

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Учебник

В двух томах

Том 2

СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ Ю. К. РОЗАНОВА

Допущено

*Учебно-методическим объединением по образованию в области энергетики
и электротехники в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
«Электротехника, электромеханика и электротехнологии»*



Москва

Издательский центр «Академия»

2010

УДК 621.3.038(075.8)
ББК 31.264я73
Э454

Рецензенты:

зав. кафедрой электрических и электронных аппаратов Чувашского государственного университета им. И. Н. Ульянова, канд. техн. наук *Е. Г. Егоров*;
проф. Военной академии РВСН им. Петра Великого, д-р техн. наук *А. А. Гуров*

Э454 **Электрические** и электронные аппараты. В 2 т. Т. 2.
Силовые электронные аппараты : учебник для студ. высш. учеб. заведений / [А. П. Бурман и др.] ; под ред. Ю. К. Розанова. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 320 с.

ISBN 978-5-7695-6255-6

Рассмотрены принцип действия, электромагнитные процессы, схемотехническое исполнение и характеристики основных видов статических коммутационных аппаратов и регуляторов; нашли отражение достижения современной электроники в области создания аппаратов на полностью управляемых полупроводниковых ключах для импульсного управления потоками электроэнергии.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 621.3.038(075.8)
ББК 31.264я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение
любым способом без согласия правообладателя запрещается*

ISBN 978-5-7695-6255-6 (т. 2) © Коллектив авторов, 2010
ISBN 978-5-7695-6254-9 © Образовательно-издательский центр «Академия», 2010
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Введение	4
Глава 1. Силовые электронные ключи.....	8
1.1. Электронные ключи и бездуговая коммутация.....	8
1.1.1. Общие сведения	8
1.1.2. Режимы работы идеализированных ключей	10
1.1.3. Область безопасной работы	20
1.1.4. Особенности бездуговой коммутации	23
1.2. Силовые диоды	27
1.2.1. Электронно-дырочный переход	27
1.2.2. Статические характеристики диода	28
1.2.3. Динамические характеристики диода.....	30
1.2.4. Защита силовых диодов.....	33
1.2.5. Основные типы силовых диодов.....	35
1.3. Силовые транзисторы	40
1.3.1. Основные классы силовых транзисторов.....	40
1.3.2. Статические режимы работы транзисторов.....	46
1.3.3. Динамика силовых транзисторов.....	51
1.3.4. Обеспечение безопасной работы транзисторов.....	59
1.4. Тиристоры	67
1.4.1. Принцип действия обычного тиристора	67
1.4.2. Статические ВАХ тиристора	68
1.4.3. Динамические характеристики тиристора	73
1.4.4. Развитие тиристорov.....	78
1.4.5. Запираемые тиристоры.....	80
1.5. Общая характеристика силовых полупроводниковых ключей и модулей на их основе	88
1.5.1. Сравнение силовых электронных ключей.....	88
1.5.2. Тенденции развития силовых полупроводниковых при- боров	90
1.5.3. Последовательное и параллельное соединение ключе- вых элементов	91

1.5.4. Силовые полупроводниковые модули	93
1.5.5. Моделирование силовых полупроводниковых ключей	100
Глава 2. Пассивные компоненты и охладители силовых электронных приборов	105
2.1. Общие сведения	105
2.2. Электромагнитные компоненты	106
2.2.1. Общие сведения о ферромагнитных материалах	106
2.2.2. Влияние повышенной частоты и несинусоидальности напряжения на работу трансформаторно-реакторного оборудования	107
2.3. Конденсаторы	115
2.3.1. Общие сведения	115
2.3.2. Влияние формы и частоты напряжения на работу конденсатора	118
2.4. Теплоотвод в силовых электронных приборах	124
2.4.1. Тепловые режимы работы силовых электронных ключей	124
2.4.2. Охлаждение силовых электронных ключей	127
Глава 3. Системы управления силовых электронных аппаратов	134
3.1. Назначение и основные принципы функционирования	134
3.1.1. Общие сведения и назначение	134
3.1.2. Основные принципы управления импульсными системами	137
3.1.3. Организация синусоидальной широтно-импульсной модуляции	142
3.2. Интегральные микросхемы	147
3.3. Формирователи импульсов управления	149
3.4. Датчики	158
3.5. Микропроцессорные системы управления	163
3.5.1. Общие сведения о микропроцессорах и микропроцессорных устройствах	163
3.5.2. Микропроцессорные контроллеры	168
3.5.3. Программное обеспечение	175
3.5.4. Программируемые логические контроллеры	178
Глава 4. Анализ процессов и моделирование силовых электронных аппаратов	182
4.1. Основные методы анализа	182

4.1.1. Общее математическое описание электронных аппаратов	182
4.1.2. Метод «припасовывания» по интервалам постоянства структур	184
4.1.3. Метод основной составляющей	186
4.2. Моделирование импульсных регуляторов	188
4.2.1. Метод осреднения переменных состояния	188
4.2.2. Пример аналитической модели импульсного преобразователя постоянного тока	190
4.3. Компьютерное моделирование	195

