

А. В. ЩЕГОЛЬКОВ, А. В. КОБЕЛЕВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ



**Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2025**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»**

А. В. ЩЕГОЛЬКОВ, А. В. КОБЕЛЕВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Утверждено Ученым советом университета в качестве учебного пособия
для студентов 3, 4 курсов, обучающихся по направлению подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и энергоэффективность»,
очной и заочной форм обучения

Учебное электронное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2025

УДК 621.313
ББК 31.26
Щ34

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Химические технологии» Южно-Российского государственного
политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова
М. С. Липкин

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ТГТУ»
Ю. В. Родионов

Щегольков, А. В.

Щ34 Электрические и электронные аппараты [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. В. Щегольков, А. В. Кобелев. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2025. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium IV ; RAM 512 Mb ; необходимое место на HDD 4,0 Mb ; Windows 7/8/10/11 ; дисковод CD-ROM , мышь. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-8265-2912-6

Рассмотрены практические подходы, связанные с функционированием и применением различных типов электрических и электронных аппаратов, как классических с механическими элементами включения и выключения, так и современных на полупроводниковых силовых ключах, которыми можно управлять с помощью программ. Практические вопросы и аспекты конструкций и режимов работы электрических и электронных аппаратов помогут расширить знания обучающихся.

Предназначено для студентов 3, 4 курсов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и энергоэффективность», очной и заочной форм обучения.

УДК 621.313
ББК 31.26

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-2912-6

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2025

ВВЕДЕНИЕ

Электрические и электронные аппараты, которые определяют надежность в различных режимах эксплуатации, являются важной основой современной электроэнергетики. Электрические и электронные аппараты нового поколения станут основой интеллектуальных сетей. Они обеспечивают мониторинг, защиту и автоматическую оптимизацию работы взаимосвязанного элемента. Основное внимание уделяется некоторым функциям интеллектуальных сетей на уровне распределения, таким как взаимосвязь распределенной генерации и активного управления распределением с использованием систем автоматизированного управления сетью. Связь электрических и электронных аппаратов с интеллектуальной распределенной архитектурой управления обеспечивает распределительным системам большую защиту от угроз и возможность быстрого реагирования на аварийные режимы. Ожидается, что новое поколение электрических и электронных аппаратов улучшит управляемость энергосистемой и обеспечит переход к интеллектуальным сетям. В будущем будет увеличиваться количество генераторных установок с единичной мощностью 600 МВт и выше. Установка автоматических выключателей на выходах этих генераторных установок может быстро отключать неисправности в оборудовании, таком как генераторы или трансформаторы, повышая надежность и гибкость использования электроэнергии.

Развитие электронных аппаратов основано на новых методах математического моделирования и применения для их управления программного обеспечения. Метод конечных элементов (МКЭ) – широко используемый метод численного анализа, применяемый к различным инженерным и научным задачам. Этот метод использовался для механического анализа электрооборудования.

В настоящее время обработка изображений широко используется в области механики твердого тела и производства компонентов. Например, цифровая корреляция изображений обычно используется для измерения деформации и напряжения, что может быть использовано при оценке технического состояния контактных групп электрических аппаратов. Новые технологии 3D-печати позволят существенно улучшить многие механические элементы электрических аппаратов, что связано с более точным и оптимальным сочетанием формирования деталей при аддитивной технологии.

1. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТОВ

Электрические аппараты являются конструктивно законченными техническими устройствами, используемыми в электроэнергетике [1 – 5]. Они бывают различных типов и функционала, связанных с управлением и защитой, а также режимами измерения и индикации в электрических сетях. Аппараты могут быть использованы при напряжении до 1000 В в цепях переменного тока и 750 В в цепях постоянного тока. В этом случае они могут быть выключателями высокого напряжения и обеспечивать режимы токоограничения, разъединения и весь набор функций, который позволяет управлять различными типами электрических сетей городского, областного и районного назначения с токами от 1 до 6300 А.

Функциональные процессы в электрических сетях, связанные с выполнением основных задач, реализуются с помощью электрических и электронных аппаратов. Возможны два варианта электрических аппаратов – с замыканием и размыканием контактной системы. Замыкание и размыкание происходит под действием напряжения или пружинного механизма [1 – 15].

На рисунке 1 показаны различные варианты контактов.

