарядные устройства, например для мобильных телефонов. На рис. 14 приведена зависимость термоЭДС некоторых термопар от температуры (1 – платина – медь, 2 – платина – железо, 3 – медь – железо), а на рис. 15 показаны примеры объединения термопар в батарею.

Величины термоЭДС малы. Для их увеличения необходимо создать большую разность температур, что для металлов сложно из-за их высокой теплопроводности. Поэтому чаще используют полупроводники с ЭДС около $1\text{ мВ}/^\circ\text{С}$. Современные термогенераторы выпуска-

каются на напряжение до 150 В и ток до 500 А при общем КПД порядка 10 – 12 % [2].

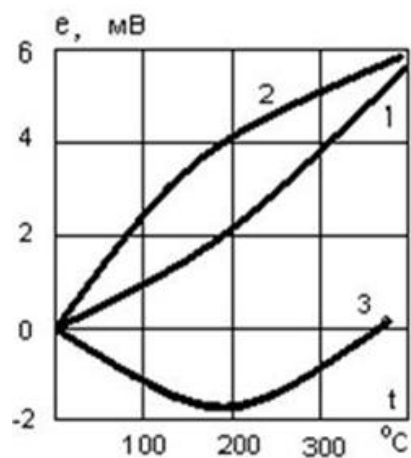


Рис. 14. ЭДС термопары



Рис. 15. Примеры термобатарей

1.3. Топливные элементы

Топливные элементы вырабатывают электрическую энергию без реакции горения. Действие топливных элементов основано на электрохимическом окислении углеводородов в среде окислителя. Для окисления используют водород, пропан, метан или керосин. Топливные элементы получают электричество путем бесшумной электрохимической реакции без горения. Другой особенностью топливных элементов является то, что они преобразуют химическую энергию топлива в электричество, тепло и воду.

К топливным элементам непрерывно подводится топливо и окислитель. В качестве окислителя используют воздух. Топливные элементы для производства электрической энергии используют топливо, подаваемое от внешнего источника. Этим они отличаются от привычных аккумуляторных батарей и не являются аккумуляторами, так как не копят электрическую энергию, не разряжаются и не требуют электричества для повторной зарядки. Топливные элементы могут постоянно вырабатывать электроэнергию, пока имеют запас топлива и воздуха.

Первый водородный топливный элемент был предложен Уильямом Р. Гроувом, который осадил медь из водного раствора сульфата меди на железную поверхность. В качестве электролита он использо-

вал серную кислоту. Под действием электрического тока вода распадается на водород и кислород, но этот процесс обратим и при соединении водорода с кислородом возникает электрический ток [1]. После этого открытия Гроув и работавший параллельно с ним Кристиан Шенбейн, химик из университета Базеля (Швейцария), в 1839 году одновременно продемонстрировали возможность производства энергии в водородно-кислородном топливном элементе. Это эффективный и экологически чистый источник получения электрической энергии [2].

Электролит проводит протоны. При поступлении водорода на анод, а кислорода на катод возникает химическая реакция, в результате которой генерируются электричество, тепло и вода. На аноде водород диссоциирует и теряет электроны. Ионы водорода (протоны) проходят через электролит к катоду, а электроны проходят электролит и создают постоянный ток в нагрузке [Там же].

Известный пример использования щелочных топливных элементов – это их применение в качестве главного источника энергии во время космических полетов по программе «Аполлон». Выбор на топливные элементы пал из-за их долговечности и технической устойчивости.

Поскольку при электрохимическом окислении углеводородного топлива результатом являются электроэнергия, вода и тепло, то в настоящее время топливные элементы стали использовать в качестве стационарных электростанций и автономных источников тепло- и энергоснабжения.

1.4. Солнечные батареи

Солнечная батарея – это объединение фотоэлементов, прямо преобразующих солнечную энергию в постоянный электрический ток. Эффект преобразования света в электричество был открыт в 1842 году А. Э. Баккерелем. Позднее Чарльз Фриттс стал использовать селен для превращения света в электричество, а первые прототипы солнечных батарей были созданы итальянским фотографом и химиком Д. Л. Чамичаном. Во вторую мировую войну пассивные солнечные системы отопления (которые превращают солнечную энергию

в тепло) были использованы в домах США, а в марте 1948 года специалисты компании Bell Laboratories заявили о создании первых солнечных батарей на основе кремния для получения электрического тока. Эта технология стала интенсивно развиваться и получила широкое внедрение, например, спутники на солнечных батареях начали использовать в 1958 году, в этих целях постоянно используют солнечные батареи.

При действии света на полупроводник электроны переходят на более высокий энергетический уровень, поддерживая ток во внешней цепи [3]. Максимальная чувствительность кремниевого (Si) фотоэлемента находится на границе инфракрасного излучения. Селеновые фотоэлементы охватывают видимую часть спектра (0,4 мкм – фиолетовый цвет, 0,55 мкм – зеленый, 0,65 мкм – красный), что не всегда удобно. Поэтому используют кремний, который дешев и широко распространен на земле. На рис. 16 показаны примеры использования солнечных батарей в промышленности и быту.

Теоретический КПД солнечных батарей невелик и равен 22,5 %, у арсенид-галиевых фотоэлементов теоретический КПД равен 33,3 % [4]. Увеличить КПД предложил тринадцатилетний американский школьник Aidan Dwyer. Гуляя в парке, он обнаружил, что ветви деревьев растут не хаотично, а их длина подчиняется последовательности Фибоначчи 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, ... (каждое последующее число равно сумме двух предыдущих).



Рис. 16. Применение солнечных батарей

Используя это, он построил стойку, напоминающую дерево, на котором вместо листьев и веток закрепил небольшие солнечные батареи. Сравнив результат с плоскими солнечными панелями, он обнаружил, что получил КПД в два раза больше, т. е. получил пятидесятипроцентное увеличение эффективности.

Благодаря специальной конструкции панели он придумал, как использовать последовательность Фибоначчи для увеличения эффективности солнечных батарей. В результате получил от солнца на 50 % больше энергии, чем дают стандартные плоские панели солнечных батарей.

Солнечные батареи дают бесплатную энергию, не влияя плохо на экологию. С ними, правда, не все просто. Периодически их нужно мыть от атмосферной пыли, даже небольшое затенение отключает всю батарею. Ночью они не работают, поэтому требуется аккумулятор энергии, который они наполняют днем на солнце. В средних широтах дают около 300 Вт/м² летом, а зимой примерно 80 Вт/м². Поэтому требуется их большая площадь и соответственно большое количество панелей [4].

В среднем частному жилому дому требуется не менее 7,5 кВт энергии в день. Солнечная панель вырабатывает до 0,18 кВт в день. Для обеспечения 7,5 кВт нужно около 42 панелей, не имеющих затенения и под нужным углом направленных к солнцу. Одна типовая панель имеет размеры 142 × 64 см, так что 42 панели будут занимать примерно 38 м², и пока они дороги [3].

Солнечные батареи в настоящее время активно используются в тропических и субтропических районах мира с большим количеством солнечных дней. Они востребованы в европейских странах, например, строящиеся дома в Испании оборудуют солнечными водонагревателями, чтобы обеспечивать потребности в горячей воде. Даже нежилые здания должны иметь фотоэлектрическое оборудование, преобразующее солнечный свет в тепло или электричество.

Недостатки солнечной электроэнергетики [Там же]:

- солнечные батареи не работают ночью, а в вечерние сумерки и пасмурные дни их эффективность мала;
- содержание вредных и ядовитых веществ (кадмий, свинец, галлий, мышьяк) в фотоэлементах;

- необходимость больших площадей для солнечных батарей;
- снижение производительности с ростом температуры;
- низкая окупаемость.

Несмотря на эти недостатки, солнечная энергетика непрерывно развивается. Солнечные батареи – один из способов получения электрической энергии на космических аппаратах. Их достоинство в том, что они работают долгое время без расхода материалов и признаны экологически безопасными в отличие от ядерных и радиоизотопных источников энергии [4]. Ширится их применение и на Земле, например, во Франции солнечные батареи стали встраивать в дорожное полотно и используют их для работы светофоров, а накопленную энергию – для освещения в ночное время проезжей части дорог в деревнях.

1.5. Радиоизотопные источники энергии

Радиоизотопные источники энергии используют энергию радиоактивного распада для нагрева теплоносителя или напрямую преобразующие ее в электрическую. В радиоизотопном источнике энергии используется не управляемая ядерная реакция, а энергия естественного распада радиоактивных изотопов [3]. Такой источник принципиально отличается от атомного реактора. На рис. 17 приведены примеры таких атомных элементов питания.

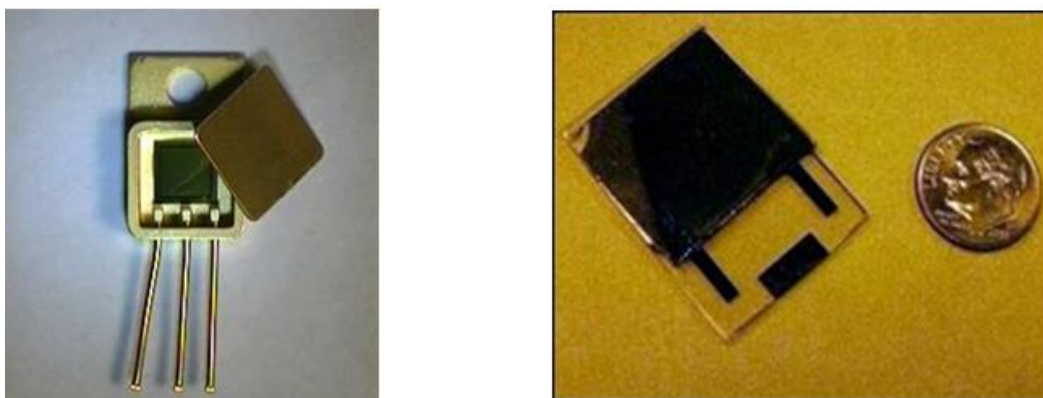


Рис. 17. Миниатюрные атомные элементы питания

Принцип построения атомных батарей не сложен. Один из электродов – это радиоактивный изотоп, а второй электрод – металлическая оболочка. Под действием радиационного излучения на электро-

дах создается разность потенциалов в несколько киловольт при токе в единицы миллиампер. Атомные элементы служат несколько лет. В настоящее время созданы низковольтные атомные батареи, работающие по принципу фотоэлементов, и их излучение не превышает уровня общего фона [4].

Исторически первый радиоизотопный источник электрической энергии (Beta Cell) был создан и представлен британским физиком Г. Мозли в 1913 году. Он представлял собой стеклянную сферу, посеребренную изнутри, в центре которой на изолированном электроде располагался радиевый источник ионизирующей радиации. Электроны, излучающиеся при бета-распаде, создавали разность потенциалов между серебряным слоем стеклянной сферы и электродом с радиевой солью [Там же]. Схема радиоактивного деления приведена на рис. 18.

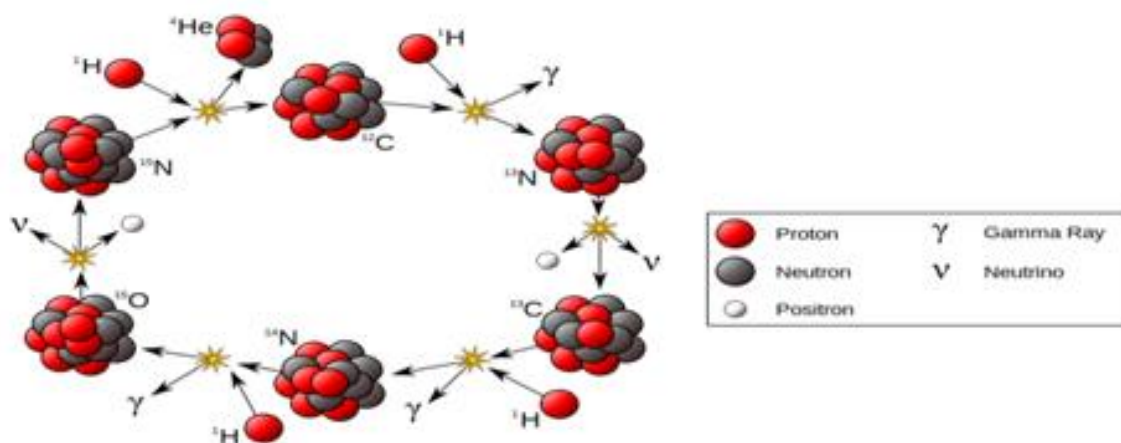


Рис. 18. Радиоактивный распад

Радиоизотопные источники энергии применяются для автономной работы необслуживаемого оборудования. Они имеют высокую надежность, небольшие массу и габаритные размеры. Основные области применения – космические и глубоководные аппараты, маяки на удаленных территориях. Изучение глубокого космоса без радиоизотопных генераторов практически пока невозможно, так как при значительном удалении от Солнца уровень солнечной энергии, который можно использовать, исчезающе мал. Пример радиоизотопного генератора приведен на рис. 19.

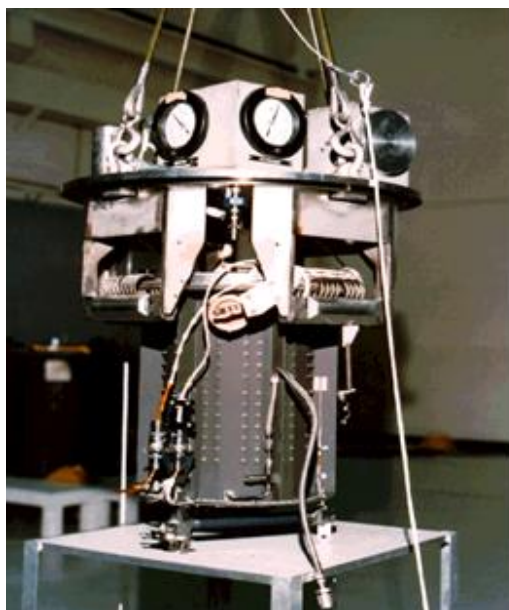


Рис. 19. Радиоизотопные генераторы космического зонда «Вояджер» и космического аппарата «New Horizons»

Радиоизотопные источники питания подразделяются [4]:

- на радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГи), которые используют термоэлементы [5];
- радиоизотопные термоэмиссионные генераторы с термоэмиссионным преобразователем;
- радиоизотопные комбинированные генераторы. В них используются термоэмиссионный преобразователь (1-я ступень) и термоэлементы (2-я ступень преобразования) [6];
- радиоизотопные паротурбинные генераторы, в которых используют парортутные турбины или пароводяные турбины и электрогенератор;
- атомные элементы, представляющие собой альфа- и бета-излучающие изотопы, помещенные в вакуумные капсулы. Они создают очень высокое напряжение при малых токах;
- атомные полупроводниковые элементы, действующие путем облучения полупроводниковых сборок в заданном направлении;
- радиоизотопные пьезоэлектрические источники;
- радиоизотопные оптико-электрические источники [Там же];
- радиоизотопные источники высокопотенциального тепла, т. е. получение нагретых жидкостей (вода, топливо и др.) и газов для отопления, обогрева резервных батарей и др.;
- радиоизотопные подогреватели и ионизаторы воздуха;

– радиоизотопные реактивные двигатели малой мощности для маневрирования спутников [4].

В радиоизотопных реактивных двигателях используются высококонцентрированные и тугоплавкие соединения радиоизотопов с максимальным выделением энергии для нагрева рабочих тел (водород, гелий). В таком двигателе энергия распада радионуклида используется для нагрева рабочего тела, либо продукты распада сами создают реактивную струю. Тяга радиоизотопных ракетных двигателей мала, но они нашли широкое применение в космосе [Там же].

Схема радиоизотопного ракетного двигателя приведена на рис. 20.

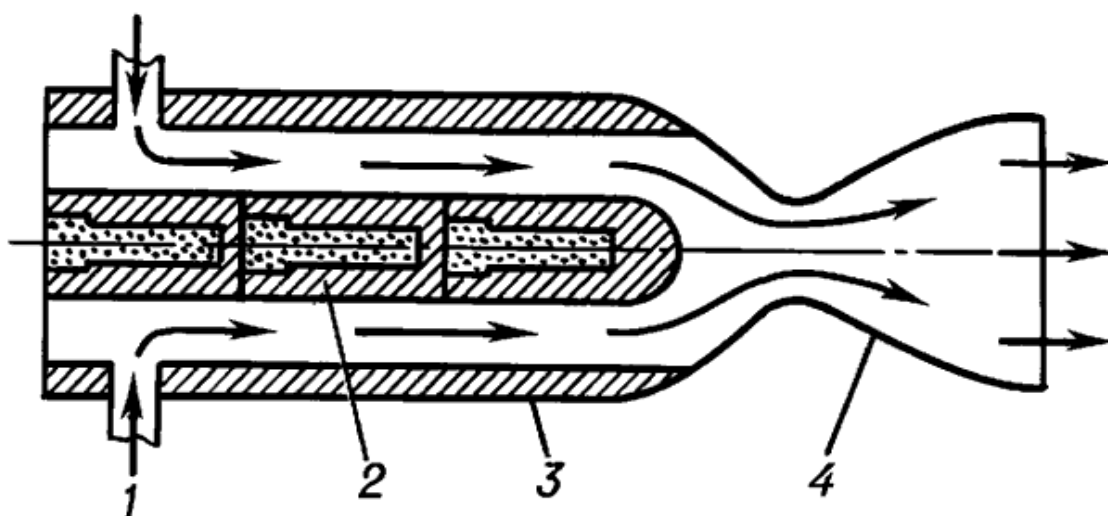


Рис. 20. Радиоизотопный ракетный двигатель: 1 – ввод газа; 2 – радиоактивный изотоп; 3 – защитный кожух; 4 – сопло

Топливом радиоизотопных источников электроэнергии являются короткоживущие радиоактивные изотопы различных химических элементов. Следует выделить основные требования к изотопам и изготовленным из них соединениям и сплавам: большой период полураспада, безопасность в обращении и эксплуатации, большое удельное энерговыделение, а для изотопов, способных к делению, и возможно большая критическая масса [6].

При выборе изотопа стараются выбрать такой, у которого образуется дочерний изотоп, способный к значительному тепловыделению. В этом случае цепь ядерного преобразования при распаде удлиняется и возрастает общая энергия, которую можно использовать. Наилучшим примером изотопа с длинной цепью распада и большим энерговыделением (на порядок большим, чем у других изотопов),

можно назвать уран-232, показанный на рис. 21. Процесс его получения дорог и опасен [6].



Рис. 21. Уран – тяжелый серебристо-белый металл

плутоний-238, кюрий-242, кюрий-244, кюрий-245 и другие изотопы трансурановых элементов, например калифорнии-248, 249, 250, эйнштейний-254, фермий-257, а также

ряд более легких изотопов, например, полоний-208, полоний-209, актиний-227 [Там же].

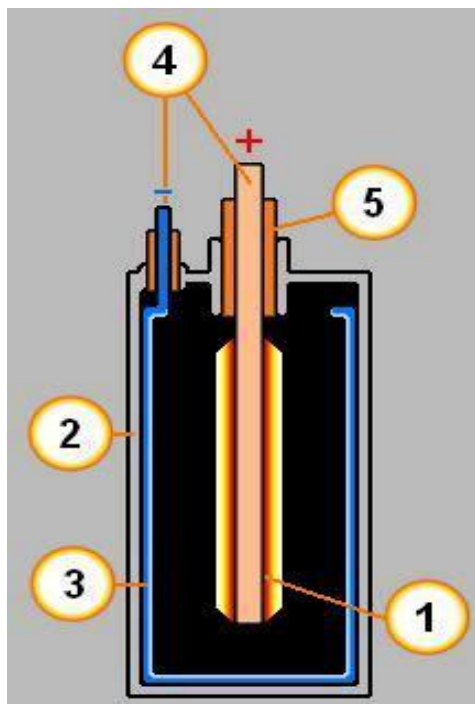


Рис. 22. Изотопный источник питания: 1 – изотоп; 2 – защитный корпус; 3 – отрицательный электрод; 4 – электроды; 5 – высоковольтный изолятор

На советских космических аппаратах «Космос-84», «Космос-90» (1965 г.) использовались радиоизотопные генераторы «Орион-1» и «11К» на основе полония-210. Тот же изотоп (в составе полонида иттрия) был основой радиоизотопных источников тепла ВЗ-Р70-4 с начальной тепловой мощностью 150 – 170 Вт на аппаратах «Луноход-1» (1970 г.) и «Луноход-2» (1973 г.). Схема изотопного источника питания приведена на рис. 22.

Российские радиоизотопные генераторы БЕТА-1, БЕТА-2, БЕТА-3, БЕТА-М, БЕТА-С, МИГ-67, РИТ-90, Эфир-МА, РИТЭГ-ИЭУ-1, РИТЭГ-ИЭУ-1М, РИТЭГ-ИЭУ-2, РИТЭГ-ИЭУ-2М, «Гонг», «Горн», «Сеностав-1870», РИТЭГ-238/0,2 и многие другие выпускались в основном для питания маяков [5; 6].

При использовании альфа-излучающих рабочих изотопов с большим удельным энерговыделением разбавляют рабочий изотоп для уменьшения тепловыделения. В качестве разбавителей используются различные металлы.

При создании полониевых излучательных элементов учитывают то обстоятельство, что полоний летуч и требуется создание прочного химического соединения с каким-либо элементом. В качестве таких элементов предпочтительны свинец и иттрий, так как они образуют тугоплавкие и прочные полониды. Золото также образует весьма технологичный полонид. Эффективное использование обедненного урана для защиты от гамма-излучения в 1,9 раза больше, чем при использовании свинца [6].

Радиоизотопы, получаемые промышленностью, достаточно дороги. Некоторые из них производятся в очень малых количествах ввиду трудностей получения, отделения и накопления. В первую очередь это относится к наиболее важным изотопам: плутонию-238, кюрию-242 и урану-232 как наиболее перспективным, технологичным и отвечающим основному комплексу задач, возлагаемых на радиоизотопные источники энергии. В этой связи в странах с развитой атомной энергетикой существуют программы накопления и выделения плутония и калифорния.

Основными недостатками радиоизотопов следует назвать их опасность для живых организмов и то, что их энерговыделение невозможно регулировать. Можно только отсекал поток тепла от преобразователей.

Опасные факторы, сопутствующие применению радиоизотопных источников энергии [5]:

- проникающее гамма-излучение, нейтроны;
- образование радиоактивных аэрозолей при нарушении герметичности капсул с изотопами;
- повышение давления гелия в капсулах с альфа-активными изотопами (~200 кг/см² и выше);
- разрывы трубопроводов с активным теплоносителем (натрий, калий и др.), ведущие к пожарам и взрывам;
- выброс паров ртути в паротурбинных турбогенераторных установках при аварии.

Использование радиоизотопных источников питания создает опасность при возникновении аварий [5; 6], например:

– 17 апреля 1970 года при возвращении на Землю аварийной пилотируемой миссии «Аполлон-13» лунная посадочная ступень, отстреленная вместе с плутониевым энергоисточником, содержащим 44 500 Ки плутония-238, вошла в атмосферу над южной частью Тихого океана и, приводнившись к югу от островов Фиджи, по счастью, затонула на глубине 6 тыс. м.

– 17 ноября 1996 года российская АМС «Марс-96» сошла с орбиты и рухнула в Тихий океан у западного побережья Чили. На «Марсе-96» находились четыре плутониевых термоэлектрических генератора и 270 граммов Pu-238.

– 12 и 13 ноября 2003 года гидрографическая служба Северного флота при проведении планового осмотра в районе г. Полярный обнаружила два полностью разобранных радиоизотопных генератора типа БЕТА-М, обеспечивавших электропитание навигационных маяков [5]. В них были использованы радиоизотопные источники тепла. Капсулы со стронцием-90 были найдены в воде у берега в губе Оленьей Кольского залива и на суше у берега в северной части острова Южный Горячинский в Кольском заливе. Выброшенная штормом на берег капсула генератора маяка показана на рис. 23 [Там же].



Рис. 23. Разбитый штормом радиоизотопный генератор БЕТА-М для морских маяков

1.6. Электрические машины

История электрических машин началась в 1821 году с открытия Фарадеем способа преобразования электрической энергии в механическую, а первый электрический генератор был создан братьями Пикси 11 лет спустя. Если двигатель Фарадея преобразовывал электрическую энергию в механическую, то электрические генераторы преобразуют механическую энергию движения (поступательного или вращательного) в электрическую и наоборот. В настоящее время электрические машины широко востребованы и выпускаются на большой диапазон токов и напряжений. Массовый пример их практического применения – это генераторы в автомобилях, используемые для подзарядки аккумулятора, освещения, питания радиоприемника, навигатора, компьютера и другого дополнительного автомобильного оборудования.

Электродвигатели и генераторы делятся на электрические машины постоянного и переменного тока. При одинаковой мощности электрические машины переменного тока имеют в 1,5 – 2 раза лучшие массо-объемные показатели. Поэтому 98 % электроэнергии в мире вырабатывается электрическими машинами переменного тока [7].

Недостатки электрических машин заключаются в наличии изнашиваемых подвижных частей, что определяет необходимость плановых ремонтов и снижает надежность системы электроснабжения, и в присутствии акустических шумов. Однако инерционность электрических машин делает невозможными кратковременные провалы напряжения сети, что положительно сказывается на качестве электроснабжения. Внешний вид электрической машины дан на рис. 24.



Рис. 24. Мощный электрогенератор

В зависимости от того, чем вращают электрогенератор, различают:

1. **Гидрогенераторы** от водяной турбины. Это генераторы большой мощности при скорости вращения до 1500 об/мин. Гидроэлектростанции (ГЭС) оснащаются электрическими машинами, вращаемыми потоком воды [8]. При этом для увеличения мощности и напора водного потока используют естественные или искусственные перепады высоты используемого водного потока. Требуемый напор воды обеспечивается комплексом гидротехнических сооружений, создающих необходимый запас воды. Вода под напором поступает на лопасти гидротурбины, которая крутит генераторы, как показано на рис. 25.

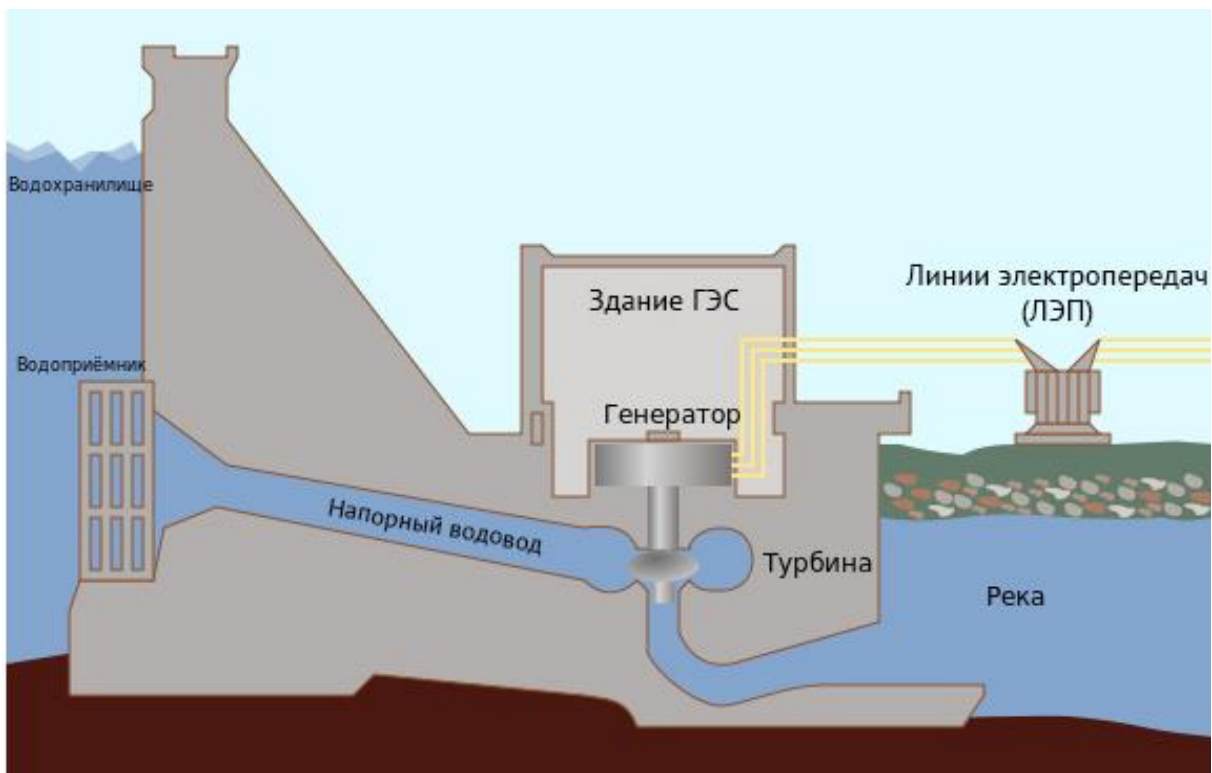


Рис. 25. Принцип работы ГЭС [8]

ГЭС возводят в основном на реках, используя либо естественные уклоны русла на горных реках, либо строя плотины и организуя таким образом требуемый напор воды. Известны и приливные ГЭС, использующие энергию морских приливов.

Поскольку расходуются возобновляемые ресурсы и гидроэлектростанции не требуют дополнительного топлива, то и стоимость электроэнергии существенно ниже, чем при других источниках электроэнергии.

2. **Турбогенераторы**, работающие от паровой турбины тепловой электростанции с числом оборотов в минуту до 3000 и более.

3. **Дизель-генераторы**. Это устройства, конструктивно объединяющие дизельный двигатель и электрогенератор. Пример дизель-генератора приведен на рис. 26. Принцип действия их прост: дизельный двигатель крутит вал электрической машины, вырабатывающей электроэнергию [7].



Рис. 26. Дизельный генератор электроэнергии

В нашей стране все крупные больницы, узловые станции сотовой связи, приемопередающие радиостанции радиорелейных линий и магистральной радиосвязи оснащаются дизель-генераторным резервным питанием. На кораблях используют дизельные генераторы, а в Заполярье и в удаленных районах страны строят дизельные электростанции, оборудованные обычно несколькими генераторами, имеющими привод от дизельного двигателя. Дизель-генераторы неприхотливы, надежны и широко используются в резервных источниках электропитания [Там же].

4. **Газогенераторы электричества.** Это устройства, применяемые для производства электроэнергии и работающие на сжиженном или магистральном газообразном топливе. Газовые генераторы используются в качестве резервных или постоянных источников электроснабжения. Их разделяют на газотурбинные и газопоршневые и широко используют в качестве источников бытового автономного электроснабжения.

5. **Биогенераторы.** Это генераторы, приводимые в действие мускульной силой человека. Примером могут быть велосипедные генераторы, используемые для освещения дороги [8]. На первых полярных станциях «Северный Полюс» зарядка батарей для радиостанции проводилась велотренажером, соединенным с автомобильным генератором постоянного тока. Одна лошадиная сила составляет примерно 730 Вт электрической мощности, поэтому человек может вырабатывать около 50 Вт в течение 10 – 15 мин (что соответствует езде на велосипеде при подъеме в гору). Затем человеку нужен отдых. Такое производство электрической энергии – очень трудная задача [4].

6. **Ветрогенераторы** показаны на рис. 27. Ветер – неиссякаемый источник энергии. Ветрогенераторы выпускаются промышленностью мощностью от 200 Вт до 1000 кВт и работают при скорости ветра от 5 до 15 м/с [3].



Рис. 27. Ровенский ветряк мощностью 10 кВт и целая группа ветряков

К недостаткам ветрогенераторов можно отнести их негативное влияние на флору и фауну, экологию из-за сильных акустических шумов, а также их жесткую зависимость от погодных условий, когда отсутствие ветра может наблюдаться не только часами, но и сутками. Поэтому ветрогенераторы работают на аккумуляторы, которые обеспечивают электроснабжение и при отсутствии ветра [4].

Ветрогенераторы из-за ограничения их веса делают на мощности от единиц до тысячи киловатт. Чтобы коэффициент полезного действия ветряков был выше, требуется увеличивать размеры лопастей и поднимать пропеллеры на высоту, где скорость ветра больше чем у земли. Для получения мощности промышленного уровня приходится применять целые поля ветрогенераторов, объединяя их возможности. В нашей стране по этим причинам широкого применения они пока не нашли, хотя и считаются перспективными из-за бесплатного и неиссякаемого источника первичной энергии.

При скорости ветра больше расчетной ветряк постепенно поворачивается к ветру боком и производство электроэнергии снижается. Для избавления от этого недостатка стали активно применять ветрогенераторы с автоматически изменяющимся углом лопастей относительно направления ветра. Такие генераторы могут работать при скоростях ветра вплоть до штормовых. При усилении ветра лопасти поворачиваются более горизонтально к воздушному потоку, что поддерживает постоянство выработки электроэнергии. На рис. 28 показана зависимость выходной мощности от скорости ветра у таких ветрогенераторов.

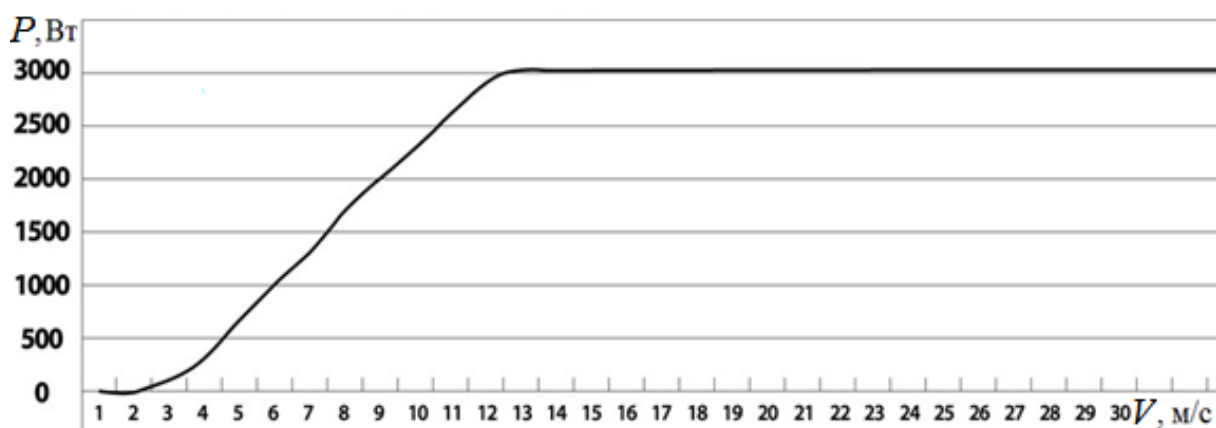


Рис. 28. Зависимость мощности двухкиловаттного ветрогенератора с изменением угла атаки лопастей от скорости ветра [6]

Контрольные вопросы

1. Какую работу выполняют первичные источники электропитания?
2. В чем основная функция вторичных источников электропитания?
3. Чем отличаются вторичные источники электропитания от первичных?
4. Какие по типу источники электропитания применяют в мобильной аппаратуре?
5. Какой источник электропитания в автотранспорте?
6. Как подразделяются химические источники электропитания?
7. Раствор какой кислоты является электролитом в автомобильном аккумуляторе?
8. Являются ли реакции в свинцово-кислотном аккумуляторе обратимыми?
9. Что такое емкость аккумулятора?
10. В каких единицах измеряется емкость аккумулятора?
11. Герметичные и негерметичные аккумуляторы. В чем их особенности?
12. Какова роль сепаратора в аккумуляторе?
13. Какие известны методы зарядки аккумуляторов?
14. Никель-кадмиевый аккумулятор кислотный или щелочной?
15. В чем достоинства никель-кадмиевых аккумуляторов?
16. В чем недостатки никель-кадмиевых аккумуляторов?
17. Где в основном используют никель-железные аккумуляторы?
18. Почему никель-железные аккумуляторы выпускают только в негерметичном исполнении?
19. В чем достоинства и недостатки никель-железных аккумуляторов?
20. Можно ли производить никель-металлогидридные аккумуляторы в герметичном исполнении?
21. Выше или ниже удельная емкость и энергия никель-металлогидридных аккумуляторов по сравнению с никель-кадмиевыми?
22. В чем достоинства Ni-MH аккумуляторов?
23. В чем недостатки Ni-MH аккумуляторов?

24. Никель-цинковые аккумуляторы кислотные или щелочные?
25. В чем достоинства Ni-Zn источников питания?
26. В чем недостатки Ni-Zn аккумуляторов?
27. В чем достоинства и недостатки серебряно-цинковых и серебряно-кадмиевых аккумуляторов?
28. Где используются никель-водородные аккумуляторы?
29. В чем основные достоинства никель-водородных аккумуляторов?
30. Что используют в качестве электродов в литий-ионных аккумуляторах?
31. Как осуществляют заряд Li-ion аккумуляторов?
32. В чем основное отличие литий-полимерных аккумуляторов от литий-ионных?
33. Какой из аккумуляторов безопаснее: Li-ion или Li-pol?
34. Какой из аккумуляторов компактнее: Li-ion или Li-pol?
35. В чем недостаток марганцево-цинковых источников тока?
36. Какой саморазряд у марганцево-цинковых аккумуляторов большой или малый?
37. Что такое термоэффект Зеебека?
38. Что такое термопара?
39. Какой КПД термогенераторов?
40. Являются ли щелочные топливные элементы аккумуляторами энергии?
41. Как работает топливный элемент?
42. КПД солнечных батарей больше или меньше 20 %?
43. В чем недостатки солнечной электроэнергетики?
44. В чем отличие радиоизотопного источника энергии от ядерной реакции?
45. Как много разновидностей имеют радиоизотопные источники питания?
46. В чем достоинства генераторов электрических машин?
47. В чем недостатки электрических машин?
48. Могут ли выдавать электроэнергию без электрических машин гидрогенераторы, турбогенераторы и дизель-генераторы, газогенераторы, биоэнергетические и ветрогенераторы?
49. Есть ли будущее у биоэнергетических машин?
50. В чем основные недостатки ветрогенераторов?

Глава 2. ВТОРИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

2.1. Основные характеристики вторичных источников электропитания

Вторичные источники электропитания, преобразующие электрическую энергию к виду, удобному для потребителя, представляют собой целый комплекс из нескольких функциональных узлов, выполняющих различные виды преобразования электрической энергии. В состав такого комплекса могут входить следующие устройства:

- **трансформаторы**, преобразующие переменное напряжение (или ток) одного уровня в одно или несколько напряжений (токов) другого уровня;
- **инверторы**, преобразующие постоянное напряжение (или ток) в переменное (ток);
- **выпрямители**, преобразующие напряжение переменного тока в однополярное пульсирующее напряжение (ток);
- **фильтры**, представляющие собой частотнозависимые четырехполюсники из индуктивных L , емкостных C и активных R элементов;
- **стабилизаторы** напряжения или тока, поддерживающие на выходе уровень постоянного или переменного напряжения (тока) в необходимых пределах при изменениях входного напряжения и в действии различных внешних факторов;
- **регуляторы** напряжения (или тока), необходимые для изменения напряжения (тока) в нагрузке по требуемому закону и в заданном диапазоне;
- **устройства защиты** источника электропитания от аварий нагрузки.

Простейший вариант схемы вторичного источника электропитания приведен на рис. 29 [7].

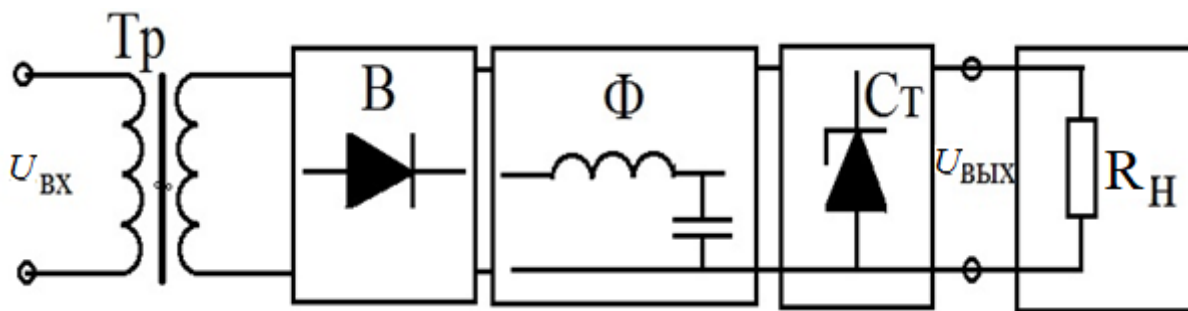


Рис. 29. Пример структуры вторичного источника электропитания:
Tr – трансформатор; *B* – выпрямитель; *Φ* – согласующий фильтр;
Cт – стабилизатор напряжения; *R_н* – сопротивление нагрузки

Если первичная сеть источника электропитания переменного тока, то мощность, потребляемая от сети при гармоническом токе, равна:

$$S = U \cdot I \text{ – полная мощность;}$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ – активная мощность;}$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ – реактивная мощность,}$$

где U , I – действующие значения напряжения и тока; φ – фазовый сдвиг между током и напряжением.

Активная мощность P – это мощность, потребляемая источником питания и нагрузкой, а **реактивная мощность Q** – мощность, характеризующая энергию, запасаемую в реактивных элементах (емкостях и индуктивностях) устройства. Выражения для мощностей графически можно представить треугольником мощностей, в котором **полная мощность**, потребляемая от первичного источника электропитания, является гипотенузой прямоугольного треугольника с катетами из активной и реактивной мощностей $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, как показано на рис. 30.