Глава 5. Статические коммутационные аппараты и регуляторы постоянного тока

200

5.1. Статические и гибридные коммутационные аппараты постоянного тока	200
5.1.1. Общие сведения	200
5.1.2. Транзисторные реле и контакторы	202
5.1.3. Тиристорные контакторы	215
5.1.4. Гибридные аппараты постоянного тока	220
5.2. Типовые схемы регуляторов постоянного тока	226
5.2.1. Общие сведения	226
5.2.2. Регуляторы-стабилизаторы непрерывного действия	229
5.2.3. Типовые структуры управления импульсными регуляторами	233
5.2.4. Импульсный регулятор с последовательным ключом	237
5.2.5. Импульсный регулятор с параллельным ключом	245
5.2.6. Импульсный регулятор с параллельным индуктивным накопителем	249

Глава 6. Статические коммутационные аппараты и регуляторы переменного тока

253

6.1. Статические и гибридные коммутационные аппараты переменного тока	253
6.1.1. Общие сведения	253
6.1.2. Тиристорные преобразователи с естественной коммутацией	253
6.1.3. Тиристорные преобразователи с искусственной коммутацией	261
6.1.4. Реле и контакторы переменного тока на полностью управляемых ключах	264
6.1.5. Гибридные аппараты	267
6.2. Регуляторы переменного тока с импульсной модуляцией	269
6.2.1. Принцип управления переменным током	269

6.2.2. Активные силовые фильтры.....	274
6.2.3. Гибридные фильтры.....	284
6.3. Электромагнитные управляемые компоненты.....	291
6.3.1. Общие сведения	291
6.3.2. Дроссели насыщения без подмагничивания.....	292
6.3.3. Дроссели насыщения с подмагничиванием.....	297
6.3.4. Феррорезонансные стабилизаторы напряжения и то- ка	300
6.3.5. Управляемые реакторы в системах электроснабже- ния.....	303
Список литературы.....	310

ПРЕДИСЛОВИЕ

Второй том учебника «Электрические и электронные аппараты» посвящен статическим, в основном, электронным аппаратам. В XX в. в основе силовых регуляторов преимущественно использовались электромагнитные устройства. В настоящее время развитие полупроводниковой техники позволило создать широкую гамму силовых быстродействующих ключей с очень низкой мощностью управления ими. В этой связи существенно расширились функциональные возможности регуляторов электрических величин и характеристик: тока, напряжения, мощности и др. Появились статические компенсаторы реактивной мощности и мощности искажений.

При написании второго тома учебника работа между авторами была распределена следующим образом: предисловие, введение и главы 2, 4 и 5, подразделы 1.1, 1.5 и 3.1, подразделы 6.2.1, 6.2.3 и 6.3.5 написаны докт. техн. наук, проф. Розановым Ю. К.; глава 1 (кроме разделов 1.1 и 1.5) — канд. техн. наук, доц. Рябчицким М. В.; глава 3 (кроме раздела 3.1) — канд. техн. наук, доц. Кваснюком А. А.; подраздел 6.1 — проф. Бурманом А. П.; подраздел 6.3 (кроме подраздела 6.3.5) — канд. техн. наук, доц. Коробковым Ю. С.

Авторы выражают глубокую признательность всем сотрудникам кафедры «Электрические и электронные аппараты» МЭИ (ТУ), особенно канд. техн. наук Сазонову В. В., принимавшим участие в обсуждении рукописи, а также аспирантам и студентам кафедры, помогавшим в ее оформлении.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной техники невозможно без широкого использования электрических и электронных аппаратов — устройств управления потоками энергии и информации. Независимо от назначения, области применения, принципа действия, конструктивного исполнения все электрические аппараты (ЭА) можно разделить на две большие группы:

- электромеханические, непременно содержащие подвижные элементы, в результате перемещения которых и осуществляется функционирование аппарата;
- статические (иногда называемые бесконтактными) или силовые электронные, не имеющие подвижных частей и осуществляющие возложенную на них функцию в результате изменения параметров и характеристик входящих в их состав элементов и блоков.

Создание в начале XX в. дросселей насыщения, управляемых посредством их подмагничивания постоянным током, открыло путь для развития статических ЭА. Появилась возможность управлять сопротивлением электрической цепи, содержащей электромагнитный элемент, выполненный в виде неподвижного магнитопровода и катушки намагничивания. На принципе изменения состояния его намагниченности, а следовательно, и электрического сопротивления стала развиваться новая область ЭА, выполненных на основе электромагнитных элементов. В этой области ЭА можно выделить:

- статические коммутационные аппараты управления (контакты, пускатели, реле и др);
- датчики и усилители аппаратов контроля и защиты;
- регуляторы тока, напряжения и мощности;
- компенсаторы емкостной мощности;
- токоограничивающие управляемые реакторы.

