

ГЛАВА 4

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

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

Москва – 2021

СОДЕРЖАНИЕ

4.1 Введение.....	3
4.2 Вентильные компоненты.....	—
4.2.1 Общие сведения.....	—
4.2.2 Неуправляемые вентили	—
4.2.3 Вентили с неполным управлением.....	12
4.2.4 Вентили с полным управлением.....	17
4.3 Магнитные и моточные компоненты	33
4.4 Конденсаторы	53
4.5 Защитные компоненты	64
4.5.1 Элементы для ограничения токов	—
4.5.2 Элементы для ограничения перенапряжений	67
Контрольные вопросы	71
Список литературы	—

4.1 Введение

Достигнутый за последние десятилетия уровень развития такой наукоёмкой и быстроразвивающейся области техники как силовая электроника выдвинул её на передовые рубежи высоких технологий. В частности, это стало возможным за счёт появления новых и совершенствования известных активных силовых приборов, а также магнитных и пассивных компонентов.

Целью настоящей лекции является знакомство с элементной базой современных источников электропитания (ИЭП) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

4.2 Вентильные компоненты

4.2.1 Общие сведения

Все современные преобразователи электроэнергии преимущественно выполняют на силовых полупроводниковых вентилях: неуправляемых и управляемых. Управляемые вентили разделяют на два класса:

- вентили с неполным управлением;
- вентили с полным управлением.

Одним из условий значительного улучшения качественных показателей ИЭП является совершенствование силовых вентилях. Действительно, исторически прослеживается эволюционная цепочка: электровакуумная лампа, кенотроны, ртутные вакуумные приборы, магнитный усилитель, тиристор, биполярный транзистор, полевой транзистор. Каждый из этих приборов, по существу, открывал новые возможности, благодаря которым непрерывно, а в момент появления нового прибора скачком росли качественные показатели ИЭП.

4.2.2 Неуправляемые вентили

Диод – это неуправляемый вентиль, проводящий ток в одном направлении при приложении к нему прямого напряжения. Различают

электровакуумные диоды (кенотроны), газонаполненные (газотроны, игнитроны), полупроводниковые. В настоящее время в подавляющем большинстве случаев в РЭА применяют полупроводниковые диоды. Обозначение на схемах, структура, а также внешний вид некоторых полупроводниковых диодов приведены на рисунке 4.1.

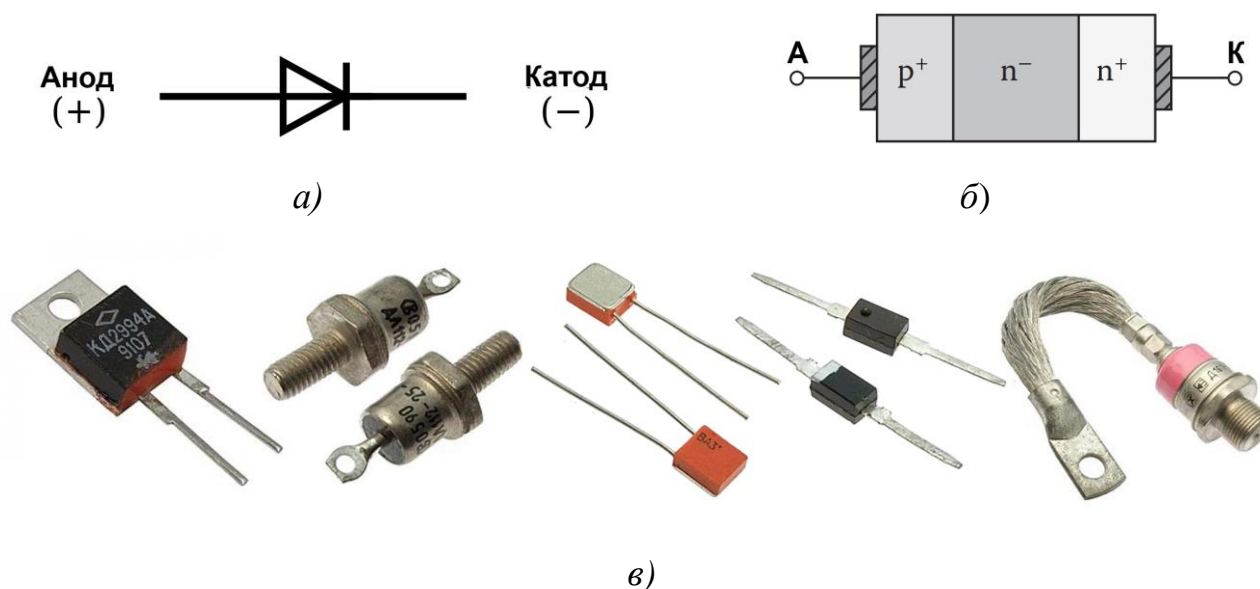


Рисунок 4.1 – Обозначение на схеме (а), структура (б) и внешний вид некоторых полупроводниковых диодов (в)

Электроды диода носят названия анод и катод. Если к диоду приложено прямое напряжение (то есть анод имеет положительный потенциал относительно катода), то диод открыт (через диод течёт прямой ток, диод имеет малое сопротивление). Напротив, если к диоду приложено обратное напряжение (катод имеет положительный потенциал относительно анода), то диод закрыт (сопротивление диода велико, обратный ток мал и может считаться равным нулю во многих случаях). Типовые вольтамперные характеристики (ВАХ) реального и идеального диодов приведены на рисунке 4.2.

В силовой электронике находят широкое применение так называемые выпрямительные и быстросовсстанавливающиеся диоды.

Выпрямительные диоды содержат один p - n -переход и являются относительно простыми полупроводниковыми приборами. В зависимости от рабочей частоты (быстродействия), такие диоды делят на низкочастотные (до 1 кГц), высокочастотные и импульсные (быстродействующие).

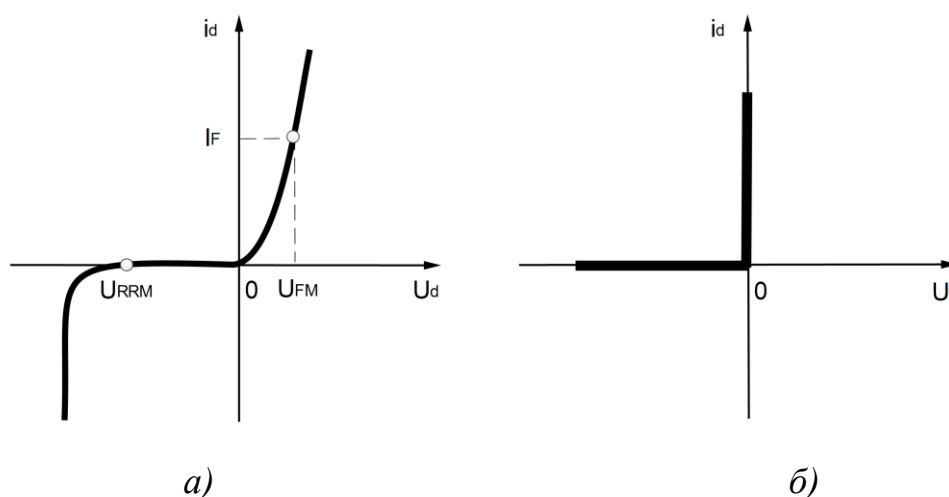


Рисунок 4.2 – Типовая ВАХ реального (а) и идеального (б) диода

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

- максимально допустимое обратное повторяющееся напряжение U_{RRM} ;
- максимально допустимый выпрямленный прямой средний/прямой эффективный (среднеквадратичный) ток – $I_{F(AV)}/I_{F(RMS)}$;
- максимально допустимый импульсный ток I_{FSM} – для повторяющихся или единичных импульсов диодов;
- прямое падение напряжения на включенном диоде U_{FM} ;
- допустимая рабочая частота f_{max} .

Максимально допустимая мощность рассеяния, как правило, не задаётся и определяется стандартными типами корпусов диодов (с определёнными значениями теплового сопротивления переход-корпус $R_{th}^{\circ C}$). В большинстве случаев выпрямительные диоды крепят к теплоотводящему радиатору (охладителю), а при таблеточной конструкции корпуса – с двух сторон. Отвод тепла обеспечивается путём естественной конвекции или принудительной вентиляции.

Для сетевых выпрямителей обычно выбирают диоды (или диодные сборки) с максимально допустимым обратным напряжением $U_{RRM} = 600-800$ В для однофазной (~ 230 В) и $800-1000$ В для трёхфазной ($\sim 230/400$ В) сети переменного тока.

Предельные характеристики на сегодняшний день для выпрямительных диодов составляют 10 кВ/ 8 кА. Примечательно, что их выпускают чаще всего в виде сборок и модулей, внутри которых диоды соединены тем или иным образом (рисунок 4.3). Внешний вид таких сборок приведён на рисунке 4.4

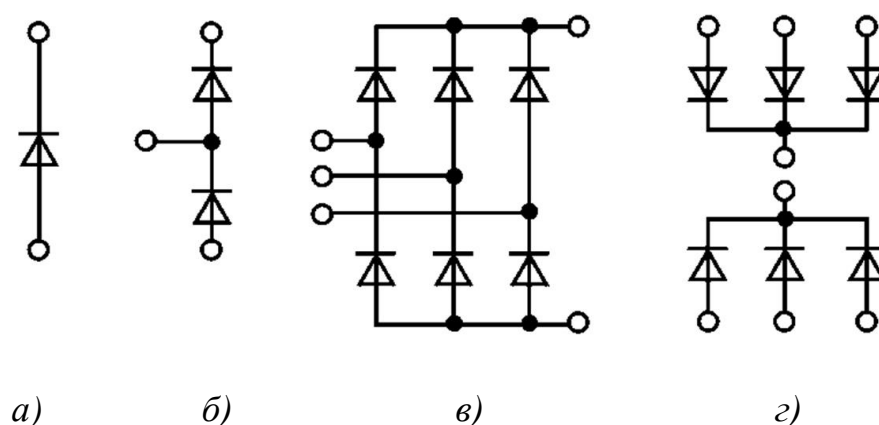


Рисунок 4.3 – Схемы силовых диодных модулей:
 одиночного (а); полумостового (б); трёхфазного мостового (в); трёхфазного полумостового (г)



Рисунок 4.4 – Внешний вид диодных силовых модулей

Совершенно очевидно, что выпрямительные диоды будут играть

значительную роль для ИЭП и в будущем. И хотя это достаточно проработанный класс приборов силовой электроники, их развитие будет непрерывно продолжаться.

Отечественные низкочастотные диоды имеют хорошо отработанную технологию, достаточно надёжны и сравнительно недороги, например, диоды серий Д1ХХ, Д2ХХ, Д3ХХ и т. д. Эти диоды покрывают диапазон напряжений $U_{RRM} = 100-10000$ В и токи $I_{F(AV)} = 10-9100$ А. Диоды выпускаются в штыревом (металлостеклянные корпуса SD1-SD3, металлокерамические корпуса SD4-SD7), таблеточном и модульном исполнении. Одним из основных производителей силовых диодов являются АО "Электровыпрямитель" (г. Саранск) и АО "Электрум АВ" (г. Орёл).

Быстровосстанавливающиеся диоды (fast recovery diod – FRED) делят на диоды с "тонкой базой" по эпитаксиально-планарной технологии (fast-FRED и ultrafast-FRED) и диоды Шоттки.

Как правило, FRED-диоды имеют планарную структуру и легируются платиной, чтобы гарантировать высокую производительность, прочность и надёжность характеристик. Максимальная рабочая температура перехода, предусмотренная технологией, составляет 175°C. Используя самые последние разработки в области эпитаксиальной структуры и передовые технологии обработки, HEXFRED-диоды (запатентованная разновидность FRED-диодов) позволяют разработчикам значительно упростить демпфирующие цепочки, уменьшить количество компонентов схемы и размер радиатора охлаждения.

В диодах с барьером Шоттки (диоды Шоттки) вместо p - n -перехода используется контакт металлической поверхности с полупроводником. В месте контакта возникают обеднённые носителями заряда слои полупроводника, которые называются запиорными.

Диоды Шоттки отличаются от диодов с p - n -переходом следующими параметрами:

- более низкое прямое падение напряжение U_{FM} ;
- более низкое обратное напряжение U_{RRM} ;
- более высокий ток утечки (обратный ток) I_R ;
- почти полностью отсутствует заряд обратного напряжения Q_R .

Главное отличие диодов Шоттки от других диодов состоит в том, что в их структуре практически отсутствуют неосновные носители заряда, которые, как раз, и влияют на величину времени обратного восстановления t_{rr} . Также в диодах Шоттки прямое падение напряжения является функцией обратного напряжения. У современных диодов Шоттки максимальное обратное напряжение составляет около 150-200 В, а прямое падение напряжения меньше, чем у диодов с p - n -переходом, на 0,2-0,35 В.

Диоды Шоттки незаменимы при проектировании мощных низковольтных (на практике до 27-48 В) и сильноточных высокочастотных выпрямителей благодаря более низкому прямому падению напряжения и отсутствию заряда обратного напряжения.

Время восстановления обратного сопротивления диода t_{rr} является основным параметром быстровосстанавливающихся диодов, определяющих их инерционные свойства. При изменении полярности приложенного к диоду напряжения обратный ток диода может увеличиваться в десятки раз. Величина t_{rr} в определённой степени зависит от "мягкости" ("плавности") характеристики восстановления и нормируется при конкретной величине прямого тока и обратного тока. При некорректном выборе диодов в части величины t_{rr} и частоты коммутации f_k в устройствах силовой электроники с увеличением частоты существенно возрастают динамические потери. Особенно это важно в таких устройствах, как импульсные ИЭП.

На рисунке 4.5 показана типовая кривая обратного восстановления быстровосстанавливающегося диода. В момент смены полярности начинается спадание тока диода i_D , затем ток достигает нулевого значения, меняет знак и

далее достигает значение I_{Rmax} , называемое в технической документации пиковым током обратного восстановления (peak reverse recovery current). Процесс спадания и нарастания тока обратного восстановления занимает время t_{rr} , называемое временем обратного восстановления диода.

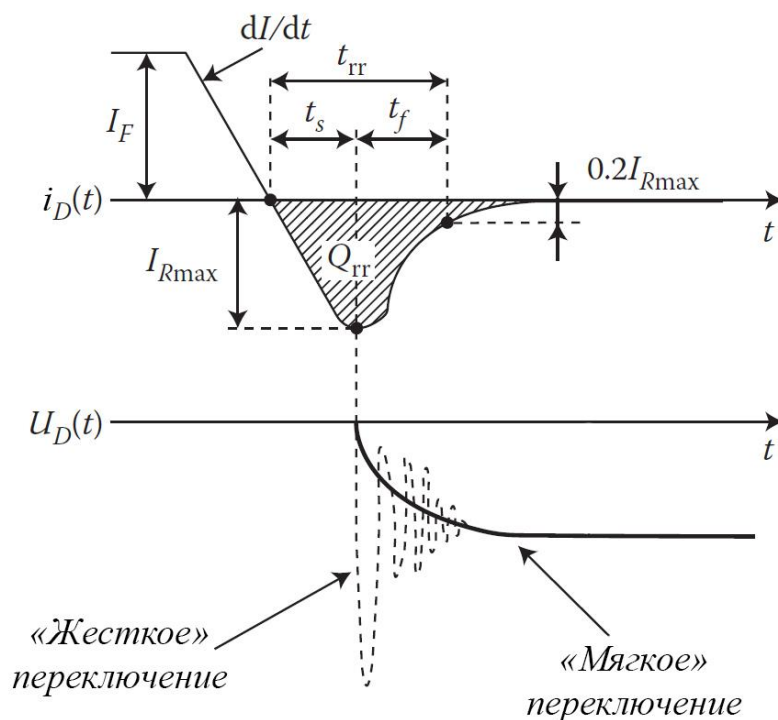


Рисунок 4.5 – К определению времени обратного восстановления диода

В таблице 4.1 приведены характеристики и особенности некоторых современных быстровосстанавливающихся диодов. Отечественные диоды и сборки представлены продукцией АО "Воронежский завод полупроводниковых приборов – Сборка" (АО "ВЗПП-С", г. Воронеж) и ЗАО "Группа Кремний-Эл" (г. Брянск).