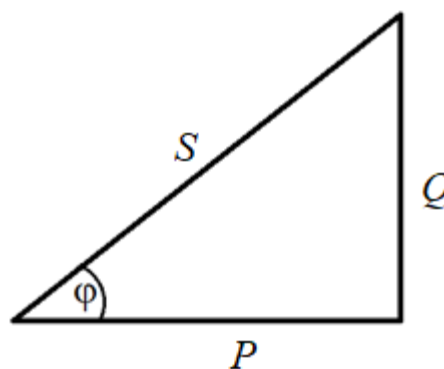


Рис. 30. Треугольник мощностей

При синусоидальной форме тока полная мощность равна потребляемой мощности $S = P$ только при резистивной нагрузке. Но реальные потребители электроэнергии имеют и реактивную составляющую сопротивления нагрузки. Часто нагрузка

имеет нелинейный характер [9], поэтому ввели понятие коэффициента мощности, под которым понимают следующее отношение:

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

где $\nu = \frac{I_1}{I}$ – коэффициент искажения тока; I_1 – действующее значение тока первой гармоники; I – действующее значение всех гармоник несинусоидального тока.

В энергетике принимают специальные меры для повышения коэффициента мощности. В связи с ростом количества потребителей малой мощности Международная электротехническая комиссия в 2001 году приняла новый стандарт IEC-1000-3-2, согласно которому любое устройство, потребляющее от электрической сети мощность более 200 ватт, должно иметь коэффициент мощности, равный единице. А это возможно только при наличии на входе нагрузки сложного устройства – активного корректора коэффициента мощности. Поэтому любая электротехническая продукция, выходящая на междуна-

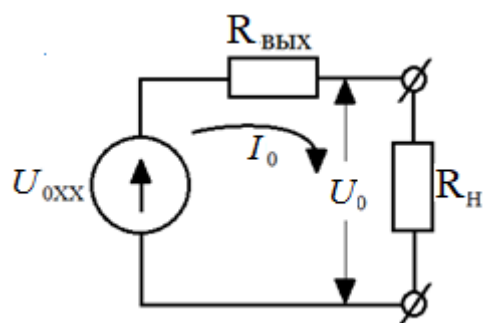


Рис. 31. Эквивалентная схема вторичного источника питания

источников электропитания любое радиоустройство часто представляют устройством с активным **сопротивлением нагрузки**

$$R_{\text{н}} = \frac{U_0}{I_0},$$

где U_0 – постоянная составляющая выходного напряжения; I_0 – ток нагрузки.

По схеме, приведенной на рис. 31, можно определить **напряжение на зажимах источника питания** $U_0 = U_{0\text{xx}} - I_0 R_{\text{вых}}$. Реальная

родный рынок и подключаемая к сети переменного тока, должна иметь активный характер входного сопротивления.

Вторичный источник питания обычно представляется генератором постоянного напряжения $U_{0\text{xx}}$ (холодного хода) с внутренним сопротивлением $R_{\text{вых}}$. Эта схема приведена на рис. 31 [10]. При расчетах вторичных

нагрузка как правило нелинейная, поэтому пользуются и дифференциальным сопротивлением нагрузки [10]:

$$R_{\text{нд}} = \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0}.$$

Чаще всего $R_{\text{н}} \neq R_{\text{нд}}$, поэтому расчеты вторичных источников электропитания справедливы только для номинального режима, что приводит к погрешности в расчетах.

Основной характеристикой любого энергетического устройства является его **коэффициент полезного действия**, который равен отношению полезной мощности к потраченной. Полезная мощность – это активная мощность на выходе $P_{\text{вых}}$, а потраченная – активная мощность на входе ($P_{\text{вх}}$ – мощность, потребляемая от первичной сети):

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}.$$

При преобразовании переменного напряжения в постоянное, т. е. при выпрямлении напряжения, возникают регулярные искажения формы выпрямленного тока, которые назвали пульсациями. В общем случае форма выходного напряжения источника питания содержит постоянную (полезную) составляющую U_0 и переменную составляющую (пульсации), как показано на рис. 32.

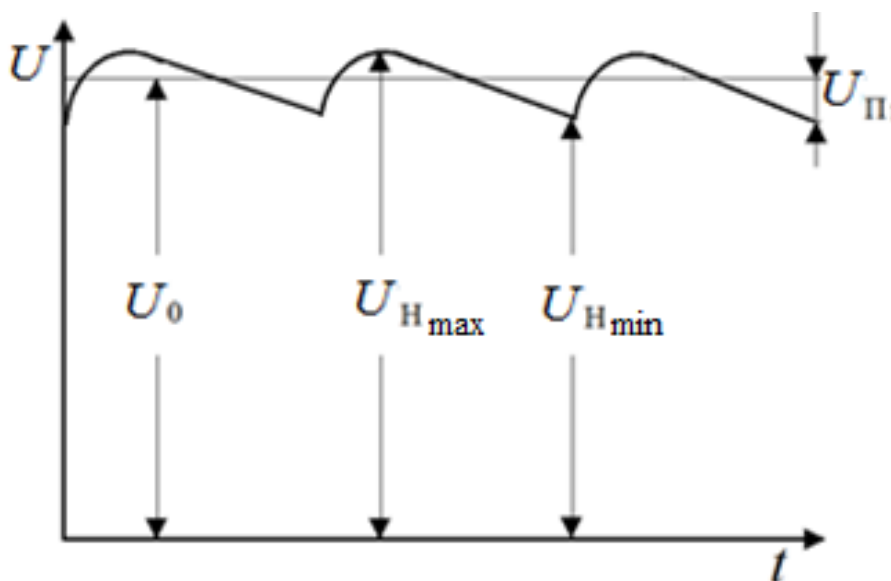


Рис. 32. Выходное напряжение источника питания с пульсациями

Под **коэффициентом пульсаций** понимают отношение амплитуды первой гармоники пульсаций к постоянной составляющей U_0 . Но коэффициент пульсаций можно определить по любой другой гармонике, которая может оказаться больше первой. Постоянная составляющая U_0 – полезный продукт любого выпрямителя, а пульсации с размахом $\Delta U_{\text{н}} = U_{\text{нmax}} - U_{\text{нmin}}$ и с вдвое меньшей амплитудой $U_{\text{н1}} = \Delta U_{\text{н}} / 2$ являются вредной составляющей, мешающей питаемой от источника аппаратуре работать нормально [11].

Представляя выпрямленное напряжение рядом Фурье, т. е. суммой постоянной составляющей U_0 и всех n гармоник, находят **абсолютный коэффициент пульсаций** напряжения

$$k_{\text{п}} = \frac{U_{\text{нmax}} - U_{\text{нmin}}}{U_0}. \quad (1)$$

В современных выпрямителях, использующих импульсные методы преобразования, форма пульсаций может существенно отличаться от синусоидальной формы. Потребителя интересует общий размах пульсаций, или так называемый абсолютный коэффициент пульсаций, который может рассчитываться как выражением (1), так и по другим формулам [12]

$$k_{\text{п}} = \frac{\Delta U_{\text{н}}}{U_0} = 1 - \frac{U_{\text{нmin}}}{U_{\text{нmax}}}. \quad (2)$$

Например, если постоянное напряжение $U_0 = 100$ В, а напряжение пульсаций $U_{\text{п}} = 5,0$ В, то коэффициент пульсаций по амплитуде первой гармоники, абсолютный коэффициент пульсаций по выражению (1) и формуле (2) будут различаться по величине

$$k_{\text{п1}} = \frac{5}{100} = 5 \%; \quad k_{\text{п}} = \frac{10}{100} = 10 \%; \quad k_{\text{п}} = 1 - \frac{99}{100} = 9,5 \%.$$

Из приведенного примера видно, что абсолютный коэффициент пульсаций вдвое больше по величине и объективно отражает пульсации на нагрузке. Но в документах на радиоаппаратуру указываются именно пульсации по первой гармонике. Поэтому к коэффициенту пульсаций надо относиться внимательно, стремясь всеми доступными средствами его минимизировать.

Внешняя характеристика вторичного источника питания – это зависимость напряжения на нагрузке от тока нагрузки $U_0 = \Phi(I_0)$. Чаще всего она имеет характер падающей экспоненты у нестабилизированного источника и практически прямой линии у стабилизированного источника электропитания, как показано на рис. 33.

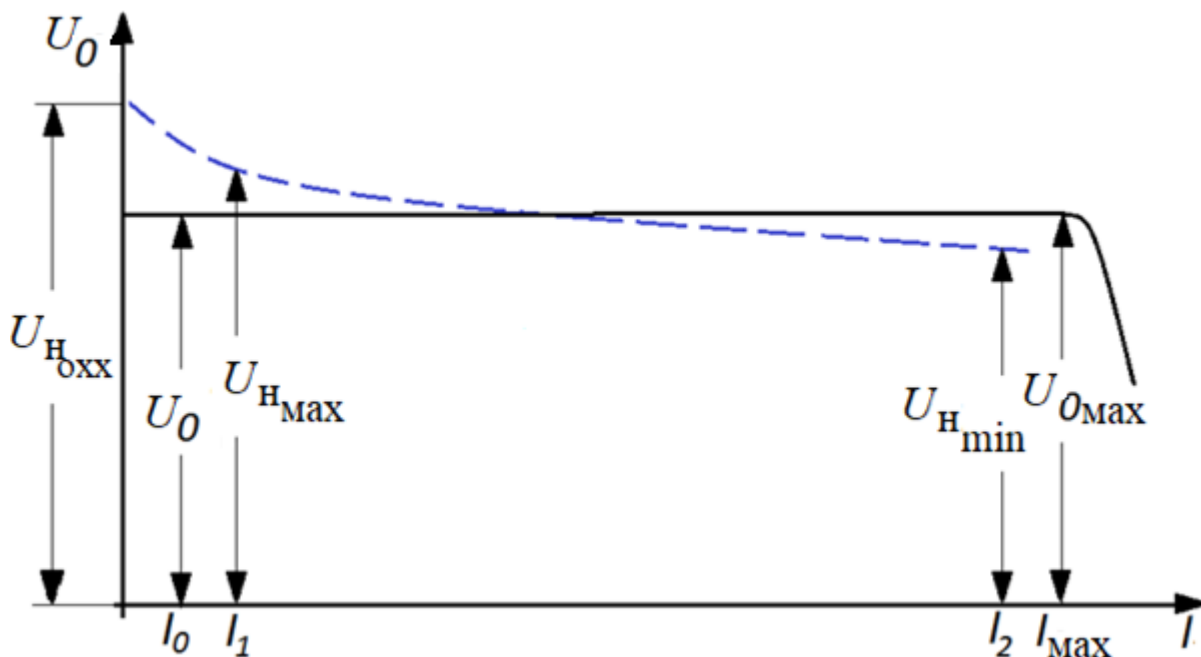


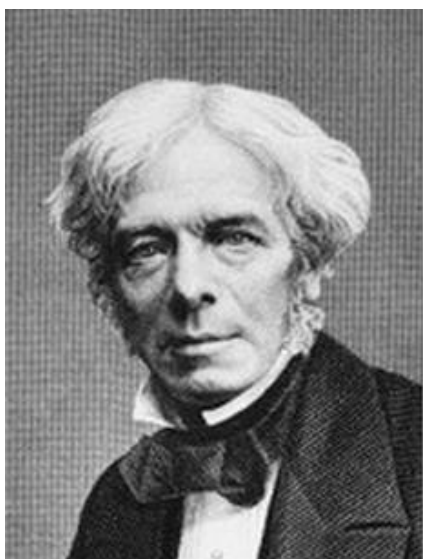
Рис. 33. Внешние характеристики источников электропитания:
 ---- нестабилизированный и — стабилизированный источники электропитания

Выходное сопротивление источников электропитания не должно быть большим по величине, иначе выделяющаяся на нем мощность снизит КПД системы и может привести к перегреву элементов источника. У нестабилизированных источников электропитания выходное сопротивление обычно нелинейное, поэтому его находят при заданном рабочем токе.

Если к нестабилизированному источнику электропитания подключается несколько нагрузок, то изменение тока у какой-либо из них вызывает изменение выходного сопротивления и выходного напряжения. При этом происходит обратная связь по току между нагрузками, поэтому источники питания шунтируют конденсаторами, реактивное сопротивление которых в сотни раз меньше выходного сопротивления источника электропитания [12].

2.2. Трансформаторы

Майкл Фарадей в 1831 году открыл явление электромагнитной индукции, лежащее в основе действия электрического трансформатора. Но эксперименты с постоянным током не привели к созданию трансформатора. В работах Фарадея и Джозефа Генри появились только схематичные изображения трансформатора. В 1841 году немецкий физик и механик Г. Румкорф предложил индукционную катушку, которая стала предтечей трансформатора.



М. Фарадей (1791 – 1867)



Д. Генри (1797 – 1878)



А. Г. Столетов (1839 – 1896)



П. Яблочков (1847 – 1894)

Наш земляк профессор Александр Григорьевич Столетов в 1872 году обнаружил петлю гистерезиса и описал доменную структуру ферромагнетика. А в 1876 году Павел Николаевич Яблочков создал первый в мире трансформатор переменного тока. Это был простой железный стержень с двумя обмотками. Только в 1884 году англичанами братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсон была разработана теория электромагнитных цепей и построены трансформаторы с замкнутыми сердечниками.

Трансформаторы – это устройства для преобразования электроэнергии и изменения величины переменного напряжения. Их работа основана на двух принципах:

- переменный электрический ток создает переменное магнитное поле;
- переменный магнитный поток, проходя через обмотку, создает в ней электродвижущую силу (ЭДС).

Первый принцип назвали электромагнетизмом, а второй – электромагнитной индукцией. Схема работы трансформатора приведена на рис. 34.

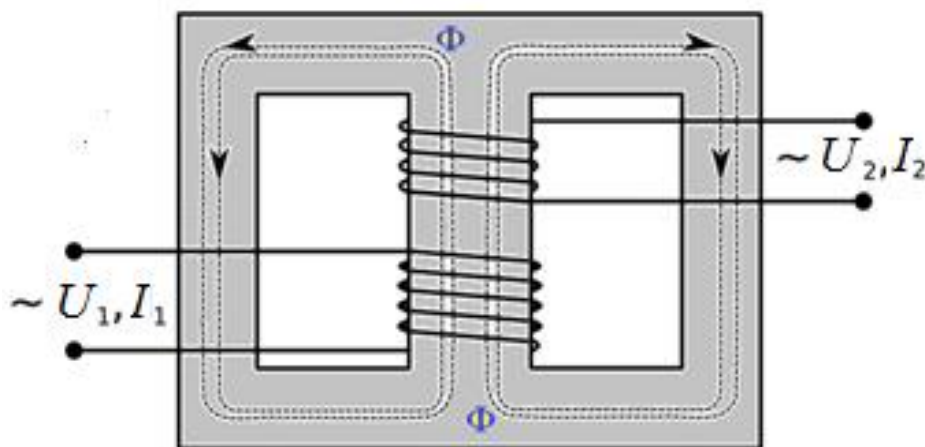


Рис. 34. Схема трансформатора

Трансформаторы предназначены:

- преобразовывать величину тока или напряжения;
- согласовывать сопротивления источника и нагрузки;
- осуществлять гальваническую развязку между электрическими цепями;
- изменять форму напряжения или тока.

Ток, протекающий в первичной обмотке I_1 , создает магнитное поле Φ , которое, в свою очередь, создает ЭДС во вторичной обмотке. Магнитное поле характеризуется индукцией B и напряженностью H , связанными друг с другом через магнитную проницаемость μ .

$$B = \mu\mu_0 H,$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Вещества, у которых μ много больше единицы, называют ферромагнетиками (железо, кобальт, никель и сплавы на их основе), и магнитная составляющая в них возникает из-за движения электронов вокруг ядер атомов (такое движение электронов называли орбитальным моментом) и вращения электронов вокруг своей оси (спиновый момент «spin» – вращение). Внешнее переменное магнитное поле вызывает изменение индукции ферромагнетика в магнитопроводе [13].

Изменение магнитного потока в магнитопроводе происходит по закону замкнутой кривой, названной петлей гистерезиса, как показано на рис. 35.

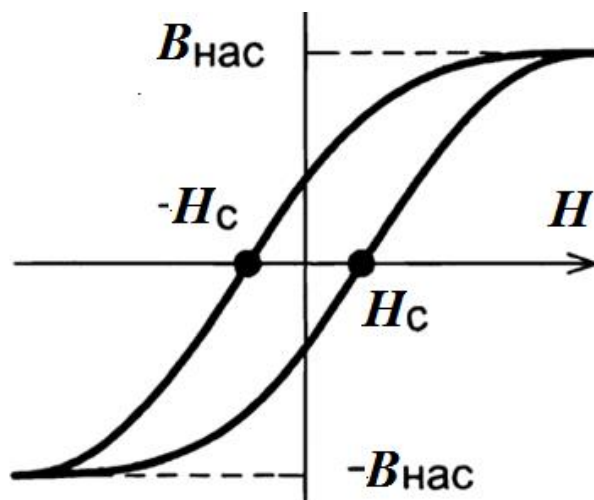


Рис. 35. Предельная петля гистерезиса

С ростом напряженности индукция переходит в режим насыщения. Площадь петли гистерезиса характеризует потери в ферромагнетике при его перемагничивании. Если сердечник трансформатора не входит в насыщение, то перемагничивание происходит по частным петлям гистерезиса, которые расположены внутри предельной петли. Основные свойства магнитопроводов и кривых перемагничивания достаточно полно изложены в работе [9].

Сердечник трансформатора – это магнитопровод, способный переносить магнитный поток. Конструкция сердечников трансформаторов бывает разных видов. Используют броневые или Ш-образные сердечники, у которых магнитный поток разветвляется на две ветви (рис. 36, а, г). Магнитопровод броневых трансформаторов набирают из штампованных пластин (рис. 36, а) или наматывают металлической лентой (рис. 36, г). Часто используют стержневые трансформаторы с П-образным сердечником (рис. 36, б, д). Наилучшей конструкцией являются тороидальные трансформаторы (рис. 36, в, е), однако для намотки обмоток они требуют сложного оборудования.

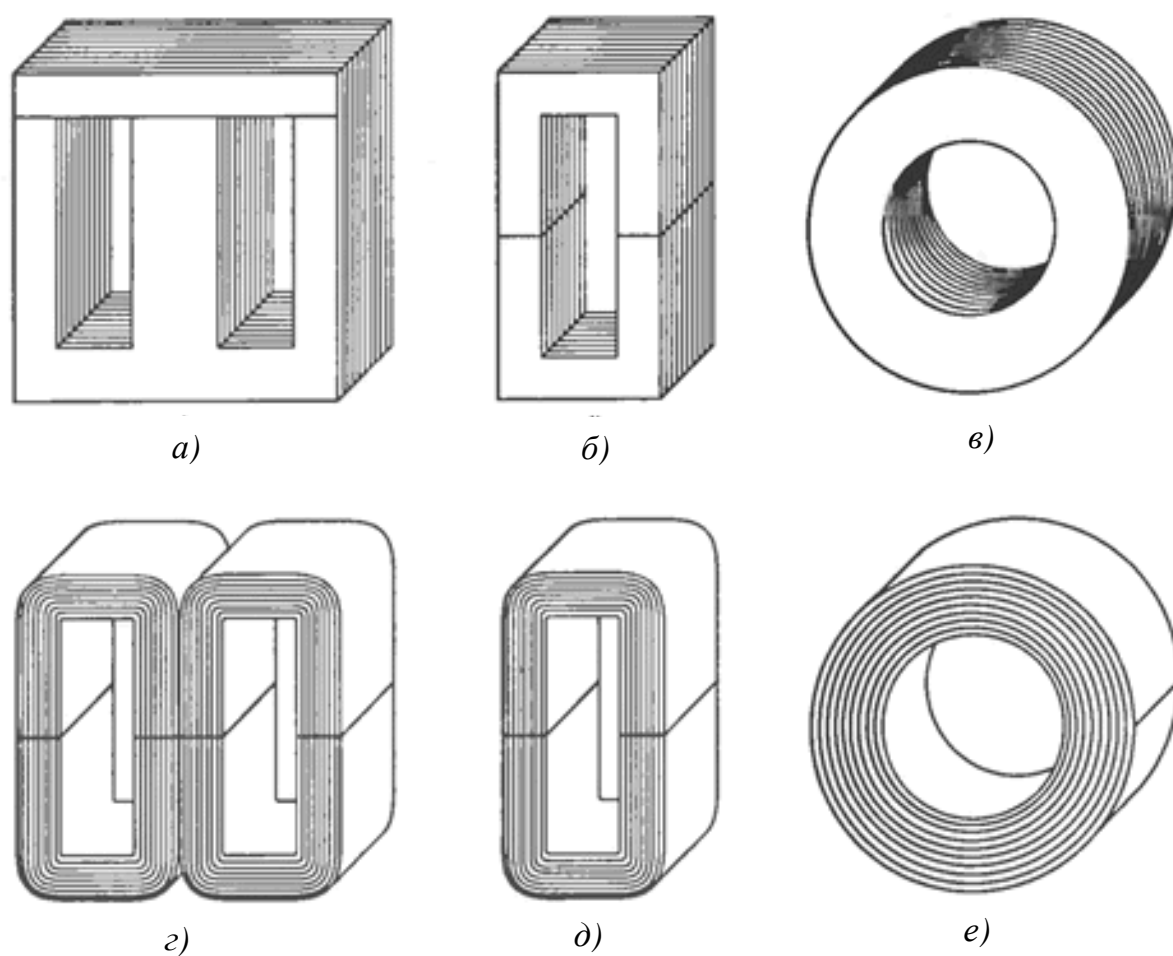


Рис. 36. Конструкции сердечников (магнитопроводов) трансформаторов

Магнитный поток в основном замыкается через магнитопровод сердечника трансформатора и пронизывает витки всех обмоток. В результате во вторичной обмотке индуцируется ЭДС E_2

$$E_2 = 4k_{\text{ф}} f w_2 \Phi_{\text{м}} 10^{-4},$$

где $k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы напряжения; $\Phi_{\text{м}} = B_{\text{м}} S_{\text{с}}$ – амплитудное значение магнитного потока, равное произведению площади поперечного сечения магнитопровода сердечника $S_{\text{с}}$ на магнитную индукцию $B_{\text{м}}$.

ЭДС E_2 создает ток $i_2(t)$ во вторичной обмотке и в нагрузке трансформатора, на которой при этом выделяется напряжение $u_2(t)$. В свою очередь, ток $i_2(t)$ создает встречный магнитный поток $\Phi_2(t)$, и в сердечнике трансформатора устанавливается результирующий магнитный поток $\Phi_0(t) = \Phi_1(t) - \Phi_2(t)$. Часть магнитных силовых линий замыкается через воздух, минуя сердечник. Это определяет магнитные потоки рассеяния, создаваемые токами первичной и вторичной обмоток $\Phi_{S1}(t)$ и $\Phi_{S2}(t)$ соответственно.

Для уменьшения потерь в сердечнике последний делается не сплошным, а из отдельных тонких листов специальной трансформаторной стали, имеющих высокое омическое сопротивление поверхности. Это позволяет уменьшить вихревые замкнутые токи Фуко, возникающие в массивном проводящем сердечнике трансформатора при изменении проходящего через него магнитного потока. Так как омическое сопротивление массивного проводника имеет малую величину, то сила индукционного электрического тока, обусловленного токами Фуко, в мощных трансформаторах может достигать сотен ампер. Для борьбы с токами Фуко сердечники набирают из тонких пластин, разделенных изолирующими прослойками. Для изоляции пластин друг от друга часто их делают из кремнийсодержащих сталей. Толщина пластин составляет обычно от 0,1 до 0,5 мм, чаще всего 0,25 – 0,35 мм, и это позволяет увеличить омическое сопротивление сердечника. Вихревые токи протекают внутри проводника так, чтобы своим действием противиться причине, которая их вызывает, что приводит к потерям энергии, уходящей на нагрев сердечника трансформатора.

При использовании Ш-образного сердечника все обмотки трансформатора размещаются на одном каркасе из диэлектрика, надеваемом на средний стержень сердечника. При П-образном сердечнике обмотки располагаются на одном или двух каркасах, надеваемых соответственно на один или оба стержня сердечника. Для минимизации

потерь и повышении коэффициента полезного действия трансформатора каждую обмотку размещают равномерно на обоих стержнях сердечника. При использовании тороидальных сердечников каждая обмотка должна наматываться равномерно по всему периметру тора. При намотке обмоток не по всему периметру тора заметно снижается КПД трансформатора [12].

На электрических схемах трансформаторы обозначаются обычно так, как показано на рис. 37.

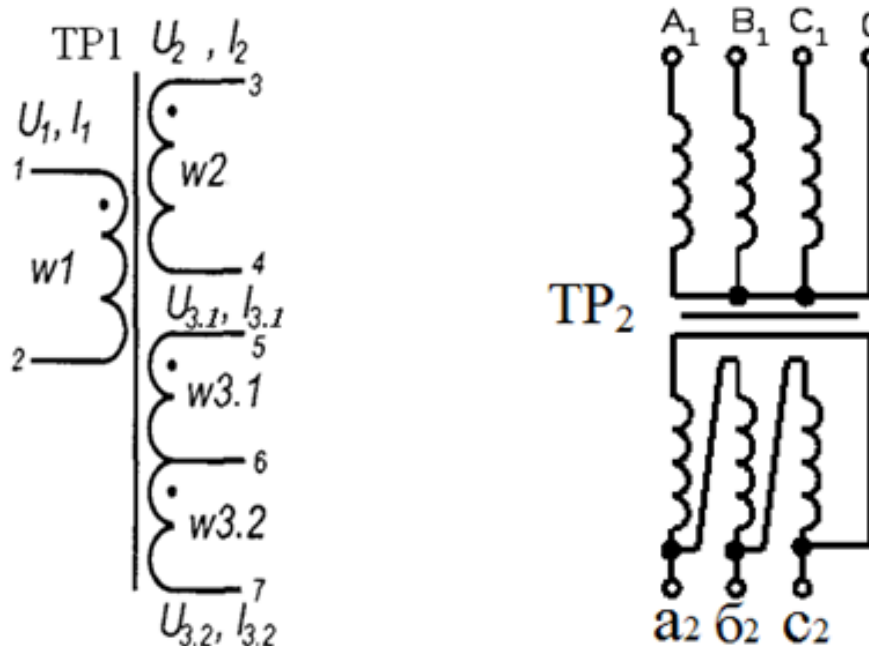


Рис. 37. Типовые обозначения трансформаторов

Материал магнитопроводов делят на три группы: порошковый, или диэлектрический, полупроводниковый и проводящий электрический ток. Порошковые сердечники представляют собой спрессованные в эпоксидной смоле ферромагнитные порошки так, что каждая частица ферромагнетика окутана диэлектриком. Альсиферы и карбонильное железо – яркие представители состава таких трансформаторных сердечников. Альсифер – это магнитомягкий сплав, состоящий из алюминия 5,4 %, кремния 9,6 % и железа, впервые получен в 1932 году в Японии. Название альсифер – аббревиатура из первых букв наименований этих элементов (aluminium, silicium, ferrum). Альсифер имеет отрицательный температурный коэффициент магнитной проницаемости и может работать в сильных магнитных полях [13].

На рис. 38 приведены примеры низкочастотных трансформаторов, изготовленных на различных сердечниках.



Рис. 38. Низкочастотные трансформаторы разных типов

К полупроводниковым сердечникам относят сердечники из феррита. Они прессуются из двухвалентных металлов (цинк, медь, марганец и др.) с наполнителем и спекаются при температуре, близкой к тысяче градусов. У ферритов высокое сопротивление, близкое к сопротивлениям диэлектриков, широкий диапазон рабочих частот и малые потери на высоких частотах. Чем выше рабочая частота феррита, тем ниже его магнитная проницаемость. Маркировка ферритов состоит из цифр и букв, причем цифры означают магнитную проницаемость, а буквы – состав элементов. Буква «С» в наименовании материала говорит о возможности его использования в сильных магнитных полях, т. е. в мощных трансформаторах и дросселях. Магнитопроводы из феррита со временем теряют свои свойства даже при отсутствии намагниченности и за 10 лет могут потерять до 45 % магнитной проницаемости [14]. Теряют магнитную проницаемость и при нагреве, но с последующим охлаждением она восстанавливается. Безвозмездно снижаются параметры ферритов и при механических воздействиях – ударах и сильной вибрации [15].

Проводящие ток магнитные сердечники делятся на две группы. Низкочастотные сердечники для частот 50, 400, 1000 Гц изготавливаются из трансформаторных (электротехнических) катаных сталей. С ростом частоты растут потери в стали и ее нагрев. Поэтому на частотах от 1 до 200 кГц используют сердечники трансформаторов из аморфных металлов и железо-никелевых сплавов, называемых пермаллоя-

ми. Пермаллой – это сплав с магнитно-мягкими свойствами, состоящий из железа и никеля. Типовое соотношение никеля 81 %, железа 19 %. Часто сплав дополнительно легируют другими компонентами (кобальтом, бором и др.). Сплав обладает высокой магнитной проницаемостью. После механической обработки, как правило, магнитная проницаемость пермаллоя снижается. Пермаллой используется для изготовления трансформаторных пластин, а прокат пермаллоя применяют для экранирования от магнитного поля электронных микроскопов, помещений для МРТ, некоторых восприимчивых к магнитному полю микросхем и чувствительных приборов [16].

Трансформация напряжения в трехфазной цепи может быть осуществлена группой из трех однофазных трансформаторов, как показано на рис. 39, либо одним трехфазным трансформатором, как показано на рис. 40. При этом обмотки фаз высшего и низшего напряжений могут соединяться звездой или треугольником. Соединение звездой обозначается знаком Y , а треугольником – Δ [17].

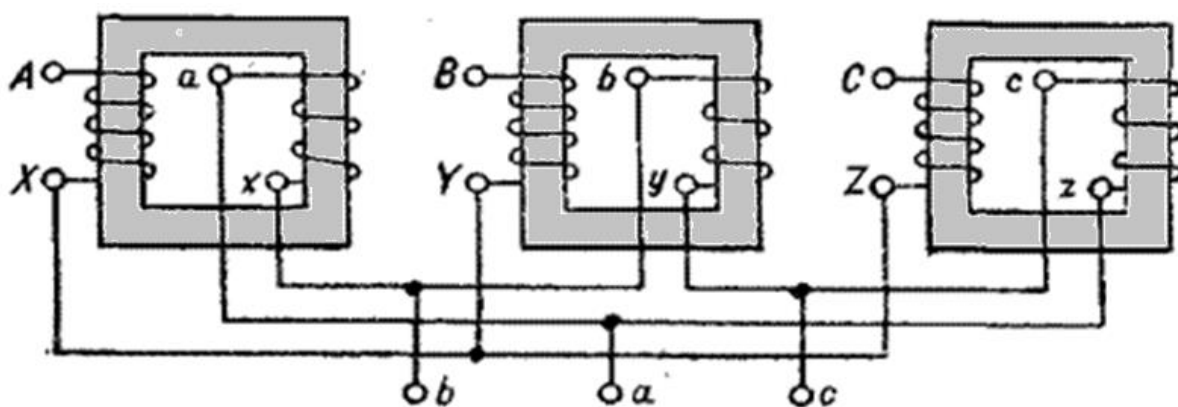


Рис. 39. Схема трехфазного трансформатора из трех однофазных

Для трансформирования энергии в трехфазных системах часто используют группу из трех однофазных трансформаторов (именно так и работают мощные однофазные трансформаторы, устанавливаемые на крупных электростанциях), у которых первичные и вторичные обмотки соединяются *звездой* или *треугольником*. На меньших мощностях используют один трехфазный трансформатор с общим магнитопроводом. Причем первичные и вторичные обмотки могут иметь как одинаковые, так и различные схемы. Если при соединении обмоток звездой нулевая точка выводится, то такое соединение называют

звездой с нулем (Y₀). Если обе обмотки соединены звездой, то такое соединение обозначается Y/Y. В числителе указывается способ соединения обмоток фаз высшего напряжения, а в знаменателе – низшего напряжения. Начала фаз высшего напряжения обозначаются буквами A, B и C, а концы буквами X, Y, Z. Начала фаз низшего напряжения – буквами a, b и c, а их концы буквами x, y, z [17].



Рис. 40. Мощный трехфазный трансформатор

Самым простым и дешевым считается соединение обеих обмоток трансформатора звездой (Y/Y). В этом случае каждая из обмоток и ее изоляция рассчитываются только на фазное напряжение и линейный ток. Так как число витков обмотки трансформатора прямо пропорционально напряжению, то соединение обмоток звездой требует в каждой из обмоток меньшего количества витков, но большего сечения

проводников, но с изоляцией, рассчитанной лишь на фазное напряжение.

При трехфазной трансформации отношение фазных напряжений $U_{1\phi}/U_{2\phi}$ приближенно равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток w_1/w_2 [16]. Что касается линейных напряжений, то их отношение зависит от способа соединения обмоток. При одинаковом способе соединения (Y/Y или D/D) отношение линейных напряжений равно коэффициенту трансформации. Однако при различном способе соединения (Y/D или D/Y) отношение линейных напряжений меньше или больше этого коэффициента в $\sqrt{3}$ раз [11]. Это дает возможность регулировать вторичное линейное напряжение трансформатора соответствующим изменением способа соединения его обмоток.

2.3. Дроссели

Дроссель – это катушка индуктивности, или магнитопровод с намотанной на нем обмоткой, через которую проходит переменный ток. Дроссель без сердечника используется на высоких частотах как большое по величине индуктивное сопротивление. Дроссель с сердечником – это большая индуктивность на пути протекания переменного тока. Чем лучше магнитные свойства ферромагнетика, тем выше индуктивность дросселя и его магнитная проницаемость. Дроссель значительно компактнее по сравнению с катушкой индуктивности при совпадающих параметрах. Конструкции дросселей аналогичны трансформаторам, т. е. броневая, стержневая и тороидальная. На высоких частотах используют также планарную конструкцию, которая представляет собой проводник на печатной плате. Графическое обозначение дросселей на электрических схемах не отличается от обозначения индуктивностей, а при наличии сердечника от однообмоточного трансформатора.

Основные характеристики дросселя определяются свойствами его ферромагнитного сердечника. Вольт-амперные характеристики дросселей могут быть линейными и нелинейными. У нелинейного дросселя сопротивление на рабочей частоте зависит от величины

приложенного напряжения. Как правило, индуктивное сопротивление дросселя меньше при насыщенном сердечнике по сравнению с ненасыщенным. Если сердечник ненасыщен, то форма кривой тока повторяет форму кривой приложенного синусоидального напряжения. Если сердечник насыщен и замкнут, то формы тока и напряжения существенно различаются.

Нелинейность дросселя нежелательна, так как приводит к потере проходящей энергии. Для линеаризации вольт-амперной характеристики магнитопровод делают с немагнитным зазором и тогда в определенных пределах изменения тока индуктивное сопротивление остается постоянным. Особенно целесообразен немагнитный зазор при получении в дросселе большой магнитной энергии. Однако немагнитный зазор вносит в работу дросселя определенные особенности и наличие зазора не делает дроссель совсем линейным элементом, поскольку энергия потерь в таком дросселе не пропорциональна квадрату тока [16].

Дроссели классифицируют по различным признакам:

- по мощности;
- используемой частоте (промышленной 50 Гц, бортовой 400 – 1000 Гц, высокой при частоте более 1000 Гц);
- конструкции (открытые, герметичные);
- материалам обмоток и сердечника;
- назначению (сглаживающие пульсации; магнитные усилители, изменяющие величину индуктивности за счет дополнительного подмагничивания).

Параметры дросселей как нелинейных элементов определяют при строго оговоренных условиях, например, при синусоидальном напряжении на обмотке с указанием величины напряжения и частоты. Такие параметры не определяют режимы в используемых цепях, но характеризуют дроссель как изделие и имеют связь с расчетными параметрами.

Индуктивность дросселя определяется следующим выражением:

$$L = \frac{U}{2\pi f I} \sin \varphi ,$$

где U и I – действующие значения приложенного синусоидального напряжения и тока в обмотке дросселя; f – частота; φ – фазовый сдвиг между напряжением и током.

При малом омическом сопротивлении обмотки и малых потерях энергии в сердечнике это выражение упрощается

$$L = \frac{U}{2\pi f I}.$$

Из-за нелинейности дросселя, обусловленной свойствами его сердечника, ток в обмотке несинусоидален и имеет искаженную форму, как показано на рис. 41.

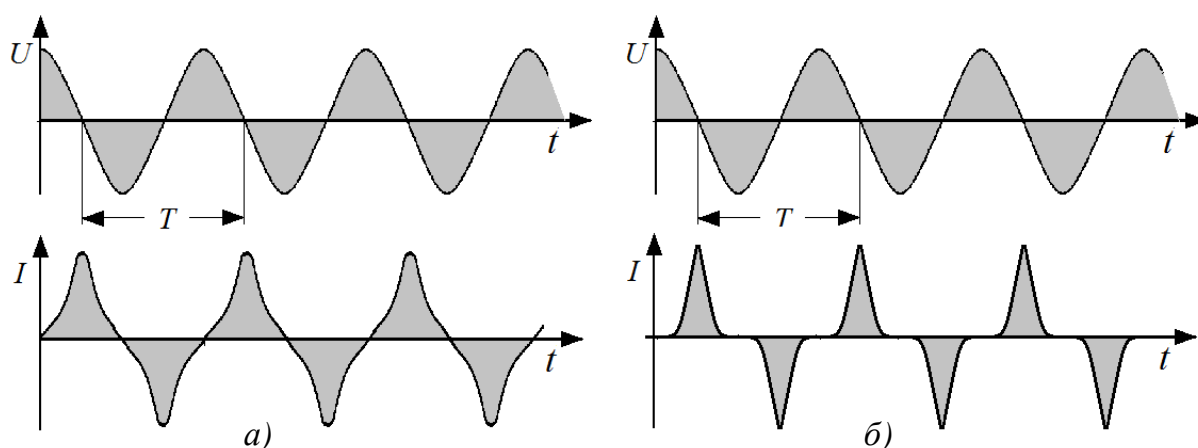


Рис. 41. Осциллограммы тока и напряжения на ненасыщенном а) и насыщенном б) дросселях

Приложенное к дросселю напряжение характеризуют коэффициентом формы

$$k_{\text{ф}} = \frac{U}{U_{\text{ср}}},$$

где U и $U_{\text{ср}}$ – действующее и среднее значения приложенного напряжения.

Размеры сердечника дросселя определяют, ориентируясь на величину габаритной мощности

$$P_{\text{габ}} = UI.$$

Зная габаритную мощность, можно выбрать сердечник из стандартных. Расчетная реактивная мощность Q отличается от габаритной

$$Q = k_T UI \sin \varphi,$$

где $k_T = I_1/I$ – коэффициент искажения формы тока; I_1 и I – ток первой гармоники и полный ток.

Добротность дросселя равна отношению величины реактивной мощности к сумме потерь в обмотке p_o и в сердечнике p_c

$$q = \frac{Q}{p_o + p_c}.$$

Низкочастотные дроссели промышленной частоты обычно имеют добротность $q = 10 - 15$ [10]. Иногда о качестве дросселя судят по так называемому углу потерь

$$\alpha = \arcsin \frac{p_o + p_c}{UI},$$

который связан с добротностью выражением $q \approx \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}$.

На разных частотах различна и оптимальная толщина листов или ленты сердечника. Для 50 Гц оптимально 0,2 – 0,5 мм, для 400 Гц 0,1 – 0,2 мм, для 1000 Гц 0,08 – 0,1 мм. Тоньше листы делать нецелесообразно, так как растут потери на гистерезис. На частотах выше 1000 Гц сердечники из листовой стали неприемлемы и применяют в основном ферриты [12]. Сердечник дросселя должен иметь максимально большой коэффициент заполнения его объема магнитным материалом. Коэффициент заполнения объема сердечника низкочастотных дросселей сталью зависит от степени сжатия сердечника и обычно находится в пределах от 0,8 до 0,9. Минимальный вес низкочастотного дросселя получается при соотношении его размеров v/a не более двух.

Сердечники высокочастотных дросселей ($f > 1000$ Гц) изготавливают из ферритов. Наибольшее применение получили марганец-

цинковые и никель-цинковые ферриты. Форма сердечников может быть самой различной. Для дросселей и трансформаторов мощностью до 500 Вт промышленность выпускает сердечники стандартных размеров.

Сердечники низкочастотных дросселей отличаются от сердечников трансформаторов только немагнитными зазорами, как показано на рис. 42.