Эти виды ЭА называют также в технической литературе «бесконтактными», хотя термин «статические» более точно отражает их принцип действия. Преимуществом этих ЭА по сравнению с электромеханическими является высокая надежность, большой ресурс работы, стойкость к различным видам радиационных

излучений и относительно высокое быстродействие, которое ограничено частотой питающей сети. Недостатки их очевидны — остаточные сопротивления в полностью включенном или выключенном состояниях и нелинейные искажения токов и напряжений силовой цепи. Развитию класса электромагнитных статических ЭА уделялось большое внимание многими специалистами. Среди них значительный вклад внесли коллективы кафедр «Электрические аппараты» Московского энергетического института (МЭИ) и Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ). Наибольшие достижения в этой области приходится на период 1980—1990-х гг. Среди последних достижений в этой области следует отметить создание регуляторов на основе быстродействующего магнитного ключа для источников вторичного питания на кафедре «Электрические аппараты» МЭИ и современных мощных управляемых шунтирующих реакторов (УШР) для электроэнергетических систем на одноименной кафедре СПбГПУ и ОАО «ЭЛУР».

Создание тиристора в 1960-х гг. стало новым этапом в развитии статических ЭА. Был разработан ряд мощных контакторов переменного тока с естественной коммутацией тиристором (ТКЕ). По быстродействию они существенно превосходили электромеханические контакторы. Однако тиристорные контакторы имеют практически неограниченный ресурс по числу коммутаций. Главное же их преимущество заключалось в возможности регулирования тока и напряжения в нагрузке. Это преимущество сделало их эффективным средством ограничения пусковых токов асинхронных двигателей.

Качественный скачок в развитии статических ЭА начался с промышленного освоения полностью управляемых силовых электронных приборов: запираемых тиристором (ЗТ), силовых транзисторов с полевым управлением (МОП) и биполярных транзисторов с полевым управлением (МОП-БТ). Появилась возможность импульсного управления потоками электроэнергии по требуемым законам практически без дополнительных энергетических затрат. Преимущества новых приборов проявились при разработке регуляторов постоянного тока, принцип действия которых основан на импульсном прерывании тока полностью управляемым ключом, работающим на повышенной частоте. Наиболее ярко преимущества ЭА с полупроводниковыми ключами проявляются при разработке так называемых «интеллектуальных» или «разумных» реле. Они выполняются на основе интеграции в одном модуле различных элементов и узлов схемы реле. Такие реле способны осуществлять контроль и защиту при коротких замыканиях (КЗ), перегрузках, перенапряжениях, осуществлять переход в различные режимы работы, обмен информацией с

внешней средой и др. Например, в интегральной схеме фирмы «Infineon technologies» интегрированы встроенные защиты от перенапряжений, токовой и температурной перегрузок. В схему также интегрирован оконечный каскад управления (драйвер) силовым МОП транзистором, управление которым осуществляется от информационного сигнала. Реле имеет высокое быстродействие и практически неограниченный ресурс работы. Среди статических ЭА большой мощности широкое практическое применение получили регуляторы мощности индуктивного характера на основе УШР и реактора со встречно включенными тиристорами. Создание полностью управляемых силовых электронных ключей позволило разработать преобразователи, работающие в режиме импульсной модуляции в четырех квадрантах области параметров переменного тока. Эти преобразователи стали основой схем регуляторов неактивной (реактивной и искажения) мощности, используемых в электроэнергетике в качестве компенсаторов реактивной мощности и силовых активных фильтрах высших гармоник. В этих устройствах на стороне переменного тока преобразователей формируются по заданному закону токи, определяющие характер генерируемой или потребляемой мощности. Эти виды статических аппаратов по принципу действия являются регуляторами мощности неактивного характера между системами электроснабжения или между линией передачи электроэнергии и накопителем электрической энергии, например конденсатором большой емкости. Функциональные возможности таких устройств значительно превосходят возможности традиционных средств компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармоник, определяющих мощность искажения. Кроме того, они могут эффективно использоваться для улучшения технико-экономических характеристик широко распространенных в настоящее время пассивных фильтро-компенсирующих устройств.

Отдельно следует отметить гибридные ЭА, разрабатываемые на основе объединения электромеханических и статических аппаратов. Например, такие гибридные ЭА начали успешно использоваться для коммутации отпаек обмоток трансформаторов. Обеспечение процессов включения и выключения электронными ключами с последующим переходом для длительной работы на электромеханические контакты позволяет значительно повысить электрическую и механическую износоустойчивость контактных систем ЭА. Гибридные ЭА повышают быстродействие переключения цепей, а также обеспечивают при необходимости работу в качестве регуляторов в кратковременных режимах, например в пускорегулирующих устройствах асинхронных двигателей.

В заключение следует отметить, что новые виды как электромеханических, так и статических ЭА расширяют область их

применения в системах электроснабжения. В ЭА все больше используются устройства микроэлектроники. Это создает новые функциональные возможности электромеханических и статических ЭА и может обеспечивать их взаимодействие с более высокими уровнями управления в системах электроснабжения.

Силовые электронные ключи

1.1. Электронные ключи и бездуговая коммутация

1.1.1. Общие сведения

Управление потоком электроэнергии электрические аппараты (ЭА) осуществляют посредством коммутации электрической цепи. В электромеханических аппаратах коммутация цепи производится замыканием или размыканием электрической цепи посредством контактной пары, имеющей подвижную часть. Потоками электрической энергии можно также управлять с помощью статических аппаратов, содержащих приборы с управляемой электрической проводимостью. Такие ЭА не содержат подвижных частей, и процессы коммутации в них происходят без дугообразования.