Таблица 4.1 – Характеристики современных диодов

№ п/п	Тип диода, производитель	U_{RRM} , В	I_F , А	t_{rr} , нс
1	2Д678БС93 (АО "ВЗПП-С")	600	60	-
2	МЕО 450-12 DA FRED модуль ("IXYS")	1200	453	450

№ п/п	Тип диода, производитель	U_{RRM} , В	I_F , А	t_{rr} , нс
3	2Д272И1 Диод Шоттки (АО "ВЗПП-С")	300	15	-
4	2ДШ2134АС4 Диод Шоттки (АО "ВЗПП-С")	100	40	-
5	HFA04TB120 HEXFRED (ex-"International Rectifier", "Vishay")	1200	6	26
6	249NQ150 Диод Шоттки ("Vishay")	150	240	-
7	MBR7030WTG Диод Шоттки ("Fairchild")	30	70	-
8	IDW100E60 Emitter Controlled Diode ("Infineon")	600	100	120
9	МКД2-100-17 SiC модуль (ЗАО "Группа Кремний-Эл")	1200	100	-
10	IDH03SG60C SiC диод Шоттки ("Infineon")	600	3	<10
11	IDW40G120C5B SiC диод Шоттки ("Infineon")	1200	40	<10
12	PCFFS20120AF SiC диод Шоттки ("Fairchild")	1200	20	-
13	DSA300I200NA Диод Шоттки ("IXYS")	200	300	-

В последние годы замедлился процесс улучшения характеристик быстросовосстанавливающихся диодов на базе кремния (Si). Текущее состояние и возможности быстросовосстанавливающихся диодов определяют "канавочные" (траншейные – trench) структуры, ячеистые pin-диоды Шоттки и некоторые другие технологии.

Также в последние годы ведутся широкие исследования новых материалов для приборов силовой электроники – арсенида галлия, карбида

кремния, III-нитридов. Диоды из арсенида галлия (GaAs) заняли свою специфическую нишу на рынке и будут оставаться там. Однако для силовых устройств очень перспективен именно карбид кремния (SiC).

Пробивная напряжённость электрического поля SiC более чем на порядок превышает соответствующие показатели у Si и GaAs. Это обстоятельство приводит к снижению сопротивления диода в открытом состоянии. Малое удельное сопротивление материала в открытом состоянии в сочетании с высокой плотностью тока и большой величиной теплопроводности позволяет использовать очень маленькие по размерам кристаллы для встраивания в силовые приборы.

Большая ширина запрещённой энергетической зоны SiC является результатом более высокого, по сравнению с Si и GaAs, барьера Шоттки. В результате очень малая величина тока утечки при повышенной температуре кристалла (менее 70 мкА при 200°C) снижает термоэлектронную эмиссию за пределами барьера. Высокая теплопроводность SiC уменьшает тепловое сопротивление кристалла по сравнению с Si диодами почти в два раза.

Электрические параметры SiC диодов стабильны и слабо зависят от температуры, что способствует высокой надёжности изделий. SiC устойчив к жёсткой радиации, поэтому её воздействие не приводит к деградации свойств кристалла. Высокая рабочая температура кристалла (более 600°C) позволяет создавать высоконадёжные приборы для жёстких условий эксплуатации и специальных применений.

Силовые диоды из SiC только выходят на рынок, но могут стать доминирующими для высокочастотных (и высокотемпературных) применений, если будут решены проблемы получения исходного материала. В настоящее время на рынке есть SiC диоды Шоттки на напряжения до 1200 В и токи до 40 А (таблица 4.1). В ближайшее время ожидается промышленное производство SiC диодов на 2500 В/100 А, а к концу десятилетия – 5 кВ/200 А.

К концу десятилетия возможно также появление диодов на основе GaN и алмазных плёнок.

Ведущей фирмой в этом направлении является "Cree", хотя "Infineon", "IXYS" и другие зарубежные фирмы также имеют технологии производства SiC приборов. Основные параметры некоторых SiC диодов Шоттки приведены в таблице 4.1.

Исследования и разработки SiC приборов проводятся и в России, например, в АО "НПП "ТЭЗ" (пос. Томилино), ПАО "Светлана" (г. Санкт-Петербург) и ЗАО "Группа Кремний-Эл" (г. Брянск).

4.2.3 Вентили с неполным управлением

Вентили с неполным управлением характеризуются тем, что переход их из состояния "выключено" в состояние "включено" возможен путём хотя бы кратковременного воздействия маломощным сигналом по цепи управления при условии наличия на вентиле прямого напряжения, то есть напряжения такой полярности, при которой клапан может пропускать ток через себя. Переход же клапана из состояния "включено" в состояние "выключено", то есть запирающее действие клапана и прекращение протекания прямого тока через него, возможно только при смене полярности напряжения на вентиле (обратное напряжение) по силовой цепи, а не в результате воздействия по цепи управления. Таким образом, неполная управляемость означает, что клапан можно включить воздействием по цепи управления, но невозможно выключить воздействием по управлению, а требуется сменить полярность напряжения на вентиле на обратную.

Главными представителями не полностью управляемых клапанов являются:

- тиристоры (SCR – Silicon Controlled Rectifier) – четырёхслойные $p-n-p-n$ полупроводниковые приборы с анодом A (крайняя p -область), катодом K (крайняя n -область) и управляющим электродом G (внутренняя область);

- симисторы (или триаки, TRIAC – Triode for Alternating Current) – пятислойные $p-n-p-n-p$ полупроводниковые приборы, которые можно представить в виде комбинации двух встречно-параллельно включенных четырёхслойных (тиристорных) $p-n-p-n$ структур.

На рисунках 4.6-4.9 приведены схемные обозначения тиристора и симистора, а также их ВАХ соответственно. Внешний вид приборов приведён на рисунке 4.10.

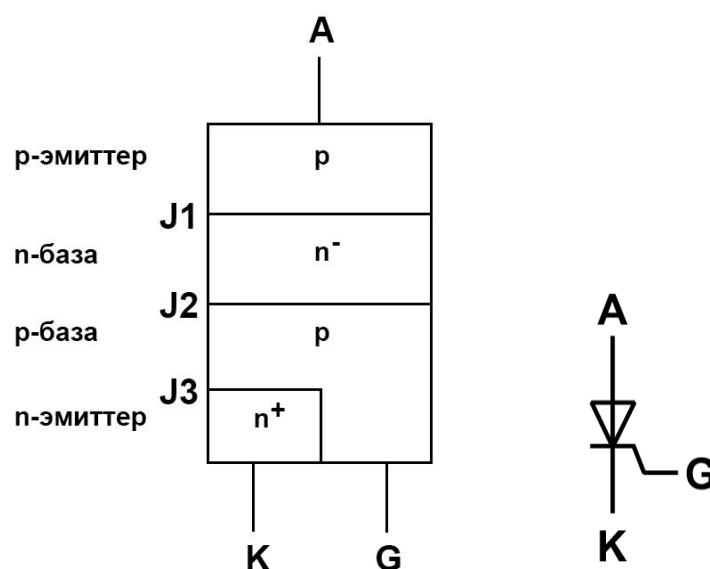


Рисунок 4.6 – Структура и схемное обозначение тиристора

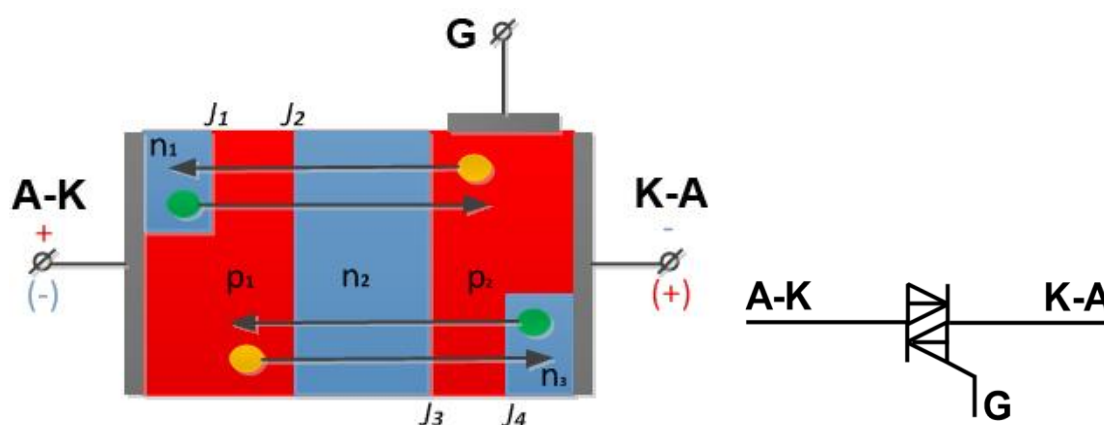


Рисунок 4.7 – Структура и схемное обозначение симистора

Из идеальной ВАХ тиристора, в частности, видно, что тиристорный ключ может проводить ток только в одном направлении, а в закрытом состоянии может выдерживать как прямое, так и обратное напряжение.

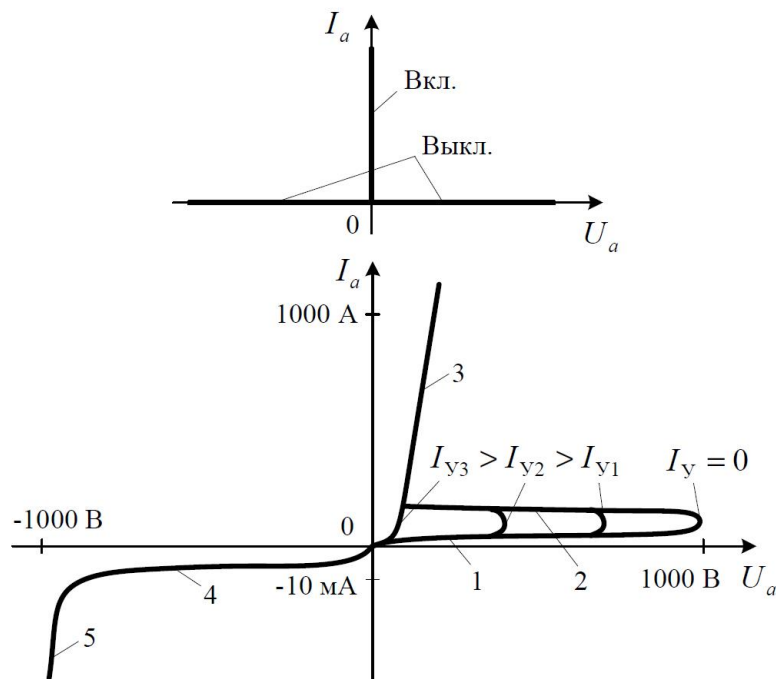


Рисунок 4.8 – Идеальная и реальная ВАХ тиристора

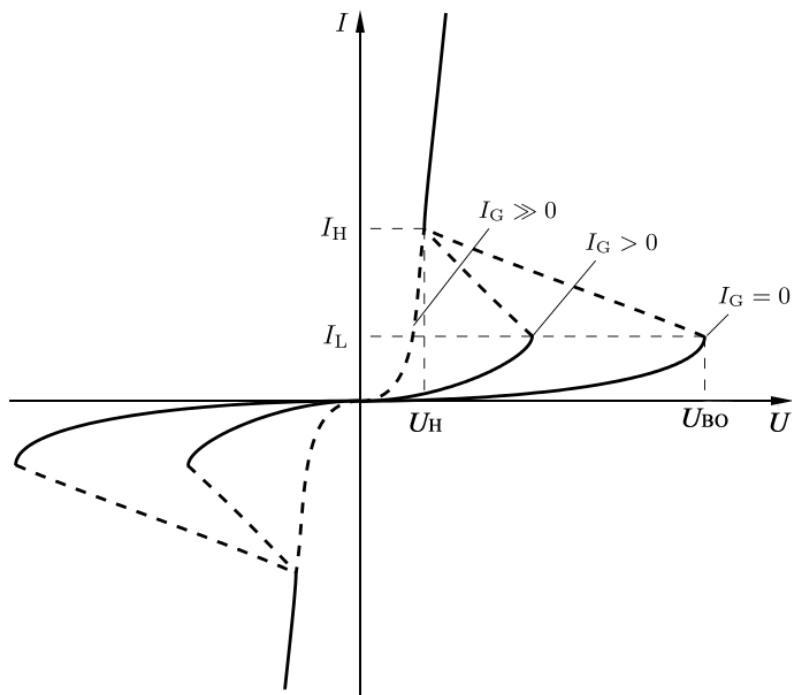


Рисунок 4.9 – Реальная ВАХ симистора

В реальной ВАХ предельное прямое напряжение, которое выдерживает тиристор без его включения, имеет максимальные значения при токе управления $I_y = 0$. Чем больше ток управления, тем при меньшем напряжении на аноде включается тиристор. Включенному состоянию тиристора соответствует ветвь 3, а выключенному – ветвь 1. Процессу включения соответствует участок 2. При приложении к тиристорному обратного напряжения прибор всё время находится в закрытом состоянии (участок 4), поскольку переходы $J1$ и $J3$ находятся под обратным напряжением, а $J2$ смещён в прямом направлении. При увеличении обратного напряжения начинается резкое возрастание обратного тока (участок 5), связанное с лавинным пробоем тиристора. Участок 5 является запрещённым участком работы тиристора.

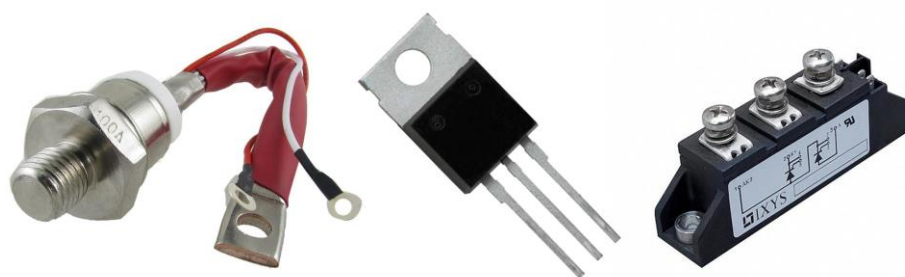


Рисунок 4.10 – Внешний вид некоторых тиристорных и симисторных

Основными параметрами тиристорных, определяющими возможности их использования в конкретных схемах ИЭП, являются следующие:

- *среднее значение анодного тока тиристора I_a* , по которому он маркируется заводом-изготовителем исходя из уровня допустимых потерь активной мощности (выделения тепла) в вентиле при прохождении прямого тока. Тиристоры выпускаются на средний ток от 1 А до нескольких тысяч ампер;

- *ток удержания I_{yd}* , минимальное значение прямого тока тиристора в случае отсутствия управления, когда тиристор ещё остается проводящим. При снижении анодного тока ниже этого значения тиристор переходит в закрытое состояние;

- *максимально допустимое прямое и обратное напряжения U_{max}* на вентиле, которое он должен выдерживать без пробоя. Маркируется в виде класса вентиля по напряжению (бывают вентили от 1 до 50 классов), умножение которого на 100 определяет максимально допустимое напряжение;

- *время восстановления управляющих свойств тиристора t_v* , которое определяется как минимально необходимая продолжительность приложения к вентилю обратного напряжения (при его выключении) после прохождения прямого тока, в течение которого он восстанавливает свои запирающие свойства и к нему снова можно приложить максимальное прямое напряжение. Современные тиристоры имеют времена восстановления примерно от десяти микросекунд (для высокочастотных тиристоров) до двухсот микросекунд (для низкочастотных тиристоров);

- *заряд восстановления тиристора Q_v* – полный заряд (накопленный в вентиле при прохождении прямого тока), вытекающий из вентиля при переходе его из состояния проводимости прямого тока в состояние появления на вентиле обратного напряжения;

- *амплитуда обратного тока вентиля I_{bmax}* , обусловленного выводом заряда восстановления Q_v из вентиля в момент спада до нуля прямого тока вентиля (при выключении) с определённой скоростью;

- *предельная скорость нарастания прямого напряжения на вентиле*, при превышении которой возможно включение тиристора в прямом направлении даже при отсутствии управления из-за появления сигнала-помехи в цепи его управляющего электрода, "просачивающегося" через паразитную ёмкость между ним и анодом тиристора. Обычно эта скорость ограничена от ста до тысячи вольт в микросекунду для различных типов тиристоров;

- *предельная скорость нарастания прямого тока тиристора при его включении*, связанная с неоднородным распределением тока по площади p - n перехода тиристора, что может привести к локальному повреждению

(прожиганию) p - n перехода. Обычно эта величина ограничивается изготовителем на уровне от нескольких десятков до нескольких сотен ампер в микросекунду;

- *предельная частота импульсов прямого тока вентиля*, до которой вентиль может работать без снижения допустимого среднего значения анодного тока. Для низкочастотных тиристоров и диодов эта величина равна 400 Гц, для высокочастотных – до 10-20 кГц;

- *время включения $t_{вкл}$ и время выключения $t_{выкл}$ полупроводникового вентиля* характеризуют соответственно время перехода вентиля из выключенного состояния во включенное и из включенного состояния в выключенное;

- *параметры сигнала управления в цепи управляющего электрода тиристора*, обеспечивающие его надёжное включение: *напряжение управления $U_{уз}$* (несколько вольт), *ток управления $I_{уз}$* (доли ампера), *скорость нарастания тока управления* (1-2 А/мкс), *минимальная длительность импульса управления* (20-100 мкс). При этом мощность сигнала управления в тысячи раз меньше мощности, переключаемой тиристором в анодной цепи.