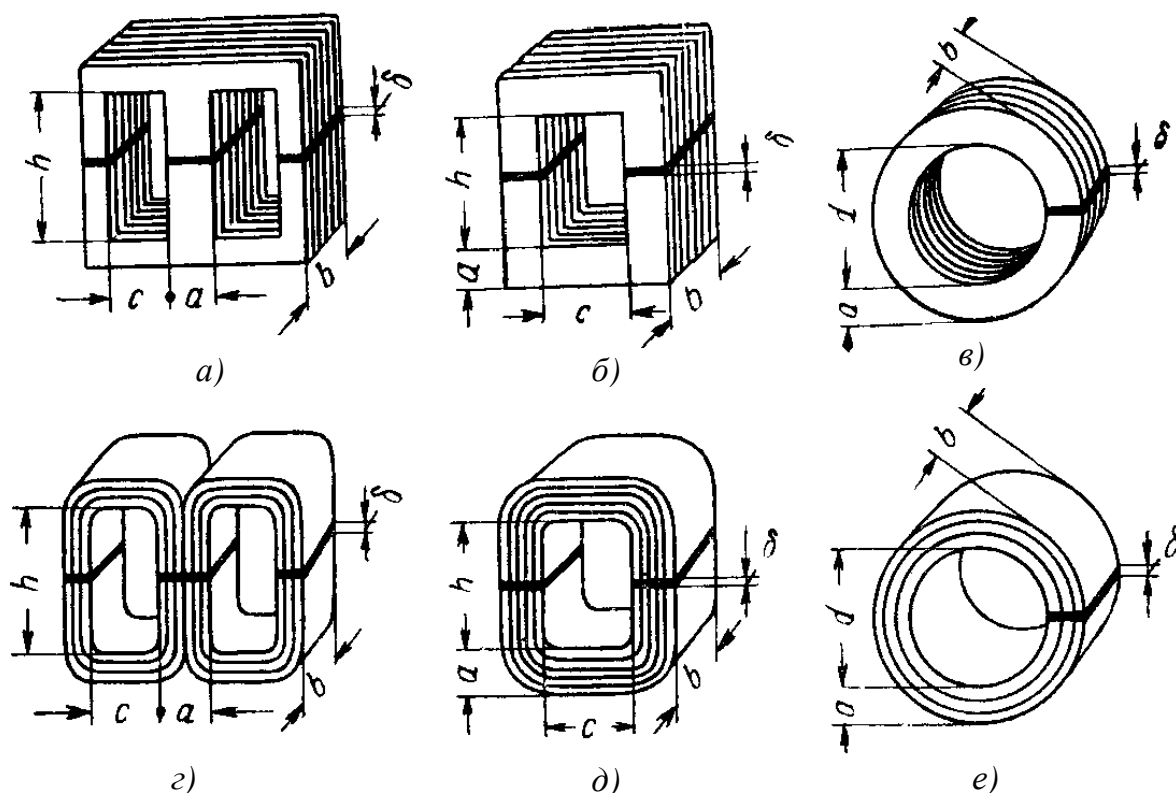


Рис. 42. Магнитопроводы дросселей штампованные (а, б, в) и ленточные (г, д, е)

Перегрев сердечников зависит от многих факторов: частоты, величины потерь, качества проводов и изоляционных материалов, конструкции и т. д. Предельная величина перегрева зависит от изоляции проводов и обычно составляет 105 – 130 °С. Ориентировочно перегрев обмотки дросселей броневых и стержневых типов можно вычислить, используя выражение

$$t_{\max} = \frac{p_o(1 + \nu)}{\delta(S_c + S_{\text{II}})},$$

где p_o – потери в обмотке, Вт; S_c и S_{II} – площади поверхностей охлаждения сердечника и обмотки провода; ν – отношение потерь в сердечнике к потерям в проводе; σ – коэффициент теплоотдачи, Вт/м² · град.

В целях повышения изоляции и снижения акустических шумов трансформаторов и дросселей их обмотки пропитывают компаундами. При этом теплопроводность обмотки увеличивается примерно в два раза, но растет и масса изделия. Следует отметить и тот факт, что на дроссели влияют внешние магнитные поля и сам дроссель воздействует своим магнитным полем на другие элементы устройств. Внешний вид низкочастотных дросселей и направление их наибольшего магнитного поля, рассеиваемого дросселем, показаны на рис. 43.

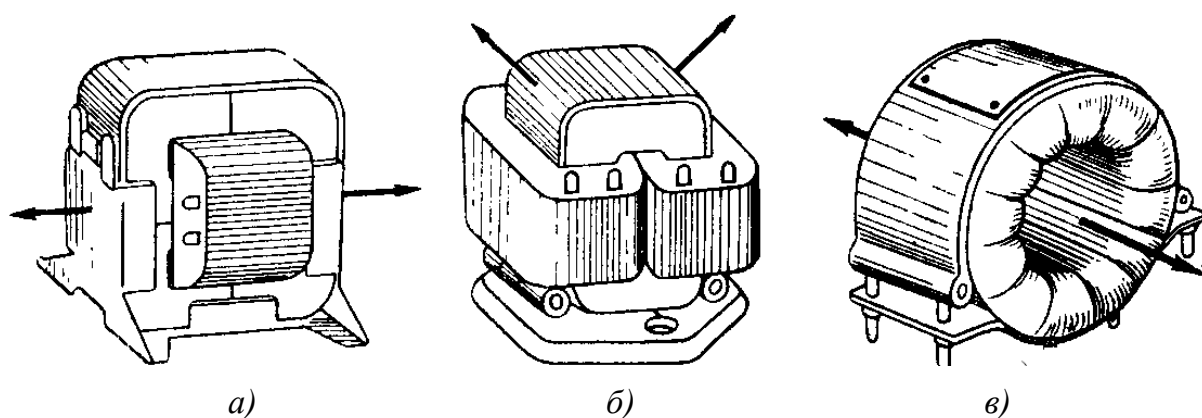


Рис. 43. Направление наибольшего магнитного поля, рассеиваемого дросселем:
а – бронированного; б – стержневого; в – тороидального типов

Сильное влияние на магнитные характеристики дросселей оказывает величина немагнитного зазора в магнитопроводе. Характерные зависимости максимальной магнитной индукции от напряженности электрического поля и коэффициента k_{γ} , равного отношению длины

немагнитного зазора к длине средней магнитной линии сердечника, приведены на рис. 44 [16].

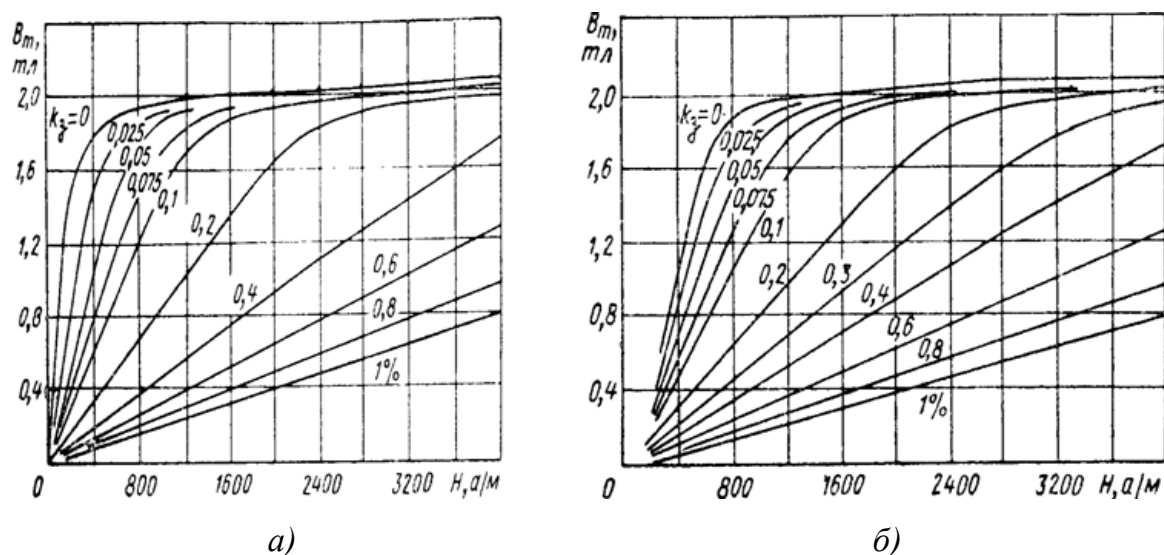


Рис. 44. Кривые намагничивания броневого магнитопровода из стали Э330: а – $f = 50$ Гц, толщина ленты 0,35 мм; б – $f = 400$ Гц, толщина ленты 0,15 мм

2.4. Выпрямители

2.4.1. Основные сведения

Устройства, преобразующие переменное напряжение в постоянное, называют выпрямителями. Преобразование переменного напряжения в постоянное может выполняться на полупроводниковых диодах, электронных лампах (кенотроны), газозаполненных электронных приборах (тиратроны, газотроны). Для преобразования используется свойство односторонней проводимости этих элементов. В состав выпрямителей входят диоды (вентили) и фильтрующие элементы. Наиболее широко применяют кремниевые полупроводниковые выпрямительные диоды. Классификация диодов достаточно обширна, так как в радиотехнической аппаратуре они выполняют разнообразные функции – выпрямляют, детектируют, стабилизируют, защищают от пробоя другие элементы, работают переключателями и т. д. [18 – 21]. Основная вольт-амперная характеристика полупроводникового диода представлена на рис. 45.

Основными параметрами полупроводникового диода являются:

- R_d – динамическое сопротивление;
- обратное (статическое) сопротивление;
- $I_{пр}$ – предельно допустимый средний прямой ток;
- $U_{пр}$ – среднее прямое напряжение (падение на диоде) в открытом состоянии диода;
- $U_{пор}$ – пороговое напряжение, т. е. противоположная ЭДС, которая препятствует нарастанию прямого тока при включении диода;
- $U_{обр}$ – максимально допустимое обратное напряжение, которое длительно может выдержать диод в закрытом состоянии.

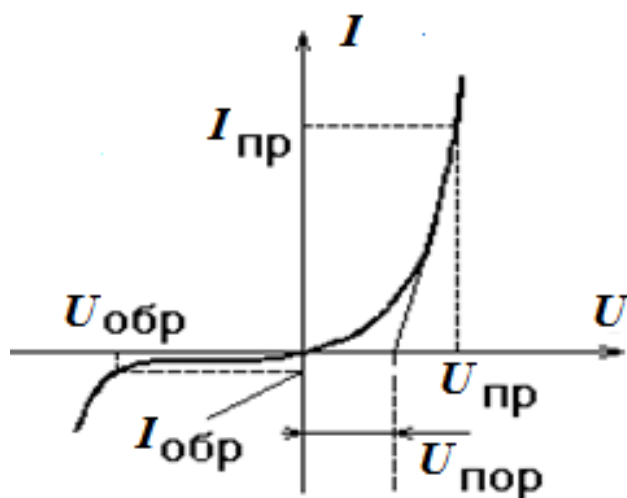


Рис. 45. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода

Однако на внутреннем сопротивлении каждого полупроводникового диода в зависимости от его типа падает от 0,5 до 1,5 В, что резко снижает КПД низковольтных выпрямителей. Это особенно ощутимо для современной процессорной техники, в которой энергия потерь в выпрямителе может превысить полезную энергию в нагрузке. В таких случаях рекомендуется использовать управляемые выпрямители на современных полевых транзисторах, у которых напряжение сток-исток в открытом состоянии составляет единицы или десятки милливольт в зависимости от мощности транзистора [19].

При параллельной работе диодов из-за несовпадения их ВАХ токи в них распределяются неравномерно и в одном из них будет преобладать средневыпрямленный ток. Это может привести к выходу из

строю одного из диодов. Для выравнивания токов используются дополнительные элементы: для средней мощности – резисторы малого номинала, для большой мощности – уравнивающий реактор, как показано на рис. 46. При необходимости выпрямления высоковольтных напряжений часто используют последовательное включение диодов. В этом случае тоже применяют высокоомные резисторы, выравнивающие обратные напряжения диодов.

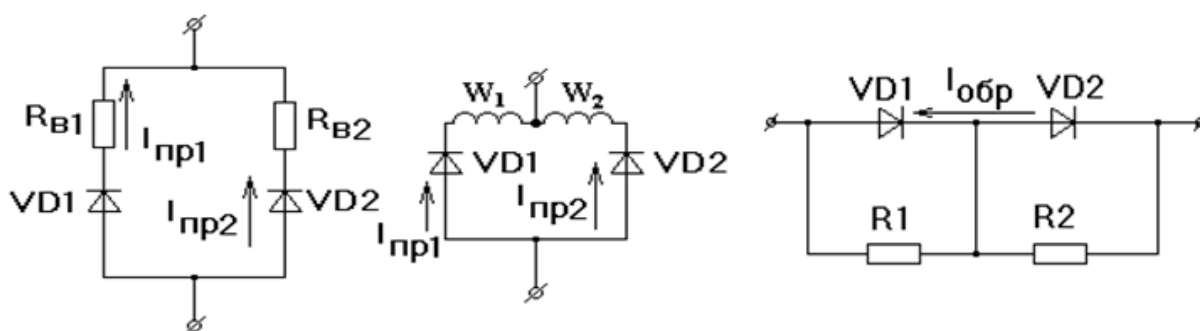


Рис. 46. Работа диодов при их параллельном или последовательном соединении

Для трехфазных электрических цепей ввели понятия анодной и катодной группы диодов (при соединении элементов в узел катодами или анодами, как изображено на рис. 47).

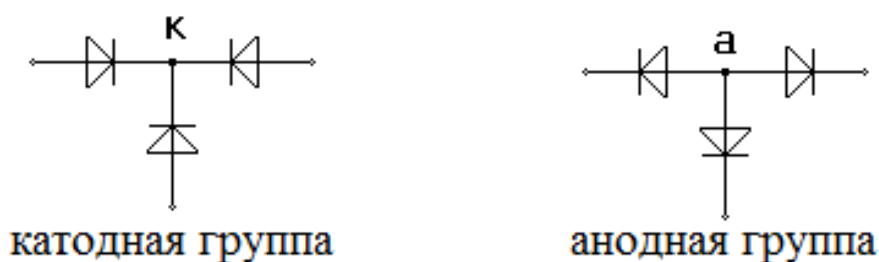


Рис. 47. Включение диодов группами

Остающаяся после выпрямления переменную составляющую напряжения на нагрузке выпрямителя называют пульсацией. Для минимизации пульсации применяют фильтрующие элементы. Емкость представляет собой самый простой фильтр, но чаще применяют более

сложные фильтры, которые кроме снижения пульсации выполняют дополнительную функцию – стабилизацию напряжения.

Критериев качества работы выпрямителя несколько:

1. Коэффициент пульсации – отношение амплитуды k -й гармоники к средневывпрямленному значению напряжения $K_{\Pi} = \frac{U_m}{U_0}$.

2. Коэффициент выпрямления по напряжению – отношение средневывпрямленного значения напряжения к действующему значению входного напряжения $K_{U_0} = \frac{U_0}{U_{\text{вх}}}$.

3. КПД – отношение полезной мощности в нагрузке к потребляемой мощности $\text{КПД} = \frac{P_{0\text{ввх}}}{P_{\text{вх}}}$.

4. Пульсность – отношение частоты пульсации к частоте питающего напряжения $p = \frac{f_{\Pi}}{f}$.

Выпрямители разделяют на управляемые и неуправляемые, на однотактные (однополупериодные и двухполупериодные) и двухтактные (однофазные и трехфазные). Рассмотрим свойства однополупериодных и двухполупериодных выпрямителей.

2.4.2. Однополупериодные выпрямители

Схема однополупериодного выпрямителя исключительно проста, как видно из рис. 48, и состоит из выпрямительного диода. Через диод однополупериодного выпрямителя проходит только положительная полуволна входного переменного напряжения и частота пульсаций совпадает с входной частотой, т. е. пульсность равна единице. Это ограничило применение таких выпрямителей в радиоэлектронной аппаратуре и стали использовать однополупериодные выпрямители, работающие на резистивно-емкостную или на резистивно-индуктивную нагрузки, как показано на рис. 48, состоящие из двух элементов – диода и накопительной емкости, или индуктивности [18].

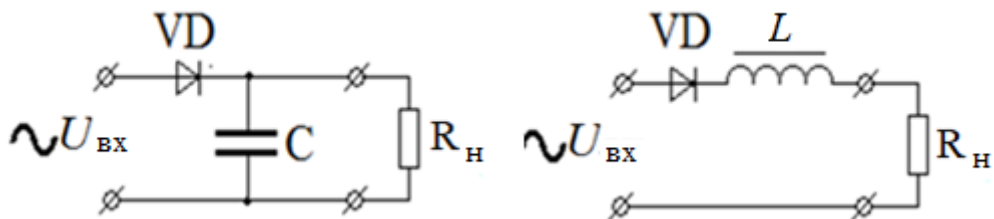


Рис. 48. Однополупериодные выпрямители с резистивно-емкостной и резистивно-индуктивной нагрузками

Напряжение на выходе диода однополупериодного выпрямителя определяется постоянной составляющей U_0 и суммой гармоник входной частоты, амплитуды которых U_i убывают с ростом номера гармоники

$$U_d = U_0 + \sum_{i=1}^N U_i e^{-i\varphi}.$$

Гармоники являются причиной пульсаций выходного напряжения, и их амплитуды уменьшают с помощью фильтров. В однополупериодном выпрямителе амплитуда первой гармоники связана с постоянной составляющей через коэффициент пульсаций [19]

$$U_{1m} = K_{\Pi} U_0 = 1,57 U_0.$$

Самый простой фильтр представляет собой накопительную емкость C , включаемую параллельно нагрузке. Чем больше номинал емкости C , тем сильнее подавляются гармоники и тем значительно снижается величина пульсаций. Эпюры напряжений для схемы однополупериодного выпрямителя синусоидального напряжения с резистивно-емкостной нагрузкой приведены на рис. 49.

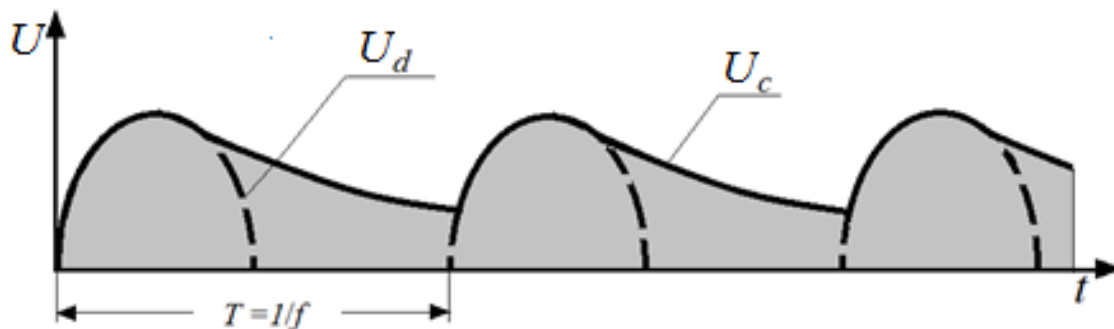


Рис. 49. Изменение напряжения на диоде и накопительной емкости

однополупериодного выпрямителя с резистивно-емкостной нагрузкой

Во время отрицательного полупериода входного напряжения обратное напряжение на диоде складывается из напряжения входной полувольты и мгновенного потенциала на нагрузке, что необходимо учитывать при выборе выпрямительного диода.

К достоинствам однополупериодных выпрямителей можно отнести их простоту, а к недостаткам:

- низкий КПД;
- высокое обратное напряжение на диоде;
- низкую частоту и большую амплитуду пульсаций;
- большие габариты магнитопровода из-за одностороннего подмагничивания при выпрямлении напряжения с трансформатора.

Эти недостатки ограничили применение однополупериодных выпрямителей в качестве источников питания радиоэлектронной аппаратуры. Но в силовой промышленной электронике трехфазные системы питания нашли применение, так как в трехфазных системах частота пульсаций в три раза выше входной частоты и напряжение пульсаций сравнительно невелико, как показано на рис. 50.

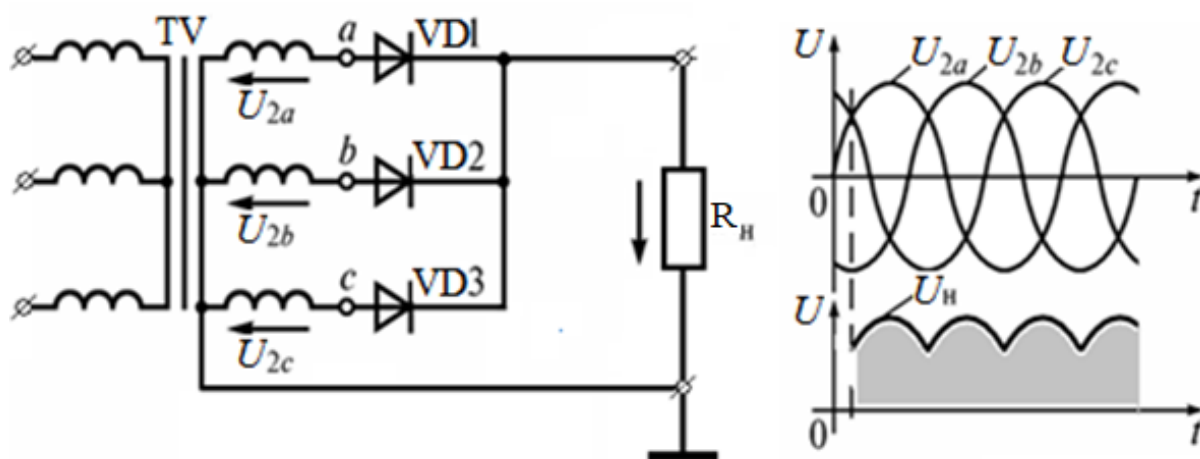


Рис. 50. Однополупериодный трехфазный выпрямитель

Подробные эюры работы однополупериодного трехфазного выпрямителя приведены на рис. 51.

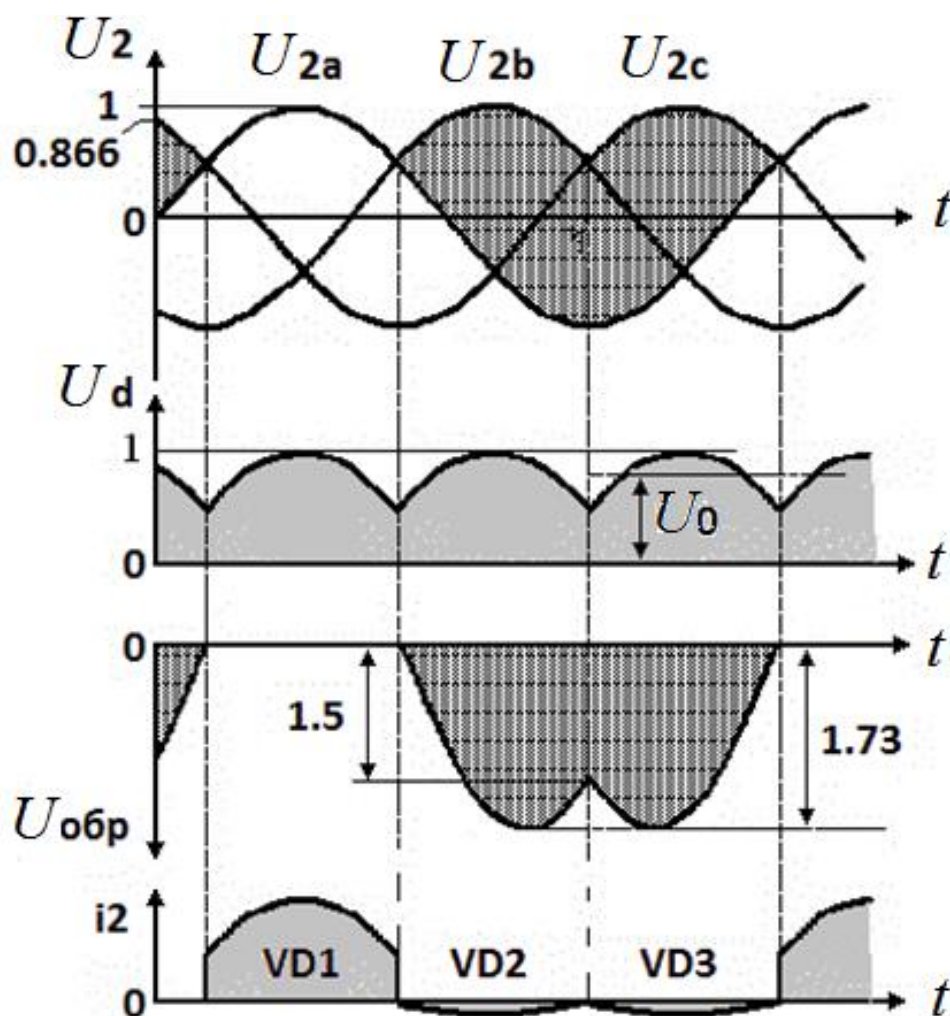


Рис. 51. Эюры работы однополупериодного трехфазного выпрямителя

Отметим, что пиковое обратное напряжение на диодах составляет 1,73, т. е. диоды требуется выбирать с двойным запасом по допустимому обратному напряжению.

2.4.3. Двухполупериодные выпрямители

В двухполупериодных однофазных выпрямителях в отличие от однополупериодных выпрямление переменного входного напряжения осуществляется в оба полупериода. Такие выпрямители бывают мо-

стового типа (рис. 52, а) и работающие со средней точкой обмотки трансформатора (рис. 52, б).

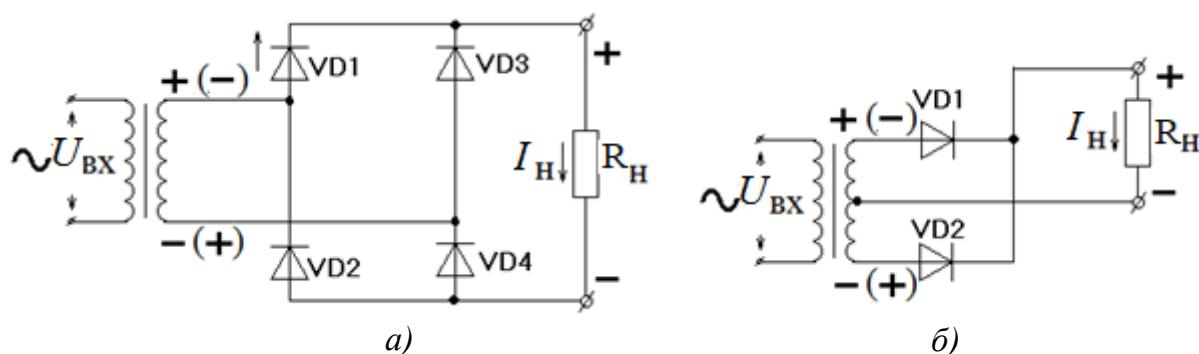


Рис. 52. Схемы двухполупериодных выпрямителей

В мостовом выпрямителе во время положительной полуволны входного напряжения, обозначенной на схеме знаками (+) и (-), к анодам диодов VD1, VD4 приложено положительное напряжение, они открываются (а диоды VD2 и VD3 при положительном напряжении на катодах закрываются) и через нагрузку течет ток I_n . Во время отрицательной полуволны, обозначенной на схеме знаками (+) и (-), открываются диоды VD3 и VD2 (а диоды VD1 и VD4 закрываются) и через нагрузку тоже течет ток I_n . Эпюры работы двухполупериодного выпрямителя показаны на рис. 53.

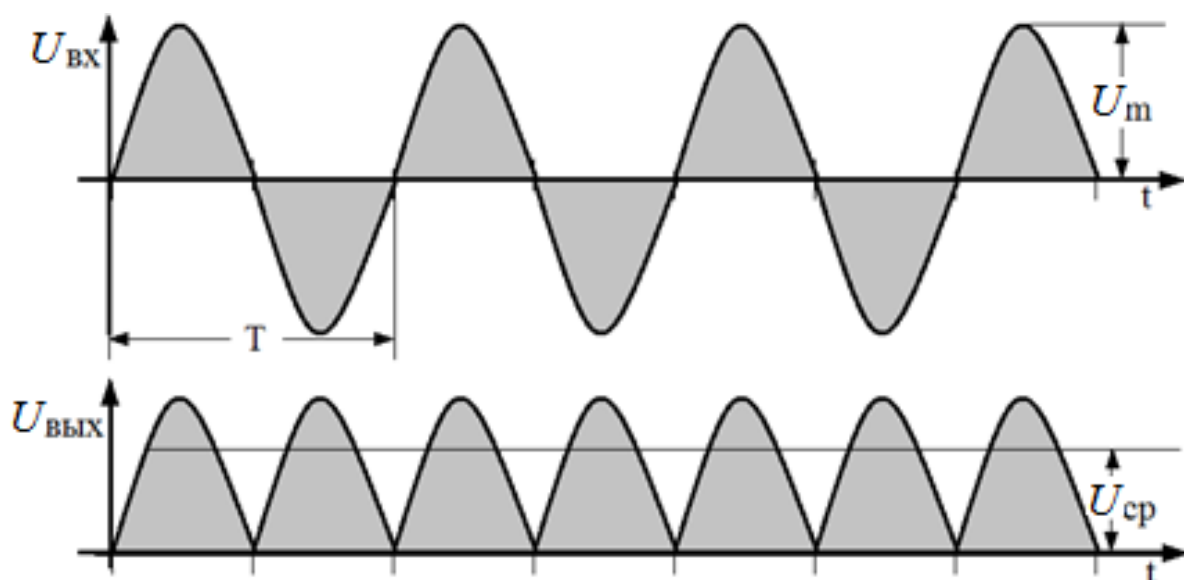


Рис. 53. Напряжения на входе и выходе двухполупериодного выпрямителя

За время периода входного напряжения через нагрузку протекают два импульса тока и частота пульсаций получается в два раза выше частоты входного сигнала. Во вторичной обмотке трансформатора ток протекает оба полупериода входного напряжения и подмагничивание сердечника трансформатора отсутствует.

К недостаткам мостового выпрямителя можно отнести наличие четырех диодов и невозможность их размещения на одном радиаторе без изолирующих прокладок, а также снижение КПД у низковольтных выпрямителей из-за потерь на внутренних сопротивлениях открытых диодов. Коэффициент пульсаций двухполупериодного выпрямителя равен $K_{\Pi} = 0,67$.

В схеме со средней точкой трансформатора во время положительной полуволны открывается диод VD1, а VD2 закрывается. Во время отрицательной полуволны, наоборот, VD2 открывается, а VD1 закрывается. Фактически двухполупериодный выпрямитель со средней точкой трансформатора состоит из двух однополупериодных выпрямителей, работающих поочередно через разные диоды.

Однако, чтобы ток через нагрузку был той же величины, как в мостовом выпрямителе, вторичная обмотка должна иметь в два раза больше витков по сравнению с вторичной обмоткой трансформатора при мостовом выпрямителе. Необходимость трансформатора с выводом во вторичной обмотке, имеющей в два раза больше витков во вторичной обмотке по сравнению с мостовой схемой выпрямителя, является основным недостатком схемы выпрямителя со средней точкой трансформатора [18].

Достоинства мостовых выпрямителей:

- частота пульсаций в два раза выше частоты входной сети;
- КПД выше, чем у мостовой схемы, так как потери на двух, а не на четырех диодах;
- поскольку пары диодов работают поочередно, то средний ток через каждый диод в два раза меньше тока в нагрузке;
- возможно размещение диодов на общем радиаторе;
- отсутствует подмагничивание магнитопровода сердечника трансформатора;
- допустима работа без трансформатора.

В целом основное преимущество двухполупериодных выпрямителей по сравнению с однополупериодными заключается в том, что

ток через нагрузку течет оба полупериода. В результате этого частота пульсаций в два раза больше частоты входного сигнала, лучше сглаживается выпрямленное напряжение и выше КПД по сравнению с однополупериодными выпрямителями. Мостовые выпрямители нашли самое широкое применение в различных отраслях радиоэлектроники. Двухполупериодные выпрямители со средней точкой трансформатора выгоднее применять в мощных низковольтных системах, требующих больших токов.

Расчет выпрямителей сводится к определению параметров используемых диодов и потерь на них. Подробно методика расчета выпрямителей изложена в работе [18].

2.4.4. Трехфазные выпрямители

Однополупериодный трехфазный выпрямитель и эпюры, описывающие его работу, приведены на рис. 50. Трехфазная входная сеть позволяет в три раза увеличить частоту пульсаций и снизить их амплитуду. Такие схемы выпрямителей широко применяются в промышленной электронике, а в радиотехнике более активно используют мостовые трехфазные схемы выпрямления, позволяющие в шесть раз увеличить частоту пульсаций и соответственно дополнительно снизить амплитуду пульсирующей составляющей выходного напряжения.

Схема мостового трехфазного выпрямителя, называемая также схемой Ларионова, показана рис. 54.

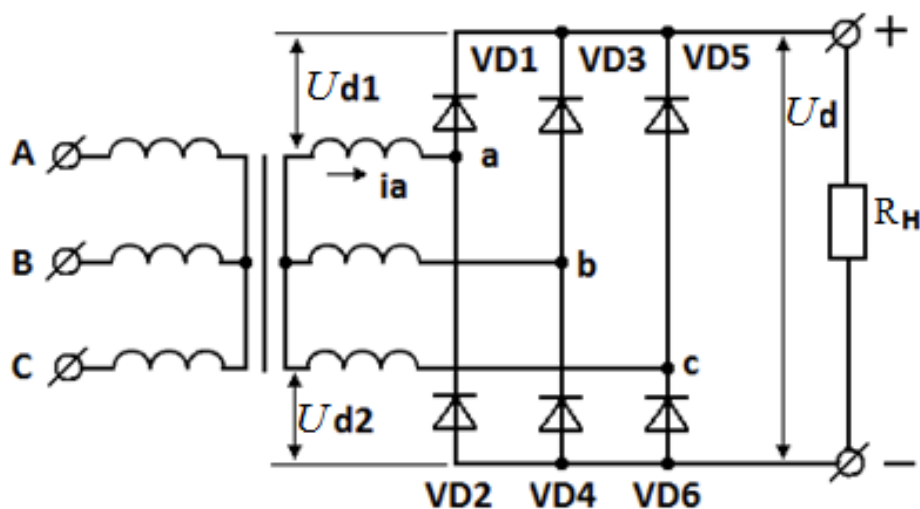


Рис. 54. Трехфазная мостовая схема выпрямителя Ларионова

Три фазы обмоток вместе с двумя полупериодами выпрямления по каждой фазе создают основную частоту пульсаций, равную шестикратной частоте сети. Это видно по диаграммам напряжений и токов, приведенным на рис. 55.

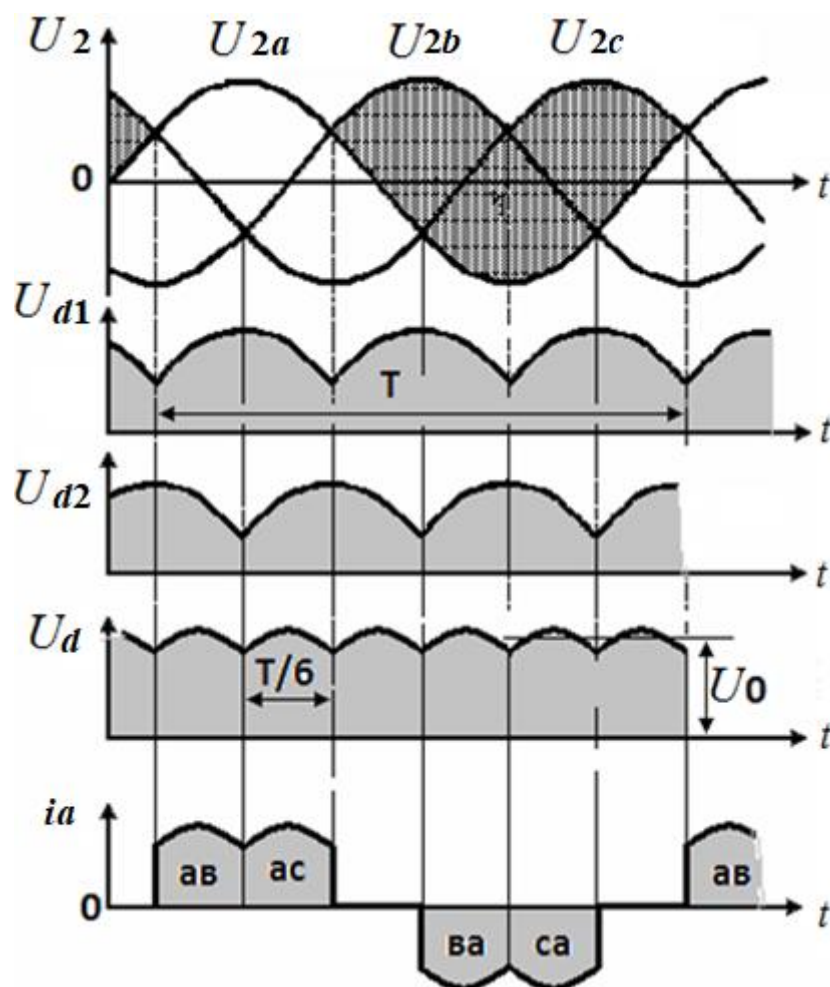


Рис. 55. Напряжения и ток фазы в схеме выпрямителя Ларионова

В схеме Ларионова выходное напряжение можно представить в виде суммы двух одноктных трехфазных выпрямителей, которые работают в противоположных фазах, и выходное напряжение является суммой их выходных напряжений $U_d = U_{d1} + U_{d2}$.

Суммарно получается шесть фаз вместо трех и частота пульсаций становится в шесть раз больше частоты питающей сети. Поэтому требования к фильтрам, снижающим пульсации, значительно упрощаются. Величина емкости, сглаживающей пульсации, может быть уменьшена практически в 10 раз [22].

Если организовать несколько вторичных обмоток на трехфазном трансформаторе, то можно получить более шести фаз выпрямления. На каждую фазу приходится пара диодов и чем больше пар диодов будет задействовано, тем выше частота пульсаций и меньше их амплитуда. Принцип увеличения фаз выпрямления показан на рис. 56.

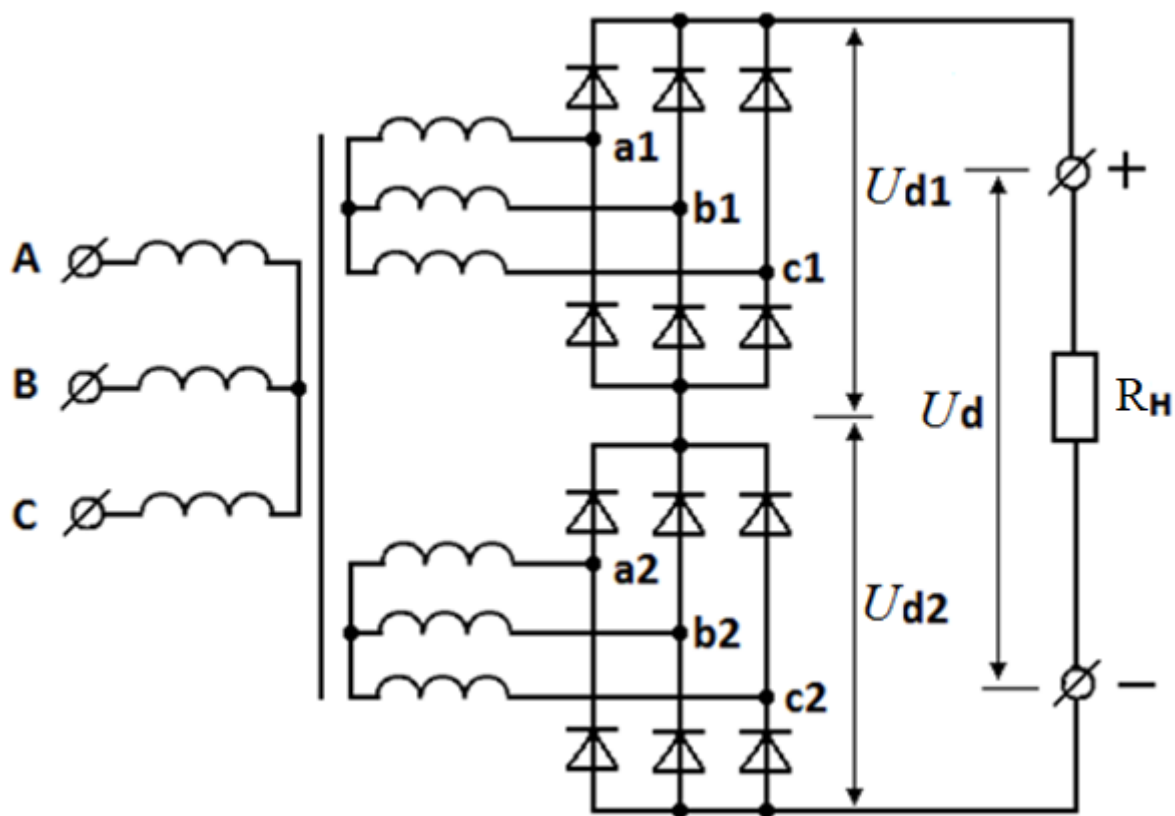


Рис. 56. Двенадцатифазный выпрямитель

На схеме двенадцатифазного выпрямителя используются две трехфазные обмотки. Сдвиг фаз напряжений относительно друг друга получается по 30° , а так как выпрямители включены последовательно, то их выходные напряжения суммируются и частота пульсаций оказывается в двенадцать раз выше частоты питающей сети. Аналогично показанной на рис. 56 схеме можно получить восемнадцать и более фаз и снизить уровень пульсаций до требуемого минимума даже без дополнительных фильтрующих элементов.

2.4.5. Управляемые выпрямители

Управляемый выпрямитель – это выпрямитель с регулируемым выходным напряжением. Самый простой способ такой регулировки – включение в первичную или вторичную обмотки реостата (автотрансформатора), позволяющего менять напряжение на обмотке. Однако такой способ обеспечит только медленное управление, да еще со значительным снижением КПД выпрямителя.

Другой способ управления выпрямителем состоит в применении управляемых вентилях, в качестве которых применяют тиристоры, т. е. четырехслойные полупроводниковые *n-p-n-p* структуры с вольт-амперной характеристикой, показанной на рис. 57.

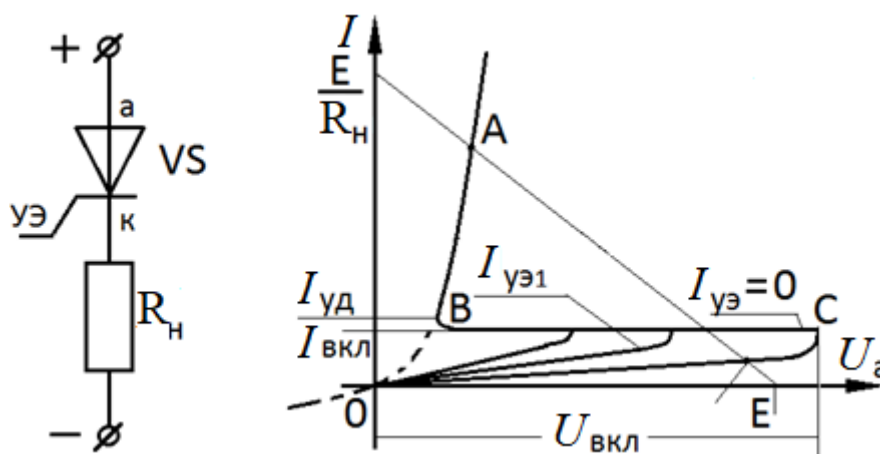


Рис. 57. Условное обозначение и вольт-амперная характеристика тринистора (тиристора)

Чтобы открыть тиристор, нужно подать на управляющий электрод импульсное напряжение с амплитудой не менее $U_{вкл}$ и тиристор перейдет в проводящую область АВ на рис. 57. Выключается тиристор снятием положительного напряжения с анода до уровня, при котором ток становится меньше тока удержания $I_{уд}$, но есть и запираемые тиристоры, однако импульс запирающего должен быть значительно мощнее импульса отпирающего.