Статические ЭА с бездуговой коммутацией можно подразделить на две основные группы: электронные и электромагнитные. В *электронных* аппаратах используются приборы с управлением электронного потока, а в *электромагнитных* — приборы с изменением магнитного сопротивления переменному току. В настоящее время наилучшими технико-экономическими показателями обладают полупроводниковые аппараты, относящиеся к группе электронных. В большинстве случаев электронные приборы в статических аппаратах работают в ключевом режиме, когда электронные приборы включены и проводят ток или выключены и не проводят ток, т. е. они подобны электромеханическим ключам, имеющим два состояния — включен или выключен. Основным элементом электронных аппаратов являются приборы, выполняющие функции электронных ключей.

Электронным ключом называется устройство для включения и выключения силовой электрической цепи, содержащее, по крайней мере, один управляемый вентильный прибор. Электронный вентильный прибор — это неделимый электронный прибор для электронного силового преобразования или прерывания, один неуправляемый или управляемый ключевым (бистабильным) способом и проводящий однонаправленный ток [17, 19]. На основе двух или более вентильных приборов создаются двунаправленные ключи, проводящие ток в двух направлениях или способные блокировать как прямое, так и обратное напряжения, т. е. не переходить в проводящее состояние при приложении к ним напряжений

противоположных полярностей. Понятие «силовой» означает, что осуществляется управление потоком электрической энергии, а не потоком информации. К «силовым» приборам формально принято относить приборы с максимально допустимым значением среднего тока свыше 10 А или импульсным током свыше 100 А. Функции силовых электронных ключей в настоящее время выполняют силовые полупроводниковые приборы, физической основой которых являются полупроводниковые структуры с различными типами электронной проводимости.

Силовые полупроводниковые приборы можно классифицировать по различным признакам: принципу действия, конструктивному исполнению, применению и др.

По принципу действия на практике в самом общем виде различают диоды, транзисторы и тиристоры. Однако каждый из этих видов содержит значительное количество разновидностей, существенно различающихся по принципу действия и своим характеристикам. Например, среди транзисторов различают биполярные транзисторы, полевые транзисторы, транзисторы с изолированным затвором IGBT (Insulated-Gate-Bipolar Transistor). С учетом структуры IGBT в русскоязычной литературе предложено именовать его МОП-БТ [17]. Не меньшее разнообразие принципов действия присуще также тиристорам. Внутри каждой разновидности приборы подразделяются на различные группы и типы, определяемые особенностями конструкции, технологиями исполнения, характеристиками отдельных параметров и др.

В каждой группе приборы могут классифицироваться по рабочей частоте (низкочастотные, высокочастотные, импульсные и др.), а также по коммутируемой мощности (малой мощности, средней мощности, большой мощности).

Важным признаком классификации ключа является принцип его управляемости, т. е. возможность перевода его из проводящего состояния в непроводящее и обратно. В настоящее время различают следующие принципы управляемости:

- изменение полярности подаваемого на прибор напряжения (диоды);
- подача сигнала управления для включения прибора и изменение полярности напряжения, подаваемого на силовые выводы, для его выключения (традиционные тиристоры), называемого не полностью управляемым;
- подача управляющих сигналов для включения или выключения прибора (транзисторы, запираемые тиристоры).

Основные характеристики и режимы работы ключей имеют много общего. Поэтому при рассмотрении их в настоящей главе введем понятия «идеальный» и «идеализированный» ключи, которые поясним при дальнейшем изложении этой главы. Это

позволит исключить повторы при рассмотрении различных видов ключей в других главах.

1.1.2. Режимы работы идеализированных ключей

Статический режим. Статическим режимом работы ключа называется режим, установившийся после его переключения в одно из следующих состояний: включенное (проводящее) или выключенное (непроводящее). Основной характеристикой ключа в этом режиме является его статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ), т. е. зависимость тока ключа i_S от напряжения на нем u_S , полученная при бесконечно медленном изменении тока и напряжения. На рис. 1.1 представлены условное обозначение идеального ключа S и его ВАХ. В обозначениях прямых токов и напряжений принято использовать индекс «пр», например $i_{пр}$ и $u_{пр}$, для обратных токов и напряжений — индекс «обр», например $i_{обр}$ и $u_{обр}$. Согласно ВАХ идеального ключа во включенном состоянии $u_S = 0$ при любом значении тока i_S , и наоборот, в выключенном $i_S = 0$ при любом значении напряжения u_S . Следует отметить, что время его включения и выключения, а также мощность, затрачиваемая на управление, тоже принимаются равными нулю.