Области применения тиристоров – преобразователи напряжения с коммутацией большой (свыше 1 МВт) мощности, применяемые для электроприводов постоянного тока, высоковольтных регулируемых электроприводов переменного тока, мощных статических компенсаторов реактивной мощности, технологических целей (электролиз, гальваника, плавка и т. д.). Симисторы применяют в термостатах, светочувствительных регуляторах и т. д.

4.2.4 Вентили с полным управлением

Вентили с полным управлением характеризуются тем, что их можно отпереть и запереть при наличии на них прямого напряжения воздействием только по цепи управления.

Промышленное освоение полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов, характеризующихся широким диапазоном значений коммутируемой мощности, коэффициента полезного действия (КПД), массогабаритных показателей и надёжности, позволило осуществлять экономичное преобразование электроэнергии и открыло широкие возможности для создания современных ИЭП.

Вентили с полным управлением обладают характеристикой ключевого элемента, который коммутирует (включают и отключают) участки электрической цепи. Действие ключевого элемента основано на том, что во включенном состоянии он обладает очень малым сопротивлением, а в выключенном – весьма большим. Обозначение ключевого элемента, а также его идеальная и реальная ВАХ показаны на рисунке 4.11.

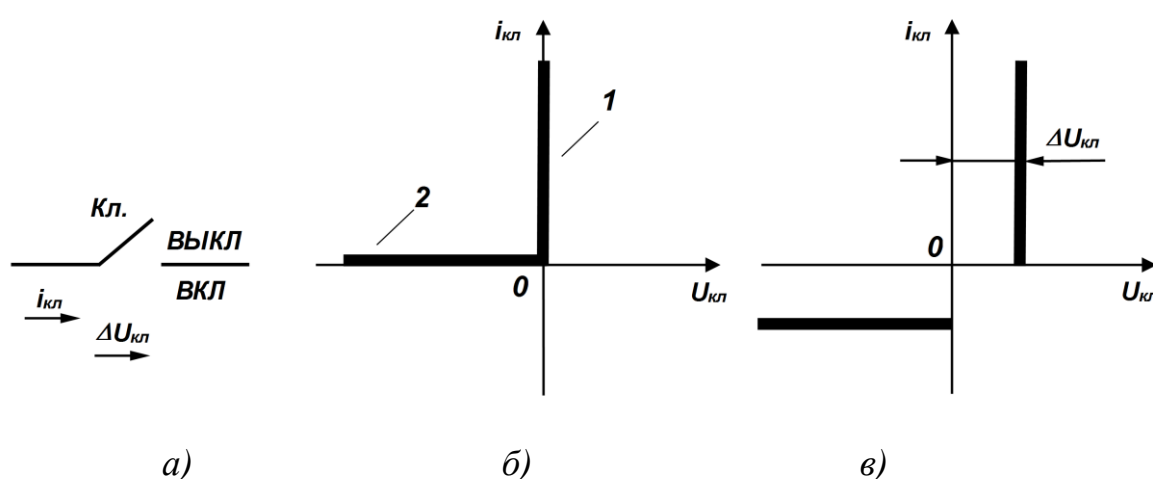


Рисунок 4.11 – Обозначение ключевого элемента (а) и его ВАХ – идеальная (б) и реальная (в)

Элементы с такими ВАХ имеют два устойчивых состояния: включенное, соответствующее $R_{вкл} = 0$ (участок 1 ВАХ); выключенное, соответствующее $R_{выкл} = \infty$ (участок 2 ВАХ). При этом должно обеспечиваться мгновенное переключение из одного состояния в другое и наоборот по соответствующему сигналу управления нулевой мощности.

Основными параметрами ключевого элемента являются сопротивления во включенном и выключенном состояниях, остаточное напряжение и быстродействие, определяемое временем переключения.

Реальные ключевые элементы, у которых $R_{вкл} > 0$ и $R_{выкл} \neq \infty$, могут лишь приближаться по своим параметрам к идеальным. При этом разные параметры накладывают и различные ограничения на возможность эффективного использования ключей. Так, например, ВАХ реального элемента, имеющего падение напряжения при прямом токе и обратный ток, определяет потери мощности в ключе в проводящем и непроводящем состояниях.

Потери мощности в ключе сказываются на КПД всего ИЭП, поэтому их снижение является одной из основных задач разработчиков силовых приборов.

Динамические потери в ключевом элементе, возникающие в процессе его коммутации, накладывают ограничение на повышение рабочих частот силовых устройств. В то же время повышение рабочих частот является доминирующей тенденцией в силовой электронике за последние годы. Это даёт возможность улучшить технико-экономические показатели ИЭП и повысить их быстродействие.

В настоящее время функции ключевых элементов выполняют полупроводниковые приборы различных типов. При этом к элементам силовой электроники относят приборы, рассчитанные на предельные значения среднего или действующего значения тока более 10 А.

Основными представителями вентилях с полным управлением являются:

- запираемые (двухоперационные) тиристоры (GTO – Gate Turn Off);
- биполярные транзисторы;
- полевые транзисторы;
- биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT – Isolated Gate Bipolar Transistor).

Запираемые (двухоперационные) тиристоры отличаются от обычных (однооперационных) тиристоров тем, что их можно запереть подачей

короткого, но мощного импульса тока обратной полярности в цепь управляющего электрода тиристора. Большая величина этого импульса тока определяется тем, что коэффициент усиления по току при запираании тиристора невысок, обычно не более 4-5. Поэтому для запираемого тиристора важно не среднее значение прямого тока, а его максимальное (мгновенное) значение, по которому и маркируются запираемые тиристоры. Достигнутые предельные параметры запираемых тиристоров за рубежом: по прямому току до 2,5 кА, по напряжению – до 4 кВ, по частоте переключения – до 1 кГц, по коэффициенту усиления по току выключения – до 3-5. Условное обозначение GTO-тиристора показано на рисунке 4.12а, а его структура и ВАХ – на рисунках 4.13 и 4.14 соответственно.

В последние годы GTO-тиристоры были модифицированы и создан новый тип прибора – тиристор, коммутируемый по управляющему электроду (GCT – Gate Commutated Thyristor или IGCT – Integrated Gate Commutated Thyristor). В них за счёт того, что весь ток включения/выключения коммутируется через управляющий электрод, почти на порядок сокращаются времена коммутации, а значит, и коммутационные потери. Это позволило сегодня уже создать IGCT на 3 кА и 3,5 кВ. При этом для этого тиристора, в отличие от GTO-тиристора, не требуется применения снабберов – специальных внешних цепей, формирующих траекторию рабочей точки при выключении тиристора. Условное обозначение IGCT-тиристора показано на рисунке 4.12б.

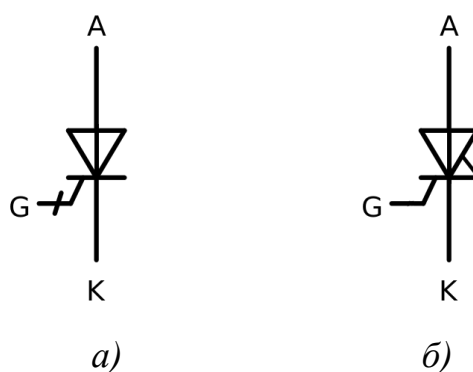


Рисунок 4.12 – Условные обозначения GTO-тиристора (а) и IGCT-тиристора (б)

Продолжаются также разработки запираемых тиристоров с полевым управлением (без потребления тока) – MCT (MOS Controlled Thyristor), которые в связи с простотой управления потеснят GTO-тиристоры при условии сопоставимости их предельных электрических параметров.

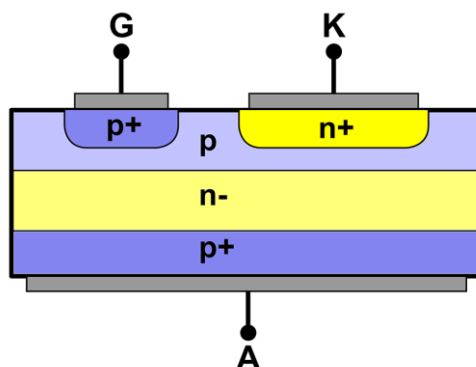


Рисунок 4.13 – Структура GTO-тиристора

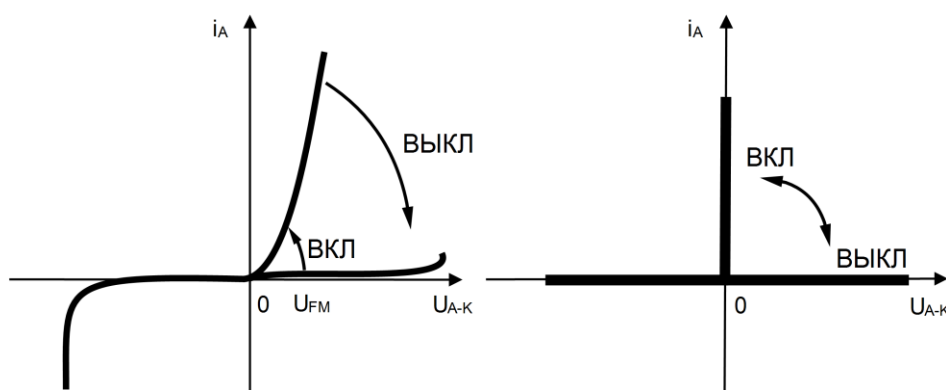


Рисунок 4.14 – Реальная и идеальная ВАХ GTO-тиристора

Области применения GTO-тиристоров – преобразователи напряжения мощностью сотни киловольт-ампер для привода вентиляторов, компрессоров, насосов (в том числе высоковольтных); мощных устройств бесперебойного электропитания; статических компенсаторов реактивной мощности.

Принципиальным отличием **транзисторов** от тиристоров является то, что в них необходимо наличие сигнала управления на всё время прохождения через транзистор прямого тока. Предельные электрические параметры транзистора, определяющие возможности его применения в устройствах силовой

электроники, зависят от типа транзистора. Внешний вид некоторых силовых транзисторов приведён на рисунке 4.15.

В силовой электронике транзисторы практически всегда применяют только в ключевом режиме, то есть они могут быть либо полностью открыты, либо полностью закрыты. Транзисторы обычно не допускают приложения к ним обратного напряжения и, поэтому, шунтируются встречно включенными диодами. Такое сочетание транзистора и диода называют обычно *транзисторным ключом*.

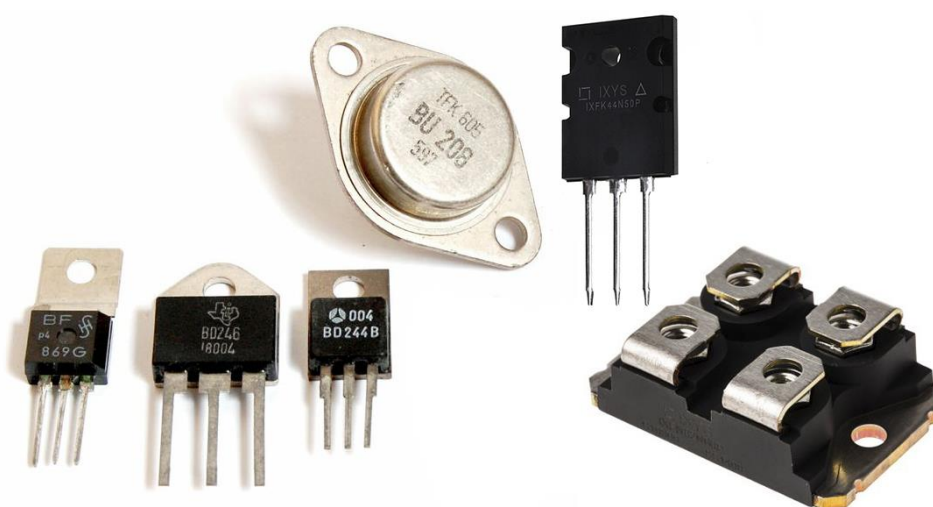
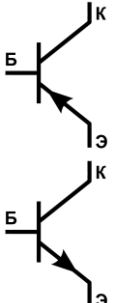
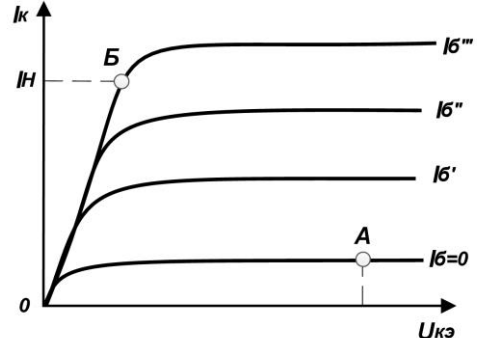
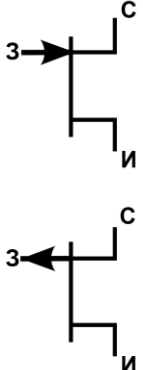
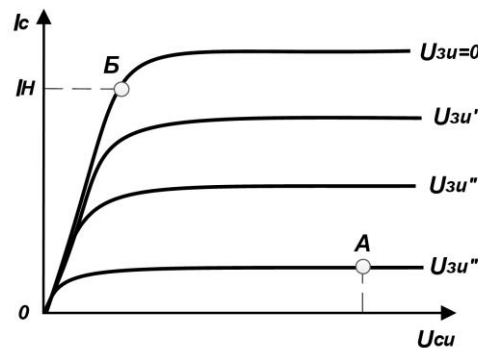
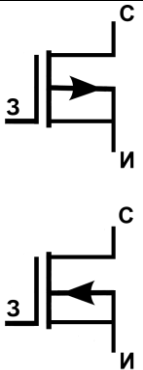
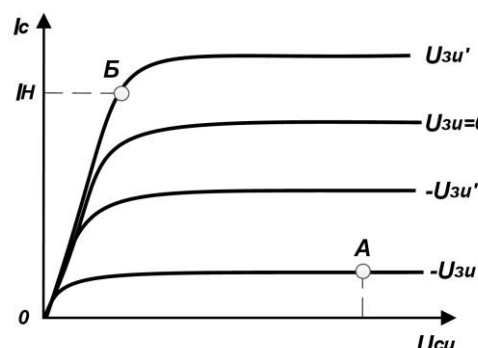


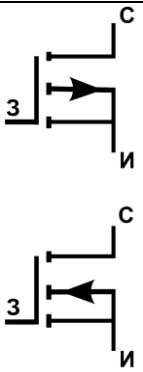
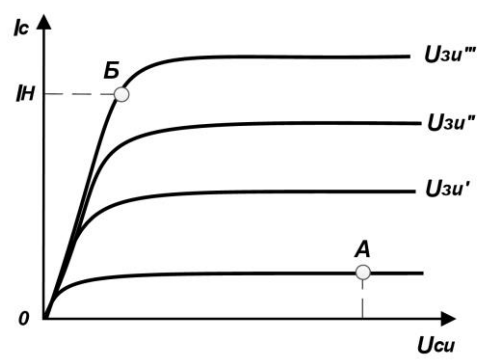
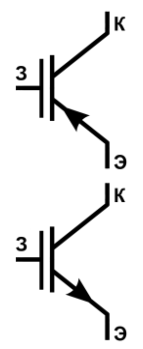
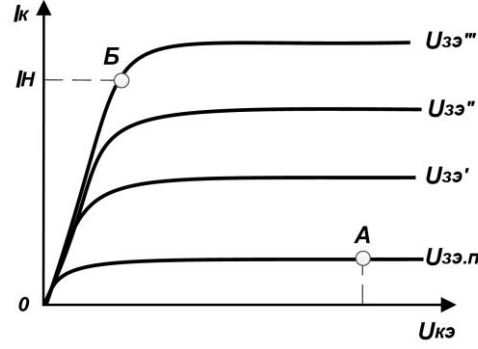
Рисунок 4.15 – Внешний вид ряда силовых транзисторов

Биполярные транзисторы (BPT – Bipolar Transistor) представляют собой трёхслойные полупроводниковые структуры $p-n-p$ и $n-p-n$ типов, в которых имеется два $p-n$ перехода: база-эмиттер и база-коллектор. Биполярный транзистор позволяет за счёт изменения тока базы $p-n$ перехода база-эмиттер, смещённого в прямом направлении, управлять в десятки раз бóльшим током, текущим через выходной переход база-коллектор, смещённый в обратном направлении. Так как обратное напряжение на коллекторном (выходном) переходе может быть также в десятки раз больше прямого напряжения на входном переходе база-эмиттер, то получается и большое усиление в транзисторе по напряжению, а значит, очень большое (в сотни и тысячи раз) усиление по мощности.