Семейство тиристоров довольно обширно [20, 21]. Тиристор без управления называется динистором, а с управлением – тринистором. Управляемые как положительным, так и отрицательным напряжением тиристоры называли семисторами, известны и запираемые тиристоры.

Тиристоры выпускают в широком диапазоне напряжений и токов. Известны высоковольтные тиристоры и тиристоры с управляемой мощностью до сотен мегаватт. Обозначения и характеристики этих приборов приведены на рис. 58.

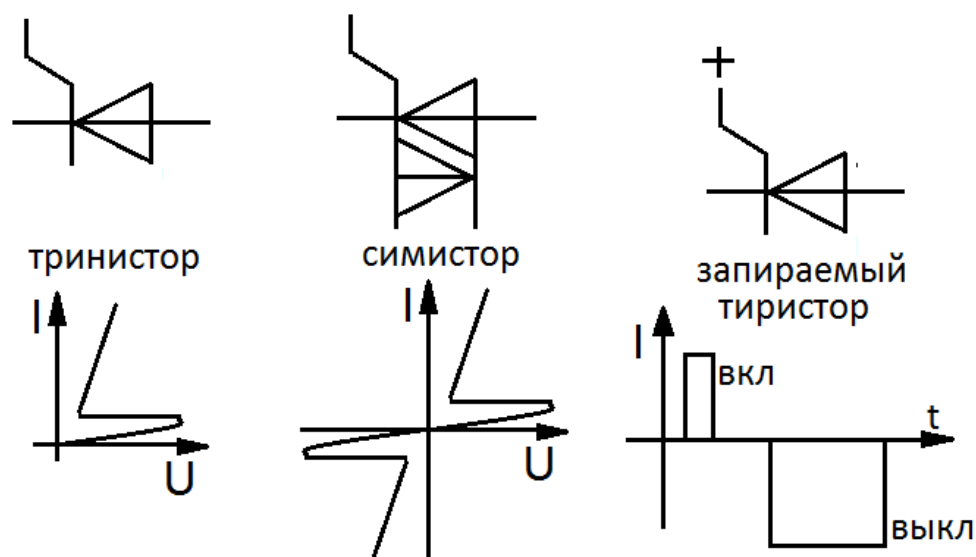


Рис. 58. Управляемые тиристоры

Тиристоры активно используют в устройствах автоматики, регулируемых источниках питания, управляемых стабилизаторах и устройствах защиты. Они могут пропускать очень большие токи, вплоть до сотен ампер, однако время включения составляет 0,1 – 10 мкс, а время выключения от 1 до 100 мкс, т. е. тиристоры инерционны. Поэтому и управляемые с их помощью устройства работают с запаздыванием. При работе тиристора нельзя превышать критичную скорость нарастания анодного напряжения, иначе за счет емкостей переходов возможно неверное открытие переходов. Скорость нарастания анодного напряжения тиристора лежит в пределах

$$V = \frac{dI}{dt} = 10 - 500 \text{ В/мкс.}$$

Чтобы избежать ложных включений переходов, управляющий электрод (УЭ) тиристора шунтируют резистором величиной от 50 Ом до 1,5 кОм.

Для управления выпрямителем тринисторы используют совместно с трансформатором, включая вместо диодов, как показано на рис. 59, в симметричной схеме управляемого выпрямителя.

Работа схемы на рис. 59, а происходит следующим образом. Во время полупериода напряжения U_2 к тиристорам VS1 и VS4 приложено прямое положительное напряжение. В момент времени α на управляющий электрод тиристоров VS1 и VS4 подается положительный импульс управления. Тиристоры открываются, во вторичной обмотке трансформатора наводится ЭДС, и напряжение U_2 передается в нагрузку.

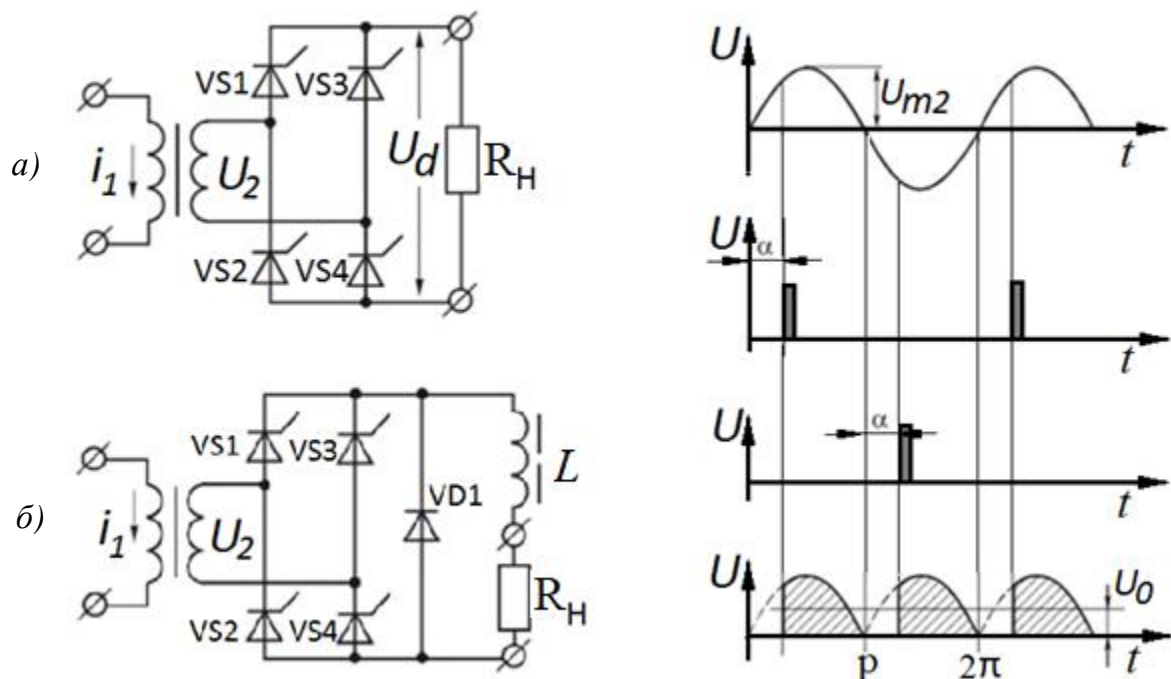


Рис. 59. Симметричные управляемые выпрямители с резистивной а) и резистивно-индуктивной б) нагрузками

При работе на активную нагрузку в момент p (из-за снижения анодного тока ниже тока удержания) происходит запираение тиристоров VS1 и VS4, так как в нагрузке на интервале $[p; p + a]$ напряжение равно нулю, поскольку происходит задержка подачи управляющего импульса на тиристоры VS2 и VS3 на угол a . Во время интервала времени $p - p + \alpha$ на тиристоры VS1 и VS4 приложены отрицательное напряжение U_2 и напряжение разряда индуктивности вторичной обмотки трансформатора.

Во время следующего полупериода напряжения U_2 к тиристорам VS2 и VS3 приложено прямое положительное напряжение. В момент времени $p + \alpha$ открываются тиристоры VS2 и VS3 и напряжение U_2 передается в нагрузку. По окончании полупериода на время α на тиристоры VS2 и VS3 приложено отрицательное напряжение U_2 и напряжение разряда индуктивности вторичной обмотки трансформатора. Далее процесс повторяется.

Если на входе выпрямителя гармоническое напряжение с полу-волнами $U_{m_2} \sin(\omega t)$, то постоянная составляющая на нагрузке будет определяться выражением

$$U_0(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{m_2} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{U_{m_2}}{\pi} (-\cos \omega t) \Big|_{\alpha}^{\pi} =$$

$$= -\frac{U_{m_2}}{\pi} (\cos \pi - \cos \alpha) = \frac{U_{m_2}}{\pi} (1 + \cos \alpha) = \frac{2U_{m_2}}{\pi} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right).$$

Если нагрузка имеет индуктивный характер, то на интервале $p + \alpha$ происходит рекуперация реактивной энергии дросселя в источник. Этот режим называется инверторным режимом работы выпрямителя. Появление отрицательного выброса напряжения снижает уровень выпрямленного напряжения. Для исключения этого явления используют обратный диод, включенный параллельно нагрузке, или переходят к несимметричной схеме выпрямителя.

К достоинствам симметричного управляемого выпрямителя можно отнести широкий диапазон регулирования выходного напряжения и высокий уровень выходного напряжения. Недостатки определяются большим количеством элементов по сравнению с несимметричной схемой, изображенной на рис. 60.

В промышленности несимметричная схема выпрямления используется более активно. Это определяется ее достоинствами: простота управления, широкий диапазон регулирования, высокий уро-

вень выходного напряжения, большая надежность и небольшие габаритные размеры.

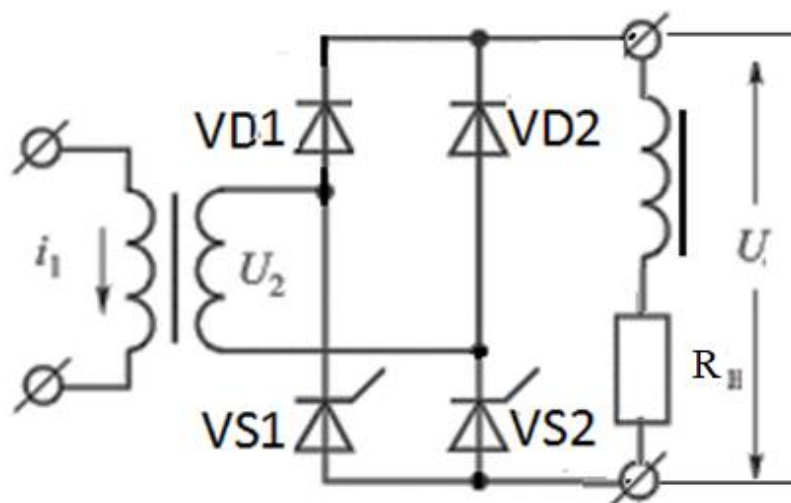


Рис. 60. Несимметричный управляемый выпрямитель

Зависимость средневыхпрямленного значения напряжения $U_{0\alpha}$ от угла регулирования α назвали регулировочной характеристикой управляемого выпрямителя. Регулировочные характеристики управляемого выпрямителя при резистивной и индуктивной нагрузках приведены на рис. 61.

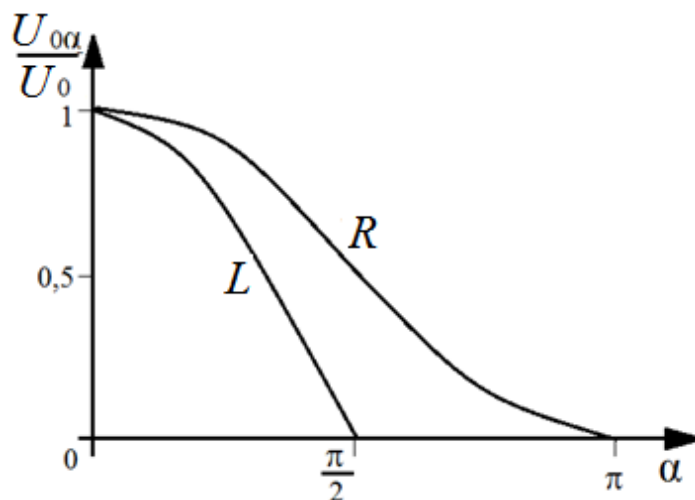


Рис. 61. Регулировочные характеристики управляемых выпрямителей

Тиристоры используют в вольтодобавочных схемах, которые по сравнению с рассмотренными имеют более высокий КПД, поскольку

преобразуют только часть энергии для нагрузки [18; 23]. Схема выпрямителя с вольтодобавкой и эюры ее работы показаны на рис. 62.

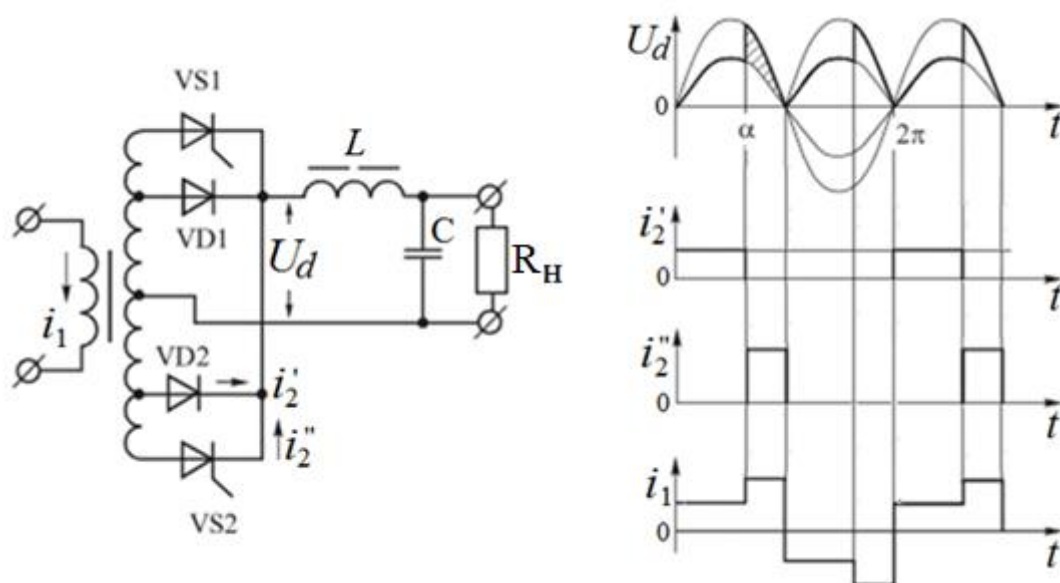


Рис. 62. Управляемый выпрямитель с вольтодобавкой

Минимальное напряжение на выходе этой схемы обеспечивается неуправляемым выпрямителем, реализованном на диодах $VD1$ и $VD2$. Повышение напряжения достигается включением тиристоров $VS1$ и $VS2$. В максимальном режиме диоды всегда закрыты и угол включения $\alpha = 0$. Такие схемы имеют хорошие энергетические показатели, но требуются дополнительные обмотки на трансформаторе.

Очень подробно работа управляемых выпрямителей с вольтодобавками рассмотрена в работах [11; 12].

2.5. Сглаживающие фильтры

Фильтры, устанавливаемые на выходе выпрямителей, предназначены для сглаживания пульсаций и относятся к классу низкочастотных фильтров. Основным критерий их работы – коэффициент сглаживания K_c , который определяется отношением абсолютных коэффициентов пульсаций входного $K_{Пвх}$ и выходного $K_{Пвых}$ сигналов,

определяемых в соответствии с выражениями (1) и (2) $K_c = \frac{K_{Пвх}}{K_{Пвых}}$.

Разделяют пассивные и активные сглаживающие фильтры. Пассивные фильтры строятся из элементов, обладающих инерционностью емкостей, индуктивностей и их комбинаций. Активные сглаживающие фильтры представляют собой схемы с частотно зависимой обратной связью. Рассмотрим такие устройства.

Простейшим методом пассивного сглаживания пульсаций является применение фильтра в виде конденсатора достаточно большой емкости, шунтирующего сопротивление нагрузки [22]. Конденсатор хорошо сглаживает пульсации, если его емкость такова, что выполняется условие $1 / (\omega C) \ll R_H$.

Через диоды выпрямителя проходит ток, заряжающий конденсатор до напряжения, близкого к максимальному. При снижении напряжения на выходе выпрямителя конденсатор начинает разряжаться через сопротивление нагрузки R_H , создавая напряжение $U_{ВЫХ}$, снижающееся по мере разряда конденсатора. В следующий полупериод процесс повторяется, как показано на рис. 63.

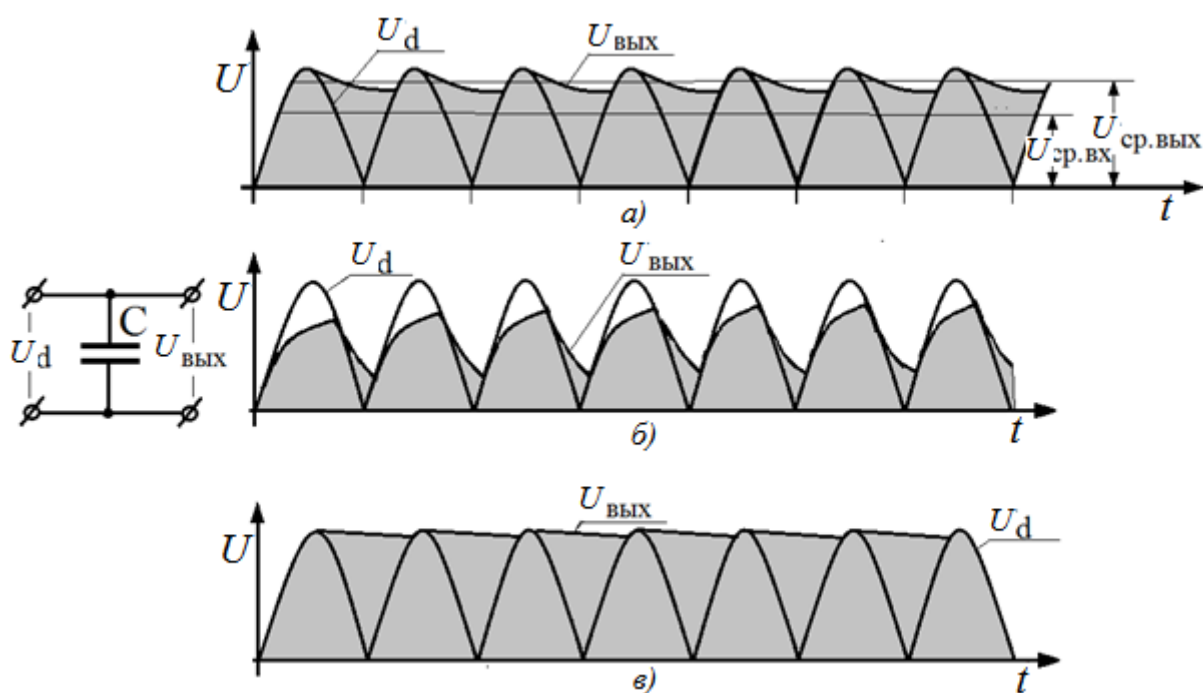


Рис. 63. Емкостный фильтр и эюры его работы

На рис. 63 показана работа емкостного фильтра при различных емкостях конденсатора C : а) $R_H > X_C$, б) $R_H < X_C$, в) $R_H \gg X_C$.

Минимальные пульсации достигаются при очень большой емкости, имеющей малое X_C , поэтому в емкостных фильтрах обычно ис-

пользуют электролитические конденсаторы, шунтируя их неполярными конденсаторами меньшей емкости для фильтрации высших гармоник.

Емкостные фильтры используются при малых токах нагрузки, т. е. при высокоомной нагрузке, поскольку с ростом тока уменьшается время разряда емкости, что приводит к росту пульсации напряжения. Достоинством емкостного фильтра является отсутствие повышения уровня напряжения или его снижение при переходных процессах [16].

Коэффициент сглаживания емкостного фильтра определяется выражением [13]

$$K_{C_c} = \frac{K_{\text{ПВХ}}}{K_{\text{ПВЫХ}}} = \sqrt{1 + (2\pi f_{\text{п}} R_{\text{н}} C_{\text{ф}})^2} \approx 2\pi f_{\text{п}} R_{\text{н}} C_{\text{ф}}, \quad (3)$$

где $f_{\text{п}}$ – частота пульсаций; $C_{\text{ф}}$ – емкость фильтра; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки.

Другим простейшим фильтром служит индуктивный фильтр, в котором индуктивность включается последовательно с нагрузкой. Обычно это большая по величине индуктивность, чаще всего дроссель. Ток через индуктивность не может измениться мгновенно. Поэтому при положительной части полуволны ток увеличивает свое значение с задержкой, а когда происходит спадание полуволны, индуктивность не дает току резко упасть, создавая запаздывание, и изменение значения тока происходит более плавно. В дросселе возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая изменению выпрямленного тока. За счет этого и происходит сглаживание пульсаций.

Индуктивное сопротивление дросселя должно быть много больше сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$. При этом переменная составляющая в основном будет выделяться на дросселе, а постоянная составляющая на нагрузке. Коэффициент сглаживания индуктивного фильтра определяется выражением [15]

$$K_{C_L} = \frac{K_{\text{ПВХ}}}{K_{\text{ПВЫХ}}} = \frac{\sqrt{R_{\text{н}}^2 + (2\pi f_{\text{п}} L_{\text{ф}})^2}}{R_{\text{н}}} \approx 2\pi f_{\text{п}} L_{\text{ф}} / R_{\text{н}}. \quad (4)$$

где $L_{\text{ф}}$ – индуктивность дросселя.

Выражения (3) и (4) позволяют, задаваясь необходимым коэффициентом пульсаций, определять номиналы L и C фильтров.

Особенностью индуктивного фильтра является то, что дроссель должен иметь диэлектрический (воздушный) зазор для исключения намагничивания проходящим постоянным током. Другая особенность состоит в том, что при отключении нагрузки возникают выбросы напряжения на выходе дросселя, а так как индуктивные фильтры применяют в основном для сильноточковых устройств, это может повредить используемое оборудование.

Наиболее часто в качестве сглаживающих фильтров применяют Г-образные индуктивно-емкостные звенья из L и C элементов, как показано на рис. 64.

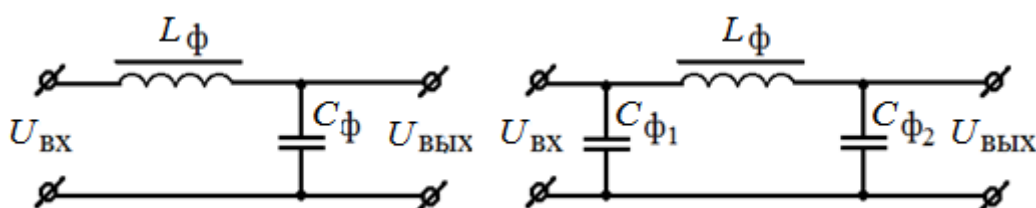


Рис. 64. Пассивные сглаживающие L и C фильтры

Коэффициент сглаживания Г-образного и П-образного фильтров ориентировочно можно определить как произведение коэффициентов сглаживания L и C фильтров:

$$K_{C_{LC}} = K_{C_L} K_{C_C} \approx (2\pi f_{\Pi})^2 C_{\Phi} L_{\Phi};$$

$$K_{C_{CLC}} = K_{C_{CL1}} K_{C_{CL}} K_{C_{CL2}} \approx (2\pi f_{\Pi})^3 C_{\Phi 1} C_{\Phi 2} L_{\Phi}.$$

2.6. Устройства стабилизации напряжения

Стабилизаторы постоянного напряжения подразделяют на линейные и импульсные.

Линейный стабилизатор напряжения является делителем напряжения, на входе которого нестабильное напряжение, а на выходе стабилизированное, которое снимается с плеча делителя. Стабилизация происходит за счет изменения сопротивления одного из плеч делителя. Сопротивление этого плеча поддерживается в таких пределах, чтобы напряжение на выходе не выходило за установленные пределы.

Линейный стабилизатор имеет низкий КПД, поскольку часть входной мощности рассеивается в виде тепла на регулирующем плече делителя напряжения. Регулирующий элемент в таких стабилизаторах должен рассеивать значительную мощность, что часто требует установки его на радиатор. Достоинствами линейного стабилизатора можно назвать простоту изготовления и отсутствие помех при его работе.

Используют два метода стабилизации:

- компенсационный;
- параметрический.

Компенсационный стабилизатор имеет эталонное напряжение и обратную связь для сравнения выходного и эталонного напряжений. Параметрический стабилизатор использует полупроводниковые приборы с малым дифференциальным сопротивлением при большом динамическом диапазоне протекающих токов.

В компенсационном стабилизаторе должны иметься два устройства: слежения за параметром и устройство управления этим параметром. Для высокой точности стабилизации необходимо наличие эталона, с которым стабилизируемый параметр сравнивается. Если при сравнении оказывается, что параметр больше эталонного значения, то схема сравнения должна дать команду схеме управления для уменьшения значения параметра. И наоборот, если параметр оказывается меньше эталонного значения, то схема сравнения должна дать команду для схемы управления на увеличение значения параметра. Этот принцип, показанный на рис. 65, используют в схемах автоматического управления всех устройств и систем, и точно так же работает стабилизатор напряжения или тока [17].

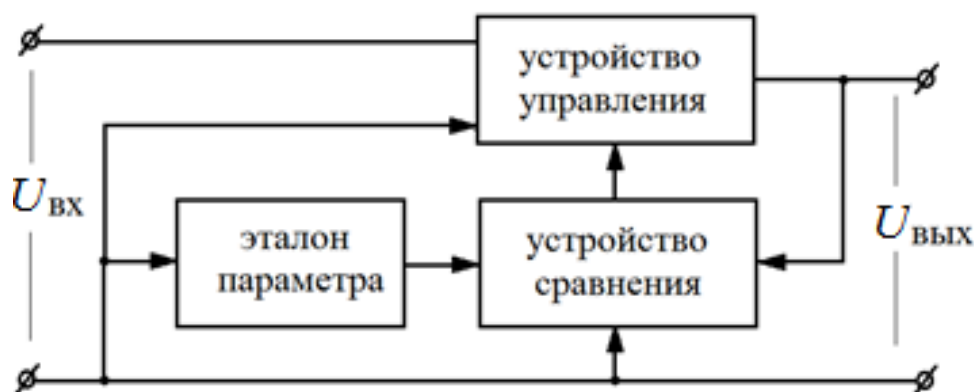


Рис. 65. Принцип автоматического управления

В параметрических стабилизаторах применяют полупроводниковый диод, называемый стабилитроном, интересное свойство которого было открыто американским физиком К. М. Зенером. Стабилитрон при прямом включении ведет себя как обычный диод и пропускает ток. Обычный диод при обратном включении не пропускает ток, а стабилитрон при достижении обратным напряжением величины, которая называется напряжением стабилизации, начинает пропускать ток в обратном направлении. Величина напряжения стабилизации устанавливается при изготовлении стабилитрона, поэтому промышленность выпускает целый ряд таких диодов на различные напряжения [20; 21].

Обратный ток возникает в результате туннельного лавинного пробоя, и ток стабилитрона возрастает до максимального значения, ограниченного резистором [17]. После достижения напряжения пробоя ток остается постоянным в широком диапазоне обратных напряжений, как показано на вольт-амперной характеристике стабилитрона на рис. 66.

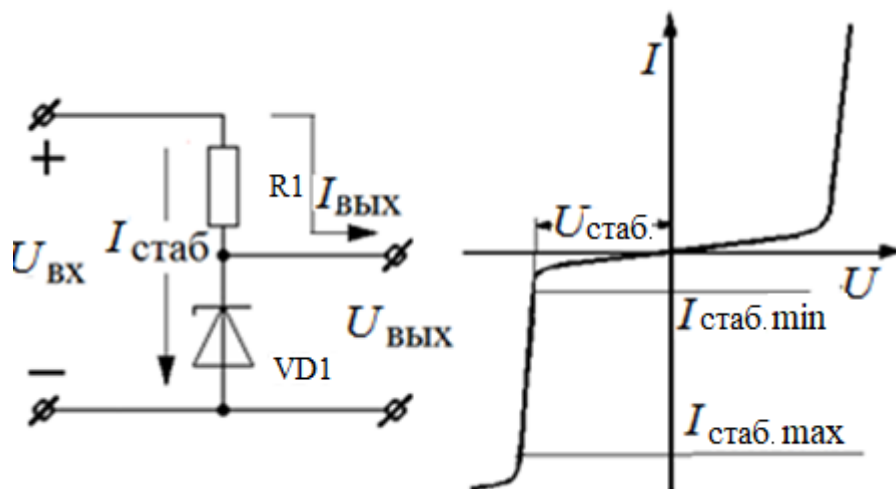


Рис. 66. Схема включения стабилитрона и его ВАХ

Отношение относительного изменения напряжения на входе стабилизатора $\Delta U_{\text{ВХ}}/U_{\text{ВХ}}$ к относительному изменению напряжения на его выходе $\Delta U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВЫХ}}$ называют коэффициентом стабилизации $K_{\text{ст}}$.

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \bigg/ \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}} U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}} U_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}} U_{\text{СТ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}} U_{\text{ВХ}}}$$

Для нормальной работы стабилизатора необходимо, чтобы ток, протекающий через стабилитрон, не был меньше, чем $I_{\text{стаб. min}}$, и не был больше, чем $I_{\text{стаб. max}}$. При изменении тока, протекающего через стабилитрон в этих пределах, на нем и на подключенной параллельно ему нагрузке R_H напряжение, называемое напряжением стабилизации $U_{\text{стаб}}$, будет оставаться постоянным. Для стабилитронов одного типа это напряжение неодинаково. Поэтому в справочниках приводятся обычно минимальная и максимальная границы значений напряжения или указываются номинальное напряжение стабилизации $U_{\text{стаб}}$ и его допустимый разброс $\Delta U_{\text{ст}}$. [20; 21].

Если напряжение $U_{\text{вх}}$, поступающее на вход стабилизатора, в процессе работы может изменяться от наименьшего значения $U_{\text{вх. min}}$ до наибольшего $U_{\text{вх. max}}$, то при неизменном напряжении на стабилитроне все изменения входного напряжения должны гаситься на резисторе R_1 . Поэтому резистор R_1 называют гасящим, или балластным. Чтобы изменения тока, протекающего через стабилитрон, не выходили за пределы $I_{\text{стаб. min}} - I_{\text{стаб. max}}$, нужно правильно рассчитать сопротивление этого резистора [23].

Резистор R_1 и дифференциальное сопротивление стабилитрона $R_{\text{ст}}$ образуют делитель, в котором распределяются как постоянная составляющая выпрямленного напряжения, так и его пульсации. Для большинства маломощных стабилитронов $R_{\text{д. стаб}}$ составляет единицы ом [16].

Амплитуда пульсаций на выходе стабилитрона выражается через амплитуду пульсаций на входе как

$$U_{\text{пвх}} = \frac{U_{\text{пвх}}}{R_1 + R_{\text{ст}}} R_{\text{ст}}.$$

Снижение пульсаций в выходном напряжении говорит об уменьшении коэффициента пульсаций, поэтому простейший стабилизатор помимо стабилизации выходного напряжения осуществляет сглаживание пульсаций [23].

Для расчетов цепи стабилизации используются следующие значения параметров стабилитронов:

- напряжение стабилизации $U_{\text{ст}}$;
- средний ток стабилизации $I_{\text{ст}}$.

Минимальный и максимальный токи стабилизации используют для расчета схем защиты по напряжению, когда возможно значительное изменение входного напряжения.

Цепь стабилизации, а фактически источник опорного напряжения, рассчитывается как простейший делитель напряжения на резисторах. Как и в делителе напряжения, в цепи стабилизации протекают два тока – ток делителя, он же ток стабилитрона $I_{ст}$, и ток нагрузочной цепи I_n . Для хорошей стабилизации ток I_n должен быть на порядок меньше $I_{ст}$. Недостатком простейшего стабилизатора на кремниевом стабилитроне является потеря части напряжения на ограничительном резисторе R1, что приводит к снижению КПД стабилизатора [23].

Такой источник опорного напряжения можно использовать в качестве самостоятельного стабилизатора для питания схем и устройств, потребляющих малый ток, таких как КМОП-микросхем, слаботочных усилительных каскадов и других, а для питания более мощных схем он не годится. У параметрического стабилизатора на стабилитроне сравнительно небольшой коэффициент стабилизации и значительное выходное сопротивление.

Когда требуется получить стабилизированное напряжение на нагрузке при большом токе применяют транзисторные стабилизаторы напряжения, которые часто строят на основе эмиттерного повторителя, где транзистор повторяет приложенное к базе напряжение (рис. 67). В такой схеме параллельный параметрический стабилизатор, подключается к эмиттерному повторителю, подавая на него эталонное напряжение [Там же].

Если напряжение на входе стабилизатора увеличится, оно передается и на выход, что приведет к увеличению тока, протекающего через нагрузку I_n , и напряжения U_n . Так как напряжение на стабилитроне практически не меняется, то рост напряжения на нагрузке вызовет уменьшение напряжения $U_{эб}$ и тока базы транзистора VT и увеличение сопротивления перехода коллектор – эмиттер. Из-за увеличения сопротивления перехода коллектор – эмиттер на переходе будет большее падение напряжения, что повлечет за собой

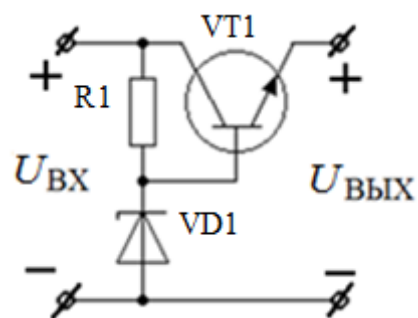


Рис. 67. Стабилизатор напряжения на биполярном транзисторе

уменьшение напряжения на нагрузке. При уменьшении входного напряжения, наоборот, напряжение $U_{эб}$ повысится, что повлечет за собой увеличение тока базы, уменьшение сопротивления перехода коллектор – эмиттер и напряжения на этом переходе [24].

В рассматриваемом стабилизаторе напряжения транзистор VT1 совместно с сопротивлением нагрузки R_n образуют делитель входного напряжения, причем сопротивление транзистора изменяется так, что компенсируются всякие изменения входного напряжения. Такой стабилизатор напряжения называют компенсационным, а транзистор VT1 с изменяющимся сопротивлением перехода – регулирующим.

Напряжение на нагрузке $U_n = U_{вых}$ отличается от напряжения на стабилитроне $U_{ст}$ на величину падения напряжения на эмиттерном переходе $U_{эб}$ транзистора VT1, т. е. $U_n = U_{ст} - U_{эб}$. Эмиттерный и коллекторный токи транзистора в десятки раз превышают ток базы, причем $I_э \approx I_к$. Поэтому при токах базы, равных единицам миллиампер, в коллекторной и эмиттерной цепях протекают токи, измеряемые десятками и сотнями миллиампер. Можно, как показано на рис. 68, а, с помощью потенциометра R2 установить необходимое стабильное напряжение на нагрузке. Можно, подключая более мощные транзисторы, как на схеме рис. 68, б, получать стабильное напряжение и при сильноточковой нагрузке [23; 24].

На схеме, приведенной на рис. 68, а, при перемещении движка переменного резистора R2 будет изменяться снимаемое с него напряжение и, следовательно, напряжение на нагрузке U_n . Так можно регулировать напряжение на нагрузке от нуля до значения, равного напряжению стабилизации стабилитрона VD минус напряжение перехода эмиттер – база транзистора VT1.

Если вместо VT1 использовать составной транзистор, состоящий из маломощного транзистора VT1 и транзистора большой мощности VT2, как показано на рис. 68, б, то можно осуществить эффективную стабилизацию напряжения при токах в нагрузке, измеряемых амперами. При таком включении транзисторов VT1 и VT2 в качестве тока базы мощного транзистора VT2 используется ток эмиттера ма-

ломощного транзистора VT1, а током нагрузки стабилизатора VD является ток базы транзистора VT1, который в десятки раз меньше тока базы транзистора VT2 [16; 24].

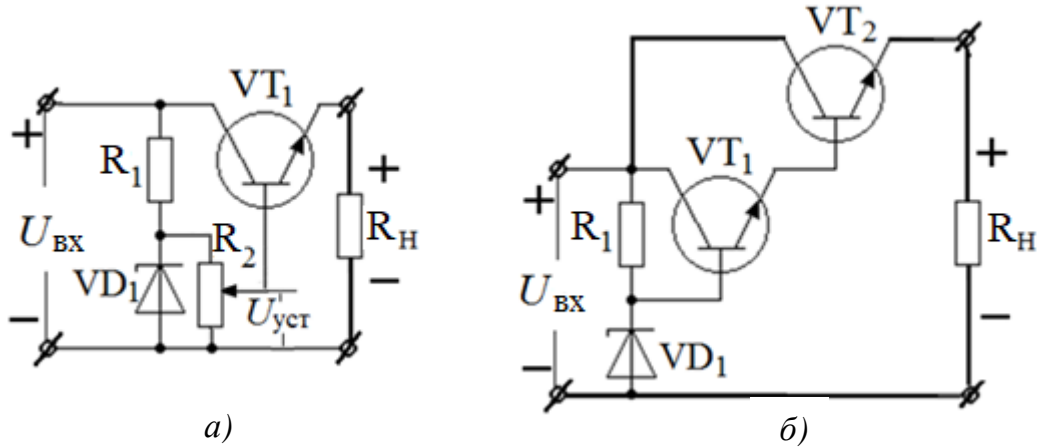


Рис. 68. Схемы управляемого и мощного стабилизаторов напряжения

Если ток базы регулирующего транзистора VT1 велик, в стабилизатор вводят дополнительный усилитель постоянного тока. Одна из схем такого стабилизатора приведена на рис. 69.

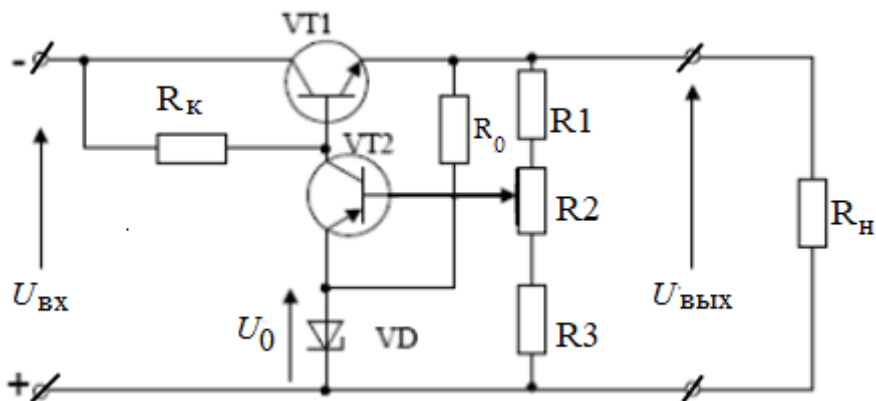


Рис. 69. Схема мощного регулируемого стабилизатора напряжения

Напряжение, подаваемое с потенциометра R3 на базу транзистора VT2, на котором выполнен дополнительный усилитель постоянного тока, называется напряжением обратной связи U_{oc} . На рисунке видно, что $U_{oc} = U_{уст} + U_{эб}$. Ток через потенциометр R3 не должен превышать 10 – 15 мА. Сопротивление резистора R1 обычно составляет несколько килоом. Коэффициент стабилизации стабилизатора около 100, а выходное сопротивление составляет десятые доли ома [16].

В описанных выше схемах в качестве эталонного напряжения используется напряжение параметрического стабилизатора, снимаемое с полупроводникового стабилитрона. Для повышения эталонного напряжения стабилитрона можно включать последовательно, суммируя их выходные напряжения и получая таким образом необходимое опорное напряжение.

Стабилизаторы напряжения компенсационного типа реализованы в серии микросхем КРЕН на различные входные и выходные напряжения. На рис. 70 показаны такие микросхемы и схемы их включения.

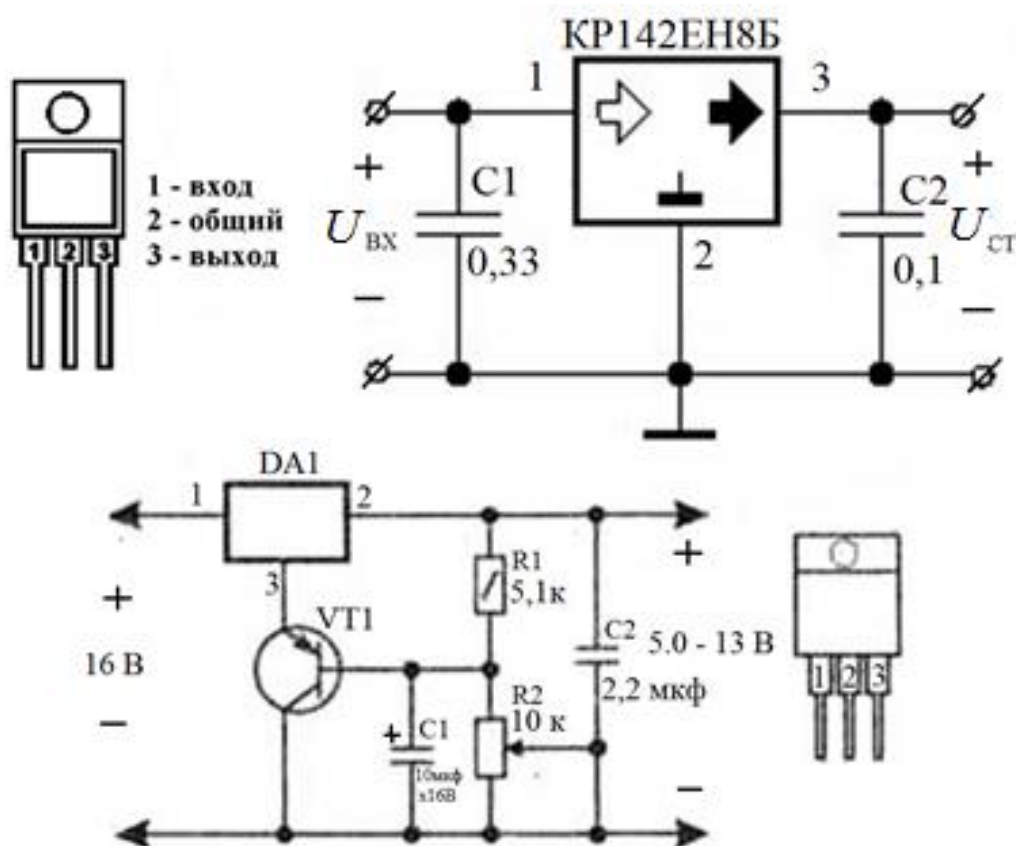


Рис. 70. Схемы включения стабилизаторов фиксированного и регулируемого напряжения серии КР142ЕН

Для повышения выходного напряжения микросхемы КРЕН можно включать, добавляя на общий вывод напряжение стабилитрона (рис. 71, а). Для повышения выходного тока параллельно стабилизатору включают мощный транзистор, превращая регулиро-

вочный транзистор внутри микросхемы в часть составного транзистора (рис. 71, б).