В отличие от идеального ключа все виды реальных ключей в проводящем состоянии имеют прямое падение напряжения ΔU_S , а в непроводящем — пропускают ток утечки $i_{ут}$ (прямой i_{0F} или обратный i_{0R}). В общем случае статическая ВАХ реального ключа имеет нелинейный характер и описывается аналитическими уравнениями трансцендентного вида. Для упрощения анализа цепей, содержащих электронные ключи, ВАХ последних аппроксимируются более простыми математическими функциями, позволяющими посредством несложных математических преобразований произвести предварительную оценку установившихся электрических параметров цепи, содержащей такие идеализированные ключи. Наиболее распространенной аппроксимацией для ВАХ рассматриваемого вида

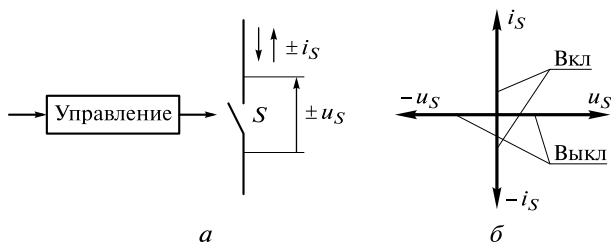


Рис. 1.1. Идеальный ключ:

a — условное обозначение ключа; b — статическая ВАХ

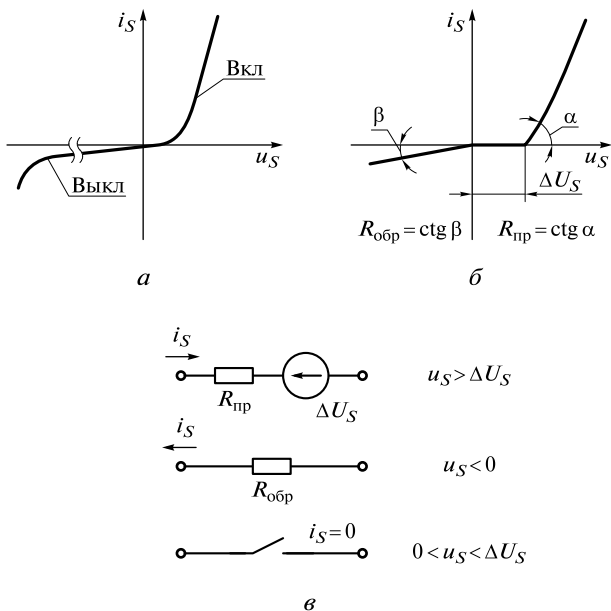


Рис. 1.2. Пример статических ВАХ полупроводниковых ключей:
 а — типовая ВАХ диода; б — аппроксимированная ВАХ диода, в — схема замещения диода при различных напряжениях U_S

(рис. 1.2, а) являются кусочно-линейные функции (рис. 1.2, б). Соответственно схемы замещения ключа в установившихся режимах при различных значениях напряжения могут быть представлены схемами линейных цепей, состоящих из сопротивлений и источников напряжения и тока (рис. 1.2, в). Например, для аппроксимированной ВАХ диода во включенном состоянии при $u_S > \Delta U_S$ (см. рис. 1.2, б) схема замещения будет включать источник напряжения ΔU_S и резистор сопротивлением R_{np} , величина которого определяет наклон ВАХ. При $u_S < \Delta U_S$ ток в ключе равен нулю.

Динамический режим. Динамическим режимом работы ключа называется его работа в переходном процессе из одного состояния в другое (из включенного в выключенное и наоборот). Применительно к ключам, работающим в электрических цепях, такие процессы называют также коммутационными, так как они соответствуют включению (отключению) цепи в электрической схеме или переводу тока из одной ветви электрической схемы в другую.

При анализе электрических цепей, содержащих электронные ключи, следует различать обозначения времени для динамических и статических режимов. Для статических (установившихся) режимов $t_{вкл}^{ст}$ и $t_{выкл}^{ст}$ — времена, в течение которых ключ находится

в включенном или выключенном состоянии, а для динамических (переходных) режимов $t_{\text{ВКЛ}}^{\text{п}}$ и $t_{\text{ВЫКЛ}}^{\text{п}}$ обозначают время перехода из выключенного состояния в включенное, и наоборот.

Одной из основных характеристик работы ключа в динамическом режиме является динамическая ВАХ, которая представляет зависимость напряжения на ключе u_S от протекающего через него тока i_S в переходном процессе. Динамические ВАХ называют также траекториями переключения (коммутации) электронного ключа. Переходные процессы в ключах зависят от его быстродействия и параметров элементов коммутируемой электрической цепи. Соответственно, динамические ВАХ также зависят от указанных факторов и поэтому отличаются многообразием. В общем случае они могут отображаться в многомерной области с координатами учитываемых факторов. Однако на практике динамические ВАХ (траектории переключения) обычно представляются на плоскости параметров тока i_S и напряжения u_S , определенных для конкретных условий коммутации на интервале переходного процесса.

Аналитическое описание динамических процессов, адекватно учитывающее физические явления в полупроводниковых приборах, представляет сложную задачу. В связи с этим при анализе процессов переключения в электронных ключах используются упрощенные математические модели, позволяющие во многих случаях получать результаты с достаточной для практических целей точностью. Например, общепринятым является представление электронного ключа на интервале включения источником линейно спадающего напряжения, а на интервале выключения — источником линейно спадающего тока. Длительности спада напряжения и тока до нуля соответственно принимаются равными временам включения $t_{\text{ВКЛ}}^{\text{п}}$ и выключения $t_{\text{ВЫКЛ}}^{\text{п}}$ электронного ключа. Такие модели соответствуют идеализированному представлению ключей в динамических режимах работы при переключении из одного состояния в другое.