Условное обозначение и выходные ВАХ биполярного транзистора представлены в строке 1 таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – Обозначения и ВАХ транзисторов

№ п/п	Тип транзистора	Атрибуты	
		Обозначения	ВАХ
1	Биполярные <i>p-n-p</i> -типа <i>n-p-n</i> -типа		
2	Полевые (FET) канал <i>n</i> -типа канал <i>p</i> -типа		
3	Полевой МДП (MOS) со встроенным каналом <i>p</i> -типа <i>n</i> -типа		

№ п/п	Тип транзистора	Атрибуты	
		Обозначения	ВАХ
	с индуцированным каналом <i>p</i> -типа <i>n</i> -типа		
4	Комбинированный (IGBT) канал <i>p</i> -типа канал <i>n</i> -типа		

Возможность транзистора работать в ключевом режиме позволяет использовать его в устройствах силовой электроники для управления потоками электроэнергии с целью их преобразования. Ключевой режим работы транзистора обеспечивается соответствующим управлением. В закрытом состоянии транзистора ток базы делается равным нулю (точка *A* на выходных характеристиках), то есть ключ разомкнут; при этом пренебрегаем малым неуправляемым током коллектора на нижней ВАХ. В открытом состоянии транзистора ток базы устанавливается не меньше такого уровня, чтобы рабочая точка транзистора с заданной внешней цепью величиной тока нагрузки I_H была в положении *B*, соответствующем наименьшему возможному напряжению на транзисторе при этом токе, для уменьшения потерь мощности в транзисторе.

Промышленность выпускает силовые биполярные транзисторы на токи до сотен ампер с напряжением в сотни вольт. Основные недостатки

биполярных транзисторов связаны с заметными затратами мощности на управление (управление током по базе) и с недостаточным быстродействием, определяющим скорость перехода рабочей точки транзистора из положения *A* в положение *B* и обратно.

Биполярные мощные транзисторы в период 1975-1990 гг. были основным классом силовых транзисторных ключей в преобразователях электроэнергии. Несмотря на непрерывное совершенствование их параметров, улучшение характеристик быстродействия различными схемами их управления, всё же относительно большое время рассасывания избыточных носителей, а также параметры области их безопасной работы значительно ограничивали частоту работы силовых преобразователей до 80-100 кГц. Однако к концу 1980-х гг. стало очевидным, что эпоха доминирования биполярных силовых высоковольтных транзисторов, используемых в преобразователях сетевых ИЭП, работающих на рабочих частотах 100 кГц и выше, практически завершилась.

Полевые (униполярные) транзисторы (FET – Field Effect Transistor), в отличие от биполярных транзисторов, работающих с двумя типами носителей тока – электронами и дырками, используют один (униполярный) тип носителей тока.

Проводимость канала между истоком и стоком (аналоги эмиттера и коллектора биполярного транзистора) модулируется с помощью электрического поля, прикладываемого к каналу в поперечном направлении с помощью третьего электрода – затвора (управляющего электрода). Канал может быть двух типов: *n*-типа или *p*-типа.

Условные обозначения полевых транзисторов с затвором в виде обратно смещённого *p-n* перехода и их выходные ВАХ (для канала *n*-типа) приведены в строке 2 таблицы 4.2. Теперь уже управляющим параметром для выходных характеристик является напряжение на затворе (на входе транзистора), а не ток

входа, как у биполярных транзисторов. Входная цепь полевого транзистора высокоомная и практически не потребляет ток, то есть управление полевым транзистором происходит без затраты мощности.

Также отметим возможность надёжной работы при простом параллельном соединении нескольких транзисторов, обусловленной положительным температурным коэффициентом сопротивления сток-исток в режиме насыщения.

У полевого транзистора с каналом p -типа аналогичные свойства и характеристики, только у последних необходимо изменить полярности напряжений на стоке и затворе (относительно истока) на обратные.

Вторая разновидность полевых транзисторов – *транзисторы с изолированным затвором*. В этих транзисторах затвор отделён от канала тонкой диэлектрической плёнкой – и поэтому во входной цепи транзистора тока нет даже теоретически. Кроме того, отделение затвора от канала позволяет выполнять канал в двух вариантах: в виде встроенного (конструктивного) или в виде индуцированного (наведённого при протекании тока) канала p - или n -типа. Условные обозначения таких транзисторов и выходные характеристики для канала n -типа приведены в строке 3 таблицы 4.2. За рубежом эти транзисторы называют *MOSFET транзисторами* (Metall-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor), что соответствует нашему обозначению МОП (МДП) транзистор (металл-окисел-полупроводник), где металл означает электрод затвора, окисел означает диэлектрик, отделяющий затвор от полупроводникового канала между истоком и стоком.

Принцип работы MOSFET заключается в следующем. В закрытом состоянии под затвором образуется зона объёмного заряда, что препятствует протеканию тока стока. Обратный ток стока незначителен и составляет несколько наноампер.

При положительном напряжении между затвором и истоком происходит инжекция носителей заряда, канал переходит от запертого состояния в проводящее – и транзистор открывается.

Основные достоинства полевых транзисторов – отсутствие затрат мощности на управление и высокое быстродействие в результате переноса тока в них носителями одного знака (основными носителями), в отличие от биполярных транзисторов, где ток в средней части прибора (базе) в основном переносится медленными неосновными носителями. Но по предельным значениям выходного напряжения и тока полевые транзисторы заметно уступают биполярным, что определяет нишу их использования в низковольтных устройствах силовой электроники с высокими частотами процессов преобразования электрической энергии.

Современные высоковольтные MOSFET имеют следующие параметры: напряжение сток-исток до 1200 В при токе до 32 А и сопротивление открытого канала сток-исток до 0,31 Ом (в зависимости от максимального напряжения и температуры). Например, это транзистор IXFN32N120P ("IXYS"). Отметим ещё транзисторы на меньшее напряжение, например, 85 В и большие токи. В частности, IXFN280N085 ("IXYS") при токе 280 А имеет сопротивление открытого канала сток-исток до 0,0044 Ом при температуре 25°C.

Сопротивление в открытом состоянии низковольтных MOSFET (до 200 В) было уменьшено за последние годы более чем в 10 раз (каждые два года уменьшение на 50%). Это было достигнуто путём оптимизации геометрии ячейки и использования технологии утопленного канала (trench gate technology). Плотность упаковки современных низковольтных MOSFET достигает в настоящее время 100 млн. элементарных ячеек на квадратный дюйм. Для низковольтного диапазона напряжений можно предсказать непрерывное развитие MOSFET для снижения статических потерь и повышения стойкости.

Для высоковольтных MOSFET реальной революцией была технология

создания суперперехода, реализованная компанией "Infineon" в семействе высоковольтных MOSFET CoolMOS. Поэтому высоковольтные MOSFET будут иметь всё большее и большее значение в диапазоне напряжений от 500 до 1200 В.

В ближайшее время на рынке могут появиться полевые транзисторы, управляемые *p-n*-переходом (VJFET) на базе карбида кремния (SiC). Также имеется потенциал для использования в качестве быстрых и стойких высоковольтных ключей каскодных соединений SiC MOSFET с низковольтными кремниевыми MOSFET.

Что касается отечественных высоковольтных полевых транзисторов, то можно отметить следующее. Если отставание в разработках высоковольтных биполярных транзисторов во времена СССР составляло 3-5 лет, то полевые транзисторы для ИЭП фактически появились в середине 1980-х гг. Однако к концу 1980-х гг. экономическое положение СССР резко ухудшилось. Зато к этому времени производители зарубежной электронной техники успели значительно обновить своё оборудование, по существу, совершив очередную техническую революцию. Они сделали упор на высокотехнологичные автоматические линии и миниатюризацию компонентной базы, которая была направлена на снижение затрат в условиях массового производства.

Многие мировые компании по производству электронных компонентов и изделий построили современные заводы в странах третьего мира – от Китая и Индии до Мексики и Бразилии, так как в этих странах преобладала дешёвая рабочая сила. Именно в это время очередного технического резкого подъёма микроэлектроники и силовой электроники случился обвал политической системы СССР – и на произвол судьбы был брошен реальный сектор экономики, в том числе и вся электронная промышленность.

К настоящему времени достигнуты относительные успехи в ПАО "НПО "Энергомодуль" (г. Москва), где производятся мощные MOSFET модули с напряжением сток-исток до 1200 В и на токи до 540 А (например, SiC MOSFET

М2ТКПК-540-12). Отметим также, что в АО "ВЗПП-С" (г. Воронеж) и «Ангстрем» (г. Зеленоград) освоено серийное производство изделий для специальной силовой электроники. Речь идёт о ряде полевых транзисторов в металлокерамических корпусах.

Области применения MOSFET – высокочастотные преобразователи (до единиц мегагерц) и низковольтные преобразователи напряжения для приводов двигателей, компактных устройств бесперебойного электропитания.

В последние годы появился комбинированный прибор, объединяющий конструктивно полевой транзистор с изолированным затвором (на входе) и биполярный транзистор (на выходе), названный **биполярным транзистором с изолированным затвором (БТИЗ)** или **транзистором IGBT** (Isolated Gate Bipolar Transistor). Он имеет высокое входное сопротивление и не требует мощности на управление. Параметры выходного напряжения и тока у него такие же, как у биполярного транзистора, то есть значительно выше, чем у полевого.

В соответствии с четырьмя типами полевых транзисторов с изолированным затвором возможны четыре типа IGBT транзисторов, условные обозначения которых и выходные ВАХ для транзистора с индуцированным каналом *n*-типа приведены в строке 4 таблицы 4.2.

В настоящее время за рубежом выпускают IGBT транзисторы четвёртого поколения с выходными токами до 1200 А и напряжением до 4000 В.

Следует отметить, что более половины всех современных силовых полупроводниковых приборов, в том числе IGBT транзисторы, выпускают и будут выпускать в модульном исполнении. В простейшем случае модуль представляет собой один или совокупность силовых ключевых элементов, а в более сложном – преобразователь параметров электрической энергии. Так, одно-, двух-, четырёх- и шестиключевые модули позволяют создавать компактные и надёжные преобразовательные устройства. Выпускают также

функционально законченные модули, например, преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока. На рисунке 4.16 приведены схемы модулей IGBT, выпускаемых фирмой "Mitsubishi".

Применение модулей позволяет значительно снизить массу, габариты и стоимость преобразовательных устройств. Их применение оказывает существенное влияние не только на технико-экономические показатели силовой аппаратуры, но и изменяет технологию проектирования устройств силовой электроники, сводя её к выбору элементов высокой заводской готовности на требуемые входные и выходные параметры.

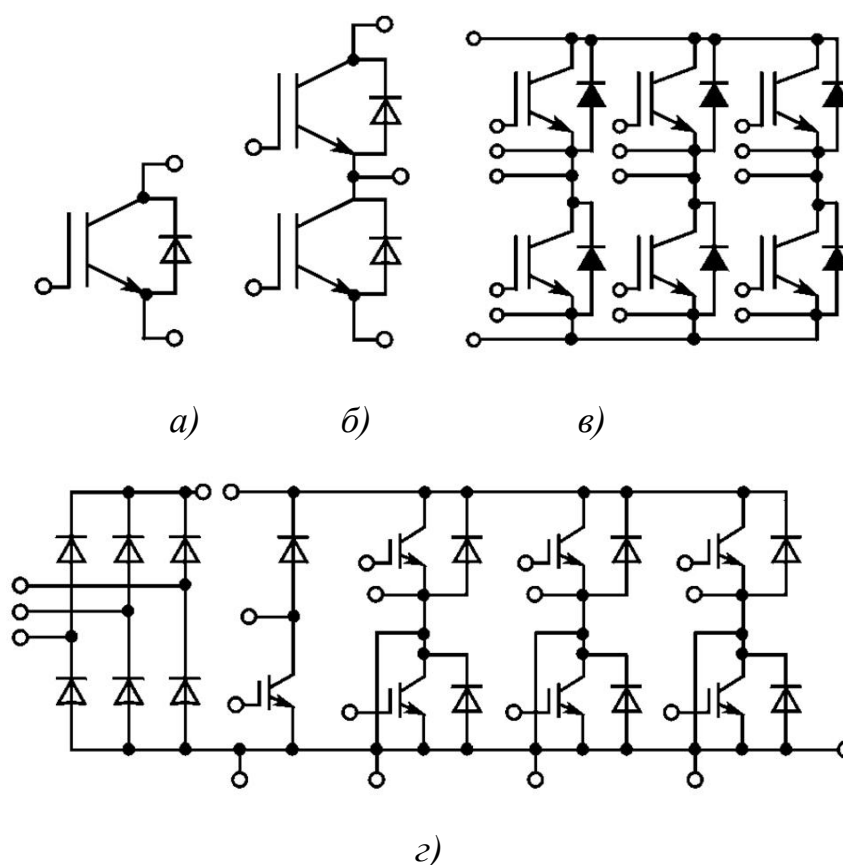


Рисунок 4.16 – Схемы модулей IGBT: одноключевого (а); двухключевого (б); трехфазного мостового (в); преобразователя частоты по схеме выпрямитель-инвертор (г)

По быстродействию IGBT уступают MOSFET, но значительно превосходят биполярные. Ток управления IGBT мал, поэтому цепь управления

конструктивно компактна. В модулях IGBT драйверы непосредственно включены в их структуру.

Конструктивно модули IGBT можно условно разбить на два типа: паянной с изолированным основанием (предельные параметры 2,4 кА и 3,3 кВ) и прижимной (таблеточной) конструкции (предельные параметры 1,2 кА и 3,3 кВ). Последние, помимо высокой надёжности, термоциклоустойчивости, лучшего охлаждения, имеют ещё по сравнению с модулями с изолированным основанием меньшую паразитную индуктивность выводов (единицы наногенри). При этом снижаются перенапряжения на выводах модулей и повышается их надёжность.

Разработки силовых модулей паянной и прижимной конструкции, а также с повышенными требованиями к механическим и климатическим воздействиям ведутся и в России. Промышленное производство IGBT модулей освоено в АО "Электровыпрямитель" (г. Саранск), АО "Электрум АВ" (г. Орёл).

Области применения IGBT транзисторов – преобразователи напряжения мощностью до единиц мегаватт для электроприводов переменного тока, устройств бесперебойного электропитания, статических компенсаторов реактивной мощности и активных фильтров, импульсных ИЭП.

На рисунке 4.17 приведены границы применения рассмотренных выше управляемых вентилях.

Дальнейшим развитием полупроводниковой элементной базы устройств силовой электроники явилось создание в одном полупроводниковом кристалле или в одной гибридной конструкции, т. е. модуле, целых фрагментов устройств силовой электроники. Это или совокупность нескольких силовых полупроводниковых приборов, объединённых в схему типового устройства, или силовой элемент с устройством управления и защиты – *силовая интегральная схема* (Smart Intelligent – интеллектуальная схема).

В настоящее время широкое применение нашли силовые интегральные

схемы (СИС): монолитные (однокристалльные) и гибридные, представляющие собой конструктивно законченные изделия электронной техники, содержащие совокупность гальванически связанных между собой элементов электрической схемы (рисунок 4.18). Электрические характеристики СИС определяются приборами, составляющими их основу (диодами, тиристорами, транзисторами).