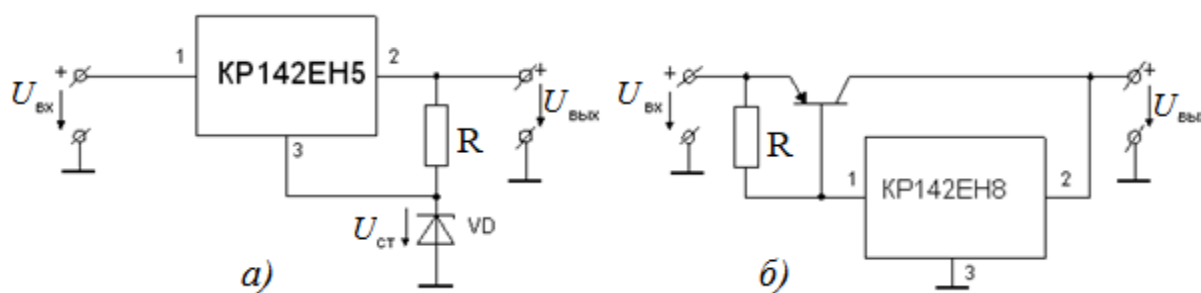


Рис. 71. Схемы включения для повышения выходных напряжений и токов

Импульсный стабилизатор использует принцип накопления энергии. Нестабилизированное напряжение формируют с помощью ключевых схем в поток коротких импульсов, которые подают на накопитель энергии (дроссель или конденсатор). При замкнутом ключе в накопителе запасается энергия, передаваемая затем в нагрузку. Управление длительностью импульсов и их периодом с помощью широтно-импульсной или частотно-импульсной модуляции импульсного потока позволяет осуществить стабилизацию выходного напряжения [24].

В качестве ключей можно использовать как биполярные, так и полевые транзисторы. Внутреннее сопротивление биполярных транзисторов больше, чем у полевых, и потери энергии на них выше. Поэтому в импульсных стабилизаторах активно используют полевые транзисторы с изолированным затвором, т. е. МДП-транзисторы технологии MOSFET, у которых при нулевом напряжении на затворе ток сток-исток равен нулю (прил. 3).

Если энергия передается, когда силовой ключ замкнут, такой преобразователь называют **прямоходовым** (forward). Если же энергия передается, когда ключ разомкнут, преобразователь называют **обратноходовым** (flyback) [23].

КПД импульсного стабилизатора выше, чем у линейного, так как используется ключевой режим работы регулирующих элементов. Другое достоинство импульсного способа стабилизации состоит в его

универсальности, позволяющей получать стабилизированные напряжения выше и ниже входного при различных полярностях выходного напряжения. Основным недостатком импульсных стабилизаторов заключается в том, что создаются импульсные помехи в выходных и входных цепях и переходные процессы длительные.

На рис. 72 дана схема понижающего стабилизатора [24].

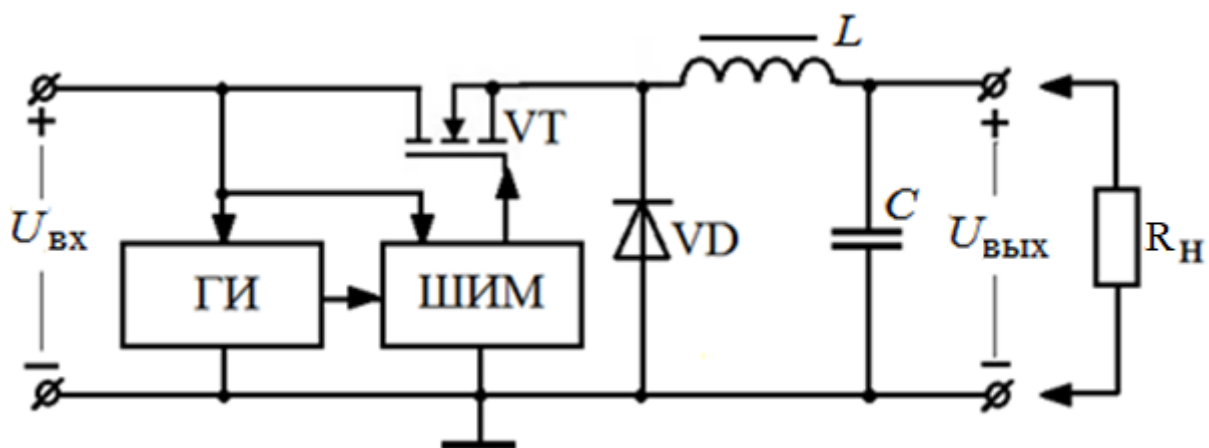


Рис. 72. Импульсный понижающий стабилизатор напряжения

Генератор импульсов (ГИ) создает поток импульсов. Модулятор ШИМ при повышении входного напряжения $U_{вх}$ сужает импульсы, а при понижении напряжения $U_{вх}$ расширяет их. Так регулируется накопление энергии на дросселе L . При замыкании ключа диод VD заперт, ток через дроссель L и через нагрузку R начинает увеличиваться во время импульса. При размыкании ключа ток через нагрузку уменьшается, но продолжает течь, так как он не может исчезнуть из-за коммутационного эффекта дросселя. И цепь разряда дросселя замкнута уже не через ключ, а через диод, который открылся [24].

При замыкании ключа VT энергия копится в дросселе, а при размыкании расходуется. Так как управление идет короткими импульсами, то высокочастотные пульсации напряжения на нагрузке просто убираются небольшим по номиналу конденсатором C . Выходное напряжение в этой схеме меньше входного, так как оно делится между дросселем и нагрузкой.

На рис. 73 приведена схема повышающего выходное напряжение импульсного стабилизатора. В этой схеме выходное напряжение

повышается относительно входного, так как на выход добавляется энергия, накопленная в дросселе.

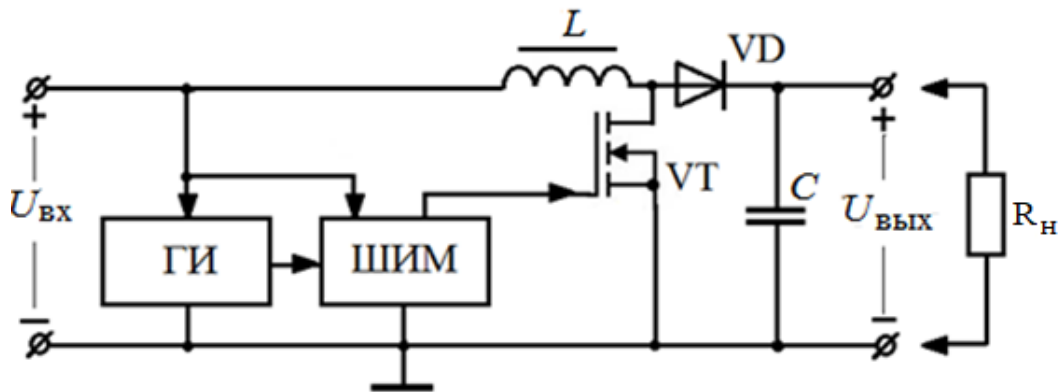


Рис. 73. Импульсный повышающий стабилизатор напряжения

При замыкании ключа диод VD заперт и ток через дроссель L начинает увеличиваться. При размыкании ключа VT ток через дроссель продолжает течь, но теперь через открытый диод, и напряжение на нагрузке определится суммой напряжений входного $U_{вх}$ и напряжения на дросселе. Выходное напряжение у такого стабилизатора больше входного, так как напряжение на дросселе прибавляется к напряжению входного источника.

Можно построить и инвертирующий стабилизатор напряжения по схеме, приведенной на рис. 74.

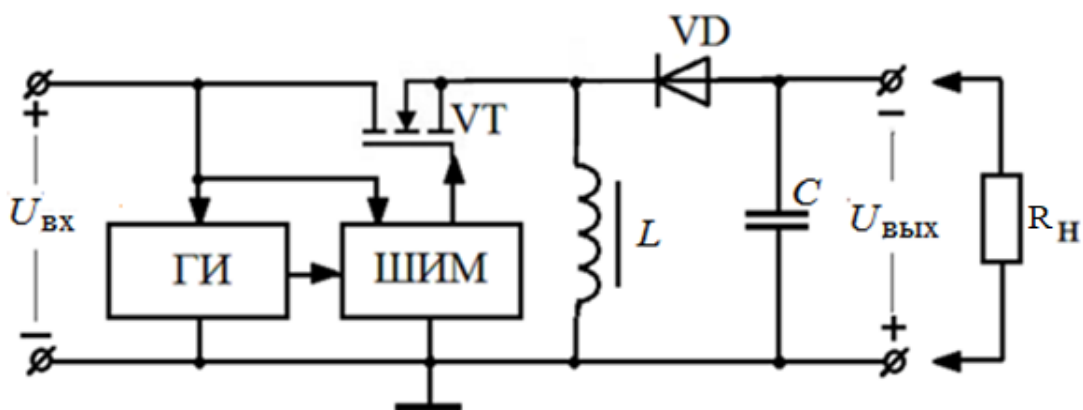


Рис. 74. Импульсный инвертирующий стабилизатор напряжения

При замкнутом ключе VT дроссель L накапливает энергию, а диод VD заперт. При размыкании ключа дроссель отдает энергию в конденсатор C и в нагрузку $R_{н}$. При этом выходное напряжение имеет отрицательную полярность по сравнению с входным источником [24].

2.7. Устройства стабилизации тока

В некоторых устройствах, например, для зарядки аккумуляторов или для питания светодиодов требуется стабильный по уровню ток нагрузки I_H . Качество стабилизации тока контролируют по двум критериям в зависимости от изменения входного напряжения или изменения сопротивления нагрузки:

1. При изменении входного напряжения $U_{ВХ}$ коэффициент стабилизации тока при постоянном сопротивлении нагрузки определяется выражением

$$K_{стI} = \frac{\Delta U_{ВХ}}{\Delta I_H} \frac{I_H}{U_{ВХ}}.$$

2. При изменении сопротивления нагрузки R_H при постоянном входном напряжении

$$K_{стI} = \frac{\Delta R_H}{R_H} \frac{I_H}{\Delta I_H}.$$

Стабилизации тока достигают, включая управляемый элемент последовательно с нагрузкой и добиваясь постоянства тока через управляемый элемент [24]. Пример такой схемы приведен на рис. 75.

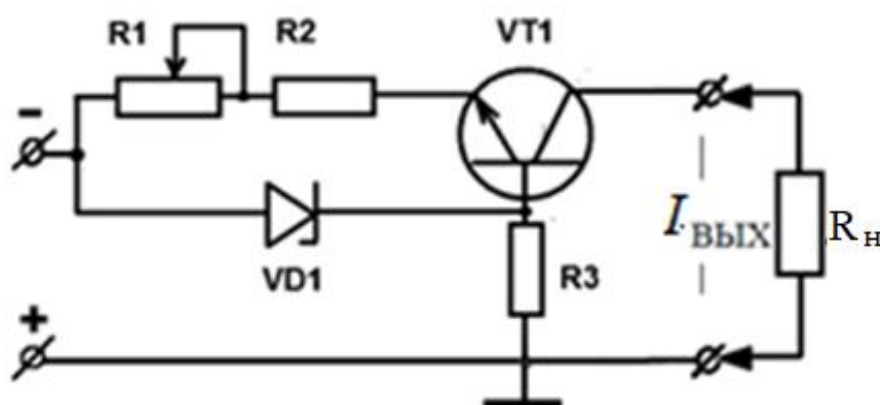


Рис. 75. Стабилизатор тока на биполярном транзисторе

Принцип работы схемы очень прост. При увеличении тока через нагрузку R_H растет падение напряжения на резисторах $R1$, $R2$ и уменьшается напряжение на переходе база – эмиттер транзистора, так как напряжение на стабилитроне $VD1$ остается неизменным. Умень-

шение напряжения на переходе база – эмиттер закрывает транзистор и повышает его сопротивление, что приводит к уменьшению тока через транзистор и нагрузку. Такой стабилизатор поддерживает выходной ток в определенных пределах, меняя при этом напряжение так, чтобы ток, протекающий по нагрузке, оставался неизменным [24].

Стабилизатор тока можно реализовать с помощью стабилизатора напряжения (рис. 76).

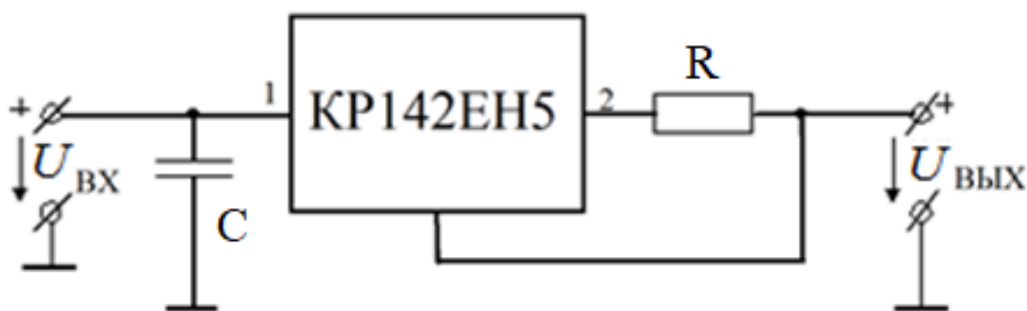


Рис. 76. Простой стабилизатор тока

Изменение сопротивления нагрузки приводит к изменению тока в выходной цепи стабилизатора. При изменении сопротивления нагрузки напряжение на полном сопротивлении делителя из сопротивления R и сопротивления нагрузки R_n останется неизменным, но перераспределится по-другому между R и R_n и на управляющий вход микросхемы КРЕН поступит корректирующее напряжение.

2.8. Инверторы и преобразователи напряжения

Преобразователи напряжения бывают двух типов: импульсные и аналоговые непрерывного действия.

Аналоговые преобразователи – это обычные силовые трансформаторы, преобразующие входное переменное напряжение (обычно однофазное или трехфазное сетевое) в необходимое по уровню выходное напряжение. Коэффициент преобразования такого преобразователя определяется коэффициентом трансформации трансформатора

$$K_{\text{пр}} = \frac{u_2}{u_1} = \frac{w_2}{w_1},$$

где u_1 – напряжение на первичной обмотке; u_2 – напряжение на вторичной обмотке; w_1 – число витков первичной обмотки; w_2 – число витков вторичной обмотки.

При подключении выпрямителя аналоговый преобразователь становится инвертором, преобразующим переменное напряжение в постоянное. Таким образом, инверторами называют устройства для преобразования постоянного тока в переменный или переменного в постоянный с возможным изменением его величины.

Идея такого преобразования основана на переключении источника постоянного напряжения с целью периодического изменения полярности напряжения на зажимах нагрузки. В качестве ключей, переключающих источник постоянного напряжения, используют транзисторы, а при больших мощностях – тиристоры. Ключевой режим работы инверторов определяет их высокий КПД, достигающий 98 % [23].

Частота переключения задается сигналами управления, формируемыми управляющей схемой (контроллером). Эта частота существенно выше стандартной частоты электрических сетей переменного тока, и инверторы работают с частотами килогерцевого диапазона.

Для изменения уровня выходного напряжения в инверторах используют трансформаторы. Для придания выходному сигналу синусоидальной формы применяют дроссели и конденсаторы. Уже на частотах от 5 до 10 кГц габаритные размеры и масса (массогабариты) трансформаторов и дросселей в разы меньше, чем на частоте 50 Гц.

Контроллер инвертора, представляющий собой управляемый генератор импульсов, управляет ключами и может решать дополнительные задачи по регулированию напряжения, стабилизации напряжения, защите от перегрузок и т. д. Если через трансформатор ток протекает один раз за период сигнала контроллера, то такой инвертор называют одноктактным, а если два раза за период, то двухтактным. Известно много схем инверторов и преобразователей напряжений [24], рассмотрим только основные из них.

На рис. 77 приведена схема однотактного инвертора, преобразующего постоянное напряжение источника в переменное напряжение требуемой амплитуды [23].

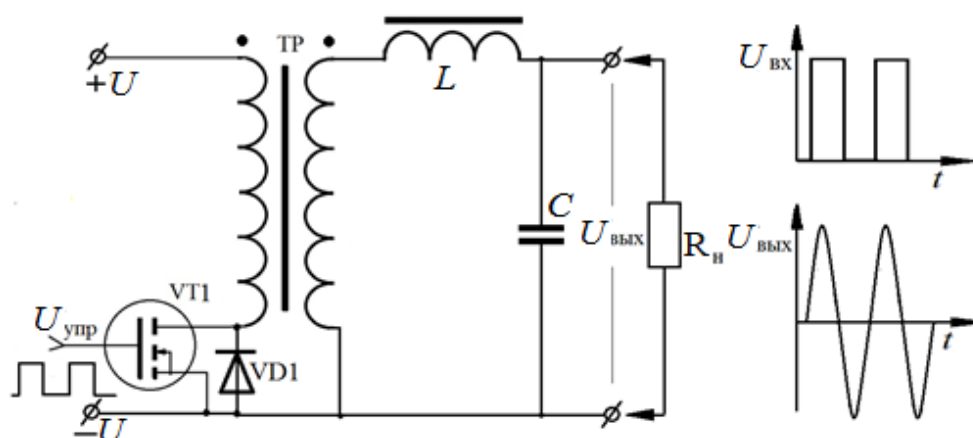


Рис. 77. Однотактный прямовходовый инвертор

Если вместо дросселя L в схему поставить выпрямительный диод, то получим преобразователь постоянного напряжения в постоянное напряжение, обычно обозначаемый DC/DC (Direct current/Direct current).

Схема работает следующим образом. Через открытый транзистор протекает ток, создавая магнитный поток в сердечнике трансформатора. Когда транзистор закрывается, запасенная в магнитопроводе энергия шунтируется диодом $VD1$. Из-за инерционности диода возникает индуктивный выброс напряжения. К закрытому транзистору приложены удвоенное напряжение питания и напряжение индуктивного выброса, поэтому транзистор $VT1$ следует выбирать с большим запасом по пробойному напряжению. На вторичной обмотке трансформатора наводится напряжение в форме меандра, которое, проходя фильтр LC , настроенный на частоту управляющего сигнала, преобразуется в синусоидальную форму [Там же].

Чтобы магнитопроводы трансформатора и диода не заходили в насыщение и не намагничивались постоянной составляющей тока, в магнитопроводах создают немагнитный зазор. Иногда на магнитопровод трансформатора наматывают дополнительную обмотку рекуперации (возвращения), через диод подключаемую к входному источнику. В этом случае при закрытии транзистора часть запасенной в магнитопроводе энергии вернется к входному источнику.

Однотактные прямовходовые инверторы строят на мощности от единиц ватт до киловатта [24]. Частота пульсаций на выходе одно-

тактных преобразователей совпадает с частотой управляющего сигнала. Однотактные обратногоходовые преобразователи по схеме не отличаются от прямых, как видно на рис. 78. Все отличие только в другой фазировке обмоток трансформатора.

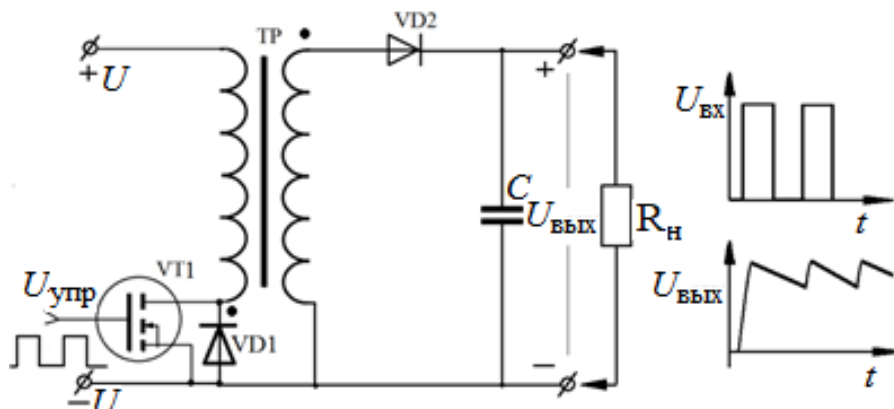


Рис. 78. Обратногоходовый однотактный преобразователь

Во время прямого хода диод VD2 закрыт и энергия запасается в трансформаторе. Форма импульса тока, проходящего через первичную обмотку, близка к треугольной. При обратном ходе управляющего напряжения транзистор VT1 закрыт, а диод VD2 открыт, и запасенная энергия поступает в нагрузку. Такие преобразователи не боятся перегрузки по току в нагрузке, но требуют более габаритного магнитопровода, и их используют на мощности не более ста ватт [24].

Несимметричный цикл перемагничивания петли гистерезиса снижает КПД однотактных преобразователей. Этому недостатка лишены двухтактные преобразователи. Схема двухтактного инвертора со средней точкой трансформатора приведена на рис. 79. В англоязычной литературе такие преобразователи получили название «Push-pull».

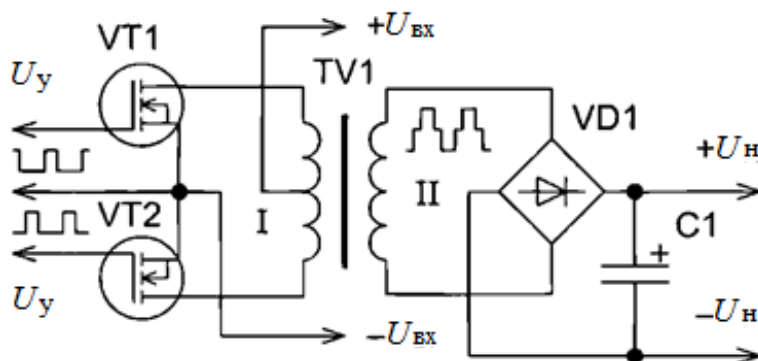


Рис. 79. Двухтактный преобразователь со средней точкой трансформатора

В этой схеме транзисторы VT1 и VT2 открываются поочередно с небольшим (1 – 3 % от периода) сдвигом между закрытием одного и открытием второго транзистора. Из-за встречного включения половин обмоток трансформатора, на которые нагружены транзисторы, в один полупериод на выход трансформируется положительный импульс, а в другой полупериод отрицательный.

Напряжение на первичной обмотке трансформатора $U_1 = 2(U_{\text{вх}} - U_r)$, где U_r – напряжение на открытом переходе сток-исток транзистора.

Частота пульсаций двухтактного преобразователя со средней точкой трансформатора в два раза превышает частоту управляющих импульсов. Петля гистерезиса в трансформаторе близка к предельной и КПД преобразователя высок. Такие инверторы могут работать с большими мощностями, их можно использовать при высоком напряжении питания, они не боятся отключения нагрузки [25].

Сигнал на выходе трансформатора со средней точкой трансформатора имеет форму меандра с защитными паузами. На рис. 80 показан инвертор постоянного напряжения 28 В в переменное напряжение 600 В с выходной мощностью 600 В и приведено фото сигнала на выходе трансформатора VT1 [Там же].

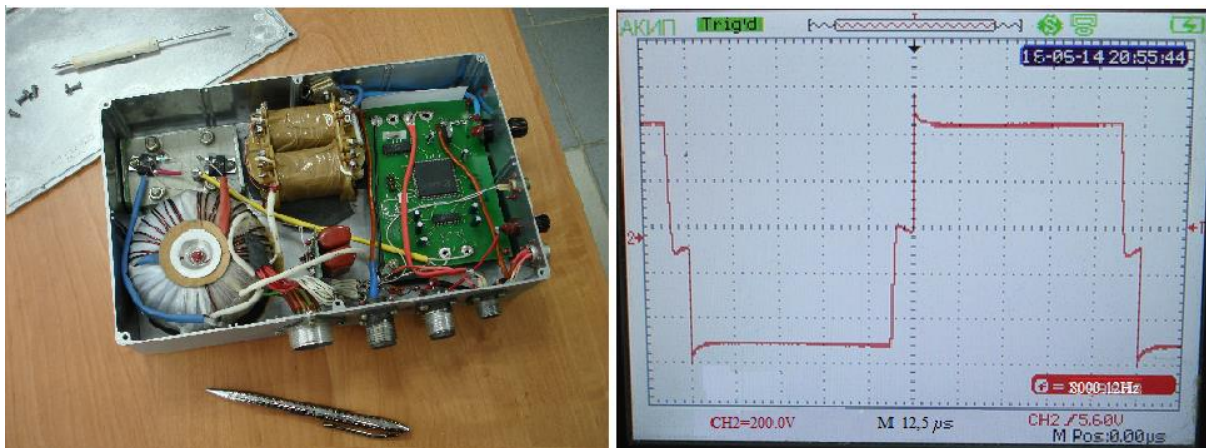


Рис. 80. Инвертор напряжения DC/AC со средней точкой трансформатора и сигнал на выходе трансформатора двухтактной схемы [Там же]

При экспериментах коэффициент полезного действия ключевой схемы по выходу трансформатора ниже 98,8 % не наблюдался, что подтверждает высокую эффективность мостовой ключевой схемы, выполненной на полевых транзисторах MOSFET. После подключения

цепи дроссель L , конденсатор C коэффициент полезного действия снизился до значения 98 %. Для экспериментов была реализована ключевая схема двухтактного инвертора со средней точкой трансформатора. В качестве ключей использованы отечественные полевые транзисторы технологии MOSFET Воронежского радиозавода типа КП793А с внутренним сопротивлением открытого перехода сток-исток 0,085 Ом. Трансформатор VT1 тороидального типа, а дроссель стержневого типа с диэлектрическим зазором. Контроллер управления ключевыми транзисторами построен на программируемой интегральной схеме Xilinx.

После преобразования меандра с помощью Г-образной цепи из дросселя и конденсатора форма сигнала становится близкой к синусоиде с небольшими искажениями из-за ступенек в меандре и неточного размера зазора в дросселе (рис. 81).

К недостаткам двухтактной схемы преобразователя со средней точкой трансформатора относят высокое напряжение на переходе сток-исток при закрытии транзистора. Оно равно удвоенному входному напряжению плюс напряжение индуктивного выброса трансформатора при переключении транзисторов. Практически это утроенное входное напряжение, что требует выбора транзисторов с большим запасом по величине пробойного напряжения [23; 24].

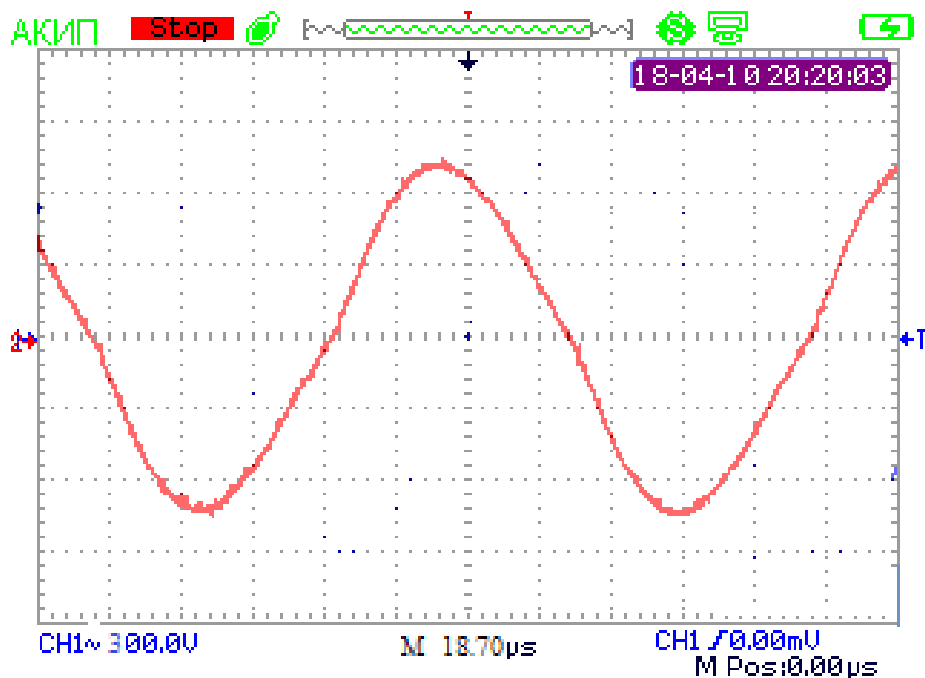


Рис. 81. Сигнал на выходе инвертора напряжения DC/AC [25]

Другая схема двухтактного преобразователя получила название мостовой, в англоязычной литературе называется «bridge» [24]. Она приведена на рис. 82.

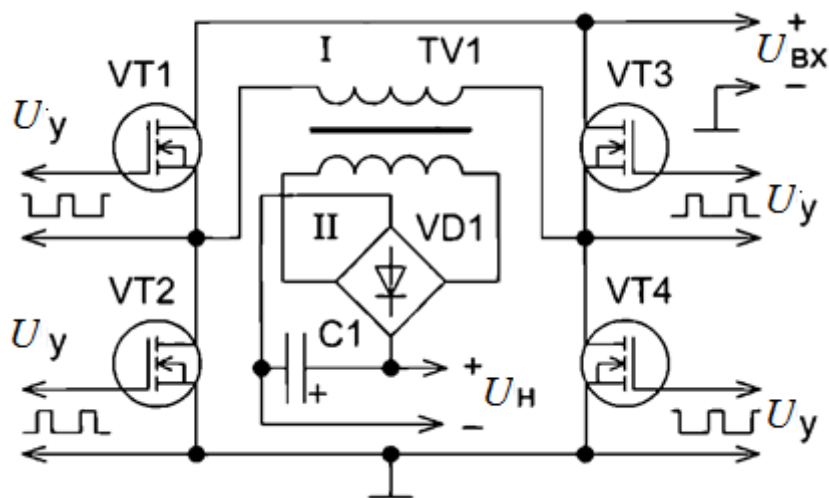


Рис. 82. Мостовой преобразователь напряжения

При подаче на транзисторы VT1 и VT4 отпирающего напряжения, а на транзисторы VT2 и VT3 запирающего напряжения по цепи $+U_{вх}$, VT1, первичная обмотка TV1, VT4 потечет ток. Трансформатор TV1 индуцирует напряжение во вторичную обмотку трансформатора и после выпрямителя напряжение U_n поступает на выход к нагрузке. Все это время транзисторы VT1 и VT4 открыты, а транзисторы VT2 и VT3 находятся в закрытом состоянии. После окончания действия управляющего импульса транзисторы VT1 и VT4 закрываются и ток в цепи $+U_{вх}$, VT1, первичная обмотка TV1, VT4 прекращается [23].

С задержкой на 1 – 3 % от периода управляющего напряжения на транзисторы VT2 и VT3 поступает открывающее напряжение, и по цепи $+U_{вх}$, VT3, первичная обмотка TV1, VT2 потечет ток. Причем ток через первичную обмотку трансформатора TV1 течет в противоположную сторону, образуя вторую ветвь петли гистерезиса магнитопровода трансформатора TV1, индуцируя во вторичной обмотке отрицательную полуволну выходного напряжения [Там же].

Таким образом с трансформатора TV1 на выпрямитель поступает напряжение, по форме близкое к меандру, со ступенькой на 1 – 3 % от периода и размахом по амплитуде

$$u_2 = \eta(2mU_{вх} - 4U_r),$$

где η – коэффициент полезного действия трансформатора; $m = \frac{w_2}{w_1}$ – коэффициент трансформации; w_1, w_2 – количество витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

Мостовые преобразователи реализуют на мощности от сотен ватт до десятков киловатт. Их достоинства в высоком КПД. Мостовая схема превосходит схему со средней точкой трансформатора по обратному напряжению, прикладываемому в ней к транзисторам, но уступает по КПД, так как потери при открытых переходах сток-исток транзисторов в четырех, а не в двух транзисторах. Обратное напряжение на транзисторах мостовой схемы распределяется между двумя транзисторами и равно входному напряжению плюс напряжение индуктивного выброса обмотки трансформатора [24].

И мостовые схемы, и преобразователи со средней точкой трансформатора могут работать как с низковольтным, так и высоковольтным питанием, и их можно включать без нагрузки. Режим короткого замыкания нагрузки приводит к выходу из строя компонентов преобразователей, поэтому необходимо дополнять преобразователи устройствами защиты. Частота пульсаций при мостовом выпрямителе равна удвоенной частоте управляющих сигналов, и пульсации легко убираются даже простейшими фильтрами.

Двухтактный полумостовой преобразователь, схема которого приведена на рис. 83, в англоязычной литературе называется «half bridge» [23]. Рассмотрим его работу.

При открытии транзистора VT1 по цепи +U, переход сток-исток транзистора VT1, первичная обмотка трансформатора TV1, конденсатор C2, –U потечет ток. На вторичной обмотке трансформатора TV1 возникнет напряжение, которое, выпрямляясь диодной сборкой VD1-4 (мостовым выпрямителем), зарядит конденсатор C3. Транзистор VT2 в это время закрыт.

При запираии транзистора VT1 и открытии транзистора VT2 по цепи +U, конденсатор C1, первичная обмотка трансформатора TV1, переход сток-исток транзистора VT2, –U ток через первичную обмотку трансформатора TV1 потечет в противоположную сторону.

На вторичной обмотке трансформатора TV1 возникнет напряжение противоположной полярности относительно первого такта, когда был открыт транзистор VT1 [23].

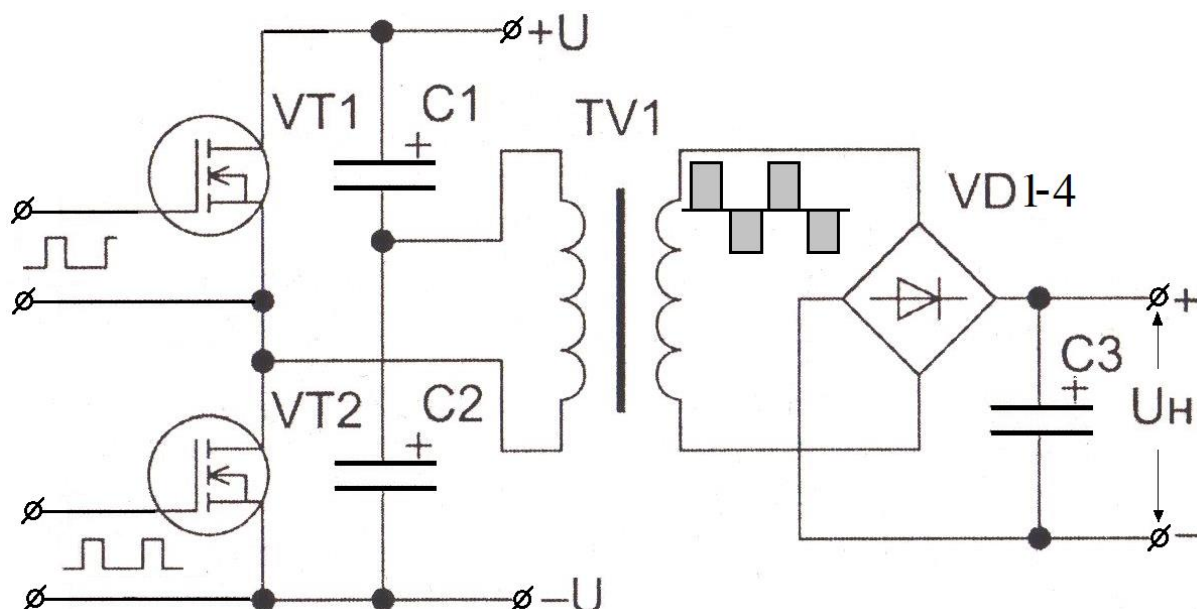


Рис. 83. Двухтактный полумостовой преобразователь

Мостовой выпрямитель VD1-4, выпрямляя, и конденсатор C3, сглаживая, обеспечат на нагрузке постоянное напряжение с частотой пульсаций вдвое большей по сравнению с частотой управляющих сигналов, подаваемых на затворы транзисторов VT1 и VT2, работающих в режиме ключей. Ток через трансформатор при смене тактов идет в противоположные стороны, обеспечивая гистерезис в магнитопроводе трансформатора близким к предельному без намагничивания сердечника [Там же].

Напряжение, приложенное к первичной обмотке импульсного трансформатора VT1 преобразователя, можно определить следующим выражением [24]:

$$u_1 = (U / 2) - U_{\text{си}} - U_{\text{т}},$$

где U – постоянное напряжение питания преобразователя; $U_{\text{си}}$ – напряжение на открытом переходе сток-исток полевого транзистора; $U_{\text{т}}$ – напряжение потерь на сопротивлении провода первичной обмотки трансформатора.

Конденсаторы $C1$ и $C2$ одинаковой емкости и при закрытых транзисторах $VT1$ и $VT2$ на каждом из них присутствует половина напряжения U , подаваемого на преобразователь. Поскольку через конденсаторы проходят импульсы тока, то они должны быть неполярными, а их емкость можно вычислить по следующей формуле [24]:

$$C1 = C2 = \frac{I_{\max}}{4\Delta U_c f_y},$$

где I_{\max} – максимальная амплитуда тока в первичной обмотке трансформатора; f_y – частота управляющих сигналов преобразователя, Гц; ΔU_c – изменение напряжения на конденсаторе за время прохождения через него импульса полного тока I_{\max} .

Такие конденсаторы выпускаются промышленностью в широком ассортименте [22].

К транзисторам приложена половина напряжения питания полумостового преобразователя, что позволяет использовать полумостовые преобразователи при высоком питающем напряжении. Фактически это основное достоинство таких преобразователей.

КПД полумостового преобразователя по сравнению с мостовым меньше, а из-за неидентичности конденсаторов, а также транзисторов в магнитопроводе возникает подмагничивание, которое дополнительно может уменьшить КПД. Отсутствие симметрии у элементов – явление частое, поэтому приходится принимать дополнительные меры для уменьшения подмагничивания магнитопровода импульсного трансформатора [23].

Полумостовые преобразователи нашли применение при выходной мощности от нескольких ватт до нескольких киловатт.

2.9. Инверторы с самовозбуждением

Инверторы с самовозбуждением (их еще называют генератором Ройера, или двухтактным блокинг-генератором) предназначены для формирования напряжения переменного тока частотой 50 – 10 000 Гц.

Они состоят из двух ключевых транзисторов и трансформатора с обмотками, подключаемых к коллекторам и базам транзисторов (рис. 84) [23]. Базовые и коллекторные обмотки включены согласно, вторичная обмотка – с любым включением.

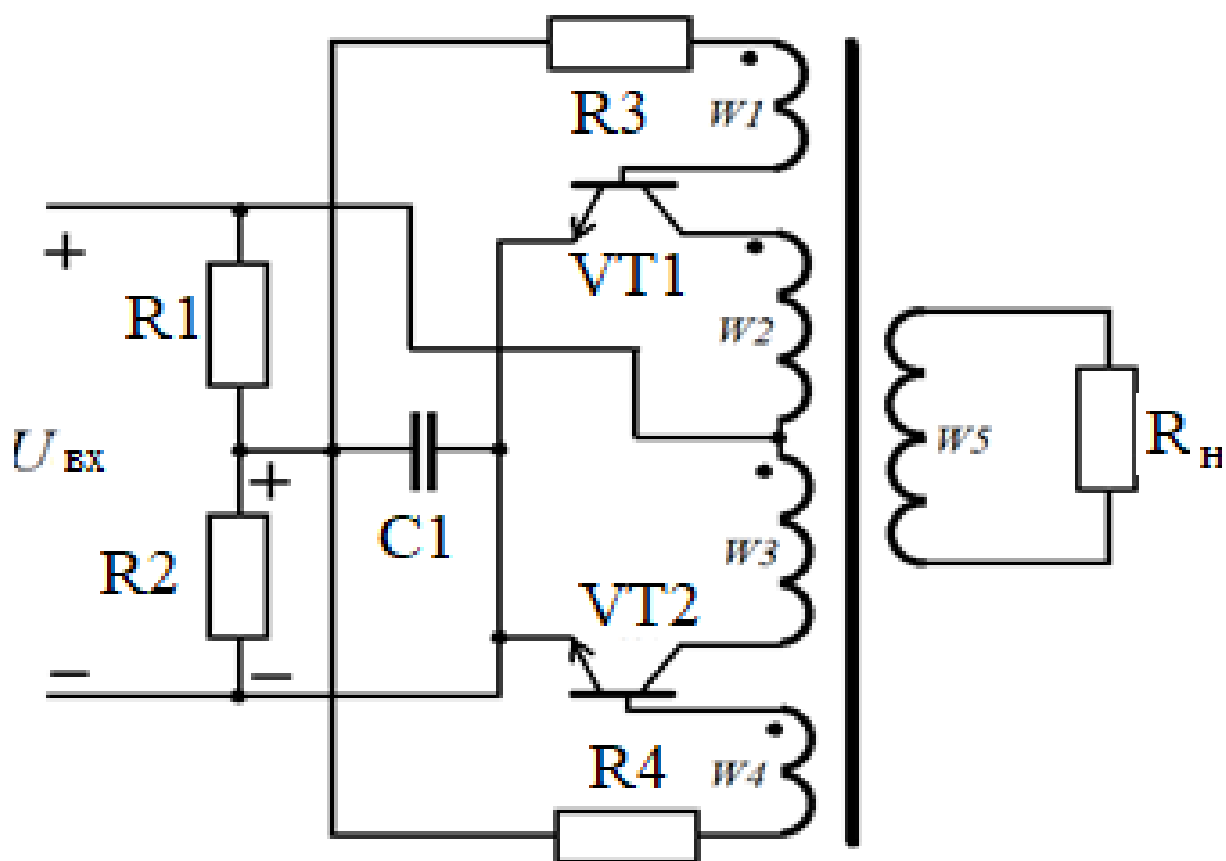


Рис. 84. Инвертор с самовозбуждением

Работа инвертора с самовозбуждением происходит так. Запускающая цепочка $R1R2$ открывает транзисторы $VT1$, $VT2$. Из-за неидентичности транзисторов ток, например транзистора $VT1$, будет больше, тогда магнитодвижущая сила обмотки $W2$ станет больше, чем у $W3$, что создаст такие напряжения на обмотках, которые запрут транзистор $VT2$, так как потенциал базы $VT2$, через который протекал меньший ток, станет отрицательным. Это создает лавинообразный процесс открывания транзистора $VT1$ за время $t_0 - t_1$, и транзистор $VT1$ будет открыт и насыщен, а $VT2$ закрыт.