Диаграммы напряжения u_S и тока i_S описываемой модели представлены на рис. 1.3. С учетом допущения о линейности их изменений, соответствующего эквивалентным источникам, напряжение и ток могут быть выражены как

$$\begin{aligned} u_S(t) &= U_{S0} \left(1 - \frac{t}{t_{\text{ВКЛ}}^{\text{п}}} \right); \\ i_S(t) &= I_{S0} \left(1 - \frac{t}{t_{\text{ВЫКЛ}}^{\text{п}}} \right), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где U_{S0} , I_{S0} — установившиеся значения напряжения и тока до момента начала коммутации $t = t_0$.

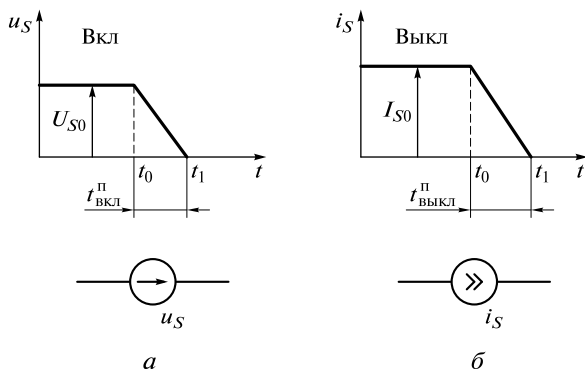


Рис 1.3. Диаграммы напряжения и тока с эквивалентными схемами при включении (а) и выключении (б)

Очевидно, что ток ключа при включении и напряжение на нем при выключении будут характеризовать реакцию коммутируемой цепи на изменение состояния ключа. Если в коммутируемой цепи будут содержаться реактивные элементы, например индуктивного или емкостного характера, то их инерционность будет вызывать соответствующую реакцию на процессы переключения ключей в виде изменения тока при включении и напряжения при выключении. В результате ВАХ ключа в статических и динамических режимах будут существенно отличаться.

На рис. 1.4 и 1.5 представлены примеры простейших схем переключения активной и активно-индуктивной нагрузок. При этом для большей ясности протекающих процессов принято допущение идеальности статической ВАХ (см. рис. 1.1, б) ключа S , а на интервалах переключения используется модель ключа, представленная формулами (1.1) и рис. 1.3.

Из приведенных примеров временных диаграмм $u_S(t)$, $i_S(t)$, мгновенных мощностей при включении $p_{\text{вкл}}^{\text{п}}(t)$ и выключении $p_{\text{выкл}}^{\text{п}}(t)$, а также динамических ВАХ видно, что они могут быть использованы для оценки различных параметров ключей при их переключениях. Так, например, временные диаграммы позволяют рассчитать потери мощности в ключе с учетом характера нагрузки. В рассматриваемом примере статические ВАХ ключей приняты идеальными и поэтому потери мощности существуют только на интервалах переключения. Рассмотрим их определение более подробно, используя известные в электротехнике формулы.

Для схемы с активной нагрузкой мгновенное значение мощности $p_{\text{вкл}}^{\text{п}}(t)$ на интервале включения (рис. 1.4, б) и выделяемая при этом энергия $W_{\text{вкл}}^{\text{п}}$ могут быть определены из следующих соотношений:

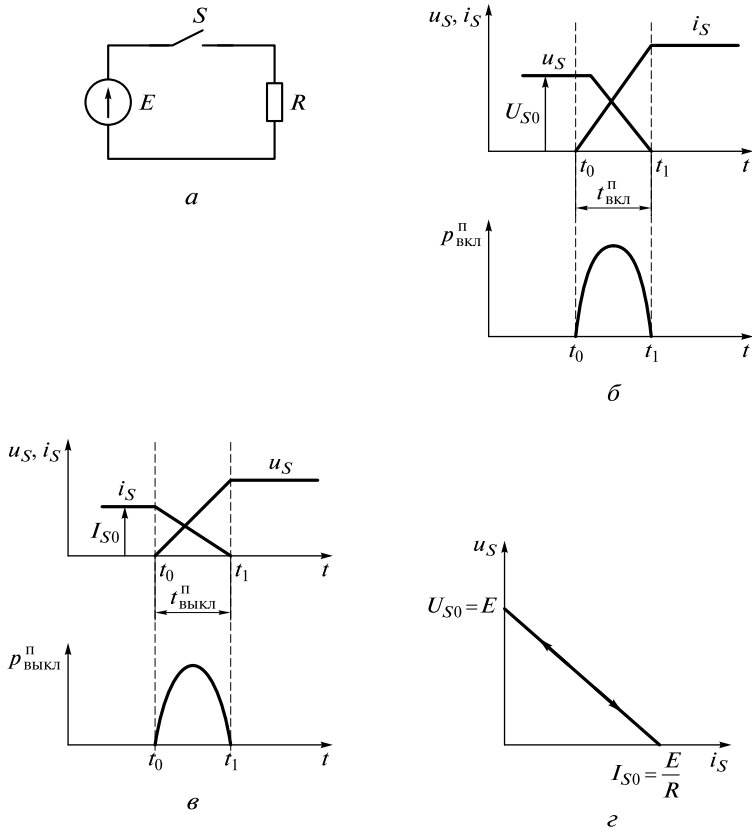


Рис. 1.4. Коммутация активной нагрузки:

a — схема; *б* — диаграммы изменения i_S , u_S , $p_{\text{вкл}}^{\text{II}}$ при включении; *в* — диаграммы изменения i_S , u_S , $p_{\text{выкл}}^{\text{II}}$ при выключении; *г* — динамическая ВАХ

$$p_{\text{вкл}}^{\text{II}}(t) = u_S(t)i_S(t) = \frac{E^2}{R} \left[\frac{1}{t_{\text{вкл}}^{\text{II}}} - \frac{t^2}{(t_{\text{вкл}}^{\text{II}})^2} \right]; \quad (1.2)$$

$$W_{\text{вкл}}^{\text{II}} = \int_0^{t_{\text{вкл}}^{\text{II}}} p_{\text{вкл}}^{\text{II}}(t) dt = \frac{E^2 t_{\text{вкл}}^{\text{II}}}{6R}.$$

На интервале выключения (см. рис. 1.4, *в*) для определения этих параметров следует в формулах (1.2) заменить $t_{\text{вкл}}^{\text{II}}$ на $t_{\text{выкл}}^{\text{II}}$.

Отсутствие реактивных элементов в схеме на рис. 1.4, *a* определяет линейный характер динамических ВАХ ключа при включении и выключении (см. рис. 1.4, *г*), которым соответствует соотношение

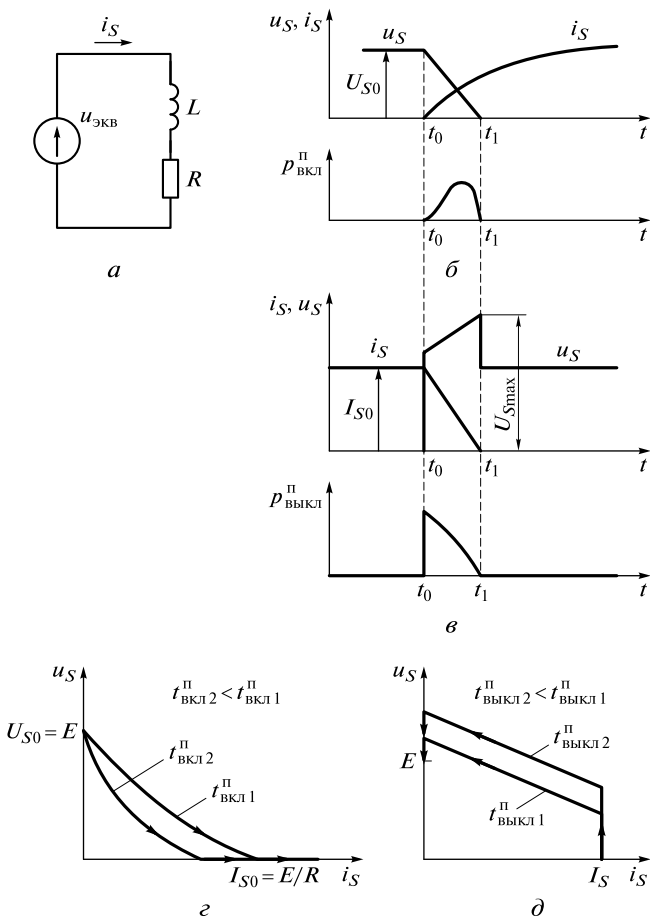


Рис. 1.5. Коммутация активно-индуктивной нагрузки:

a — схема; *б* — диаграммы изменения i_S , u_S , $p_{\text{вкл}}^{\text{п}}$ при включении; *в* — диаграммы изменения i_S , u_S , $p_{\text{выкл}}^{\text{п}}$ при выключении; *г*, *д* — динамические ВАХ при включении и выключении

$$u_S(t) = E - i_S(t)R. \quad (1.3)$$

При коммутации активно-индуктивной нагрузки процессы в схеме изменяются. Из рис. 1.5 видно, что наличие индуктивности в коммутируемой цепи приводит к повышению напряжения на ключе на интервале его выключения и затягиванию процесса нарастания тока при включении ключа. Так, например, из-за возникновения ЭДС самоиндукции на индуктивной катушке L при спаде тока i_S максимальное значение напряжения на ключе

$U_{S\max}$ становится равным $E + L \frac{di_S}{dt}$. При спаде же напряжения на интервалах включения значения тока i_S уменьшаются. В результате происходит изменение потерь мощности в ключе на интервалах коммутации. Одновременно существенно изменяются динамические ВАХ (рис. 1.5, з, д). Очевидно, что параметры нагрузки и быстродействие ключа S являются определяющими для процессов коммутации и их воздействия на условия работы ключа. В общем случае аналитическое описание коммутационных процессов в ключах с нагрузкой, содержащей реактивные элементы, является сложной задачей. Однако задача существенно упрощается при использовании приближенных моделей ключей, представленных соотношениями (1.1).