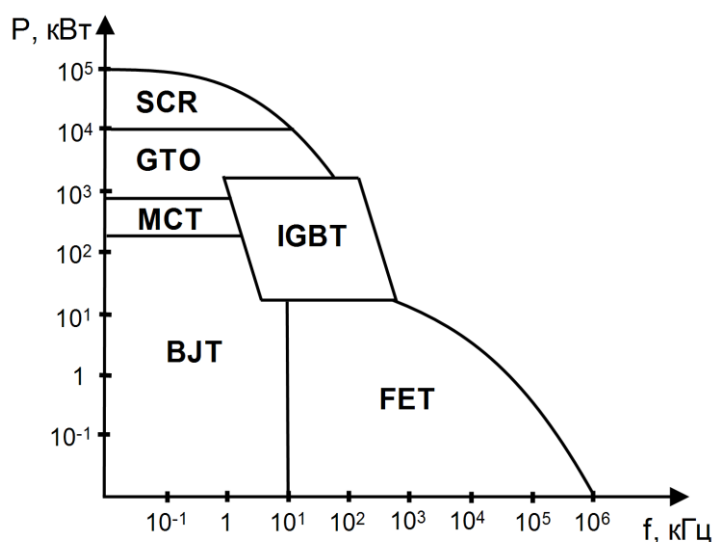


Рисунок 4.17 – Границы применения управляемых вентилей

К сожалению, российский рынок современных приборов силовой электроники более чем на 95% занят ведущими мировыми производителями: "Infineon", "Semikron", "International Rectifier", "Mitsubishi Electric", "Toshiba Semiconductors" и т. д. Не лучше ситуация и на рынке конечных устройств силовой электроники.

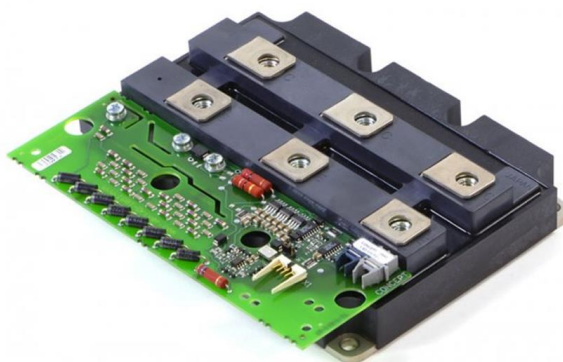


Рисунок 4.18 – Внешний вид силовой интегральной схемы

4.3 Магнитные и моточные компоненты

Для расширения возможностей и улучшения качества преобразователей электрической энергии, а также обеспечения электромагнитной совместимости с питающей сетью и нагрузкой ИЭП обычно включают в себя дополнительные элементы – среди них трансформаторы и реакторы (дрессели), которые относят к моточным компонентам (рисунок 4.19).

Моточные компоненты выполняют путём укладки обмоток. *Обмоткой* называют совокупность витков провода, основным параметром которой является индуктивность. Обмотка (или обмотки) может быть расположена или не расположена на магнитопроводе.

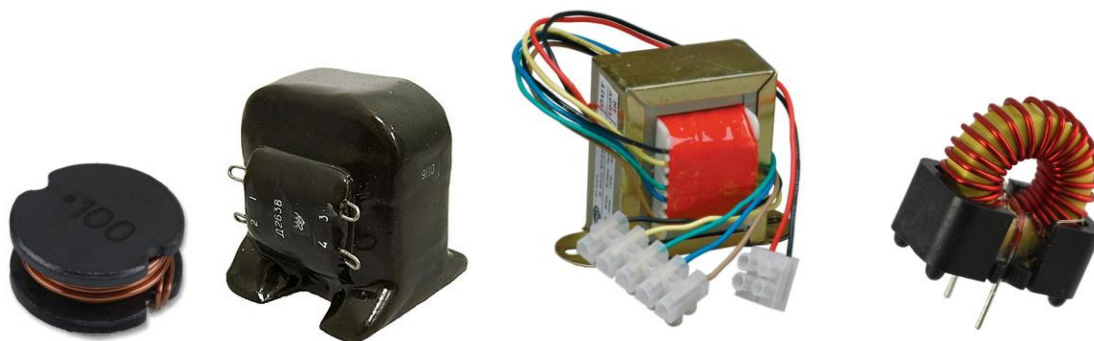


Рисунок 4.19 – Современные моточные компоненты ИЭП

Магнитопровод – это изделие из вещества, способного переносить магнитный поток. Магнитный поток Φ вычисляют как

$$\Phi = SB, \quad (4.1)$$

где S – площадь сечения, а B – магнитная индукция материала магнитопровода.

Если по обмотке пропускать переменный ток, то возникнет переменное магнитное поле. Чем больше сила тока, протекающего через витки обмотки, тем больше порождённое им магнитное поле, и тем больше магнитный поток.

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки на каком-либо магнитопроводе и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции напряжения переменного тока одного уровня в соответствующее напряжение

другого уровня без изменения частоты (в общем же смысле трансформатор – устройство для преобразования каких-либо существенных свойств энергии или объектов).

Конструктивно трансформатор может состоять из одной (автотрансформатор) или нескольких изолированных проволочных, либо ленточных обмоток (катушек), охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на магнитопровод (сердечник) из ферромагнитного магнитомягкого материала.

По конструктивному исполнению трансформаторы бывают броневыми, стержневыми и кольцевыми. У первых магнитопровод Ш-образный и намотка выполнена на одной катушке. У вторых магнитопровод П-образный и две катушки. У третьих магнитопровод кольцевой. Различаются эти конструкции в основном условиями охлаждения магнитопровода и катушки. Также в настоящее время широко применяют планарные трансформаторы в виде печатных плат.

По конкретному назначению и решаемым задачам трансформаторы делят на:

- силовые трансформаторы, применяемые в сетях переменного тока низкой частоты;
- высокочастотные трансформаторы, применяемые в сетях переменного тока повышенной и высокой частоты;
- измерительные трансформаторы, применяемые при измерениях в цепях переменного тока;
- импульсные трансформаторы, применяемые для потенциальной развязки при передаче импульсов, например, в цепях управления ИЭП;
- и некоторые другие.

Вышеперечисленные трансформаторы могут сильно отличаться по конструкции, мощности, габаритам и т. д.

Силовые трансформаторы используют в качестве повышающих или понижающих напряжение переменного тока. Также их делят на однофазные и многофазные, из последних наибольшее применение имеют трехфазные трансформаторы. Кроме того, трансформатор может быть двухобмоточным, если он имеет две обмотки, или многообмоточным, если он имеет более двух обмоток на каждую фазу.

Типовой силовой трансформатор состоит из замкнутого сердечника (магнитопровода), изготовленного из ферритового материала, и двух (или более) обмоток из изолированного провода. Обмотку, подключаемую к источнику напряжения, называют первичной, к нагрузке – вторичной (рисунок 4.20).

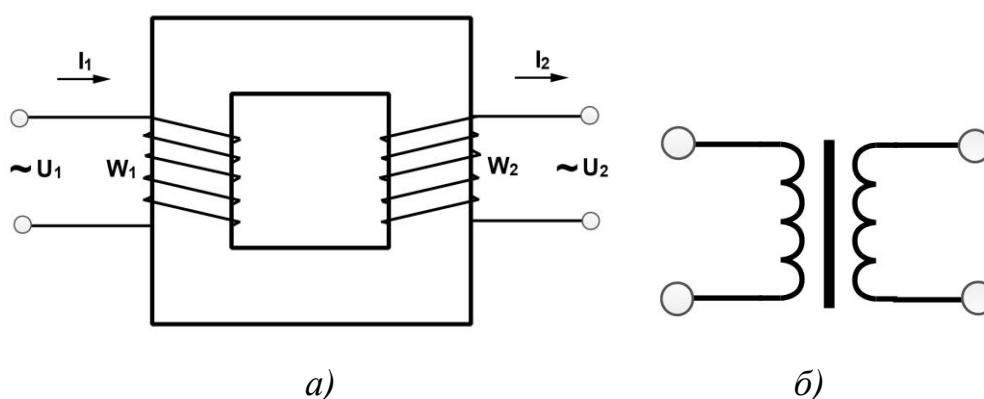


Рисунок 4.20 – Устройство типового двухобмоточного трансформатора (а) и его обозначение на схемах (б)

Работа трансформатора основана на двух базовых физических принципах:

- изменяющийся во времени электрический ток создаёт изменяющееся во времени магнитное поле (электромагнетизм);
- изменение магнитного потока, проходящего через обмотку, создаёт электродвижущую силу (ЭДС) в этой обмотке (электромагнитная индукция).

Подаваемый на первую обмотку переменный ток образует в катушке переменный магнитный поток. В результате электромагнитной индукции

переменный магнитный поток в магнитопроводе создаёт во всех обмотках, в том числе и в первичной, ЭДС индукции, пропорциональную первой производной магнитного потока, при синусоидальном токе сдвинутой на 90° в обратную сторону по отношению к магнитному потоку. Иными словами, магнитное поле образует во второй катушке электрический ток. Но просто так изменение напряжения не произойдёт: оно зависит от того, сколько витков медной проволоки в каждой обмотке. Конечно, величина изменения магнитного поля (скорость) также влияет на величину напряжения.

Если число витков в первичной катушке больше, чем во вторичной, то это *понижающий* трансформатор. И наоборот, если количество витков во вторичной обмотке больше, чем в первичной, то это *повышающий* трансформатор. Имеет место и случай, когда количество витков в обеих обмотках одинаково – это так называемые *изолирующие* трансформаторы.

Одним из наиболее важных параметров трансформатора является его мощность. Различают электромагнитную, выходную (отдаваемую), расчётную и габаритную (типовую) мощности.

Электромагнитной мощностью $P_{ЭМ}$ трансформатора называется мощность, передаваемая из первичной обмотки во вторичные электромагнитным путём. Она равна сумме произведений ЭДС E_i и соответствующих токов вторичных обмоток I_i :

$$P_{ЭМ} = \sum_{i=2}^n E_i I_i, \quad (4.2)$$

где $i = 2...n$ – номера обмоток.

Выходной (отдаваемой) мощностью $P_{вых}$ трансформатора называется сумма произведений действующих значений напряжений U_i на зажимах вторичных обмоток и выходных (нагрузочных) токов I_i :

$$P_{вых} = \sum_{i=2}^n U_i I_i. \quad (4.3)$$

Расчётной мощностью P_i обмотки трансформатора называется произведение действующих значений тока, протекающего по обмотке, и напряжения на её зажимах. Эта мощность характеризует габаритные размеры обмотки, так как число витков определяется напряжением на её зажимах, а сечение провода – действующим током:

$$P_i = U_i I_i. \quad (4.4)$$

Габаритной (типовой) мощностью P_T трансформатора называется мощность, определяющая размеры трансформатора:

$$P_T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n P_i. \quad (4.5)$$

В процессе работы трансформатора в его магнитопроводе и в обмотках затрачивается некоторая часть подводимой к нему энергии, поэтому мощность, потребляемая трансформатором из сети, всегда больше мощности, отдаваемой нагрузке. Разность между поступающей к трансформатору энергией и отдаваемой им во вторичную сеть называется *потерями*.

Назначением трансформаторов в ИЭП является:

- согласование уровней напряжений переменного тока (преобразование переменного напряжения одной величины в переменное напряжение другой величины);
- преобразование числа фаз;
- гальваническая развязка цепей нагрузки и сети.

Смысл использования в трансформаторе магнитопровода заключается в уменьшении тока намагничивания и улучшении коэффициента связи между обмотками. Уменьшение тока намагничивания происходит за счёт увеличения собственной индуктивности обмоток, которая пропорциональна магнитной проницаемости магнитопровода μ . Ниже приведена формула для расчёта индуктивности катушки (в том числе и обмотки трансформатора) с числом

витков W , намотанной на замкнутом магнитопроводе сечением S , средним периметром l_{cp} и магнитной проницаемостью μ :

$$L = \frac{\mu\mu_0 W^2 S}{l_{cp}}. \quad (4.6)$$

Индуктивность катушки прямо пропорциональна магнитной проницаемости, следовательно, предпочтителен материал с проницаемостью $\mu \gg 1$. Таким свойством обладают так называемые *ферромагнетики*, магнитная проницаемость которых может достигать 10^{10} . Ферромагнетики имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании импульсных трансформаторов. Прежде всего, они имеют нелинейную зависимость индукции B от напряженности магнитного поля H . При напряжённости поля порядка 100А/м магнитопровод входит в насыщение, его магнитная проницаемость μ падает до единицы, а кривая индукции при этом выходит на "полочку". Величина индукции насыщения может быть разной в зависимости от материала и имеет величину порядка 0,4-1 Тл. Кроме того, магнитная проницаемость в рабочей области также не является постоянной величиной. Начальная проницаемость несколько ниже максимального значения, и для расчётов магнитных элементов берут именно её.

Ещё одной особенностью ферромагнетиков является наличие гистерезиса кривой намагничивания. Это означает, что намагничивание ферромагнетика происходит по разным "траекториям" в зависимости от направления изменения магнитного поля H . Если изначально размагниченный ферромагнетик намагнитить до некоторого значения индукции B , а затем снять магнитное поле, то материал останется намагниченным. Величина этой намагниченности называется *остаточной индукцией*. Для того чтобы снять эту остаточную индукцию, нужно приложить некоторое магнитное поле обратного знака. Величина этого поля называется *коэрцитивной силой*. Таким образом,

под воздействием переменного магнитного поля кривая намагничивания описывает петлю, а на перемагничивание сердечника затрачивается некоторая энергия, которая выделяется в сердечнике в виде тепла. Мощность потерь пропорциональна площади петли гистерезиса.

По уровню остаточной намагниченности ферромагнетики делят на *магнитомягкие* и *магнитожёсткие*. Магнитожёсткие материалы имеют высокую остаточную намагниченность и используются в основном для изготовления постоянных магнитов. Из-за высоких потерь на перемагничивание они непригодны для работы в переменном поле, то есть в качестве сердечников трансформаторов: для них применяют магнитомягкие материалы.

Ещё один фактор, вызывающий тепловые потери в магнитопроводе, это *вихревые токи*, или токи Фуко. Чтобы понять природу этих токов, рассмотрим поперечное сечение магнитопровода с намотанной на неё обмоткой.

Предположим, что магнитопровод сделан из цельного куска ферромагнетика, обладающего некоторой проводимостью. Тогда, согласно закону электромагнитной индукции, магнитный поток, создаваемый током обмотки, будет создавать наведённый ток и в самом магнитопроводе, который вызывает в нём дополнительные тепловые потери. Величина наведённого тока зависит от проводимости материала. Поэтому в сердечниках стараются применять материал с большим удельным сопротивлением, а при использовании проводящего материала, как, например, электротехническая сталь, сердечники делают наборными, состоящими из большого количества тонких стальных пластин, изолированных друг от друга плёнкой окисла. Вихревые токи, возникающие в тонких пластинах, оказываются во много раз меньше, снижая общие потери в магнитопроводе.

Итак, сформулируем основные требования, предъявляемые к магнитным материалам сердечников. Они должны обладать:

- узкой петлей гистерезиса кривой намагничивания;
- большой начальной магнитной проницаемостью;
- высокой индукцией насыщения;
- малыми потерями на вихревые токи.

По величине удельной проводимости ферромагнетики делят на три группы:

- проводниковые (электротехнические стали и сплавы);
- полупроводниковые (ферриты);
- диэлектрические (магнитодиэлектрики).

Стали и сплавы хорошо работают на частотах от 50 Гц до 10 кГц. Они имеют довольно высокую индукцию насыщения – около 1 Тл, и высокую магнитную проницаемость (до 10^5), что позволяет применять их на низких частотах, в частности в сетевых трансформаторах. В то же время у них довольно высокий уровень потерь на перемагничивание, а из-за высокой проводимости материала сердечники приходится набирать из тонких пластин (от долей миллиметра до 80 мкм), чтобы снизить вихревые токи. Эти факторы ограничивают применение стальных магнитопроводов на высоких частотах.

Ферриты – это поликристаллические соединения, с общей химической формулой $MeFe_2O_3$, где *Me* – какой-либо ферромагнетик, например, *Mn*, *Zn* или *Ni*. Ферриты обладают существенно меньшей проводимостью, чем стали (более чем в 50 раз), а также более узкой петлей гистерезиса, что позволяет применять их на более высоких частотах – от 10 кГц и выше. Наиболее распространенными являются марганцево-цинковые и никель-цинковые ферриты. В отечественной номенклатуре они обозначаются марками НМ и НН соответственно. НМ по сравнению с НН ферритами имеют более низкое удельное сопротивление, худшую термостабильность, но зато меньшие потери на гистерезис и более высокую рабочую температуру. Обычно НМ ферриты применяют в силовых трансформаторах импульсных ИЭП с рабочими

частотами до 100 кГц. НН ферриты находят применение в более высокочастотной области – до 5-7 МГц. По сравнению со сталями ферриты более чувствительны к изменениям температуры.