Ток коллектора определится суммой токов нагрузки, тока базы и тока намагничивания, приведенных к первичной обмотке. Пока магнитопровод трансформатора не намагничен, ток намагничивания мал, как показано на рис. 85.

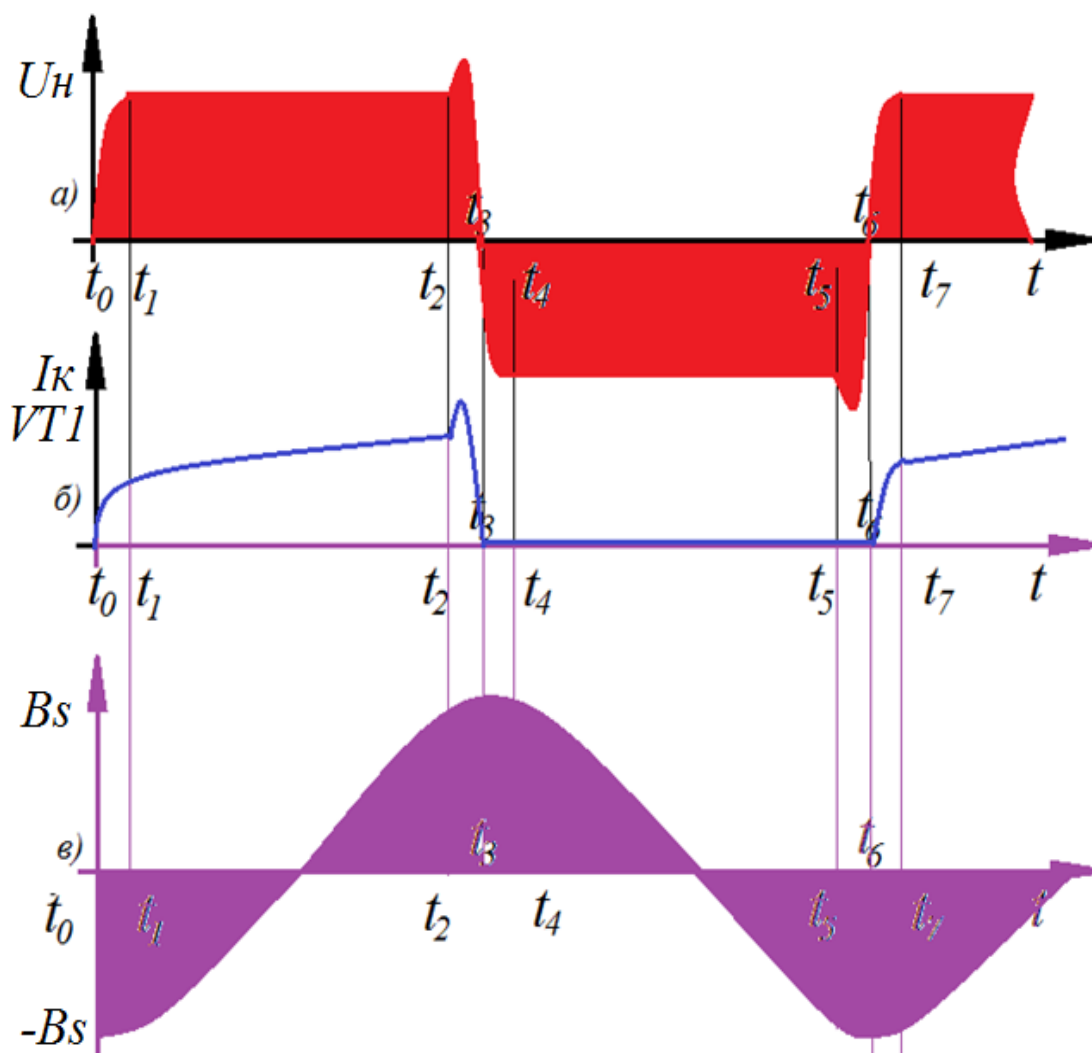


Рис. 85. Эпюры напряжений и токов инвертора с самовозбуждением

В это время ($t_0 - t_1$ на рис. 85, а) на нагрузке формируется первый полупериод напряжения. При насыщении магнитопровода рост магнитной индукции B прекращается, а ток намагничивания резко увеличивается $t_2 - t_3$ и растет ток коллектора (рис. 85, б). Из-за роста тока коллектора напряжение на нем падает и уменьшается магнитодвижущая сила от обмотки W_2 и напряжение перераспределяется между транзистором VT_1 и обмоткой W_2 . Ток транзистора VT_2 начи-

нает лавинообразно расти $t_3 - t_4$, формируя второй полупериод напряжения на нагрузке в другой полярности. Затем процесс повторяется.

Петля гистерезиса должна быть близкой к прямоугольной форме. Поэтому в качестве материала магнитопровода берут пермаллой (сплав железа и никеля) марки 79НМ или 81НМ или ферриты $MeFe_2O_3$, где Me – какой-либо ферромагнетик (Mn, Zn, Ni). Марганец-цинковые ферриты 6000НМ-1000НМ используют до сотен килогерц, а никель-цинковые 2000НН-100НН до семи мегагерц [23].

Частота коммутации определяется выражением

$$f = \frac{U_{вх} - U_{кэ\text{ нас}}}{4w_2SB},$$

где S – площадь сечения магнитопровода; w_2 – число витков обмотки W_2 трансформатора.

Частота коммутации напрямую зависит от напряжения и при разрядке источника питания уменьшается, снижая КПД. Это основной недостаток схемы инвертора с самовозбуждением. КПД схемы тем выше, чем петля гистерезиса ближе к прямоугольной форме, поэтому обычное трансформаторное железо практически не применяют.

Запускающая цепочка R1 – R2 нужна только для первоначального запуска схемы, а напряжение на R2 зависит от входного напряжения. Поэтому ее часто заменяют делителем R1-VD1. На диоде всегда около 1В и этого достаточно для запуска мощных ключей на биполярных транзисторах.

Источники с насыщающимся трансформатором широко используют при малых мощностях (10 – 20 Вт), так как энергетические показатели у них низкие. Другой недостаток состоит в том, что такие инверторы создают помехи другим радиотехническим средствам.

Для улучшения характеристик схему дополняют маломощным насыщающимся трансформатором, который насыщается в конце каждого полупериода и обеспечивает смену полярностей на обмотках до насыщения мощного силового трансформатора. Для запуска используется резистивно-емкостная цепочка (рис. 86).

В этой схеме трансформатор VT2 с обмоткой W4 фактически являются автоматическим устройством управления мощным инвертором, собранном на транзисторах VT1, VT2 и трансформаторе VT1.

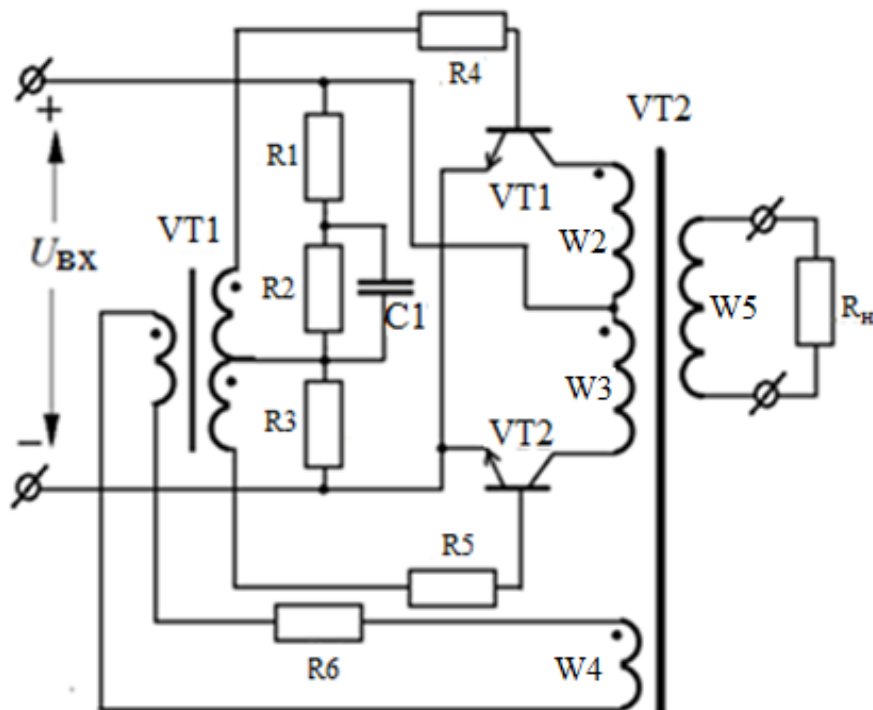


Рис. 86. Мощный инвертор с самовозбуждением

2.10. Силовые ключи

Сердцем импульсных преобразователей служат силовые ключи, которые с частотой от единиц до сотен килогерц должны с минимальными потерями пропускать через себя мощные токи от входной питающей сети, выдерживать перенапряжения из-за выбросов при переходных процессах и быть легко управляемыми. В качестве силовых управляемых ключей используют электронные лампы, тиристоры, биполярные и полевые транзисторы [26].

В современных источниках вторичного питания наиболее широко используют такие компоненты, как полевые транзисторы технологии MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) – полевой транзистор с изолированным затвором и транзисторы технологии IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), что в переводе означает биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ). Предполагается, что в скором времени им на смену могут прийти полевые

МОП транзисторы с суперпереходом или полевые транзисторы на основе нитридов галлия. Новые полупроводниковые компоненты должны повысить частоту преобразования с сотен килогерц до мегагерц, что снизит стоимость и массогабаритные показатели источников питания радиоэлектронной аппаратуры [27].

Однако с увеличением частоты коммутации растут и потери мощности, которые в импульсном источнике питания связаны с потерями в ключевых полупроводниковых приборах. Поэтому при проектировании вторичных источников питания важную роль играет оптимальный выбор силового ключа.

Потери энергии в силовых ключах можно разделить на три основные категории: потери на управление, возникающие при подаче сигнала на силовой ключ, коммутационные потери, возникающие при открытии и закрытии силового ключа, и потери на проводимость, возникающие в открытом состоянии ключа. На частотах ниже 10 кГц в ключах преобладают потери на проводимость, а на более высоких частотах преобладают потери на управление и коммутационные потери [27; 28].

В силовых ключах применяют как биполярные, так и полевые транзисторы. Главное отличие полевых транзисторов от биполярных заключается в том, что они управляются электрическим полем, которое создается напряжением, прикладываемым между затвором и истоком. Полярность управляющего напряжения зависит от типа канала транзистора. Полевые транзисторы называют униполярными, т. е. однополярными (уно – один). В полевых транзисторах в зависимости от типа канала ток осуществляется только одним типом носителей: дырками или электронами. В биполярных транзисторах ток формируется двумя носителями зарядов – электронами и дырками независимо от типа приборов [27].

Главное преимущество полевых транзисторов перед биполярными в высоком входном сопротивлении, а это означает, что при управлении им требуется малый ток. Дополнительные достоинства полевых транзисторов определяются:

- низким уровнем шумов полевых транзисторов, который обусловлен отсутствием процесса инжекции зарядов, как у биполярных транзисторов;

- высокой температурной стабильностью времени переключения;
- сравнительно высокой стойкостью к ионизирующим излучениям;
- малым потреблением мощности в проводящем состоянии, т. е. малым сопротивлением при открытии и высокий КПД устройств.

Эти достоинства и определили широкое использование полевых МОП или MOSFET транзисторов, а также МДП (металл – диэлектрик – полупроводник) транзисторов с изолированным затвором в ключевых схемах преобразователей в источниках питания. Полевые транзисторы отечественного производства приведены в прил. 4.

Однако применение биполярных и полевых транзисторов в качестве ключей в мощной технике столкнулось с проблемой задержек включения и выключения транзисторов из-за наличия в них межэлектродных емкостей (рис. 87).

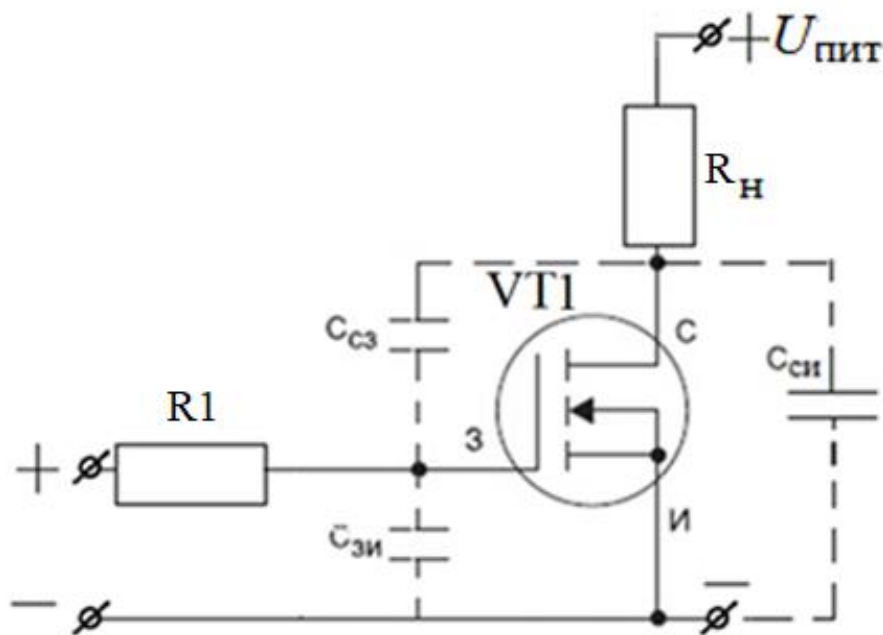


Рис. 87. Межэлектродные емкости MOSFET транзистора

Рассмотрим влияние межэлектродных емкостей подробнее. На рис. 88 показано, как происходит затягивание процесса переключения из-за межэлектродных емкостей и эффекта Миллера (эффект увеличения эквивалентной емкости инвертирующего элемента из-за обратной связи с выхода на вход при его выключении открыт Д. М. Миллером в 1920 году при исследовании ламповых триодов) [29].

При подаче напряжения на затвор в момент $t_1 - t_2$ заряжается $C_{зи}$ и перезаряжается $C_{зс}$ до порогового напряжения $U_{пор}$. Это время определяет задержку включения $t_{з\text{вкл}}$, так как транзистор еще заперт.

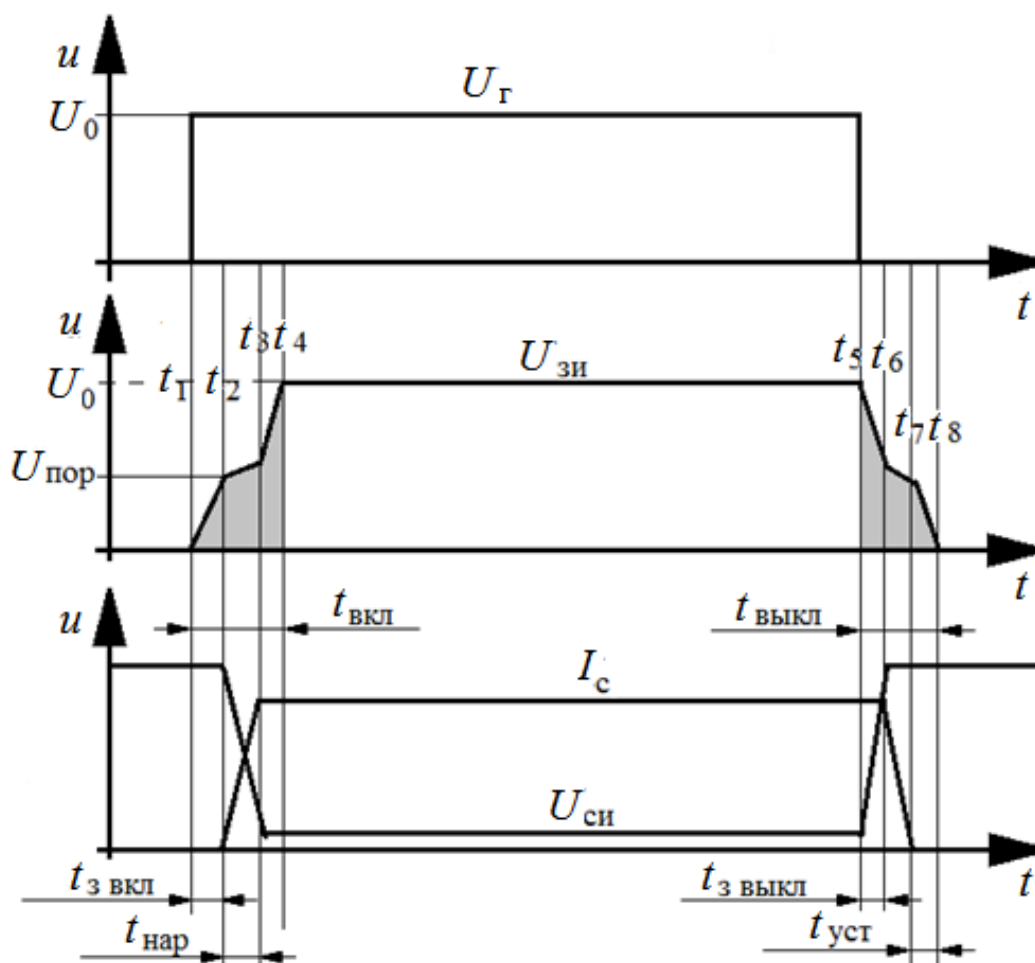


Рис. 88. Эюры управления полевым транзистором при подаче на его вход прямоугольного импульса

На интервале $t_2 - t_3$ транзистор отпирается и переходит в усиительный режим. Выходной сигнал по фазе на 180° отличается от входного. Обратная связь через $C_{зс}$ уменьшает амплитуду входного сигнала, т. е. увеличивает эквивалентную входную емкость $C_{зи}$. Перезаряд $C_{зс}$ замедляется – это и есть эффект Джона Мильтона Миллера.

По закону Миллера в активном режиме $C_{вх} = C_{зи} + (1 + SR_H)C_{зс}$, где S – крутизна характеристики сток-затвор; R_H – сопротивление нагрузки.

Входная емкость 2 – 3 нФ превращается в 300 – 400 нФ, образуя плато Миллера. В интервале времени $t_3 - t_4$ транзистор полностью от-

крыт. В момент t_4 емкость $C_{зс}$ уже перезарядилась и напряжение на затворе увеличивается до $U_{пит}$ $U_0 = U_{пит}$.

Время $t_1 - t_4$ это время включения транзистора. Выключение идет в обратном порядке, и процесс выключения растягивается.

Несколько снизить затягивание процесса коммутации удалось с помощью составных транзисторов, объединяющих полевой и биполярный транзисторы. Такие составные элементы объединили достоинства полевого и биполярного транзисторов и их стали называть IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), а на русском языке БТИЗ – биполярный транзистор с изолированным затвором [27; 28].

БТИЗ объединяет, как показано на рис. 89, а, полевой и биполярный транзисторы, поэтому его выводы стали называть затвором – З (управляющий электрод), эмиттер (Э) и коллектор (К). В зарубежной литературе затвор обозначается буквой G, эмиттер – E, а вывод коллектора – C.

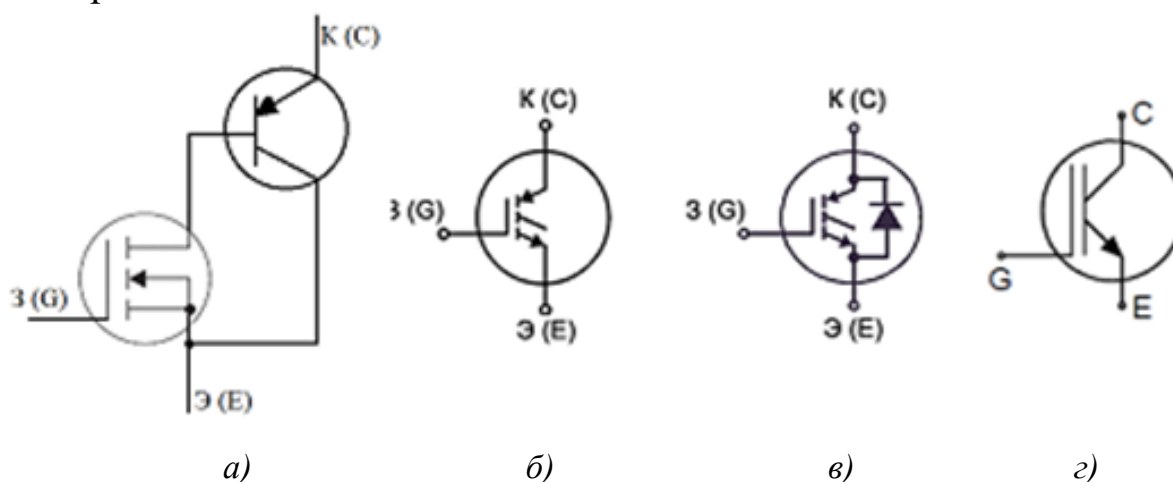


Рис. 89. Структура транзистора БТИЗ и его обозначения на электрических принципиальных схемах: а – структура; б – БТИЗ; в – БТИЗ с высокоскоростным диодом; г – БТИЗ с изолированным затвором

Для транзисторов БТИЗ были разработаны схемы, уменьшающие затягивание времени коммутации, что определило их широкое использование в мощной электронной технике. Перечень достоинств транзисторов БТИЗ можно сформулировать следующим образом:

- управляются напряжением (как полевой транзистор);
- имеют низкие потери в открытом состоянии;
- могут работать с высоковольтным напряжением (выше 1 кВ) и мощностями более 5 кВт.

Эти достоинства определили широкое применение БТИЗ на электротранспорте, в регулируемых приводах, сварочных аппаратах, импульсных регуляторах тока. Для мощной техники выпускаются транзисторные сборки, объединяющие несколько БТИЗ [28]. Пример такой сборки показан на рис. 90.

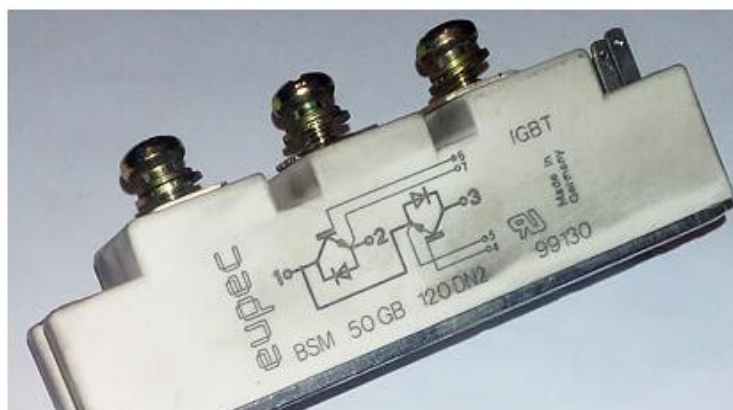


Рис. 90. Мощный модуль БТИЗ для управления трехфазным двигателем

Транзисторы MOSFET и БТИЗ взаимозаменяемые, но для высокочастотных и относительно низковольтных каскадов предпочтение получили транзисторы MOSFET, а для мощных и высоковольтных – БТИЗ.

БТИЗ транзисторы имеют хорошие характеристики на частотах до 50 кГц. На более высоких частотах у транзисторов БТИЗ увеличиваются потери. Положительные возможности БТИЗ проявляются полностью при напряжениях выше 400 В. Поэтому биполярные транзисторы с изолированным затвором часто встречаются в высоковольтных и мощных электроприборах, используемых в промышленном оборудовании [28].

2.11. Умножители напряжения

При построении высоковольтных преобразователей AC/DC и получении из низковольтного переменного напряжения высоковольтного постоянного возникают сложности с реализацией трансформаторов, так как требуется качественная электроизоляция обмоток и сами обмотки, требуя большого количества витков, имеют большие габаритные размеры. Если нагрузка высоковольтного преобразователя вы-

сокоомная, то стали использовать умножители напряжения, построенные на одних диодах и конденсаторах. Умножители напряжения часто называют по фамилии одного из авторов схемой Латура [30].

Принципиальная схема простейшего удвоителя напряжения приведена на рис. 91.

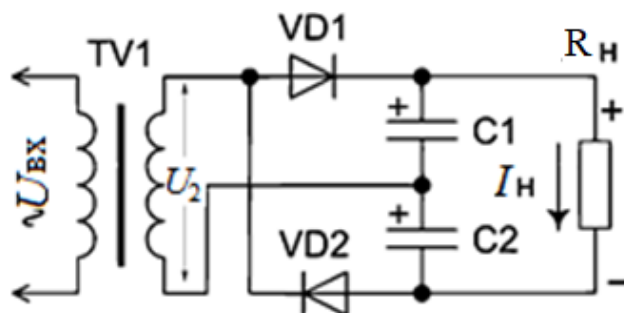


Рис. 91. Симметричный удвоитель напряжения Латура – Делона – Гренашера

В положительный полупериод выходного напряжения трансформатора диод VD1 открыт, а диод VD2 закрыт и обратный ток через него пренебрежимо мал. Ток через открытый диод VD1 заряжает конденсатор C1 до максимальной амплитуды напряжения U_2 .

Во время второго полупериода диод VD1 закрыт, а диод VD2 открыт и через него заряжается конденсатор C2, причем в той же полярности, что и заряженный первой полувольтной конденсатор C1. Таким образом, за время периода входного переменного напряжения к нагрузке будет приложена двойная амплитуда напряжения U_2 , поскольку конденсаторы C1 и C2 включены последовательно.

Конечно емкость конденсаторов должна быть такой, чтобы за период переменного сигнала они существенно не разряжались. Но при малых токах через нагрузку их номиналы невелики. Выходное напряжение оказывается кратно амплитуде вторичного напряжения трансформатора, и схема получила название удвоителя напряжений. Фактически схема содержит два однополупериодных выпрямителя, работающих на емкостную нагрузку с временным сдвигом на половину периода входного переменного напряжения.

Конденсаторы C1 и C2 заряжаются поочередно со сдвигом на половину периода входного сигнала, а значит, выпрямленное напряжение будет иметь пульсации с частотой в два раза выше частоты входного сигнала. Ток постоянной составляющей в трансформаторе

каждый полупериод меняет свое направление, поэтому и подмагничивание магнитопровода отсутствует. В принципе, такой умножитель напряжения может спокойно работать и без трансформатора, все что ему нужно – это входной переменный сигнал.

Недостатком схемы считается необходимость одинаковых по емкости конденсаторов, что в результате старения устройства может не соблюдаться. При различных величинах емкостей частота пульсаций снижается вплоть до частоты питающей сети. Поэтому рекомендуется выбирать емкости с запасом и параллельно им ставить очень высокоомные выравнивающие резисторы одинакового номинала [30].

Несимметричные умножители напряжения по принципу действия могут быть не похожи на симметричные удвоители напряжения. Например, на рис. 92 показаны три варианта схемы умножителя напряжения в три раза (рис. 92, а) с указанием напряжений на конденсаторах схем и три схемы умножителей напряжения в четыре раза (рис. 92, б).

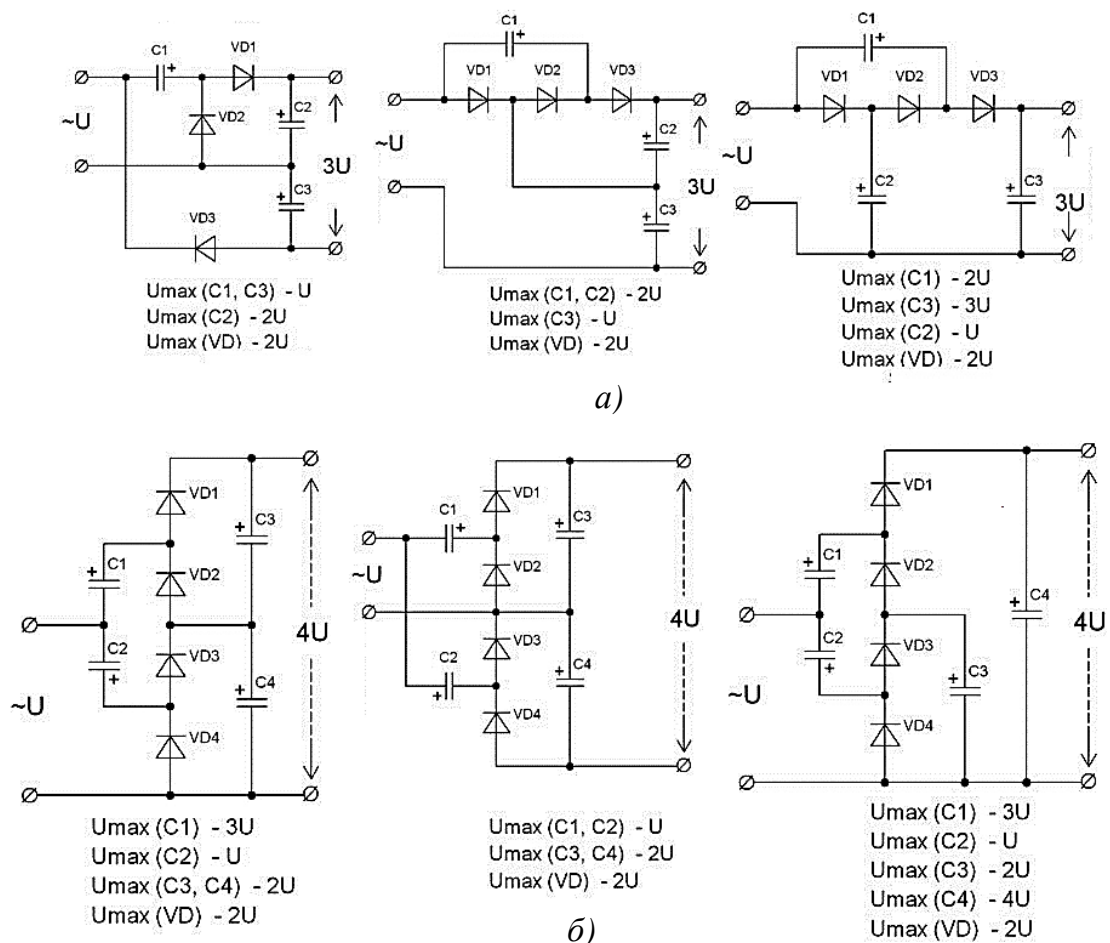


Рис. 92. Три варианта схемы утроителей напряжения в три и четыре раза

На рис. 93 приведены схемы умножения в пять и шесть раз, построенные по принципу, близкому к принципу, предложенному схемой Латура, но отличающиеся от него [30].

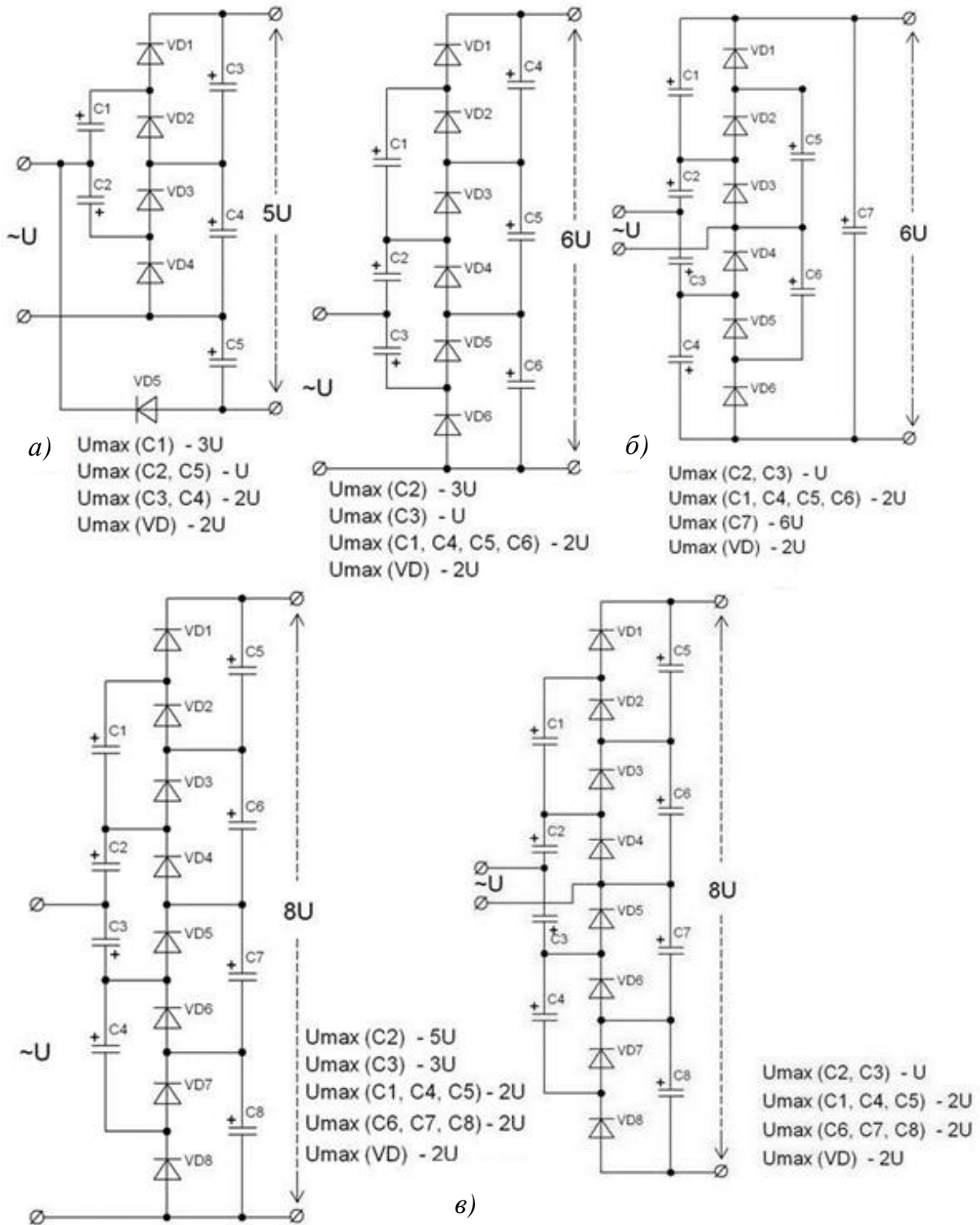


Рис. 93. Схемы умножения напряжения: а – в пять; б – в шесть; в – в восемь раз

На рис. 94 показана схема умножителя напряжения Шенкеля – Вилларда. Отличительная особенность этой схемы в том, что она позволяет умножить напряжение в n раз [30].

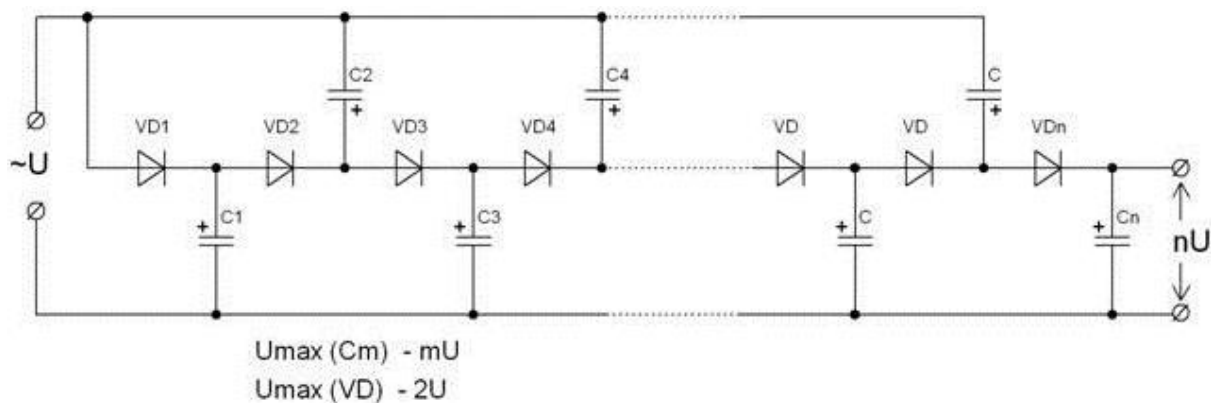


Рис. 94. Умножитель напряжения Шенкеля – Вилларда

Но есть и другие способы умножения напряжения в n раз. Например, на рис. 95 приведена схема, позволяющая дополнительными наборами мостовых выпрямителей получить необходимый коэффициент умножения напряжения.

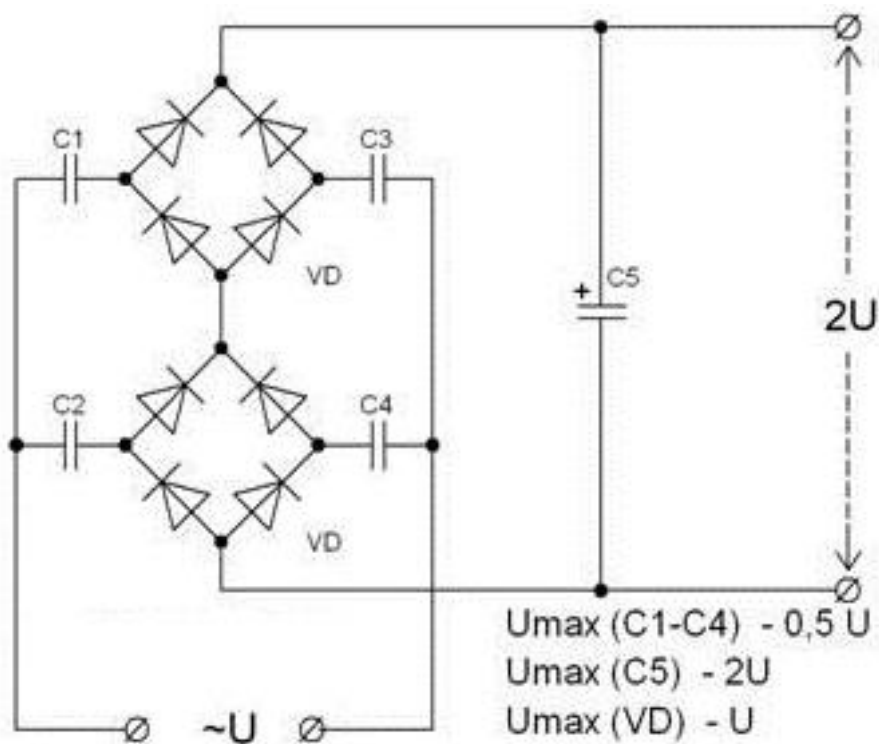


Рис. 95. Удвоитель напряжения на диодных мостах

Контрольные вопросы

1. Какую работу выполняют вторичные источники электропитания?
2. Что такое инверторы электропитания?
3. Чем отличаются вторичные источники электропитания от первичных?
4. Что такое активная мощность?
5. Что такое реактивная мощность?
6. Как определить полную мощность?
7. При какой нагрузке полная мощность равна потребляемой?
8. Что такое коэффициент мощности?
9. Что такое дифференциальное сопротивление нагрузки?
10. В каких единицах измеряется КПД?
11. Как определяется коэффициент пульсаций?
12. Как определяется абсолютный коэффициент пульсаций?
13. Что такое внешняя характеристика вторичного источника питания?
14. В каких единицах измеряется индукция?
15. На каких принципах основана работа трансформатора?
16. Для чего предназначены трансформаторы?
17. Что характеризует площадь петли гистерезиса?
18. Какие типы конструкций магнитопроводов используют?
19. Что такое магнитный поток рассеяния?
20. Что такое токи Фуко?
21. Как уменьшают токи Фуко?
22. Какие материалы используют для изготовления магнитопроводов трансформаторов?
23. Что такое альсифер?
24. Что такое феррит?
25. Как обозначают соединение обмоток трехфазного трансформатора?