Рассмотрим в качестве примера включение RL -нагрузки, используя модели ключа при включении и выключении (рис. 1.6). Так как изменение напряжения и тока в ключе на интервалах коммутации имеет форму, отличную от синусоиды, то для анализа процессов целесообразно использовать операторный метод и принцип суперпозиции. Применение последнего возможно при допущении линейности коммутируемой цепи. В соответствии с этим принципом на интервале выключенного состояния ключ может быть представлен напряжением U_{S0} , равным по значению и направленным встречно напряжению источника питания E . В этом случае ток в коммутируемой цепи будет равным нулю, что соответствует разомкнутому состоянию ключа. Началу процесса

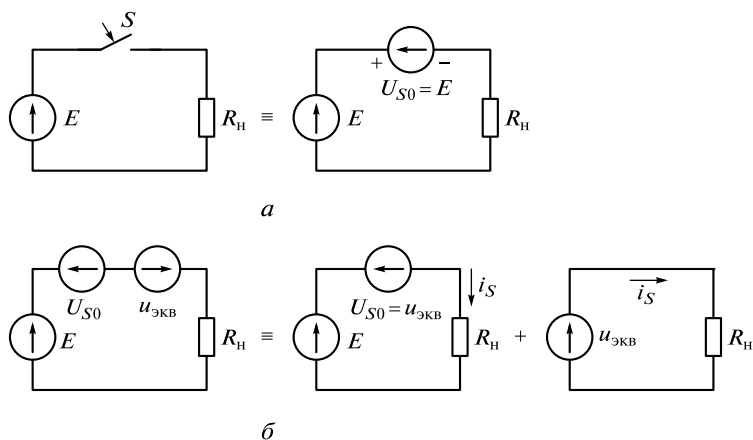


Рис. 1.6. Включение нагрузки:

а — эквивалентная схема до момента включения ($t \leq t_0$); б — эквивалентная схема при включении ($t \geq t_0$)

включения ключа S согласно модели (1.1) соответствует подключение эквивалентного источника при $t = t_0$:

$$u_{\text{ЭКВ}}(t) = \frac{Et}{t_{\text{ВКЛ}}^{\text{П}}}, \quad (1.4)$$

где $t_{\text{ВКЛ}}^{\text{П}} = t_1 - t_0$.

В результате в цепи начинает протекать ток включения $i_{S \text{ ВКЛ}}(t)$, который по принципу наложения может быть рассчитан как сумма токов:

$$i_{S \text{ ВКЛ}}(t) = I_0 + i_{\text{ЭКВ}}(t), \quad (1.5)$$

где I_0 — ток в момент начала коммутации, который равен нулю, так как $U_{S0} = E$; $i_{\text{ЭКВ}}(t)$ — ток, обусловленный включением эквивалентного источника с напряжением $u_{\text{ЭКВ}}(t)$.

В общем случае ток, возникающий под воздействием несинусоидального напряжения, может быть определен методом интеграла Дюамеля. В рассматриваемом случае более целесообразно использовать операторный метод с представлением воздействующего напряжения в виде суммы напряжений, описываемых элементарными функциями. Так, например, в рассматриваемом случае ток от воздействия напряжения $u_{\text{ЭКВ}}(t)$ при $t > t_1$ может быть представлен токами от возрастающего и убывающего линейных напряжений, смещенных по времени (рис. 1.7).

Соответственно изображение тока на интервале $0 - t_{\text{ВКЛ}}^{\text{П}}$ может быть представлено как

$$i_{S \text{ ВКЛ}}(p) = \frac{u_{\text{ЭКВ}}^{\text{ВКЛ}}(p)}{Z_{\text{Н}}(p)} = \frac{E}{t_{\text{ВКЛ}}^{\text{П}} L p^2 (1 + 1/\tau)}, \quad (1.6)$$

где $\tau = L/R$.

Переходя к оригиналу при $0 < t < t_{\text{ВКЛ}}^{\text{П}}$, получим

$$i_{S \text{ ВКЛ}}^{\text{ЭКВ}}(t) = \frac{E}{R t_{\text{ВКЛ}}^{\text{П}}} \left[t - \frac{L}{R} (1 - e^{-t/\tau}) \right]. \quad (1.7)$$

После завершения процесса коммутации для $t > t_1$ происходит изменение функции напряжения $u_{\text{ЭКВ}}^{\text{ВКЛ}}(t)$, которое становится равным напряжению с постоянной величиной E . В этом случае для смещенной функции изменяется знак, а время t заменяется на время $t - t_{\text{ВКЛ}}^{\text{П}}$. Процесс изменения тока i_S для времени $t > t_{\text{ВКЛ}}^{\text{П}}$ будет определяться реакцией цепи при включении на смещенные функции напряжения $u_{\text{ЭКВ}}(t)$:

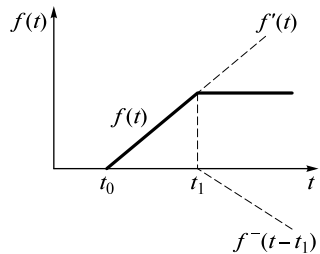


Рис 1.7. Графическое представление функций эквивалентных источников в виде суммы двух функций