Магнитодиэлектрики по своей структуре состоят из магнитного порошка и полистирольной непроводящей основы. Поскольку магнитные частицы внутри основы не связаны между собой электрически, общая проводимость такого материала оказывается низкой, образуя диэлектрик с относительно невысокой магнитной проницаемостью. Одно из преимуществ такой технологии состоит в том, что, меняя концентрацию магнитного порошка, можно получать материал с произвольной, довольно точно определяемой величиной μ , чего нельзя добиться, скажем, для ферритов. Наиболее распространёнными магнитодиэлектриками являются альсифер, состоящий из трёх компонентов Al-Si-Fe, и молибден-пермаллой, изготавливаемый из порошка пермаллоя (сплава железа и никеля), легированного молибденом. Магнитная проницаемость магнитодиэлектриков составляет всего 20-250, но благодаря "разреженной" структуре магнитного вещества, насыщение наступает при гораздо более высоких полях – до 10^4 А/м, а кривая намагничивания имеет более линейный вид. Магнитодиэлектрики редко используют в трансформаторах из-за их низкой проницаемости, в основном на них делают дроссели, работающие в цепях с постоянной составляющей тока.

В отличие от широкой номенклатуры силовых полупроводниковых приборов, насчитывающей многие тысячи разновидностей, отличающихся типом и параметрами, номенклатура силовых трансформаторов промышленного изготовления для ИЭП значительно скромнее. Это связано с ограниченным рядом значений промышленных напряжений как для сетей электроснабжения, так и для типовых потребителей электрической энергии. В свою очередь, это определяет необходимость выпуска силовых трансформаторов с фиксированными коэффициентами трансформации,

которые в составе преобразователя определённого типа со своим коэффициентом преобразования по напряжению обеспечивают передачу преобразованной энергии с уровня напряжения питающей сети на уровень напряжения потребителя. В СССР это привело к тому, что фактически были унифицированы трансформаторы только для выпрямителей. Трансформаторы для других типов преобразователей, работающие при нестандартной частоте 50 Гц, нестандартной форме напряжения (несинусоидальной), с нестандартным коэффициентом трансформации, проектировались и выпускались обычно там же, где и преобразователь в целом. Поэтому они унифицировались на уровне предприятия, а не отрасли.

Стремление к снижению габаритов трансформаторов, а также профиля ИЭП, привело к созданию планарных магнитных компонентов.

На рисунке 4.21 приведены изображения многослойной печатной платы, с помощью которой реализован *планарный трансформатор*, а также сам планарный трансформатор. Такие трансформаторы активно применяют и в России, и за рубежом при разработке малогабаритных модулей электропитания.

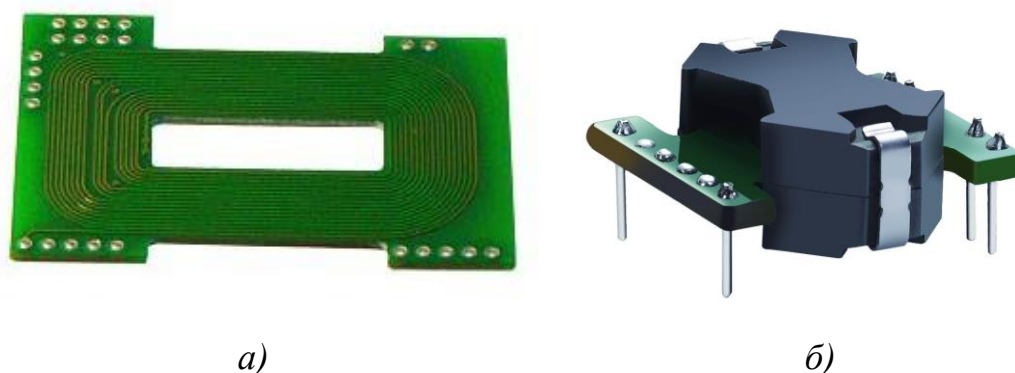


Рисунок 4.21 – Многослойная печатная плата с элементами планарного трансформатора (а) и сам планарный трансформатор в сборе (б)

Планарные трансформаторы впервые были разработаны в конце 1980-х гг., однако из-за сложной технологии изготовления они не получили

широкого распространения. Современную технологию производства планарных трансформаторов тоже нельзя назвать простой, однако благодаря постоянному совершенствованию технологического процесса, стоимость планарных трансформаторов снизилась – и это позволило им конкурировать на рынке ИЭП.

Планарные трансформаторы являются отличной альтернативой обычным трансформаторам, когда возникает необходимость в малоразмерных магнитных компонентах.

Планарные трансформаторы могут выступать в виде навесных компонентов, в виде однослойных печатных плат или в качестве небольшой многослойной платы.

Основные преимущества планарных трансформаторов приведены ниже.

1. Имеют малые размеры. Благодаря этому планарные компоненты становятся перспективными для применения в портативной РЭА с высокой плотностью монтажа.

2. Подходят для разработки высокоэффективных ИЭП. Медь на переменном токе имеет малую величину потерь, а благодаря высокому коэффициенту связи становится возможным более эффективное преобразование электроэнергии.

3. Высокая плотность проходной мощности. Возникает благодаря хорошим температурным характеристикам.

4. Имеют отличную повторяемость свойств. Повторяемость величин паразитных параметров позволяет достигать высоких частот переключения и создавать резонансные схемы.

5. КПД до 98%. Если конструкция хорошо охлаждается, это позволяет ей передавать мощность от десятков ватт до единиц киловатт.

6. Рабочее напряжение между обмотками составляет более 1000 В.

7. Возможности к увеличению мощности трансформатора путём использования пакетов обмоток.

Планарная технология производства предусматривает, что в процессе изготовления индуктивных компонентов в качестве обмоток выступают дорожки на печатной плате или участки меди, которые наносятся печатным способом и разделяются слоями изоляционного материала. Также обмотки можно сконструировать из многослойных печатных плат.

В любом случае обмотки помещаются между малоразмерными ферритовыми сердечниками. Навесные планарные компоненты расположены ближе всего к обычным индуктивным компонентам и их можно использовать вместо обычных деталей на одно- или многослойных печатных платах.

В целом, планарные трансформаторы могут применяться везде, где возникает необходимость в силовых трансформаторах, которые бы имели высокий КПД и в то же время обладали малыми габаритами.

В случае изменения вторичного напряжения в сравнительно узких пределах используют *автотрансформаторы*. Характерной их особенностью является наличие непосредственной электрической связи между обмотками (рисунок 4.22).

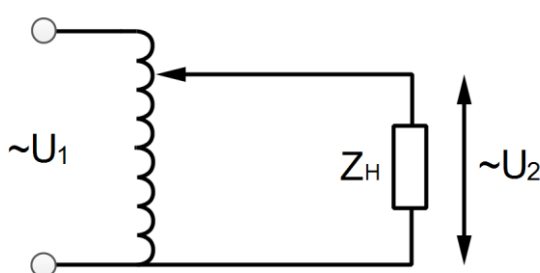


Рисунок 4.22 – Схема автотрансформатора

Любой автотрансформатор имеет не менее трёх выводов. Автотрансформатор способен отдать бóльшую мощность в нагрузку без разрушения в долговременном режиме, чем трансформатор такой же конфигурации и с таким же магнитопроводом, но без электрической связи

между обмотками. Это обстоятельство объясняется тем, что в автотрансформаторе часть энергии передают в нагрузку благодаря магнитному полю, а другую часть энергии переносят электрическим путём. Следовательно, при заданной неизменной мощности нагрузки автотрансформатор будет иметь меньшие габариты и магнитопровод меньшего типоразмера по сравнению с обычным трансформатором. Это достоинство автотрансформаторов чрезвычайно важно для мощных установок силовой электроники.

Автотрансформаторы не имеют гальванической развязки между обмотками, поэтому их применять следует, соблюдая правила техники безопасной работы с высоким напряжением.

Импульсные трансформаторы используют обычно в конверторах импульсных ИЭП с целью согласования напряжений, инвертирования фазы импульсов, измерения параметров сигнала или для осуществления гальванической развязки цепей друг от друга, причём возможна передача электроэнергии в несколько гальванически развязанных цепей.

Особенность импульсных трансформаторов заключается в импульсном характере тока, протекающего через обмотки и небольшом числе витков в обмотках. Такие трансформаторы зачастую содержат магнитопроводы из ферритов или аморфных сплавов.

Основные параметры импульсных трансформаторов те же, что и у низкочастотных силовых, однако часто рассматривают ряд дополнительных параметров, среди которых резонансная частота трансформатора и температура перегрева.

К достоинствам импульсных трансформаторов следует отнести:

- малый расход меди;
- небольшие масса и габариты.

Среди недостатков необходимо выделить:

- низкая тепловая инерция и очень быстрое насыщение магнитопровода при перегрузке, не превышающее миллисекунд, что не позволяет обойтись плавким предохранителем для организации защиты: необходима быстросрабатывающая электронная защита;

- высокий уровень излучений в окружающее пространство, который сложно подавить до заданного уровня даже при использовании экранов.

Импульсный трансформатор, как и любой трансформатор, представляет собой многочастотную резонансную систему. Наличие индуктивности первичной обмотки, паразитных индуктивностей и ёмкостей обмоток приводит к колебательным процессам на выходе трансформатора, то есть к искажению формы импульса.

Трансформаторами тока называют электрический датчик, предназначенный для считывания переменного тока и получения сигнала, практически не сдвинутого по фазе относительно измеренного тока и обладающего информацией о его величине. Выходной сигнал трансформатора тока должен практически линейно соответствовать измеряемому току.

Первичную обмотку измерительного трансформатора тока образуют одним или, реже, несколькими витками провода и включают последовательно в цепь с током, который надлежит измерить. Зачастую роль первичной обмотки играет шина большого сечения, на которую надевают магнитопровод с уложенной на него вторичной обмоткой. Магнитопровод обычно выбирают таким, чтобы он не входил в режим насыщения. В качестве материала магнитопровода используют аморфные металлы или нанокристаллические сплавы.

Вторичную многовитковую обмотку выполняют проводом малого диаметра. Коэффициент трансформации может достигать нескольких тысяч. Вторичных обмоток может быть несколько. Между первичной и вторичной обмотками часто прокладывают слой изоляции.

К выходу трансформатора тока обычно подключают прецизионный резистор и с этого резистора снимают напряжение, соответствующее току через первичную обмотку.

Трансформаторы тока используют в измерителях величины тока и в системах защиты ИЭП от перегрузок и коротких замыканий в нагрузках.

Реактор – это статическое электромагнитное устройство, обладающее индуктивностью. Термин "реактор" применяют обычно в электротехнике и силовой электронике. В слаботочной электронике и радиотехнике то же устройство называют *дросселем* (drossel – от немецкого "сглаживать").

Обычно дроссель – это катушка из провода, намотанного на сердечник с магнитопроводом. В этом смысле реактор отличается от трансформатора наличием только одной катушки (хотя встречаются и двухобмоточные, и трёхобмоточные варианты дросселей – в основном для подавления синфазных помех на входе ИЭП). В высокочастотных схемах исполнение дросселей может быть одно- или многослойным, при этом часто сердечники (как стальные, так и ферромагнитные) не используют. Иногда в качестве основы для навивки применяют обычные резисторы или пластмассовые каркасы.

Дроссели бывают экранированными и неэкранированными. Неэкранированный дроссель может иметь магнитный сердечник или быть намотанным без сердечника.

Применение магнитных сердечников позволяет существенно уменьшить габариты дросселей при тех же заявленных параметрах индуктивности. Также сердечник снижает величину рассеяния магнитного потока, концентрируя большую его часть внутри себя и непосредственно снаружи провода (хотя всё же существует значительный магнитный поток за пределами сердечника). Дроссели подавления высокочастотных помех имеют ферродиелектрические сердечники: ферритовые, флюкстроловые, из карбонильного железа. Дроссели, предназначенные для сглаживания пульсаций промышленной и звуковой

частот, имеют сердечники из электротехнических сталей или магнитомягких сплавов (пермаллоев). Сердечники могут иметь форму бобины, втулки, стержня.

В экранированном дросселе магнитный сердечник должен полностью закрывать обмоточный провод. Для этой цели применяют Ш-образный, броневой и некоторые другие виды сердечников, в том числе для поверхностного монтажа на печатные платы.

Все дроссели имеют паразитную ёмкость, возникающую вследствие близкого расположения соседних витков. Обычно она очень мала (так как дроссель с магнитным сердечником имеет малое количество витков), и на рабочих частотах импульсных ИЭП её влиянием можно пренебречь.

В случае, когда через дроссель течёт довольно большой постоянный ток, необходимо учитывать величину сопротивления обмоточного провода. Например, для 10-амперного ИЭП потребуется около 10-20 витков провода (около 60 см). Его сопротивление составит примерно 0,02 Ом, однако на нём будет рассеиваться до 2 Вт тепла.

Сопротивление провода переменному току обусловлено, в первую очередь, скин-эффектом (сопротивление проводника увеличивается с ростом частоты). Величину сопротивления, обусловленного скин-эффектом, можно снизить, используя несколько параллельных проводов, литцендрат или плоские проводники.

Намотка в несколько параллельных проводов снижает сопротивление, однако увеличивает межвитковую ёмкость. Литцендрат состоит из нескольких проводников, переплетённых таким образом, чтобы минимизировать ёмкость между ними (эффективен примерно до 3 МГц). Плоские проводники (ленты или полосы) в дросселях практически не применяют из-за трудности получения требуемого числа витков. Кроме того, повышается паразитная ёмкость обмотки.

Основные свойства катушки индуктивности следующие:

- скорость изменения тока через катушку ограничена и определяется индуктивностью катушки;
- сопротивление (модуль импеданса) катушки растёт с увеличением частоты текущего через неё тока;
- катушка индуктивности при протекании тока запасает энергию в своём магнитном поле (при отключении внешнего источника тока катушка отдаст запасённую энергию, стремясь поддержать величину тока в цепи; при этом напряжение на катушке нарастает вплоть до пробоя изоляции или возникновения дуги на коммутирующем ключе).

Катушка индуктивности в электрической цепи для переменного тока имеет не только собственное омическое (активное) сопротивление, но и реактивное сопротивление переменному току, нарастающее при увеличении частоты, поскольку при изменении тока в катушке возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая этому изменению.

Катушка индуктивности обладает реактивным сопротивлением, модуль которого определяется как

$$X_L = \omega L, \quad (4.7)$$

где L – индуктивность катушки, ω – циклическая частота протекающего тока. Соответственно, чем больше частота тока, протекающего через катушку, тем больше её сопротивление.

Катушка с током запасает энергию в магнитном поле, равную работе, которую необходимо совершить для установления текущего тока I . Эта энергия равна:

$$E = \frac{LI^2}{2}. \quad (4.8)$$

При изменении тока в катушке возникает ЭДС самоиндукции, значение которой:

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}. \quad (4.9)$$

Явление самоиндукции аналогично проявлению инертности тел в механике, если аналогом индуктивности принять массу, тока – скорость, напряжения – силу. Для идеальной катушки индуктивности (не имеющей паразитных параметров) ЭДС самоиндукции равна по модулю и противоположна по знаку напряжению U на концах катушки:

$$|\varepsilon| = -\varepsilon = U. \quad (4.10)$$

При замыкании катушки с током на резистор ток в цепи экспоненциально уменьшается в соответствии с формулой:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (4.11)$$

где I_0 – начальный ток в катушке; $\tau = \frac{L}{R + R_L}$ – постоянная времени; R – сопротивление резистора в цепи; R_L – омическое сопротивление катушки.

Во всех применениях дросселей используют их главное свойство – индуктивность (в общем случае индуктивность катушки пропорциональна линейным размерам катушки, магнитной проницаемости сердечника и квадрату числа витков намотки). По конкретному назначению и решаемым задачам дроссели, применяемые в ИЭП, делят на:

- токоограничивающие, применяемые на стороне переменного тока для ограничения амплитуды тока и скорости его нарастания в аварийных режимах;
- сглаживающие, применяемые в сглаживающих фильтрах на стороне постоянного тока для уменьшения пульсаций тока и ограничения скорости нарастания тока в аварийных режимах;
- уравнивательные, применяемые для обеспечения параллельной работы групп вентилях, включенных на общую нагрузку;

- помехоподавляющие, входящие в состав высокочастотных фильтров, применяемых для ограничения радиопомех, генерируемых преобразователями и распространяемых по проводам в питающую и приёмную сеть;

- насыщающиеся, включаемые для задержки нарастания тока через вентиль (применяют в стабилизаторах напряжения и тока);

- магнитные усилители (представляют собой катушки индуктивности, сердечник которых подмагничивается за счёт постоянного тока: меняя параметры последнего, можно изменять индуктивное сопротивление).