26. Как обозначают начала и концы обмоток высшего на трансформаторе напряжения?
27. Как обозначают начала и концы обмоток низшего на трансформаторе напряжения?
28. Какое соединение обмоток трехфазного трансформатора самое простое и дешевое?
29. Как определяется индуктивность дросселя?
30. Зачем в дроссели вводят немагнитный зазор?
31. Что такое коэффициент формы?
32. Как определяется габаритная мощность магнитопровода?
33. Как определяется добротность дросселя?
34. На каких частотах применяют ферриты в качестве магнитопровода?
35. Как соединять диоды параллельно и последовательно и зачем?
36. Что такое катодная и анодная группы диодов?
37. Как определяют коэффициент выпрямления по напряжению?
38. Что такое пульсность?
39. В чем недостатки однополупериодного выпрямителя?
40. Какие типы двухполупериодных выпрямителей известны?
41. В чем недостатки мостовых схем выпрямителей?
42. В чем достоинства мостовых выпрямителей?
43. Какие группы диодов задействованы в схеме Ларионова?
44. На каких полупроводниковых элементах делают управляемые выпрямители?
45. Что делают сглаживающие фильтры?
46. Как определить коэффициент сглаживания?
47. Для уменьшения пульсаций емкость нагрузки нужно уменьшать или увеличивать?
48. Для уменьшения пульсаций индуктивность нагрузки нужно уменьшать или увеличивать?

49. Какой фильтр лучше сглаживает пульсации Г-образный или П-образный?

50. Что такое линейный стабилизатор?

51. Какие методы стабилизации известны?

52. Что такое параметрический стабилизатор напряжения?

53. Как определить коэффициент стабилизации?

54. Как работает импульсный стабилизатор?

55. Что такое прямовходовый стабилизатор?

56. Что такое обратновходовый стабилизатор?

57. В чем недостатки однотактных инвертеров?

58. В чем достоинства двухтактного инвертора со средней точкой трансформатора?

59. В чем недостаток двухтактного инвертора со средней точкой трансформатора?

60. Почему в двухтактных инверторах необходимо делать ступеньку между положительной и отрицательной полуволнами управляющего напряжения?

61. В чем достоинства мостового инвертора?

62. В чем недостатки мостового инвертора?

63. На какие мощности реализуют инверторы?

64. В чем достоинства полумостового инвертора?

65. В чем недостатки полумостового инвертора?

66. Как определить номиналы емкостей в полумостовом инверторе?

67. На каком принципе работают инверторы с самовозбуждением?

68. На каких частотах работают инверторы с самовозбуждением?

69. В чем преимущество полевых транзисторов перед биполярными в силовых ключах?

70. Что такое транзисторы МОП и MOSFET?

71. Почему ключи на биполярных транзисторах не выгодны?

72. Что такое транзистор IGBT или БТИЗ?
73. Почему транзисторы БТИЗ эффективнее МОП транзисторов?
74. О чем закон Миллера?
75. В чем достоинства БТИЗ транзисторов, применяемых в ключевых схемах?
76. Что реализует схема Латура?
77. Могут ли умножители напряжения работать без трансформатора?
78. Какая схема позволяет умножать напряжение в n раз?
79. Можно ли умножать напряжение с помощью диодных мостов?
80. Что такое коэффициенты заполнения сталью и медью?

Глава 3. РАСЧЕТ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

3.1. Расчет трансформаторов

Исходными данными для расчета являются:

- частота тока питающей сети;
- электрическая схема трансформатора;
- действующие значения напряжений на всех обмотках трансформатора;
- максимальные действующие значения токов во всех обмотках;
- условия работы трансформатора.

Электрические схемы трансформаторов приведены на рис. 96. Первичная обмотка у трансформаторов может рассчитываться на напряжение питающей сети (рис. 96, а) и иметь дополнительные выходы (рис. 96, б).

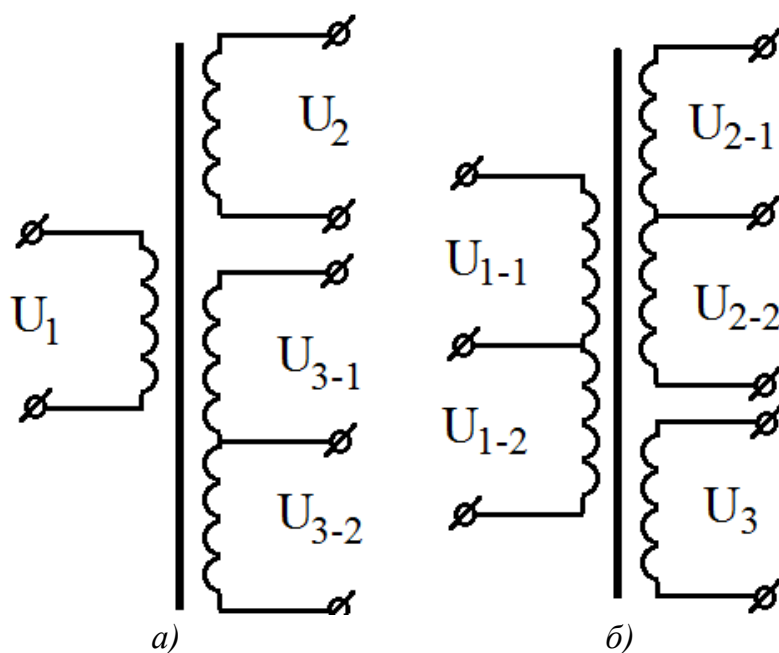


Рис. 96. Электрические схемы трансформаторов

1. *Выбор типа магнитопровода.* При выборе магнитопровода следует исходить из следующих соображений [11 – 16]:

- для сети 50 Гц броневые трансформаторы проще стержневых по конструкции, так как имеют одну катушку;
- для сети 50 Гц при мощностях в сотни ватт, а для сети 400 Гц при мощности до нескольких киловатт предпочтительны стержневые

трансформаторы, так как меньше броневых по габаритным размерам и массе;

- тороидальные трансформаторы целесообразно использовать при частоте 400 Гц и мощности до 300 – 500 Вт, но они требуют специального оборудования для намотки обмоток;

- на частотах выше 2 кГц используют прессованные броневые или тороидальные магнитопроводы.

2. *Расчет коэффициента полезного действия.* По графикам [14], приведенным на рис. 97, находим КПД трансформатора в зависимости от частоты сети и суммарной активной мощности P_2 , выделяемой во вторичных цепях (приходящаяся на одну фазу).

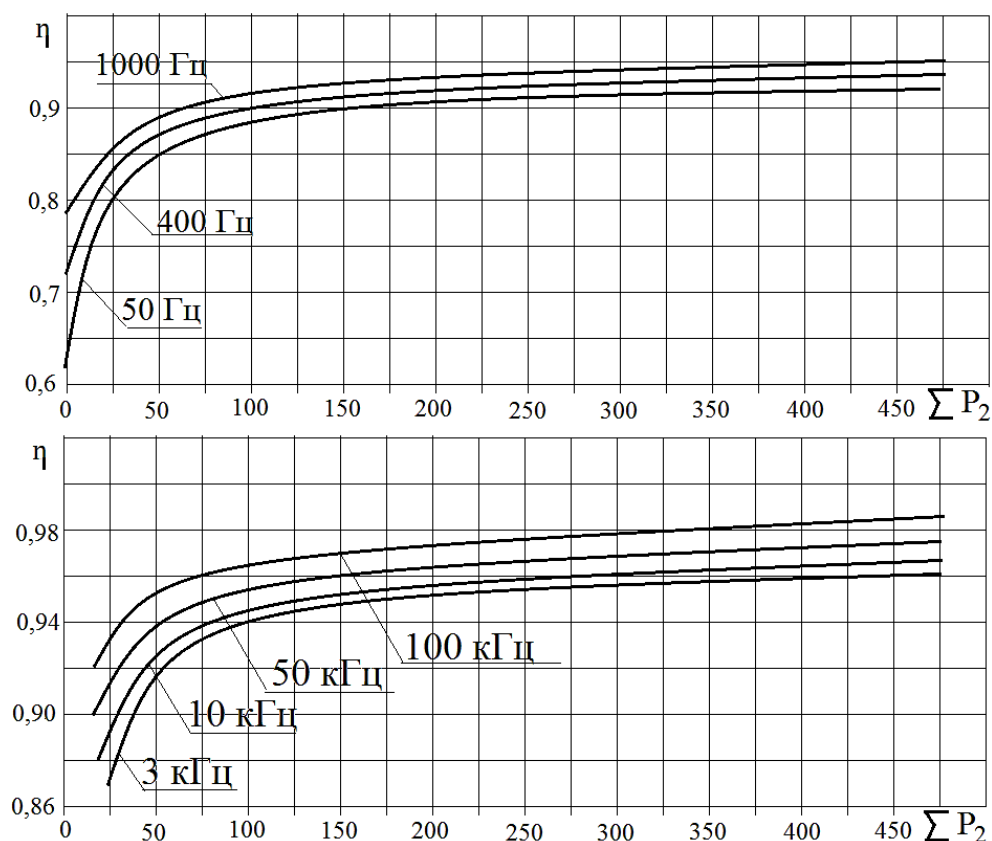


Рис. 97. Зависимости КПД от суммарной выходной мощности

3. *Определение расчетной мощности однофазного трансформатора при работе на активную нагрузку.*

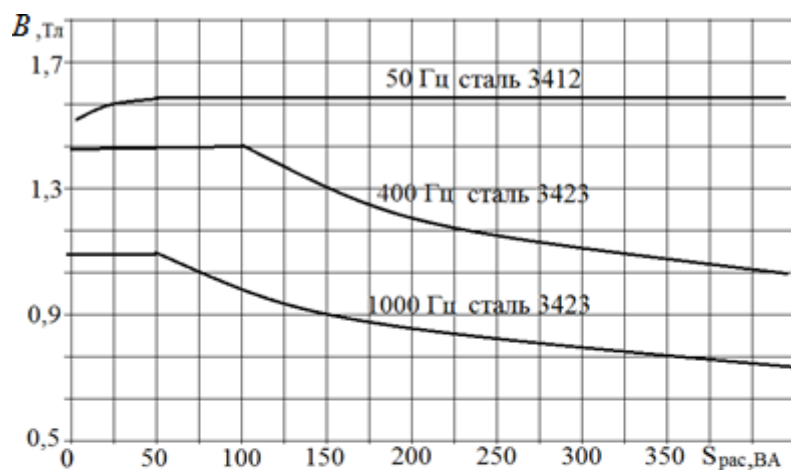
$$S_{\text{рас}} = [(1 + \eta) / 2\eta] \sum P_2, \quad (5)$$

где $P_2 = \frac{1}{2} (U_1 I_1 + \sum_{i=2}^n U_i I_i)$.

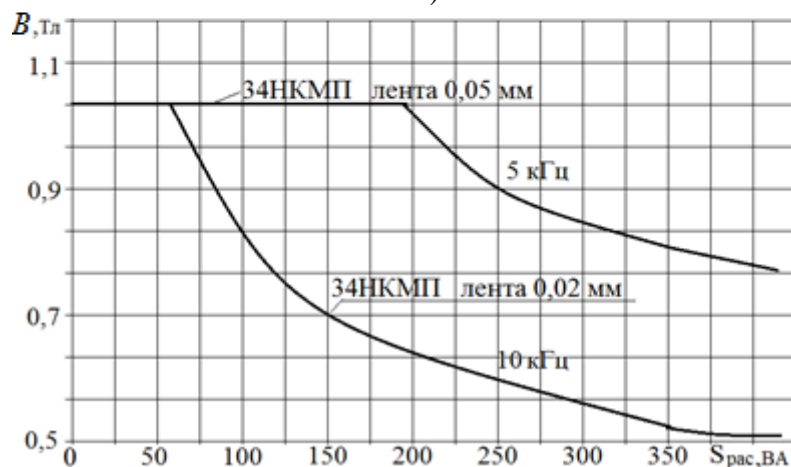
Выражение (5) справедливо и для трехфазных трансформаторов, так как они рассчитываются на одну фазу.

4. *Выбор материала магнитопровода.* На частоте 50 Гц применяют горячекатаные стали марок 1511, 1512, 1513, 1514 и холоднокатаные стали 3411, 3412, 3413, 3414, 3415 с толщиной ленты от 0,28 до 0,5 мм. На частоте 400 Гц используют горячекатаную сталь 1521 и холоднокатаные 3421 – 3425 с толщиной ленты 0,05, 0,08, 0,1, 0,15, 0,2, 0,22, 0,35 мм. Для магнитопроводов на частотах до десятков килогерц используют пермалоевые сплавы 50НП, 34НКНП, 47НК, 79НМ, 40НКМ (цифры указывают процент никеля в сплаве), а с 20 кГц и выше марганцево-цинковые ферриты 700НМ, 1000НМ1, 1500НМ1, 1500НМ3, 2000НМ1, 2000НМ3.

Величину магнитной индукции B магнитопровода определяем по рис. 98 или справочным электротехническим данным [14].



а)



б)

Рис. 98. Зависимость величины магнитной индукции от выходной мощности: а – для ленточных броневых и стержневых трансформаторов, б – для ленточных тороидальных трансформаторов

5. *Определение типоразмера трансформатора.* Для определения типоразмера трансформатора определим величину произведения площади сердечника S_c и площади окна под намотку S_o

$$S_c S_o = S_{\text{рас}} 10^2 / 2k_{\text{ф}} f B J k_c k_o, \quad (6)$$

где $k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы сигнала (для синусоиды $k_{\text{ф}} = 1,11$, для прямоугольных импульсов $k_{\text{ф}} = 1/\sqrt{2\tau_{\text{и}}/T}$, $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса, T – период); B – магнитная индукция; J – плотность тока; k_c – коэффициент заполнения сталью; k_o – коэффициент заполнения окна.

На рис. 99 приведена зависимость величины магнитной индукции от расчетной мощности для кольцевого трансформатора на марганцево-цинковом феррите марки 2000НМ1.

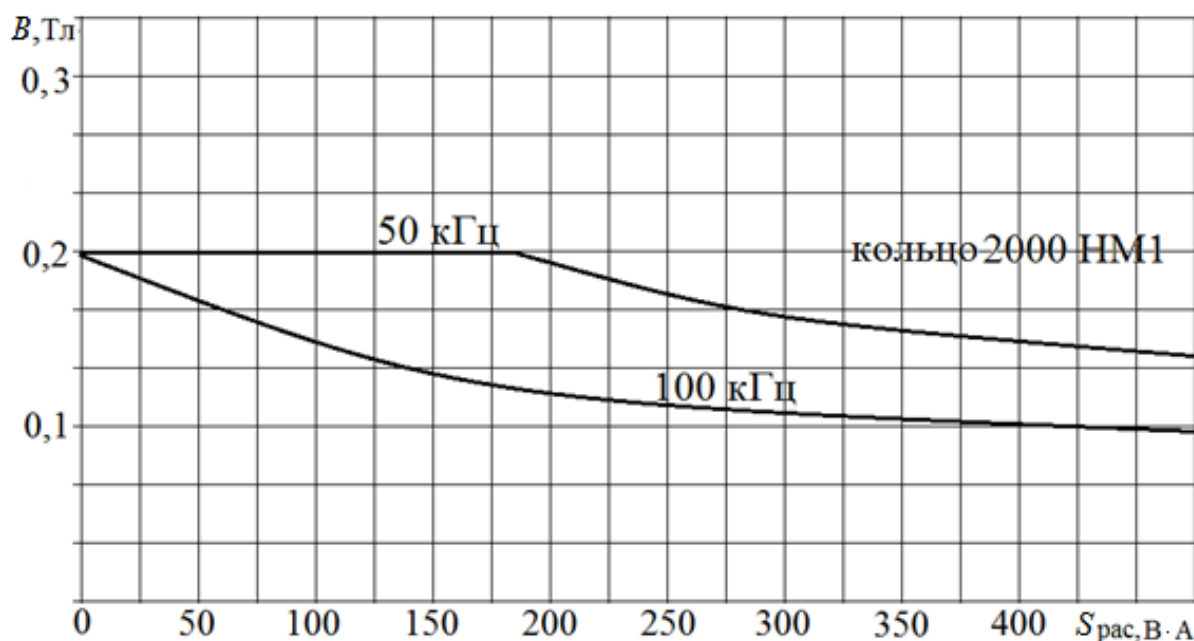


Рис. 99. Взаимосвязь магнитной индукции ферритовых колец с выходной мощностью [14]

На рис. 100 показана зависимость плотности тока J от расчетной мощности для различных частот [Там же]. Графики приведены для температуры, не превышающей 50 °С.

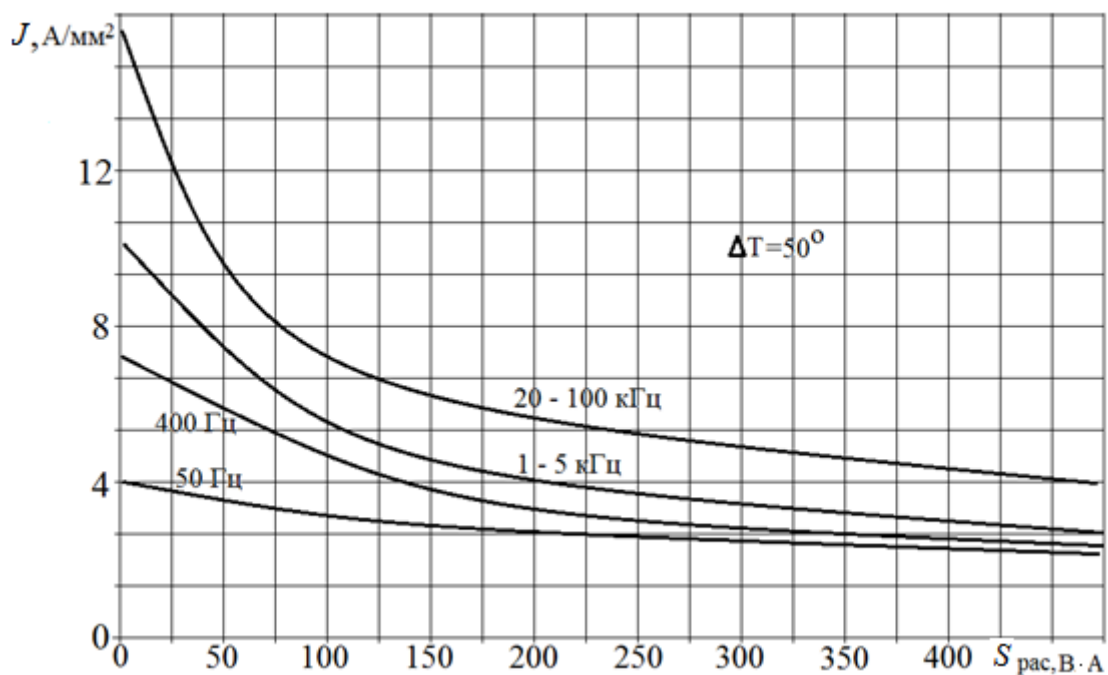


Рис. 100. Зависимость плотности тока от выходной мощности для различных частот при температуре не более 50 °С

Коэффициент заполнения медью окна трансформатора определим по рис. 101. Этот коэффициент зависит от диаметра провода, изоляции, частоты сети и напряжения на обмотках.

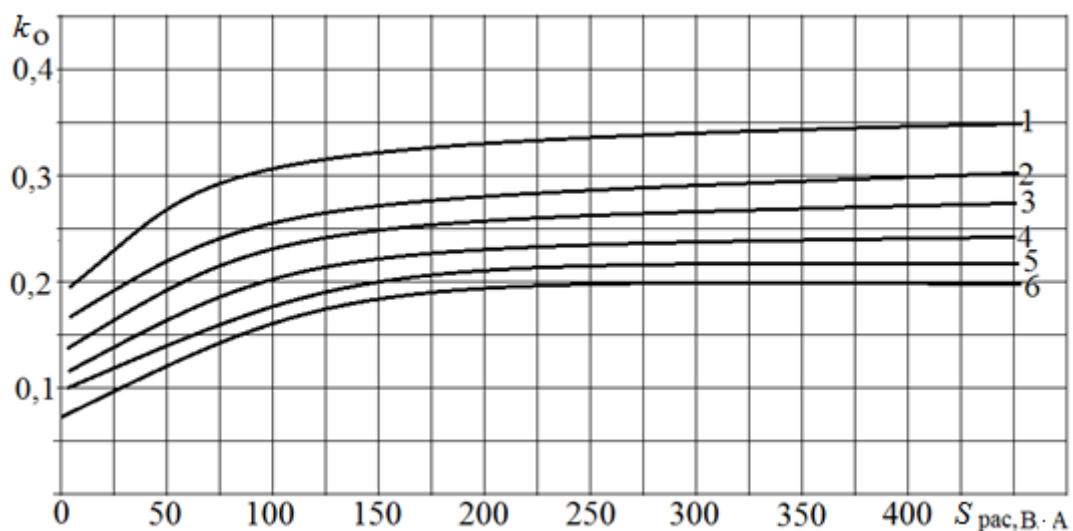


Рис. 101. Взаимосвязь коэффициента заполнения окна трансформатора от выходной мощности (1 – 50 Гц, $U < 100$ В; 2 – 50 Гц, $U < 300$ В; 3 – 400 Гц, $U < 300$ В; 4 – 1000 Гц, $U < 300$ В; 5 – 5 – 10 кГц, $U < 300$ В; 6 – $f > 20$ кГц, $U < 300$ В) [14]

Коэффициент заполнения сталью зависит от толщины ленты магнитопровода. Эта зависимость [14] приведена в табл. 1. Для пресованных магнитопроводов $k_c = 1$.

Таблица 1. Коэффициент заполнения трансформатора сталью

Толщина ленты, мм	0,02	0,05	0,1	0,15	0,35	0,5
k_c	0,68	0,78	0,85	0,9	0,93	0,96

Определив значение $S_c S_o$ из выражения (6), выбираем типоразмер магнитопровода из типовых, выпускающихся промышленностью [14 – 18], имеющий $S_c S_o$ не менее рассчитанного. Для выбранного сердечника определяем среднюю длину магнитной силовой линии и другие конструктивные параметры.

6. *Определение числа витков в обмотках трансформатора.* Количество витков находим в соответствии с выражениями, приведенными в работе [14]

$$w_1 = U_1 \cdot 10^4 (1 - 0,5\Delta U) / 4k_\phi fBS_c k_c;$$

$$w_{2-n} = U_{2-n} \cdot 10^4 (1 + 0,5\Delta U) / 4k_\phi fBS_c k_c,$$

где ΔU – относительное изменение напряжения на выходе трансформатора при изменении тока нагрузки, определяемое в соответствии с рис. 102 [Там же].

7. *Определение потерь в магнитопроводе.* Потери в магнитопроводе можно найти по выражению [29]

$$P_{ст} = P_y M,$$

где P_y – удельные потери в одном килограмме магнитопровода; M – масса магнитопровода.

Удельные потери P_y зависят от марки материала магнитопровода, толщины ленты и закона изменения магнитной индукции. На рис. 103 приведены зависимости для определения P_y [14].

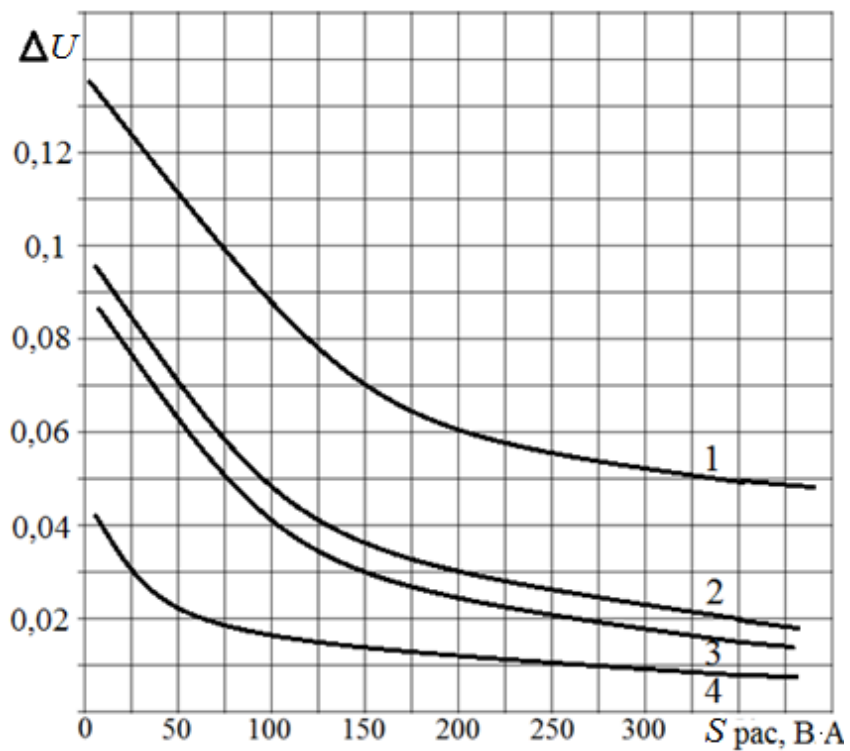
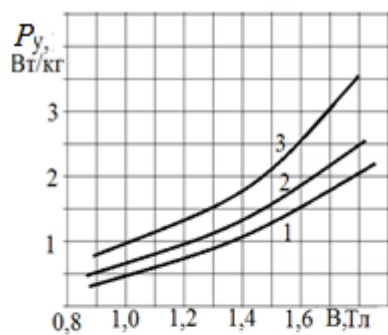
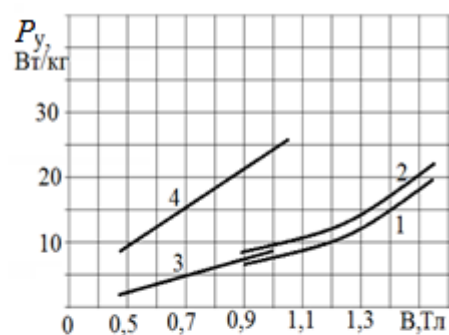


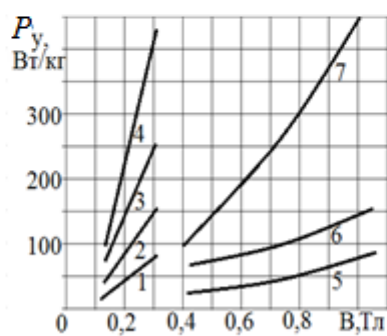
Рис. 102. Относительное изменение напряжения обмоток при изменении тока: 1 – стрижневые, Ст3412, ленточные 0,35 мм, 50 Гц; 2 – стрижневые, Ст3423, ленточные 0,08 мм, 400 Гц; 3 – кольцевые, сплав 34НКНП, ленточные 0,1 мм, 1000 Гц; 4 – кольцевые, феррит, 50 кГц



а)



б)



в)

Рис. 103. Зависимость удельных потерь от материала магнитопровода

На рис. 103 приведены примеры зависимостей:

а) 1 – сталь 3413, 50 Гц, 0,35 мм; 2 – 0,35 мм; 3 – 0,5 мм;

б) 1 – сталь 3423, 400 Гц, 0,08 мм; 2 – 0,15 мм; 3 – сплав 34НКМ, 1000 Гц, 0,1 мм; 4 – сплав 34НКМП, 2,4 кГц, 0,05 мм;

в) 2000НМЗ, 1 – 20 кГц; 2 – 50 кГц; 3 – 75 кГц; 4 – 100 кГц; 5 – 34НКМП, 5 кГц, 0,05 мм; 6 – 10 кГц, 0,02 мм; 7 – 20 кГц, 0,02 мм.

8. *Расчет тока холостого хода трансформатора.* Действующее значение тока холостого хода можно определить по выражению

$$I_{x.x} = \sqrt{I_a^2 + I_p^2},$$

где $I_a = \frac{P_{ст}}{U_1(1 - 0,5\Delta U)}$ – активная составляющая холостого хода;

$I_p = \frac{H \cdot 10^{-2} \cdot l_c}{w_1} + \frac{0,8B \cdot 10^4 \cdot n_3 l_3}{\sqrt{2}w_1}$ – реактивная составляющая холостого

хода; l_3 – длина немагнитного зазора, принятая для ленточных трансформаторов $l_3 = 0,002$ см; n_3 – число зазоров; H – эффективное значение напряженности магнитного поля; А/м; l_c – средняя длина магнитной силовой линии, см.

Эффективное значение напряженности магнитного поля можно определить по графикам, приведенным на рис. 104 [14].

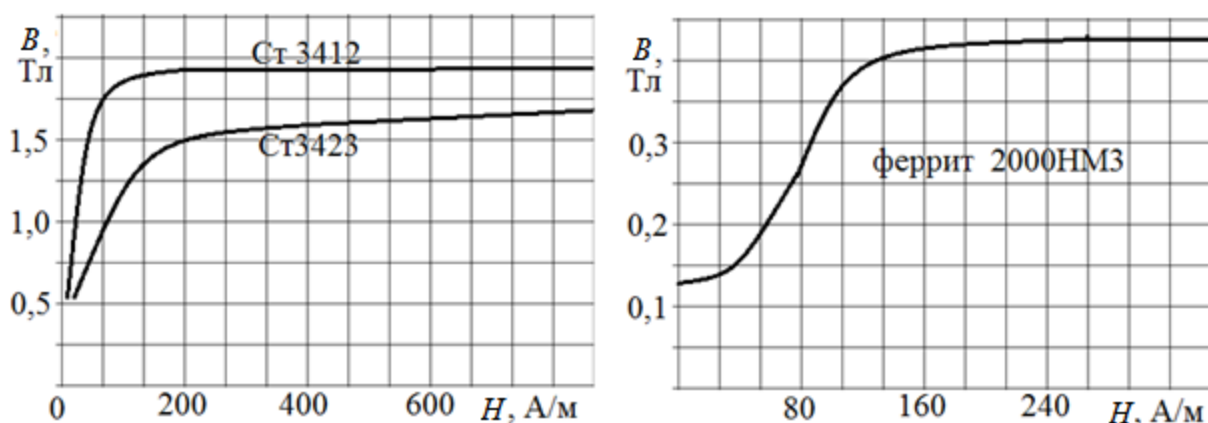


Рис. 104. Зависимости напряженности магнитного поля для различных материалов магнитопровода

9. *Расчет действующего значения тока первичной обмотки (полуобмотки) трансформатора.* Действующее значение тока первичной обмотки при работе трансформатора на активную нагрузку можно определить как

$$I_1 = \sqrt{I_{x \cdot x}^2 + (\sum P_2 / \eta U_1)^2},$$

где $\sum P_2$ – суммарная мощность, поступающая в нагрузку.

10. *Определение сечения проводов обмоток трансформатора.* Поперечное сечение проводов в обмотках 1 – n можно определить следующим выражением

$$S_{1-n} = I_{1-n} / J, \text{ мм}^2, \quad (7)$$

где I_{1-n} – ток в соответствующей обмотке.

По прил. 2 или 3 выбираем ближайšie по сечению стандартные намоточные провода и находим их диаметры. Если нет совпадающих сечений, то выбираем провода с ближайшим большим сечением. Если напряжения обмоток не превышают 500 В при токах до нескольких ампер можно использовать провода марки ПЭТВ (130 °С) или ПЭВ-1 (105 °С). При более высоких напряжениях применяют провода ПЭВ-2.

В случае выбора проводов больших сечений, что определено выражением (7), корректируем значение плотности тока в обмотках.

11. *Выбор изоляции обмоток.* Выбрав изоляцию, выполняем конструктивный расчет трансформатора. Для этого определяем средний диаметр витка обмотки, находим длину используемого провода и омическое сопротивление обмоток r_{1-n} и массу медного провода.

12. *Расчет потерь в проводах обмоток.* Суммарные потери в проводах определим по выражению

$$P_M = I_1^2 r_1 + \sum I_{2-n}^2 r_{2-n}.$$

13. *Определение КПД трансформатора*

$$\eta = \frac{1 - (P_M + P_C)}{P_M + P_C + \sum P_{2H}},$$

где P_{2H} – суммарная активная мощность, поступающая в нагрузку.

14. *Определение температуры перегрева обмоток относительно окружающей среды.*

$$\Delta T = \frac{P_M + P_C}{\alpha_T (s_{\text{охл.м}} + s_{\text{охл.с}})},$$

где $\alpha_T = 11 - 13 \text{ Вт/м}^3$ – коэффициент теплоотдачи трансформатора.

Для броневых трансформаторов:

$$s_{\text{охл.м}} = 2h_{\text{обм}} [a + \pi(c - 4)] 10^{-6} \text{ – площадь охлаждения меди об-}$$

МОТОК;

$$s_{\text{охл.с}} = 2[(C + H)b + (C + h)a + hb] 10^{-6} \text{ – площадь охлаждения}$$

стали.

Для стержневого трансформатора:

$$s_{\text{охл.м}} = 2h_{\text{обм}} [2a + b + 2\pi(c/2 - 2)] 10^{-6},$$

$$s_{\text{охл.с}} = 2[2Ca + b(C + 2a)] 10^{-6}.$$

Размеры $a, b, c, h, C, H, h_{\text{обм}}$ для трансформатора броневых типа приведены на рис. 105.

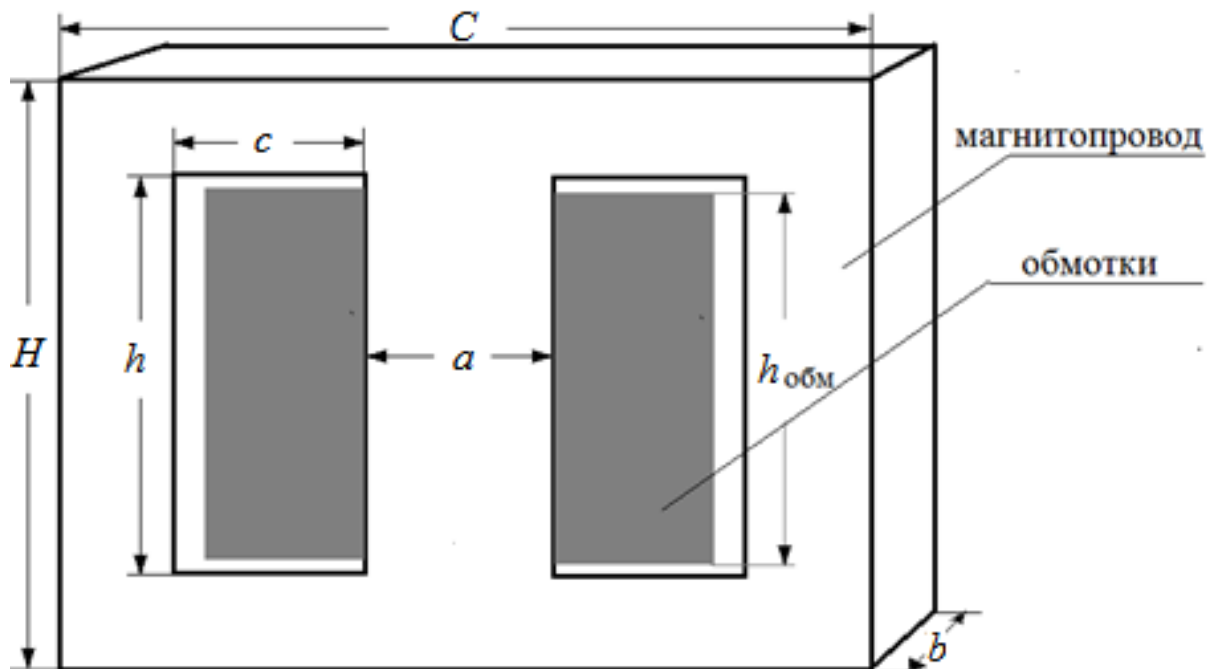


Рис. 105. Размеры броневых трансформаторов

3.2. Расчет двухполупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

Двухполупериодные мостовые выпрямители (см. рис. 52) наиболее часто встречаются на практике, что обусловлено их простотой, сравнительно низким коэффициентом пульсаций ($K_p = 0,67$), высоким коэффициентом использования трансформатора по мощности.

Расчет мостового выпрямителя сводится к определению типа применяемых диодов, расчету сглаживающего пульсации емкостного фильтра и определению необходимого входного переменного напряжения.

Требуемое постоянное напряжение на нагрузке U_0 и потребляемый нагрузкой максимальный ток I_0 являются исходными данными для расчета, который производится по следующей методике.

1. Определяем входное для выпрямителя переменное напряжение (в трансформаторной схеме с выпрямителем это напряжение на вторичной обмотке трансформатора)

$$U_{\text{вх}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_0 = 1,11 U_0. \quad (8)$$

2. Поскольку ток в нагрузку идет через диоды поочередно, то

$$I_{VD} = \frac{I_0}{2}, \quad I_{VD \text{ max}} = \frac{\sqrt{2} U_{\text{вх}}}{R_{\text{H}}} = \frac{\pi I_0}{2}, \quad (9)$$

где $R_{\text{H}} = U_0 / I_0$ – сопротивление нагрузки.

3. По величинам выходного напряжения U_0 , тока через диод I_{VD} , максимального обратного напряжения $I_{VD \text{ max}}$ по справочной литературе [20; 21] выбираем выпрямительные диоды, у которых все эти значения параметров превышают определенные по выражениям (8) и (9).

4. Определяем емкость конденсатора фильтра

$$C_{\phi} = 3200I_0 / U_0 K_{\pi}, \quad (10)$$

где C_{ϕ} – емкость конденсатора фильтра, мкФ; I_0 – максимальный ток нагрузки, А; U_0 – напряжение на нагрузке, В; K_{π} – требуемый коэффициент пульсации выпрямленного напряжения, т. е. отношение амплитудного значения переменной составляющей на выходе выпрямителя к среднему значению выпрямленного напряжения.

Для выпрямителей без конденсатора фильтра величина коэффициента пульсаций зависит от типа выпрямителя ($K_{\pi} = 1,57$ для однополупериодного выпрямителя, $K_{\pi} = 0,67$ для двухполупериодного выпрямителя, $K_{\pi} = 0,057$ для трехфазного выпрямителя по схеме Ларионова).

5. По справочнику [22] выбираем стандартный конденсатор с емкостью не менее чем определенная по выражению (10). Нужно отметить, что при применении дополнительных сглаживающих фильтров и стабилизаторов напряжения емкость на выходе выпрямителя можно значительно уменьшить.

Величина емкости фильтра выпрямителя зависит от параметров выпрямителя. При выборе конденсаторов необходимо помнить, что их использование ограничено частотой и амплитудой выпрямленного напряжения. Из выражения (10) видно, что реактивное сопротивление емкости должно быть много меньше сопротивления нагрузки

$$X_c \ll R_n = U_0 / I_0. \quad (11)$$

Исходя из ограничений (11) при малом сопротивлении нагрузки невозможно использовать конденсаторный сглаживающий фильтр. Чем меньше сопротивление нагрузки, тем большая емкость конденсатора требуется, а неполярные конденсаторы большой емкости имеют большие габаритные размеры и массу. Поэтому в качестве емкости фильтра C часто применяют полярные электролитические конденсаторы [22], так как они удовлетворяют требованию $\operatorname{Re} X_c \rightarrow \infty$, $\operatorname{Im} X_c \rightarrow 0$.

Тем не менее электролитические конденсаторы имеют недостатки, и про это не следует забывать:

- при неверном подключении из-за униполярности они взрывоопасны;
- их требуется «тренировать» напряжением, иначе электролит высыхает и все параметры со временем изменяются;
- электролитические конденсаторы чувствительны к пульсациям тока, напряжения и превышению максимально допустимого уровня напряжения.

Также нужно отметить, что емкость электролитических конденсаторов имеет сильно выраженную зависимость от температуры и частоты переменной составляющей. С ростом частоты пульсаций и снижением окружающей температуры величина емкости электролитических конденсаторов значительно уменьшается. Это приводит к необходимости увеличивать емкость фильтра при работе на повышенной частоте и при низкой температуре.

3.3. Расчет индуктивных фильтров

Индуктивный L -фильтр отличается тем, что последовательно с нагрузкой подсоединена катушка индуктивности (дроссель). На индуктивности ток не может изменяться мгновенно. Поэтому при нарастании положительной части синусоидальной волны напряжения ток увеличивает свое значение с некоторой задержкой, а при уменьшении амплитуды волны индуктивность не дает резко изменяться значению тока и также создается некоторое запаздывание. Благодаря индуктивности изменение тока в нагрузке происходит более плавно.

Эффективность индуктивного фильтра повышается при соблюдении условия, когда реактивное сопротивление индуктивности X_L много больше сопротивления нагрузки R_H

$$X_c \gg R_H = U_0 / I_0. \quad (12)$$

Выражение (12) ограничивает применение индуктивных фильтров при высокоомной нагрузке источника питания.

Индуктивный фильтр выпрямителя делает нагрузку индуктивного характера. На такие нагрузки чаще всего работают выпрямители средней и большой мощности. В индуктивном фильтре в моменты включения или выключения входного питания или нагрузки возникают перенапряжения, величиной тем больше, чем больше индуктивность L .

Для исключения влияния индуктивности на форму выпрямленного напряжения параллельно к нагрузке включают обратный диод, как показано на рис. 106, а, который обеспечивает сброс реактивной энергии дросселя и тем самым исключает отрицательный выброс выпрямленного напряжения. В двухполупериодной однофазной схеме роль обратного диода выполняет тот из диодов выпрямителя, который открывается первым (рис. 106, б).