Для обеспечения токоограничения индуктивность дросселя не должна уменьшаться с ростом тока, поэтому часто токоограничивающие реакторы выполняются без ферромагнитного сердечника.

Сглаживающие дроссели должны сохранять индуктивность в условиях, когда через них проходит пульсирующий ток. При этом обычно амплитуда пульсаций значительно меньше постоянной составляющей тока.

В общем случае все магнитные материалы состоят из очень малых магнитных доменов (буквально несколько молекул). Когда внешнее магнитное поле отсутствует, эти домены ориентированы случайным образом. При появлении внешнего магнитного поля домены стремятся выровняться по его силовым линиям. При этом происходит поглощение части энергии поля. Чем сильнее внешнее поле, тем больше доменов полностью выравниваются по нему. Когда же все домены окажутся ориентированы по силовым линиям поля, дальнейшее увеличение магнитной индукции не будет влиять на характеристики материала, то есть будет достигнуто насыщение.

По мере того, как напряжённость внешнего магнитного поля начинает снижаться, домены стремятся вернуться в первоначальное (хаотичное) положение. Однако некоторые домены сохраняют упорядоченность, а часть поглощённой энергии, вместо того чтобы вернуться обратно во внешнее поле, преобразуется в тепло. Это свойство называется гистерезисом.

С 1988 г. по настоящее время остаются лучшими в мире японские ферритовые сердечники из материала РС-50 (Н704), которые на частотах 250-500 кГц имеют удельные потери $P_{уд} = 8-12$ Вт/кг при $\Delta B = 0,05-0,08$ Тл. Аналогичная картина, в части стабильности параметров, складывается и для материала, который используется в высокочастотных дросселях фильтров импульсных ИЭП. Это молибденовый пермаллой марки МП140, МП250, который появился в 1980 г. и до сих пор является лучшим для сердечников дросселей, работающих в сильных полях.

Также часто для разъемных сердечников дросселей используют марганец-цинковые ферриты следующих марок:

- 3С85, 3С90, 3F3 фирмы "Philips";
- N27, N41, N47, N67 фирмы "Siemens";
- РС30, РС40 фирмы "TDK";
- В50, В51, В52 фирмы "Thomson-LCC";
- F44, F5, F5А фирмы "Neosid" и т. д.

Никель-цинковые ферриты предпочтительны для использования на высоких частотах, 2 МГц и более, это вне рабочего диапазона частот большинства современных ИЭП. Вообще ферриты разных изготовителей имеют схожие параметры и образуют взаимозаменяемые семейства. В том числе их можно заменить и отечественными ферритами марок 1500ММ, 2000ММ, 2500ММ.

Некоторые надежды разработчики импульсных ИЭП возлагали на использование сердечников из аморфных и нанокристаллических сплавов. Однако фактически этот материал, имея превосходные качества для частот до 50-80 кГц в части удельных объемных потерь при относительно высоких значениях индукции $\Delta B = 0,2-0,4$ Тл, всё же практически мало применяется в импульсных ИЭП при рабочих частотах более 120 кГц. Кроме того, надо

отметить, что технология изготовления сердечников из этих материалов достаточно сложная и дорогостоящая, хотя и хорошо отлаженная.

Определённые проблемы есть у аморфных сплавов и с таким параметром, как долговечность, которая оценивается, по разным источникам, от 30-40 до 60 лет. Последнее обстоятельство в определённой степени ограничивает их применение в РЭА оборонного назначения, так как некоторые стратегические виды радиоэлектронных систем имеют срок эксплуатации 30-50 лет с заменой некоторых недолговечных компонентов. Очевидно, что силовой трансформатор не может просто заменяться в условиях ремонтных баз или после проведения очередных регламентных работ. Так что и в этой части материалов и компонентов в силовых узлах импульсных ИЭП имеется проблема с появлением нового поколения этих изделий.

4.4 Конденсаторы

Конденсатор является пассивным электронным компонентом, его используют для накопления заряда. Основным параметром любого конденсатора является ёмкость – отношение величины заряда к напряжению на обкладках.

В простейшем случае конденсатор образован двумя обкладками из токопроводящего материала, в качестве которого часто используют алюминий, ниобий, тантал, а между обкладками проложен слой диэлектрика. Диэлектрик может быть выполнен из тефлона, фторопласта, слюды, керамики и других материалов. Внешний вид самых распространённых современных конденсаторов, применяемых в ИЭП, приведён на рисунке 4.23.

Основными параметрами конденсатора являются:

- номинальная ёмкость и допустимый диапазон её отклонения;
- номинальное напряжение на обкладках;
- тангенс угла потерь, равный отношению активной мощности, выделяющейся в конденсаторе, к реактивной мощности;

- максимальный переменный ток;
- эквивалентное последовательное сопротивление (ESR);
- эквивалентная последовательная индуктивность (ESL);
- ток утечки;
- диапазон рабочих частот.



Рисунок 4.23 – Современные конденсаторы для ИЭП

В зависимости от типа применяемого диэлектрика различают конденсаторы:

- с газообразным диэлектриком;
- с жидким диэлектриком;
- танталовые;
- с твёрдым неорганическим диэлектриком (слодяные, стеклянные, керамические и т. д.);
- с твёрдым органическим диэлектриком (бумажные, плёночные и т. д.);
- электролитические;
- оксидно-полупроводниковые и некоторые другие.

В соответствии с двумя видами электрической энергии (переменный ток и постоянный ток) конденсаторы также различают по назначению. Для цепей переменного тока предназначаются "косинусные" (компенсирующие) конденсаторы, вырабатывающие в источнике реактивной мощности реактивный ток, опережающий синусоидальное напряжение на четверть периода, и фильтровые конденсаторы, предназначенные для фильтрации (ослабления) высших гармоник, присутствующих в цепях с преобразователями. Для цепей постоянного тока предназначаются полярные конденсаторы (обычно электролитические), призванные сглаживать пульсации постоянного напряжения. Кроме того, выделяют помехоподавляющие, снабберные, силовые и некоторые другие конденсаторы.

Также есть конденсаторы общего назначения и специального. Первые используют практически в любых видах РЭА, вторые применяют там, где нужны особые параметры конденсатора (импульсные, высоковольтные, помехоподавляющие, пусковые, дозиметрические и т. д.).

Тангенс угла потерь зависит от типа диэлектрика, напряжённости поля, температуры и прочих факторов. Для конденсаторов, работающих в колебательных системах резонансных и квазирезонансных преобразователей напряжения, важен максимальный переменный ток, который может выдержать компонент, поскольку величина тока может достигать десятков ампер. Предельно допустимая величина переменной составляющей напряжения является важным параметром конденсаторов, что обязательно нужно учитывать, например, при расчёте сглаживающих и помехоподавляющих фильтров. Ёмкости электролитических конденсаторов зависят от температуры, причём при отрицательных температурах они значительно снижаются.

Простейшую эквивалентную схему конденсатора можно представить как последовательное соединение ёмкости, паразитного сопротивления обкладок и выводов (ESR) и паразитной индуктивности (ESL). Схема приведена на рисунке 4.24.

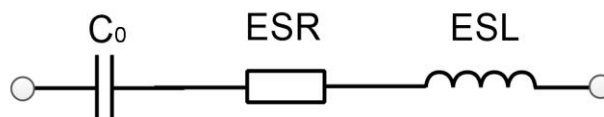


Рисунок 4.24 – Эквивалентная схема конденсатора

При протекании через конденсатор переменного тока на ESR падает напряжение – и в конденсаторе выделяется тепло. Чем больше величина ESR, тем существеннее мощность потерь в конденсаторе. Перегрев, вызванный выделением тепла, может привести к разрушению конденсатора. С целью снижения ESR конденсаторы относительно небольшой ёмкости соединяют параллельно.

На низких частотах (до 1 кГц) величина ESL обычно незначительна – и её допустимо не учитывать. На большой частоте величина ESL относительно велика – и при протекании через конденсатор импульсов тока на ESL образуются выбросы ЭДС самоиндукции. При этом выброс импульсного напряжения приложен обратной полярностью к конденсатору, что может привести к разрушению, например, электролитического конденсатора, диэлектрик которого чувствителен к обратному напряжению.

Достоинством *электролитических конденсаторов* считается их очень большая (по сравнению с альтернативами) ёмкость. К недостаткам относится то, что достичь полной герметичности изделий не удаётся, в связи с чем наблюдается постепенное высыхание электролита. Когда это происходит, теряется ёмкость и конденсатор начинает сильно разогреваться. Особенно быстро явление высыхания наблюдается в системах с частыми температурными колебаниями. Это нередко служит причиной выхода РЭА из строя, таким образом, они подлежат периодической замене.

Технология изготовления электролитических конденсаторов постоянно совершенствуется, увеличивается их удельная энергоёмкость, растут

показатели надёжности. Однако темпы увеличения их удельных показателей существенно отстают от темпов роста удельных показателей ИЭП.

Керамические конденсаторы некоторых типов способны работать на частотах в сотни мегагерц и при этом обладают низкими значениями ESR и ESL. Другие преимущества керамических конденсаторов: малые размеры, достаточно большая ёмкость, отличные частотные характеристики, возможность работы в широком температурном диапазоне и высокая надёжность.

К числу задач, связанных с применением керамических конденсаторов в ИЭП, можно отнести:

- подавление радиопомех во входных и выходных цепях, а также на сигнальных разъемах;

- шунтирование низкочастотных электролитических конденсаторов для того, чтобы избежать появления на их зажимах переменной составляющей напряжения высокой частоты (поэтому если требуется иметь конденсатор большой ёмкости на высоких частотах, то его можно составить из алюминиевого и керамического, включенных параллельно);

- применение в цепях, позволяющих уменьшить высокочастотные выбросы или колебания напряжения на силовых транзисторах и диодах (демпфирующие цепи);

- применение развязывающих конденсаторов, позволяющих "отсечь" постоянную составляющую напряжения от таких элементов схемы, как трансформаторы;

- цепи обратных связей операционных усилителей систем управления силовыми преобразователями и т. д.

В настоящее время ведущим производителям керамических многослойных конденсаторов удалось значительно повысить их удельную ёмкость. Современные керамические конденсаторы с диэлектриком типа X7R

по удельной ёмкости вплотную приблизились к электролитическим конденсаторам. Этот факт позволяет рассматривать современные многослойные керамические конденсаторы как основу для перспективных ИЭП с высоким КПД и большими разрядными токами для жёстких условий эксплуатации.

Вместе с тем следует признать, что общее состояние дел в разработке и изготовлении конденсаторов в нашей стране характеризуется отставанием от мирового технического уровня и, кроме того, недостаточно представленной номенклатурой изделий для нужд специальной техники.

В частности, отечественные керамические конденсаторы отстают от мирового уровня по величине максимальной удельной ёмкости приблизительно на один-два порядка. Например, наиболее компактные конденсаторы типа К10-84 ("Монолит") группы ТКЕ Н20 с напряжением 100 В имеют габариты 12х10х6 мм и ёмкость 1,8 мкФ, в то время как зарубежные конденсаторы СКГ серии "Megacap" ("TDK") группы ТКЕ Х7S (аналог Н20) с напряжением 100 В имеют габариты 5,7х5,0х5,0 мм³ и ёмкость 22 мкФ, то есть их удельная ёмкость выше в 60 раз!

Твердотельные полимерные конденсаторы лишены недостатков электролитических и отличаются высокой надёжностью, но стоимость их зачастую слишком высока. Особой устойчивостью параметров характеризуются современные танталовые конденсаторы.

Плёночные конденсаторы находят применение в силовой электронике там, где от них требуется большая удельная энергия, хорошие частотные свойства, способность выдерживать импульсные нагрузки, возможность работы как при постоянном, так и при переменном напряжениях. Назовём несколько областей применения плёночных конденсаторов:

- входные и выходные фильтры защиты от радиопомех;

- конденсаторы, устанавливаемые параллельно электролитическим конденсаторам большой ёмкости;
- разделительные цепи;
- защитные цепи силовых транзисторов и диодов.

Сравнительные характеристики некоторых конденсаторов приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Сравнительные характеристики некоторых конденсаторов

№ п/п	Тип конденсатора	Удельная энергия, Дж/кг		Удельная масса, кг/кВт		Рабочие частоты, Гц
		2001 г.	2011 г.	2001 г.	2011 г.	
1	Плёночные	0,40	20,00	5,0	2×10^3	>100
2	Керамические	0,01	5,00	10,0	10×10^3	>100×10 ³
3	Электролитические	0,20	2,00	0,2	10×10^3	>100
4	Слюдяные	0,01	0,05	5,0	5×10^3	>1×10 ⁶

В последние годы в РЭА получил распространение новый тип конденсаторов – ионистор.

Ионистор (или *суперконденсатор*, *EDLC* – *electric doublelayer capacitor*) – это конденсатор, заряд в котором накапливается на границе раздела двух сред – электрода и электролита. Энергия в ионисторе содержится в виде статического заряда. Накопление совершается, если к его обкладкам будет приложена разность потенциалов (постоянное напряжение).

Концепция создания ионисторов появилась недавно, и в настоящее время они заняли свою нишу применения. Ионисторы успешно могут заменять химические источники тока в качестве резервного или основного подзаряжаемого источника тока. Внешний вид ряда ионисторов приведён на рисунке 4.25.

Если обычный конденсатор представляет собой обкладки из фольги, разделённые сухим сепаратором, то ионистор – это комбинация конденсатора с гальванической батареей. В нём применяют специальные обкладки и

электролит. В качестве обкладок используют материалы одного из трёх типов: обкладки большой площади на основе активированного угля, оксиды металлов и проводящие полимеры. Использование высокопористых угольных материалов позволяет достичь плотности ёмкости порядка 10 Ф/см^3 и больше.



Рисунок 4.25 – Современные ионисторы

Ионисторы на базе активированного угля наиболее экономичны в изготовлении. Их ещё называют двухслойными, или DLC-конденсаторами, потому что заряд сохраняется в двойном слое, образующемся на поверхности обкладки.

Электролит ионисторов может быть водным либо органическим. Ионисторы на основе водного электролита обладают небольшим внутренним сопротивлением, но напряжение заряда для них ограничено 1 В. А ионисторы на основе органических электролитов обладают более высоким внутренним сопротивлением, но обеспечивают напряжение заряда 2-3 В.

Для электропитания РЭА нужны более высокие напряжения, чем обеспечивают ионисторы. Для получения нужного напряжения их включают последовательно. 3-4 ионистора обеспечивают напряжение достаточной величины.

Величина ёмкости конденсаторов измеряется в пикофарадах, нанофарадах и микрофарадах, в то время как ёмкость ионисторов измеряется в фарадах. В ионисторах достижима энергетическая плотность от 1 до 10 Вт/кг. Она больше, чем у типичных конденсаторов, но меньше, чем у аккумуляторов.

Относительно низкое внутреннее сопротивление ионисторов обеспечивает хорошую проводимость.

Ионистор может запасать энергию, примерно равную $1/10$ энергии никель-металлгидридного аккумулятора. В то время как аккумулятор выдаёт относительно постоянное рабочее напряжение, напряжение на ионисторе понижается линейно от рабочего значения до нуля и ему не присущи такие плоские зоны характеристики разряда, как у аккумуляторов. По этой причине ионистор не способен удерживать полный заряд. Степень его заряда определяется в процентах и зависит в первую очередь от того приложения, в котором он применяется.

Например, если 6-вольтовая батарея допускает разряд до 4,5 В, пока оборудование не выключится, ионистор достигает этого порога в течение первой четверти времени разряда. Оставшаяся в нём запасенная электроэнергия оказывается бесполезной. Для повышения степени использования запасённой в ионисторе энергии можно использовать DC/DC преобразователи, однако такой путь недостаточно результативен и к тому же ведёт к удорожанию системы.

Чаще всего ионисторы используют для электропитания микросхем памяти, и иногда ими подменяют гальванические элементы. Кроме того, их используют в цепях фильтрации и в сглаживающих фильтрах. Ионисторы могут работать и в буфере с аккумуляторными батареями в целях защиты их от резких скачков тока нагрузки: при низком токе нагрузки батарея подзаряжает суперконденсатор, и если ток резко возрастёт, суперконденсатор отдаст запасённую энергию, чем уменьшит нагрузку на батарею. При таком варианте использования его размещают либо непосредственно возле аккумуляторной батареи, либо внутри её корпуса. Таким образом, применение суперконденсатора оправданно в той РЭА, где требуется кратковременная

повышенная мощность при относительно низком собственном энергопотреблении в остальное время работы.

Использование в упомянутой выше РЭА для обеспечения требуемой пиковой мощности гальванических батарей оказывается неэффективным, громоздким и относительно дороги. Рассмотрим для примера проектирование некоторого датчика типа "интеллектуальной пыли", который действует в составе ячеистой сети, расположен в зоне с ограниченным доступом и питается путем сбора свободной энергии или миниатюрной батареи (литиевая на 3,6 В). Это связано с тем, что с точки зрения массогабаритных ограничений его нельзя питать от относительно мощной батареи, к тому же требующей выезда персонала для периодической замены. В работе датчика есть моменты, когда ему в течение 20 с нужен ток 30 мА: датчик должен проснуться, выполнить измерения, обработать их, сформировать пакет данных, отправить последний по каналу беспроводной связи, получить подтверждение и указания о дальнейших действиях и, наконец, перейти в режим сна до следующего цикла работы. Именно в этом случае и необходим суперконденсатор, включенный параллельно маломощной батарее.

Преимущества ионисторов:

- большой срок службы;
- малое внутреннее сопротивление (обеспечивает сглаживание импульсов (бросков) тока нагрузки, если ионистор включен параллельно аккумуляторной батарее);
- быстрый заряд – в течение нескольких секунд из-за низкого внутреннего сопротивления;
- работа при любом напряжении, не превосходящем номинального;
- неограниченное число циклов заряд/разряд;
- отсутствие необходимости контроля за режимом зарядки;
- использование простых методов заряда;

- широкий диапазон рабочих температур: от минус 25°C до 70°C;
- относительная дешевизна.

Недостатки ионисторов:

- не обеспечивают достаточного накопления электроэнергии;
- маленькая энергетическая плотность;
- низкое напряжение на некоторых типах ионисторов;
- для получения требуемого напряжения необходимо последовательное подключение не менее трёх ионисторов;
- высокий саморазряд.

Применение ионисторов:

- телевизоры, СВЧ-печи: резервное электропитание таймера;
- видеокамеры, платы памяти: резервное электропитание запоминающего устройства во время смены батарей;
- музыкальные центры: электропитание микросхем памяти установок тюнера;
- телефоны: резервное электропитание микросхем памяти для хранения номеров абонентов;
- электронные счётчики электрической энергии;
- охранная сигнализация;
- электронные измерительные приборы и т. д.

В настоящее время ионисторы выпускают и у нас в стране, и за рубежом.

В России производителем ионисторов является компания "Элеконд" (г. Сарапул). Уже налажен выпуск ионисторов К58-20 и К58-21. В 2019 г. планируется выпуск ионистора К58-26. Последний совмещает в себе малые габаритные размеры (объём от 0.65 до 12.5 см³), большую ёмкость (1...100 Ф) и низкий уровень ЭПС при высокой стойкости к внешним воздействующим факторам. К58-26 является надёжными резервными источником тока с рабочим

временем до 700 ч. и токами разряда до 50 А при 500 000 циклах заряда-разряда.

За рубежом среди всех компаний, выпускающих ионисторы, выделяется "Murata". Её ионисторы серий DMF и DMT (плоские многослойные) имеют относительно малые размеры, что делает удобным их применение в РЭА.

4.5 Защитные компоненты

4.5.1 Элементы для ограничения токов

Полупроводниковые компоненты ИЭП могут выйти из строя либо по причине электрического пробоя, обусловленного высоким напряжением, либо по причине теплового пробоя из-за перегрева токами. При этом, как правило, пробой полупроводникового вентиля приводит к возникновению аварии и протеканию больших токов в неповреждённых вентилях и других элементах ИЭП.

Режимы, характеризующиеся протеканием больших аварийных токов, можно разделить на две группы: внешние аварии, вызванные короткими замыканиями в нагрузке или в распределительной сети, и внутренние аварии, обусловленные повреждением отдельных вентилях или других элементов ИЭП. При этом часто внешние аварии приводят к повреждениям вентилях и к развитию внутренних аварий.

Для защиты ИЭП от аварийных токов применяют защитные компоненты – быстродействующие автоматические выключатели, быстродействующие плавкие предохранители и самовосстанавливающиеся предохранители.

Быстродействующие плавкие предохранители являются самыми простыми защитными элементами. Как правило, к ним предъявляют более жёсткие требования, чем к общепромышленным плавким предохранителям.

Эти требования сводятся к следующим:

- полное или частичное согласование характеристик предохранителя

с характеристиками полупроводниковых вентиляй;

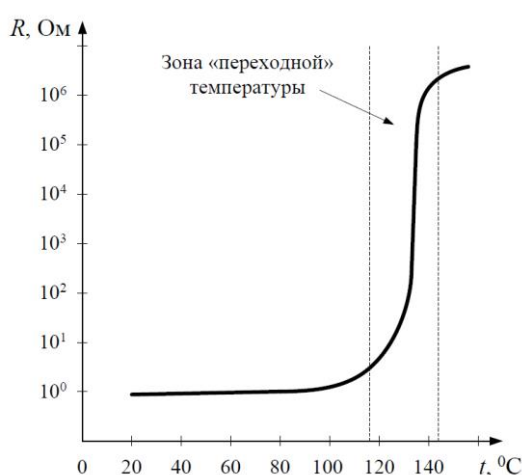
- высокая отключающая способность;
- минимальные потери при номинальном токе;
- отсутствие изменений характеристик во времени при длительном протекании номинального тока;
- эффективное токоограничение;
- минимальная энергия, выделяющаяся в полупроводниковых вентилях за время протекания аварийного тока;
- минимальное напряжение дуги, возникающее при срабатывании предохранителя, которое не должно приводить к пробое неповреждённых вентиляй.

Быстродействующие плавкие предохранители, как правило, обеспечивают защиту полупроводниковых вентиляй лишь от токов короткого замыкания и не защищают от перегрузки.

Самовосстанавливающиеся предохранители (PolySwitch, позисторы, РТС-термисторы) изготавливают из тонкого листа проводящего пластика, на который напылены электроды. Проводящий пластик состоит из непроводящего электрический ток кристаллического полимера и распределённых в нём мельчайших частиц углерода, проводящих электрический ток. Электроды гарантируют равномерное распределение энергии по всей площади поверхности, к ним крепятся выводы. Проводящий пластик имеет высокий нелинейный положительный температурный коэффициент сопротивления. Особенность материала самовосстанавливающегося предохранителя – это очень сильная зависимость сопротивления от температуры и практически скачкообразное изменение сопротивления (рисунок 4.26а). До определённой, так называемой "переходной" температуры, сопротивление практически не возрастает. При

достижении "переходной" температуры сопротивление возрастает на 6-7 порядков. Внешний вид типового позистора приведён на рисунке 4.26б.

При комнатной температуре материал самовосстанавливающего предохранителя имеет кристаллическую структуру. Проводящие частицы углерода расположены в нём по границам кристаллов, образуя цепочки, по которым может идти электрический ток. Когда начинает течь ток, превышающий номинальный, температура полимера начинает расти, пока не достигнет так называемой температуры "фазовой трансформации", при которой происходит изменение фазового состояния полимера из кристаллического в аморфное, сопровождаемое небольшим расширением. Проводящие частицы углерода более не сжаты кристаллами полимера в плотные цепочки, они движутся относительно друг друга и больше не могут проводить электрический ток. В результате сопротивление материала резко возрастает – и самовосстанавливающийся предохранитель выключается. В высокоомном состоянии внутренняя температура элемента достигает 120°C и за счёт протекания остаточного тока (десятые-сотые доли миллиампер) поддерживается довольно высокой для предотвращения восстановления токопроводящих цепей.



а)



б)

Рисунок 4.26 – Кривая сопротивления позистора (а) и его внешний вид (б)

Когда приложенное к цепи напряжение снимается, предохранитель быстро остывает, происходит восстановление токопроводящих цепей. Сопротивление элемента уменьшается до исходной величины.

Самовосстанавливающийся предохранитель включают в цепь электропитания последовательно с нагрузкой.

4.5.2 Элементы для ограничения перенапряжений

Помехи в цепях электропитания имеют различную природу и отличаются по уровню мощности. Например, импульсы, возникающие при грозовых разрядах, имеют колоссальную энергию и амплитуду напряжения в тысячи вольт. Значительно меньшей энергией обладают выбросы при коммутации индуктивных нагрузок.

Для защиты силовых полупроводниковых ключей от перенапряжений при коммутации цепей с индуктивностями и атмосферных перенапряжений используют газовые разрядники, варисторы и супрессоры (TVS-диоды) (рисунок 4.27).



Рисунок 4.27 – Элементы для ограничения перенапряжений

Газовые разрядники применяют, в первую очередь, для защиты от атмосферных перенапряжений. Работа их основана на пробое промежутка между электродами, находящимися в среде инертного газа. Газовый разрядник содержит трубку, заполненную аргоном или неоном и имеющую электроды, сделанные из специального сплава. Всё это помещено в стеклянный или керамический корпус.

Когда к такому устройству прикладывается высокое импульсное напряжение, нарастающее со скоростью около 1 кВ/мкс, в трубке возникает разряд. Чем меньше скорость нарастания фронта, тем выше должно быть напряжение, "зажигающее" разряд. Они могут многократно выдерживать значительные импульсы тока (25 кА и более). Длительность атмосферных перенапряжений обычно не превышает 1 мс.

Газовые разрядники обладают продолжительным сроком службы, низкой ёмкостью (1-2 пФ) и малыми вносимыми потерями. Они выпускаются на напряжения пробоя 50-1000 В.

Несмотря на отличную способность снижать напряжение, газовый разрядник имеет скорость срабатывания 0,1-1 мкс. Надо отметить, что у разрядника в момент "пробоя" сопротивление снижается практически до нуля. При этом мощность, выделяемая в разряднике в момент пробоя, весьма невелика. Иными словами, газовый разрядник, защищая от перенапряжений, создаёт короткое замыкание, которое должно быть отключено автоматом или предохранителем.

Варисторами называют полупроводниковые резисторы, электрическое сопротивление которых существенно зависит от приложенного напряжения. Как правило, их изготавливают из карбида кремния. Нелинейность появляется из-за явлений, наблюдаемых на поверхностях зёрен кристалла, из которого спрессован варистор.

В нормальном режиме работы сопротивление варистора велико – и он не оказывает никакого влияния на схему. При резком увеличении напряжения выше заданного уровня происходит срабатывание элемента – и его сопротивление на несколько порядков уменьшается, тем самым импульс перенапряжения поглощается внутри прибора. Включают его параллельно цепи электропитания.

Супрессоры – это защитные диоды по принципу действия и

характеристикам аналогичные стабилитронам. Их полное название – Transient Voltage Suppressor (подавитель напряжений переходных процессов).

Супрессоры изготавливают как в однонаправленном, так и в двунаправленном исполнениях. Однонаправленное исполнение применяют для подавления перенапряжений только одной полярности. Двунаправленные диоды предназначены для подавления перенапряжений обеих полярностей.

Супрессор включают параллельно защищаемой нагрузке, как это показано на рисунке 4.28. В нормальных условиях он находится под обратным смещением и практически не влияет на работу схемы. При возникновении высоковольтного импульса происходит обратимый пробой диода. Благодаря этому входное напряжение ограничивается на уровне напряжения пробоя.

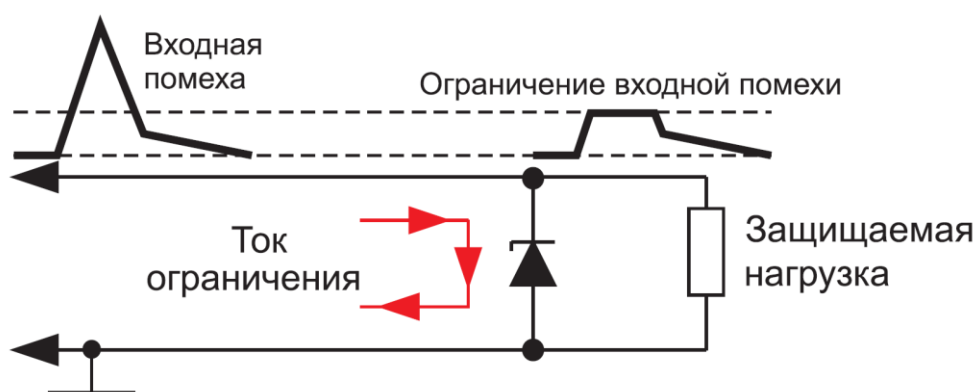


Рисунок 4.28 – Включение супрессора в схему

Супрессор, по сути, представляет собой мощный, быстродействующий стабилитрон. С момента пробоя и до конца действия перенапряжения напряжение на его выводах ограничивается на уровне напряжения пробоя. При этом мощность, рассеиваемая на супрессоре, в десятки раз выше, чем на разряднике. Поэтому супрессор справляется прекрасно с кратковременными перенапряжениями не очень большой мощности. А вот мощность пробоя, вызванного статическим электричеством, накопившимся на линии, на несколько порядков выше. Супрессор при этом работает в нехарактерном для него режиме (поддерживая на своих выводах напряжение не ниже

напряжения стабилизации при очень большом импульсном токе), что может вызвать выход его из строя.

Супрессоры обладают высоким быстродействием в отличие от газовых разрядников, которые из-за значительного времени срабатывания (более 0,15 мкс) не решают проблемы защиты многих полупроводниковых приборов и микросхем, для которых недопустимы начальные выбросы напряжения, пропускаемые разрядниками.

Супрессоры быстрее срабатывают и более надежно фиксируют напряжение срабатывания, чем варисторы. Время срабатывания супрессоров составляет десятки пикосекунд. Собственная ёмкость у них ниже, чем у варисторов.

Супрессоры обладают низким уровнем напряжения ограничения при широком его диапазоне, высокой долговечностью и надёжностью, легко встраиваются в печатные платы. Однако имеют низкое значение максимального импульсного тока.

На практике часто применяют комбинированные системы защиты, когда на входе стоят сначала газовые разрядники, срабатывающие только при атмосферных перенапряжениях, затем варисторы, воспринимающие на себя основную энергию перенапряжений, а затем супрессоры, обеспечивающие точное ограничение перенапряжений (рисунок 4.29).

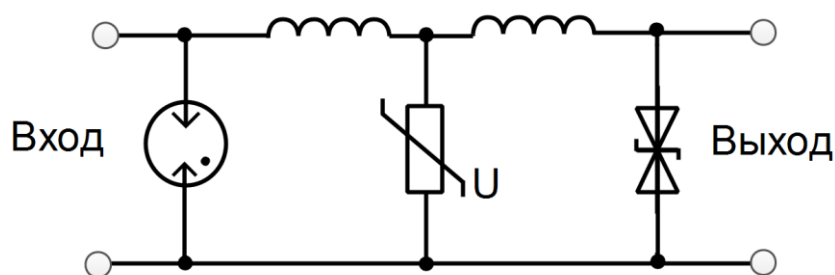


Рисунок 4.29 – Комбинированная система защиты

Контрольные вопросы

1. Какие преимущества имеют планарные трансформаторы перед традиционными силовыми?
2. Чем различаются области применения полевых и IGBT транзисторов?
3. В каких приложениях электролитические конденсаторы успешно могут быть вытеснены ионисторами?
4. Сформулируйте преимущества, недостатки и области применения основных элементов защиты от перенапряжений.
5. Сформулируйте преимущества, недостатки и области применения основных элементов защиты от короткого замыкания.
6. Где в современной силовой электронике находят применение тиристоры?
7. Какие типы конденсаторов находят применение в современных источниках электропитания?

Список литературы

1. Шихов С. Проектирование планарных силовых трансформаторов // Компоненты и технологии. – 2003. – № 7. – С. 22-27.
2. Кузнец В., Панькина О., Мачковская Н. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6.
3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: НГТУ, 2009. – 672 с.
4. Дьяконов В. Мощные полевые транзисторы: история, развитие и перспективы // Силовая электроника. – 2011. – № 3. – С. 18-28.
5. Основы силовой электроники. Силовые полупроводниковые приборы / Богомяков А.А., Голов Н.А., Евсеев Ю.А. и др.; под ред. Ковалева Ф.И. и Усачева В.А. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 247 с.

6. Chappell P. Introduction to Power Electronics. – London: Artech House, 2014. – 200 p.

7. Рентюк В. Суперконденсаторы и их роль в системах питания электроники ближайшего будущего // Компоненты и технологии. – 2018. – № 3. – С. 7-10.