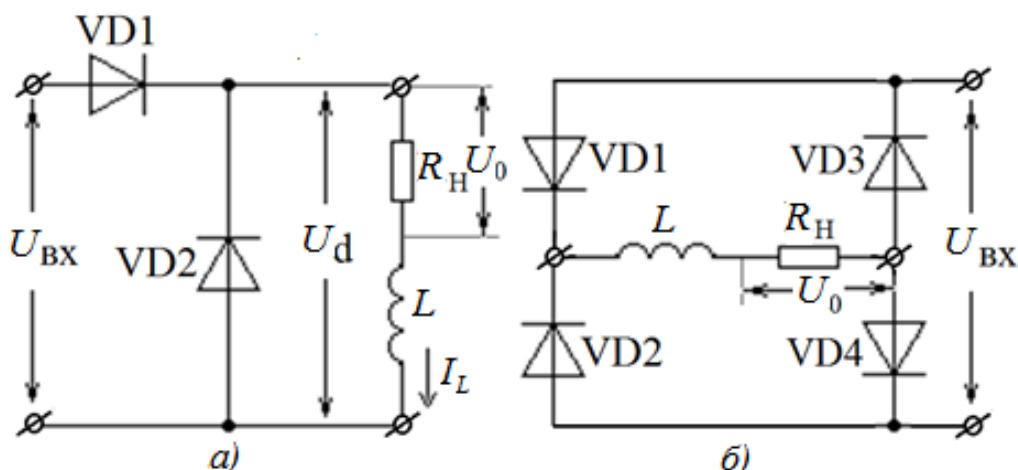


Рис. 106. Выпрямители с индуктивным фильтром

Величину индуктивности фильтра можно определить, пользуясь выражением [12]

$$L = \frac{2U_0}{(m^2 - 1)m\pi f I_0},$$

где m – число фаз выпрямления.

Ориентировочные значения падения напряжения на индуктивности фильтра приведены в табл. 2 [12].

Таблица 2. Падение напряжения на индуктивном фильтре

$P_0 = U_0 \cdot I_0$, Вт	ΔU_0 при $f = 50$ Гц	ΔU_0 при $f = 400$ Гц
10 – 30	$(0,2 - 0,14)U_0$	$(0,07 - 0,05)U_0$
30 – 100	$(0,14 - 0,1)U_0$	$(0,05 - 0,035)U_0$
100 – 300	$(0,1 - 0,07)U_0$	$(0,035 - 0,025)U_0$
300 – 1000	$(0,07 - 0,05)U_0$	$(0,025 - 0,018)U_0$
1000 – 3000	$(0,05 - 0,035)U_0$	$(0,018 - 0,012)U_0$
3000 – 10 000	$(0,035 - 0,025)U_0$	$(0,012 - 0,009)U_0$

В первом приближении площадь поперечного сечения стержня дросселя можно определить выражением

$$S_c = 3,9^4 \sqrt{LI_0^2}. \quad (13)$$

Выбирают стандартный сердечник с сечением не менее чем определяемое выражением (13). Дроссель работает в цепи постоянного тока и для исключения намагничивания сердечник должен иметь немагнитный зазор длиной l_3 . Длину немагнитного зазора l_3 в процентах от длины магнитной силовой линии выбранного сердечника l_c , а также величину μ_3 с учетом поправок из-за наличия зазора у дросселя можно найти из рис. 107.

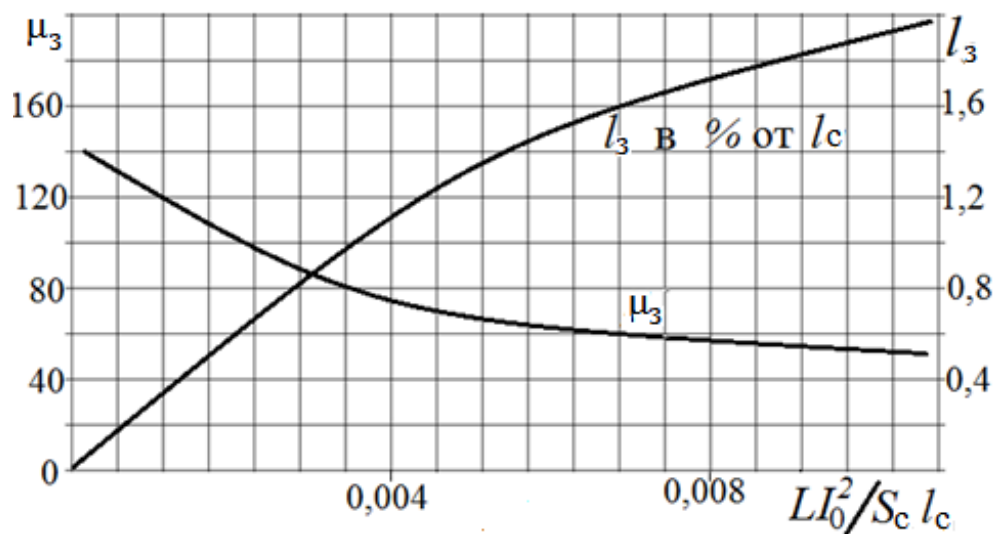


Рис. 107. График для определения длины немагнитного зазора и магнитной проницаемости сердечника дросселя [29]

Для мощных индуктивных фильтров, реализуемых с магнитопроводом из трансформаторной стали, число витков дросселя можно определить, используя выражение

$$w_L = 10^4 \sqrt{\frac{Ll_c}{1,26\mu_3 S_c}},$$

где l_c – средняя длина магнитной силовой линии выбранного сердечника; μ_3 – магнитная проницаемость сердечника с учетом зазора в магнитопроводе; S_c – площадь поперечного сечения сердечника дросселя.

Диаметр провода обмотки d_n дросселя определим следующим выражением:

$$d_n = 1,13 \sqrt{\frac{I_0}{J}},$$

где $J = 3 - 4$ А/мм² – плотность тока в обмотке дросселя (точнее ее можно определить, используя рис. 100).

Коэффициент сглаживания индуктивного фильтра равен

$$K_{\text{и}} = \frac{\sqrt{R_{\text{н}}^2 + (m2\pi f_c L)^2}}{R_{\text{н}}},$$

где m – коэффициент, показывающий, во сколько раз частота пульсаций отличается от частоты сети; f_c – частота питающей выпрямитель сети.

3.4. Расчет индуктивно-емкостных фильтров

В практических приложениях для сглаживания пульсаций наиболее часто используют Г-образный индуктивно-емкостный фильтр, схема которого показана на рис. 108.

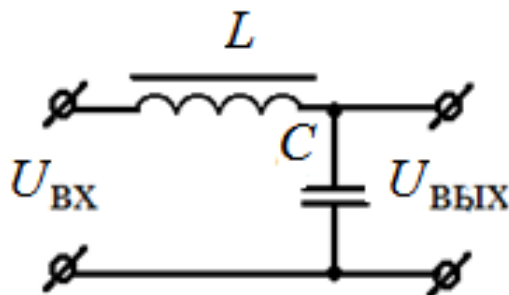


Рис. 108. LC фильтр

Для подавления пульсаций Г-образные LC фильтры должны удовлетворять двум основным требованиям:

1. На минимальной частоте пульсаций емкостное сопротивление конденсатора C должно быть много меньше сопротивления нагрузки $X_c \ll R_n$.

2. Емкостное сопротивление конденсатора C должно быть много меньше индуктивного сопротивления индуктивности (дросселя) L

$$X_c \ll X_L \quad (14)$$

Если считать, что активное сопротивление индуктивности пренебрежимо мало, то коэффициент сглаживания пульсаций

$$K_{\Gamma LC} = \frac{K_{\Pi ВХ}}{K_{\Pi ВЫХ}} = \frac{U_{ВХ}}{U_{ВЫХ}} = (2\pi f_{\Pi})^2 LC - 1, \quad (15)$$

где $f_{\Pi} = nf_c$ – частота пульсаций, определяемая схемой выпрямителя и связанная с частотой питающей выпрямитель сети f_c через число фаз n , участвующих в преобразовании переменного напряжения в постоянное.

Выражение (15) позволяет найти произведение LC , дающее возможность определить номиналы L и C

$$LC = (1 + K_{\Gamma LC}) / (2\pi f_{\Pi})^2. \quad (16)$$

Из выражения (14) следует, что входное сопротивление фильтра должно иметь индуктивный характер и при этом индуктивность L должна быть больше критической $L_{кр}$, так как при меньшей индуктивности ток в ней имеет прерывистый характер. Критическая индуктивность, при которой амплитуда тока дросселя равна его постоянной составляющей, в работе [14] определена через сопротивление нагрузки R_n

$$L_{кр} = 2R_n / (n^2 - 1)n2\pi f_c.$$

Задаваясь $L > L_{кр}$ и пользуясь выражением (16), находим величину емкости C , соблюдая при этом условие (14). При выборе индук-

тивности L дросселя необходимо стремиться к стандартным дросселям, выпускаемым промышленностью [13; 16; 26].

Поскольку дроссель установлен в цепи постоянного тока, то для исключения намагничивания сердечника его сердечник должен иметь воздушный или другой, но немагнитный зазор. На высокой частоте используют феррит или альсифер, так как эти материалы имеют достаточный запас по намагничиванию сердечника.

Во время пуска в результате переходных процессов возникает бросок пускового тока и перенапряжение на конденсаторе фильтра. Во время пуска напряжение на дросселе L равно выходному напряжению источника питания. Эти величины можно определить согласно следующим выражениям:

$$U_{c\max} = U_0 \left[1 - \exp(-\pi R_B / 2\sqrt{LC}) \right];$$
$$I_{0\max} = I_0 + U \frac{\exp\left(\frac{-\pi R_B}{2\sqrt{LC}}\right)}{\sqrt{LC}},$$

где R_B – активное сопротивление выпрямителя при включении; \sqrt{LC} – волновое сопротивление фильтра.

Увеличение волнового сопротивления фильтра снижает выброс тока, но увеличивает скачок напряжения на емкости фильтра. Здесь появляется возможность в определенной степени оперировать переходными процессами при пуске устройства электропитания или при отключении нагрузки от устройства питания.

Для уменьшения бросков напряжения и пускового тока в мощных источниках питания последовательно с индуктивностью L включают резистор R , который после завершения переходных процессов от включения закорачивают. Этот простой способ позволяет значительно сократить массогабаритные размеры дросселя L и конденсатора C .

Расчет сглаживающего фильтра при прямоугольном входном сигнале, что характерно для импульсных преобразователей и инверторов напряжения, выполняют аналогично, только пользуясь другими

выражениями. Критическую индуктивность в таком случае можно определять [14] по формуле

$$L_{кр} = U_0(1 - \tau/T) / 2f_{и} I_{0\min},$$

где τ и T – длительность и период следования импульсов; $f_{и}$ – частота следования импульсов.

Задавшись индуктивностью $L > L_{кр}$, находим емкость конденсатора

$$C \geq (1 - \tau/T) / 4Lf_{и}^2 K_{п},$$

где $K_{п}$ – необходимый коэффициент пульсаций.

Перенапряжения, возникающие в фильтре LC , тем больше, чем больше индуктивность дросселя L и чем меньше емкость C . Для идеального выпрямителя при отключенной нагрузке предельное значение напряжения на конденсаторе равно $U_{с\max} = 2U_0$.

Не менее часто чем Γ -образные LC фильтры, используются Π -образные фильтры, схема которых приведена на рис. 109.

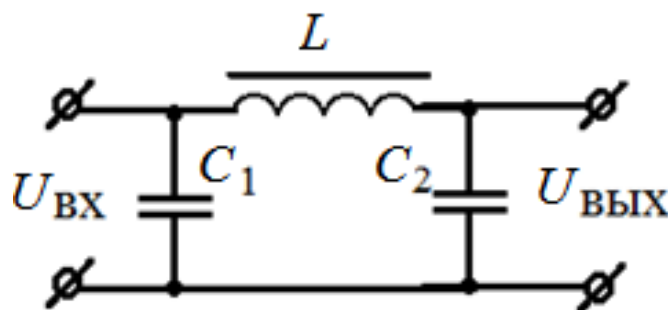


Рис. 109. Π -образный сглаживающий фильтр

При анализе Π -образный СДС фильтр обычно представляют как последовательное соединение емкостного C_1 и Γ -образного LC_2 фильтров. Причем известно [14], что максимальное сглаживание достигается при равенстве емкостей $C_1 = C_2$. Поэтому расчет сводится к расчету Γ -образного звена и емкость C_1 принимается равной по величине рассчитанной C_2 .

Π-образные CLC фильтры делают емкостной нагрузкой выпрямителя, что усложняет работу диодов выпрямителя и требует несколько большей габаритной мощности трансформатора. Однако коэффициент сглаживания существенно выше и выпрямленное выходное напряжение несколько больше по сравнению с Γ-образным фильтром.

Для дальнейшего увеличения коэффициента сглаживания применяют последовательное включение нескольких сглаживающих фильтров, обычно чередуя Γ- и Π-образные фильтры. Коэффициент сглаживания при этом определяется произведением коэффициентов сглаживания использованных фильтров. Практика показала, что двухзвенный фильтр позволяет обеспечить коэффициент сглаживания больше 50, а трехзвенный фильтр может обеспечить не менее 1500.

3.5. Активно-емкостный фильтр

Активно-емкостный фильтр, схема которого приведена на рис. 110, применяют в выпрямителях малой мощности, так как КПД такого фильтра находится в пределах от 0,6 до 0,8. Потери энергии на резисторе велики, но небольшие габаритные размеры и низкая стоимость определили использование таких фильтров.

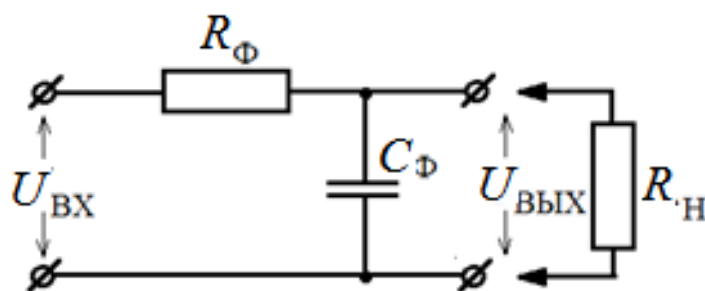


Рис. 110. Активно-емкостный фильтр

Резистор R_{Φ} выбирают исходя из требуемого выходного напряжения и допустимых потерь, обеспечивая КПД фильтра в диапазоне от 0,6 до 0,8. Величина емкости определяется так же, как у емкостного фильтра, и для ее определения можно использовать выражение (10).

Коэффициент сглаживания такого фильтра определяется по формуле

$$K_{A-C} = m2\pi f_c C_\phi R_\phi \frac{R_H}{R_H + R_\phi}.$$

К достоинствам активно-емкостного фильтра, кроме его небольшой стоимости и простоты, можно отнести отсутствие повышения уровня напряжения или его снижения при переходных процессах, к недостаткам – очень низкий КПД, что и определило его применение только в маломощных выпрямителях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие написано по материалам читаемых авторами курсов лекций «Устройства электропитания» и «Методы и устройства передачи сигналов». В книге использованы и собственные разработки авторов, полученные при выполнении научно-исследовательских работ по разработке и поставке мощных носимых, а также стационарных радиопередающих устройств.

Значимость изложенных учебных курсов в настоящее время существенно возросла в связи с существующими проблемами энергосбережения и бурным развитием носимых и мобильных радиотехнических устройств. Массовый переход электроники в цифровые формы требует новейших подходов и новых устройств преобразования электрической энергии, так как источники электропитания во многом определяют характеристики и параметры радиотехнических систем и комплексов.

В соответствии с учебным планом изучение дисциплины «Устройства электропитания» сопровождается проектированием устройств электропитания в рамках курсовой работы. Поэтому кроме теоретического материала в учебное пособие включены раздел с примерами расчетов основных узлов источников питания радиоаппаратуры и приложения, позволяющие определить необходимые компоненты для проектирования вторичных источников питания.

Современная электроника развивается очень бурно. Появляются новые перспективные материалы и разработки в области элементной базы. При написании учебного пособия авторы стремились использовать известные в мире и апробированные научные методы разработки устройств электропитания и максимально охватить современные наработки в области совершенствования мощной ключевой элементной базы. Авторы надеются, что предлагаемое издание будет полезно бакалаврам радиотехнических направлений обучения как при подготовке курсовых работ, так и в будущей инженерной деятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Хрусталеv, Д. А.* Аккумуляторы / Д. А. Хрусталеv. – М. : Изумруд, 2003. – 224 с. – ISBN 5-98131-001-4.
2. *Кашкаров, А. П.* Аккумуляторы / А. П. Кашкаров. – М. : Радио-Софт, 2014. – 192 с. – ISBN 978-5-93037-261-8.
3. *Он же.* Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции / А. П. Кашкаров. – М. : Пресс, 2012. – 144 с. – ISBN 978-5-94074-662-1.
4. *Москатов, Е. А.* Источники питания / Е. А. Москатов. – Киев : Пресса ; СПб. : КОРОНА-ВЕК, 2011. – 208 с. – ISBN 978-966-8806-71-1.
5. Алимов, Р. Радиационная авария в Мурманской области [Электронный ресурс] / Р. Алимов. – URL: www.belona.ru/2003/11/17/ (дата обращения: 17.03.2020).
6. Радиоизотопные термоэлектрические генераторы [Электронный ресурс]. – URL: <https://bellona.ru/2005/04/02/radioizotopnyie-termoelektricheskie-g/> (дата обращения: 17.03.2020).
7. *Жуловян, В. В.* Электрические машины: электромеханическое преобразование энергии : учеб. пособие для вузов / В. В. Жуловян. – М. : Юрайт, 2017. – 425 с. – ISBN 978-5-534-04293-1.
8. Возобновляемая энергия. Гидроэлектростанции России : справочник / под общ. ред. В. В. Берлина. – СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2018. – 224 с. – ISBN 978-5-7422-6139-1.
9. *Пестриков, В. М.* Домашний электрик и не только. В 2 кн. Кн. 2 / В. М. Пестриков. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Наука и Техника, 2006. – 240 с.
10. *Микушин, А. В.* Показатели вторичных источников электропитания [Электронный ресурс] / А. В. Микушин. – URL: <https://digteh.ru/ВР/ПоказVторIсточников/> (дата обращения: 17.03.2020).
11. *Битюков, В. К.* Источники вторичного электропитания / В. К. Битюков, Д. С. Симачков, В. П. Бабенко. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Инфра-Инженерия, 2019. – 376 с. – ISBN 978-5-9729-0267-5.
12. *Костиков, В. Г.* Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование : учеб. для вузов / В. Г. Костиков, Е. М. Парфенов, В. А. Шахнов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2001. – 344 с. – ISBN 5-93517-052-3.

13. *Сидоров, И. Н.* Малогабаритные трансформаторы и дроссели : справочник / И. Н. Сидоров, В. В. Мукосеев, А. А. Христинин. – М. : Радио и связь, 1985. – 416 с.

14. *Китаев, В. Е.* Расчет источников электропитания устройств связи / В. Е. Китаев, А. А. Бокуняев, М. Ф. Колканов. – М. : Радио и связь. – 1993. – 232 с.

15. *Королев, Г. В.* Электронные устройства автоматики : учеб. пособие / Г. В. Королев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк. – 1991. – 256 с.

16. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций / В. М. Бушуев [и др.]. – М. : Горячая линия-Телеком, 2009. – 384 с. – ISBN 978-5-9912-0077-6.

17. Источники вторичного электропитания / под ред. Ю. И. Конева. – М. : Радио и связь, 1990. – 420 с.

18. *Борисов, П. А.* Расчет и моделирование выпрямителей : учеб. пособие по курсу «Элементы систем автоматики». В 2 ч. Ч. 1 / П. А. Борисов, В. С. Томасов. – СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2009. – 169 с.

19. *Воробьев, А. Ю.* Электроснабжение компьютерных и телекоммуникационных систем / А. Ю. Воробьев. – М. : Эко-Трендс, 2002. – 280 с. – ISBN 5-88405-048-8.

20. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры : справочник / под общ. ред. А. В. Голомедова. – М. : Радио и связь, 1988. – 528 с.

21. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам / под ред. Н. Н. Горюнова. – М. : Энергия, 1977. – 744 с.

22. Справочник по электрическим конденсаторам / М. Н. Дьяконов [и др.] ; под общ. ред. И. И. Четверткова и В. Ф. Смирнова. – М. : Радио и связь. 1983. – 576 с.

23. *Готтлиб, Ирвинг М.* Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы / Ирвинг М. Готтлиб ; пер. с англ. А. Л. Ларина ; под ред. С. А. Лужанского. – М. : Постмаркет, 2000. – 559 с. – ISBN 5-901095-05-7.

24. *Мэк, Раймонд.* Импульсные источники питания / Раймонд Мэк. – М. : Додэка XXI, 2008. – С. 272. – ISBN 978-5-94120-172-3.

25. Пат. № RU 140867 U1. Устройство электропитания / Соловьев А. В., Самойлов А. Г., Самойлов С. А., Полушин П. А. – Оpubл. 25.11.2013. – Бюл. № 2013152277/08.

26. Семенов, Б. Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов / Б. Ю. Семенов. – М. : Солон-Р, 2001. – 328 с. – ISBN 5-93455-089-6.

27. Ямпурин, Н. П. Электроника : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / Н. П. Ямпурин, А. В. Баранова, В. И. Обухов. – М. : Академия, 2011. – 240 с. – ISBN 978-5-7695-4606-8.

28. Шишкин, Г. Г. Электроника : учеб. для бакалавров / Г. Г. Шишкин, А. Г. Шишкин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2014. – 702 с. – ISBN 978-5-9916-3391-8.

29. Источники электропитания РЭА (радиоэлектронной аппаратуры) : справочник / Г. С. Найвельт [и др.] ; под ред. Г. С. Найвельта. – М. : Радио и связь, 1985. – 576 с.

30. Костиков, В. Г. Источники электропитания высокого напряжения РЭА / В. Г. Костиков, И. Е. Никитин. – М. : Радио и связь, 1986. – 200 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Отечественные стартерные аккумуляторы

Тип	Напряжение	Номинальная емкость, А · ч	Количество электролита, л	Номинальный ток заряда, А
Напряжение 6 В				
3СТ-65	6	65	2,2	6,5
3СТ-80	6	80	2,8	8
3СТ-95	6	95	3,3	9,5
3ТСТ-150	6	150	4,8	15
3СТ-215	6	215	7,0	21,5
Напряжение 12 В				
6СТ-45	12	45	3	4,5
6СТ-50	12	50	3,5	5
6СТ-55	12	55	3,8	5,5
6СТ-60	12	60	3,8	6
6СТ-75	12	75	5	7,5
6СТ-82	12	82	5,4	8
6СТ-90	12	90	6	9
6СТМ-128	12	128	8	10
6СТ-132	12	132	8	13
6СТ-182	12	182	11,2	18
6СТ190	12	190	12	19

Приложение 2. Намоточные провода. Основные параметры

Диаметр провода по меди, мм	Сечение провода по меди, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм				Сопротивление 1 м провода при 20 °С, Ом	Допустимый ток при плотности			
		ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭЛ	ПЭТВ		2 А/мм ² , А	3 А/мм ² , А	4 А/мм ² , А	5 А/мм ² , А
0,02	0,00031	0,027	–	0,035	–	61,5	0,0006	0,0009	0,0012	0,0015
0,025	0,00051	0,034	–	0,04	–	37,16	0,001	0,0015	0,002	0,0025
0,03	0,00071	0,041	–	0,045	–	24,7	0,0014	0,002	0,0028	0,0035
0,032	0,0008	0,043	–	0,046	–	18,4	0,0016	0,0024	0,0032	0,004
0,04	0,0013	0,055	–	0,055	–	13,9	0,0026	0,004	0,005	0,0065
0,05	0,00196	0,062	0,08	0,07	–	9,169	0,004	0,0058	0,008	0,01
0,06	0,00283	0,075	0,09	0,085	0,09	6,367	0,0057	0,0084	0,011	0,014
0,063	0,0031	0,078	0,09	0,085	0,09	4,677	0,0063	0,0093	0,012	0,015
0,07	0,00385	0,084	0,092	0,092	0,1	4,677	0,0071	0,011	0,014	0,019
0,071	0,00396	0,088	0,095	0,095	0,1	4,71	0,0078	0,012	0,015	0,02
0,08	0,00503	0,095	0,105	0,105	0,11	6,63	0,01	0,015	0,02	0,025
0,09	0,00636	0,105	0,12	0,115	0,12	2,86	0,013	0,018	0,025	0,031
0,1	0,00785	0,122	0,13	0,125	0,13	2,291	0,016	0,023	0,035	0,04
0,112	0,0099	0,134	0,14	0,125	0,14	1,895	0,021	0,03	0,042	0,05
0,12	0,0113	0,144	0,15	0,145	0,15	1,591	0,023	0,034	0,045	0,055
0,125	0,0122	0,149	0,155	0,15	0,155	1,4	0,025	0,036	0,047	0,06
0,13	0,0133	0,155	0,16	0,155	0,16	1,32	0,026	0,04	0,053	0,065
0,14	0,0154	0,165	0,17	0,165	0,17	1,14	0,03	0,047	0,06	0,07
0,15	0,0176	0,176	0,19	0,18	0,19	0,99	0,035	0,053	0,07	0,085
0,16	0,0201	0,187	0,2	0,19	0,2	0,873	0,04	0,06	0,08	0,1
0,17	0,0227	0,197	0,21	0,2	0,21	0,773	0,045	0,066	0,09	0,11
0,18	0,0254	0,21	0,22	0,21	0,22	0,688	0,051	0,075	0,1	0,125
0,19	0,0283	0,22	0,23	0,22	0,23	0,618	0,057	0,084	0,12	0,14

Диаметр провода по меди, мм	Сечение провода по меди, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм				Сопротивление 1 м провода при 20 °С, Ом	Допустимый ток при плотности			
		ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭЛ	ПЭТВ		2 А/мм ² , А	3 А/мм ² , А	4 А/мм ² , А	5 А/мм ² , А
0,2	0,0314	0,23	0,24	0,23	0,24	0,558	0,063	0,093	0,125	0,154
0,21	0,0346	0,24	0,25	0,25	0,25	0,507	0,07	0,1	0,14	0,17
0,224	0,0394	0,256	0,27	0,26	0,27	0,445	0,08	0,11	0,16	0,19
0,236	0,0437	0,26	0,285	0,27	0,28	0,402	0,088	0,13	0,17	0,215
0,25	0,049	0,284	0,3	0,275	0,3	0,357	0,098	0,147	0,196	0,245
0,265	0,0552	0,305	0,315	0,305	0,31	0,318	0,111	0,165	0,222	0,275
0,28	0,0615	0,315	0,33	0,315	0,33	0,285	0,124	0,183	0,248	0,3
0,3	0,0708	0,34	0,35	0,34	0,34	0,248	0,143	0,21	0,248	0,34
0,315	0,078	0,35	0,365	0,352	0,36	0,225	0,16	0,23	0,316	0,39
0,335	0,0885	0,375	0,385	0,375	0,38	0,198	0,177	0,26	0,35	0,44
0,355	0,099	0,395	0,414	0,395	0,41	0,177	0,2	0,29	0,4	0,495
0,38	0,113	0,42	0,44	0,42	0,44	0,155	0,226	0,34	0,452	0,55
0,4	0,126	0,44	0,46	0,442	0,46	0,14	0,251	0,37	0,5	0,63
0,425	0,142	0,465	0,485	0,47	0,47	0,124	0,283	0,42	0,566	0,7
0,45	0,16	0,49	0,51	0,495	0,5	0,11	0,32	0,48	0,64	0,8
0,475	0,177	0,525	0,545	0,495	0,53	0,099	0,35	0,53	0,7	0,85
0,5	0,196	0,55	0,57	0,55	0,55	0,09	0,39	0,58	0,78	0,98
0,53	0,22	0,58	0,6	0,578	0,6	0,0795	0,44	0,66	0,88	1,1
0,56	0,247	0,61	0,63	0,61	0,62	0,071	0,5	0,74	0,95	1,2
0,6	0,283	0,65	0,67	0,65	0,66	0,062	0,56	0,84	1,12	1,4
0,63	0,313	0,68	0,7	0,68	0,69	0,056	0,626	0,93	1,25	1,56
0,67	0,352	0,72	0,75	0,72	0,75	0,05	0,7	1,0	1,4	1,76
0,71	0,398	0,76	0,79	0,77	0,78	0,044	0,8	1,2	1,6	2,0
0,75	0,441	0,81	0,84	0,81	0,83	0,039	0,884	1,32	1,768	2,2


























Диаметр провода по меди, мм	Сечение провода по меди, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм				Сопротивление 1 м провода при 20 °С, Ом	Допустимый ток при плотности			
		ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭЛ	ПЭТВ		2 А/мм ² , А	3 А/мм ² , А	4 А/мм ² , А	5 А/мм ² , А
0,8	0,503	0,86	0,89	0,86	0,89	0,035	1,0	1,5	2,0	2,5
0,85	0,567	0,91	0,94	0,91	0,94	0,031	1,13	1,7	2,26	2,8
0,9	0,636	0,96	0,99	0,96	0,99	0,0275	1,27	1,9	2,55	3,18
0,93	0,679	0,99	1,02	0,99	1,02	0,0253	1,33	2,0	2,66	3,4
0,95	0,712	1,01	1,04	1,02	1,04	0,0248	1,42	2,13	2,84	3,56
1,0	0,785	1,07	1,1	1,07	1,11	0,0224	1,57	2,35	3,14	3,9
1,06	0,884	1,13	1,16	1,14	1,16	0,0199	1,765	2,64	3,53	4,4
1,08	0,916	1,16	1,19	1,16	1,19	0,0188	1,83	2,73	3,66	4,6
1,12	0,985	1,19	1,22	1,2	1,23	0,0178	1,97	2,94	3,94	4,9
1,18	1,092	1,26	1,28	1,26	1,26	0,0161	2,185	3,27	4,37	5,46
1,25	1,227	1,33	1,35	1,33	1,36	0,0143	2,45	3,68	4,9	6,1
1,32	1,362	1,4	1,42	1,4	1,42	0,013	2,72	4,0	5,44	6,8
1,4	1,539	1,48	1,51	1,48	1,51	0,0113	3,078	4,6	6,156	7,695
1,45	1,651	1,53	1,56	1,53	1,56	0,0106	3,306	4,95	6,612	8,25
1,5	1,767	1,58	1,61	1,58	1,61	0,0093	3,5	5,3	7,0	8,8
1,56	1,911	1,63	1,67	1,64	1,67	0,00917	3,876	5,73	7,752	9,55
1,6	2,01	1,68	1,71	1,68	1,71	0,0086	4,02	6,03	8,04	10,05
1,7	2,269	1,78	1,81	1,78	1,81	0,0078	4,54	6,78	9,08	11,3
1,74	2,378	1,82	1,85	1,82	1,85	0,00737	4,75	7,13	9,5	11,89
1,8	2,544	1,89	1,92	1,89	1,92	0,00692	5,0	7,63	10,0	12,72
1,9	2,81	1,99	2,02	1,99	2,02	0,00612	5,6	8,43	11,2	14,05
2,0	3,141	2,1	2,12	2,1	2,12	0,00556	6,3	9,42	12,6	15,7
2,12	3,529	2,21	2,24	2,22	2,24	0,00495	7,0	10,56	14,0	17,6
2,24	4,011	2,34	2,46	2,34	2,46	0,00445	8,02	12,03	16,04	20,05
2,36	4,374	2,46	2,48	2,36	2,48	0,00477	8,75	13,11	17,5	21,5
2,5	4,921	2,6	2,63	2,6	2,62	0,00399	9,85	14,7	19,7	24,6































Примечания: ПЭВ-1, 2 – провод, изолированный эмалевым высокопрочным покрытием в 1 или 2 слоя; ПЭЛ – провод с эмалевым лакостойким покрытием; ПЭТВ – провод с эмалевым теплостойким высокопрочным покрытием.






















Приложение 3. Высокочастотные намоточные провода

Диаметр проволоки, мм	Число проволок в пучке	Диаметр провода, мм					Расчетное сечение медной жилы, мм	Сопротивление 1 км провода при 20 °С, Ом, не более
		ЛЭЛ	ЛЭЛО, ЛЭШО	ЛЭЛД, ЛЭШД	ЛЭП	ЛЭПКО		
0,05	10	0,25	0,32	0,38	–	–	0,0196	1012
	16	0,31	0,38	0,44	–	–	0,0314	634
	20	0,34	0,41	0,47	–	–	0,0392	507
	50	–	–	0,71	–	–	0,098	209
0,06	3	–	–	–	0,2	–	0,0085	3200
	5	–	–	–	0,25	–	0,0142	1380
0,07	7	–	0,34	–	–	–	0,0269	760
	8	0,29	0,36	0,42	0,35	0,4	0,0308	624
	10	0,33	0,4	0,46	0,39	0,44	0,0385	499
	12	–	0,42	0,48	0,42	0,47	0,0462	416
	16	–	0,47	0,54	0,49	0,52	0,0616	312
	20	–	0,52	0,59	0,53	0,57	0,077	249
	27	–	0,58	0,65	–	–	0,104	190
	32	–	0,63	0,7	–	–	0,123	161
	50	–	0,82	0,89	–	–	0,193	85,6
0,1	9	0,44	0,51	0,58	0,48	0,53	0,0707	276
	12	0,5	0,57	0,64	0,54	0,59	0,0942	207
	14	0,54	0,61	0,68	0,58	0,63	0,11	177
	16	0,57	0,64	0,71	0,61	0,66	0,126	155
	19	0,6	0,67	0,74	–	–	0,149	131
	21	0,64	0,71	0,78	0,69	0,73	0,165	118
	24	0,68	0,75	0,82	0,74	0,78	0,188	103
	28	0,74	0,81	0,88	0,8	0,84	0,22	91,3



















Приложение 4. Отечественные полевые транзисторы
 (<http://trzrus.ru/rec/recany.htm?2../mosfethp.htm>)

Наименование	Аналог	PDF	Тип	I_{max}, A	$U_{си} max, B$	$R min, Ом$
КП150	IRFP150		<i>n</i>	38	100	0,055
КП250	IRFP250		<i>n</i>	30	200	0,085
КП302 (А1-Г1)	BFR30,2SK543-5		<i>n</i>	0,043	20	100
КП350	IRFP350		<i>n</i>	14	400	0,3
КП364 (А-И)	2SK653		<i>n</i>	0,02	25	
КП402 (А)	BF998		<i>p</i>	0,15	200	20
КП403 (А)	3SK132		<i>n</i>	0,3	200	6
КП450	IRFP450		<i>n</i>	12	500	0,4
КП460	IRFP460		<i>n</i>	20	500	0,27
КП501(А,Б,В)	ZVN2120		<i>n</i>	0,18	240	10
КП502А	BSS124		<i>n</i>	0,12	400	28
КП504(А-Е)	BSS88		<i>n</i>	0,25	240	8
КП505(А-Г)	BSS295		<i>n</i>	1,4	60	0,3
КП507А	BSS315		<i>p</i>	1,1	50	0,8
КП508А	BSS92		<i>p</i>	0,15	240	20
КП511А,Б	TN0535		<i>n</i>	0,14	400	22
КП601 (А,Б)			<i>n</i>	0,4	20	
2П701 (А,Б)	MTP3N50		<i>n</i>	9	500	1,2
2П703 (А,Б)	RRF623		<i>p</i>	12	150	0,7
КП704 (А,Б)	2SK757		<i>n</i>	10	200	0,2
КП705 (А-В)	APT1004		<i>n</i>	5,4	1000	3,3
2П706 (А-В)	2SK1248		<i>n</i>	20	500	0,4
КП707 (А-В)	2SK1117		<i>n</i>	25	750	1
КП707(А1-В1)	BUZ90		<i>n</i>	6	750	1
КП709(А,Б)	BUZ90А		<i>n</i>	4	600	2
КП723 (А-В)	FZ45		<i>n</i>	50	60	0,028
КП726 (А,Б)	BUZ90		<i>n</i>	4,5	600	1,6
КП727 (А,Б) КП727 (А-В)	IRFZ34		<i>n</i>	30	60	0,05

Наименование	Аналог	PDF	Тип	I_{max}, A	$U_{си max}, B$	$R_{min}, Ом$
КП728 (Г1-С1)			<i>n</i>	3,3	700	3
КП731 (А-В)	IRF710		<i>n</i>	2	400	3,6
П733 (А)			<i>n</i>	1,5	400	3,6
КП737 (А-В)	IRF634, IRF630		<i>n</i>	9	250	0,4
КП739 (А-В)	IRFZ14, IRFZ10		<i>n</i>	10	60	0,2
КП740 (А-В)	IRFZ24, IRFZ25		<i>n</i>	17	60	0,1
КП741 (А,Б)	IRFZ48		<i>n</i>	50	60	0,018
КП742 (А,Б)	STH75N0		<i>n</i>	80	60	0,012
КП743 (А-В)	IRF510, IRF512		<i>n</i>	5,6	100	0,54
КП743 (А1-В1)			<i>n</i>	5,6	100	0,54
КП744 (А-Г)	IRF520		<i>n</i>	9,2	100	0,27
КП745 (А-В)	IRF530		<i>n</i>	14	100	0,16
КП746 (А-В)	IRF540		<i>n</i>	28	100	0,077
КП747А	IRFP150		<i>n</i>	41	100	0,055
КП748 (А-В)	IRF610		<i>n</i>	3,3	200	1,5
КП749 (А-Г)	IRF620		<i>n</i>	5,2	200	0,8
КП750 (А-Г)	IRF640		<i>n</i>	18	200	0,18
КП751 (А-В)	IRF720		<i>n</i>	3,3	400	0,8
КП767 (А-В)	RF630		<i>n</i>	18	200	0,18
КП768 (А-М)	IRF730, IRF720		<i>n</i>	10	400	0,55
КП769 (А-Г)	IRF540, IRF530		<i>n</i>	28	100	0,077
КП770 (А,Д,К)	IRF840, IRF830		<i>n</i>	8	500	0,85
КП771 (А-Г)	STP40N1		<i>n</i>	40	100	0,055
КП775 (А-В)	2SK2498А		<i>n</i>	50	60	0,009
КП780 (А-В)	IRF820		<i>n</i>	2,5	500	3
КП784А	IRF9Z34		<i>p</i>	18	60	0,14
КП785А	IRF9540		<i>p</i>	19	100	0,2
КП796(А-В)	IRF9540		<i>p</i>	4,1	300	1
2П797Г	IRF540		<i>n</i>	28	100	0,077
2П7102Д	IRFZ44		<i>n</i>	50	60	0,028

Наименование	Аналог	PDF	Тип	I_{max}, A	$U_{си max}, B$	$R_{min}, Ом$
КП7128А,Б	IRF5210		<i>p</i>	40	100	0,06
КП7129А	SSU1UN60		<i>n</i>	1,2	600	11,5
2П7140А	IRF7103		<i>n</i>	3	???	0,13
2П7144А	IRF9140		<i>p</i>	19	100	0,2
2П7145А,Б	IRF250		<i>n</i>	30	200	0,085
2П7160А			<i>n</i>	46	30	0,006
КП7173А	STP4NK60Z		<i>n</i>	4	600	2
КП7174А			<i>n</i>	18	75	0,075
КП7176А			<i>n</i>	80	100	0,026
КП7177 А,Б	IXFH50N20, IRF260		<i>n</i>	50	200	0,045
КП7178А			<i>n</i>	40	300	0,085
КП7180 А,Б	IRF460, IXFH24N50		<i>n</i>	26	500	0,2
КП7181А			<i>n</i>	40	500	0,14
КП7182А	IXFH20N60		<i>n</i>	20	500	0,35
КП7183А	OM6053SJ		<i>n</i>	30	600	0,83
КП7184А	IXFH15N80		<i>n</i>	15	800	0,6
КП7275	IXFH75N10		<i>n</i>	75	100	0,026
КП801 (А-Г)			<i>n</i>	5	65	2,2
2П802А			<i>n</i>	2,5	500	1,5
2П803 (А,Б)	BV2310		<i>n</i>	4,5	1000	4
КП804А	RFL2N05		<i>n</i>	1	60	0,6
КП805 (А-В)	BUZ216		<i>n</i>	4	600	2
КП809 (А-Е1)	BVZ90		<i>n</i>	9,6	800	0,3
КП810 (А-В)	DVZ216		<i>n</i>	7	700	0,2
КП812 (А1-В1)	IRFZ44, IRFZ34		<i>n</i>	50	60	0,028
КП813 (А1,Б1)			<i>n</i>	22	200	0,12
КП901			<i>n</i>	2	85	
КП902			<i>n</i>	0,25	70	
КП904			<i>n</i>	7,5	100	
КП905			<i>n</i>	0,3	80	

Окончание прил. 4

Наименование	Аналог	PDF	Тип	I_{\max} , А	$U_{\text{си max}}$, В	R_{min} , Ом
КП907			<i>n</i>	2,1	80	
2П912 (А,Б)			<i>n</i>	20	100	0,1
2П914А			<i>n</i>	0,1	50	23
2П917 (А,Б)			<i>n</i>	5	300	2,5
КП921А			<i>n</i>	10	45	0,08
КП922 (А,Б,А1,Б1)	NTP7N05		<i>n</i>	10	100	0,13
2П926(А,Б)			<i>n</i>	16,5	450	0,1
КП931 (А-В)	NTP7N05		<i>n</i>	5	800	0,07
КП932А	MTP5N05		<i>n</i>	0,3	250	40
КП934 (А,Б)	F1053		<i>n</i>	10	450	0,03
2П942 (А-В)	MRF136		<i>n</i>	10	800	0,2
КП953 (А-Д)	F1014		<i>n</i>	15	800	0,05
КП954 (А-Е)	BFL545		<i>n</i>	20	150	0,025
КП959 (А-В)	BVK462		<i>n</i>	0,2	300	
КП960 (А-В)	2SK659		<i>p</i>	0,2	300	
КП961 (А-Е)	BLF242(А)		<i>n</i>	5	250	0,1
КП965 (А-Д)			<i>p</i>	5	250	0,1
КП971 А,Б	КТ847,КТ878		<i>n</i>	25	900	0,04
КП973 А,Б	КТ847,КТ848		<i>n</i>	30	700	0,03

Учебное издание

САМОЙЛОВ Александр Георгиевич
САМОЙЛОВ Сергей Александрович

УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Учебное пособие

Редактор А. П. Володина

Технический редактор Е. А. Лебедева

Корректор О. В. Балашова

Компьютерная верстка Л. В. Макаровой

Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Подписано в печать 30.04.21.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 9,3. Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.