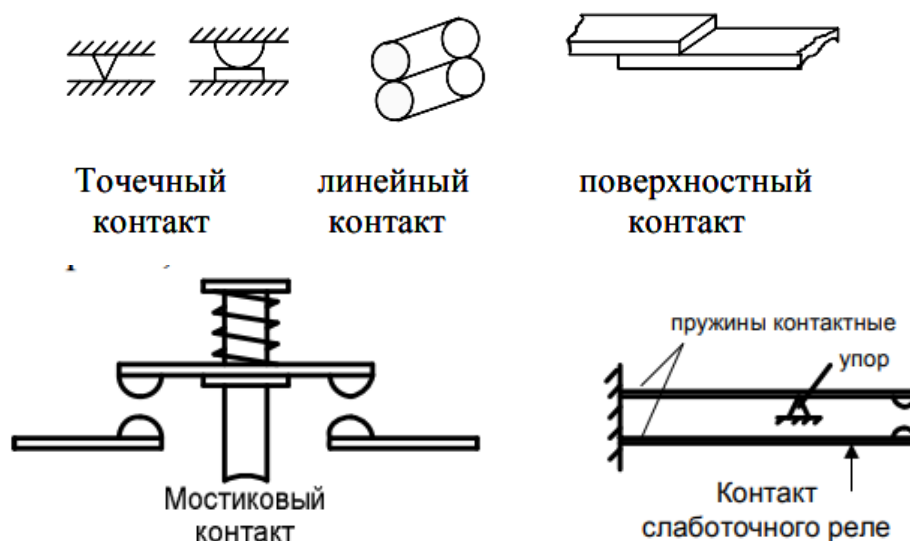


Рис. 1. Различные варианты контактов

На рисунке 2 проиллюстрировано испытание пружины растяжения на одноосное растяжение.

Электрический аппарат (ЭА) – обобщенное обозначение группы устройств, которое имеют механические подвижные элементы, размещаемые в корпусе, в котором могут находиться различные среды, и позволяющие функционально управлять режимами электротехнических устройств как в номинальном, так и аварийном режиме работы при различных условиях окружающей среды.

ЭА могут функционально обеспечить коммутацию, токоограничение или повлиять на напряжение, пускорегулирование и измерения, как косвенные так и прямые. Для измерений используют трансформаторы тока, напряжения, емкостные делители напряжения и т.д.

На рисунке 3 показана классификация электрических и электронных аппаратов.

На рисунке 4 показаны электрические аппараты.

Электромагнит электрического аппарата представлен (рис. 1) [9 – 11].

На рисунке 5 показана схема магнитной цепи электромагнита электрического аппарата.



Рис. 2. Испытание пружины растяжения на одноосное растяжение

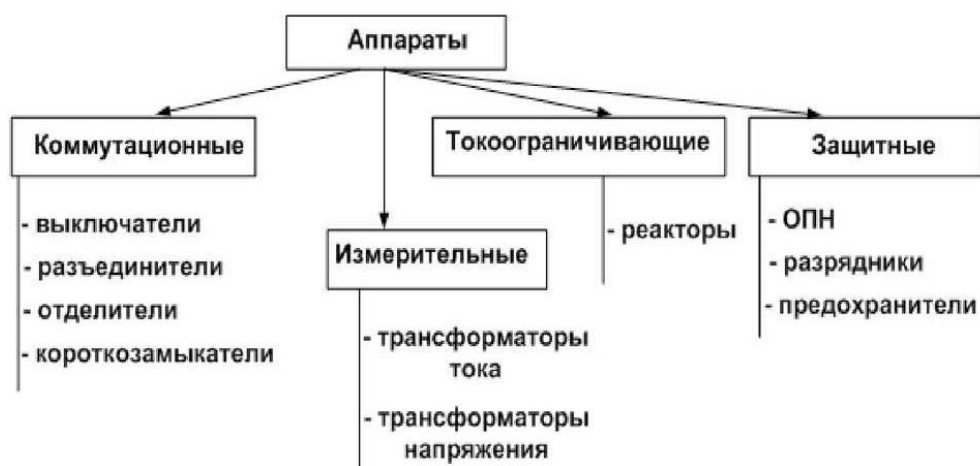


Рис. 3. Классификация электрических и электронных аппаратов

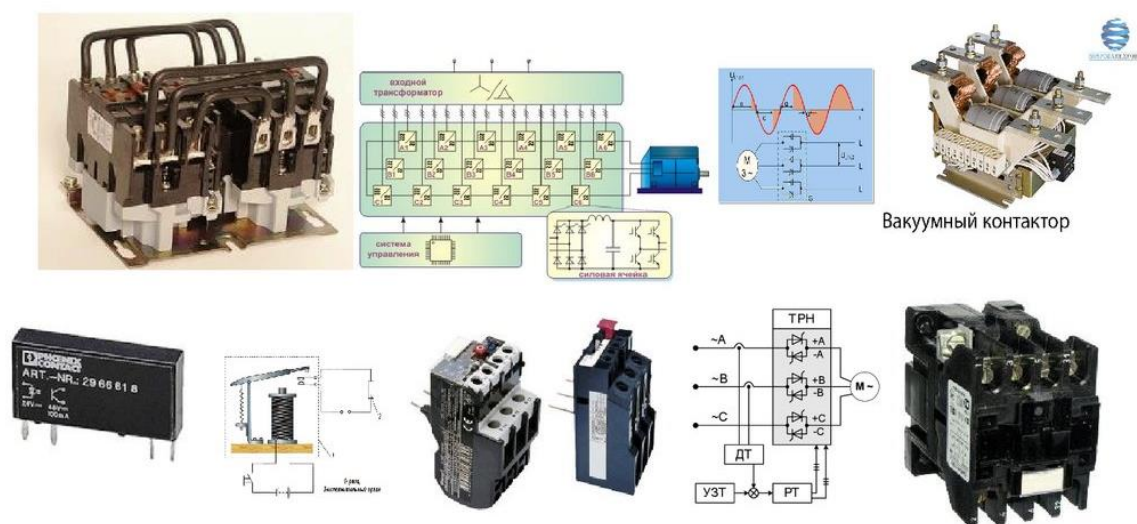


Рис. 4. Электрические аппараты

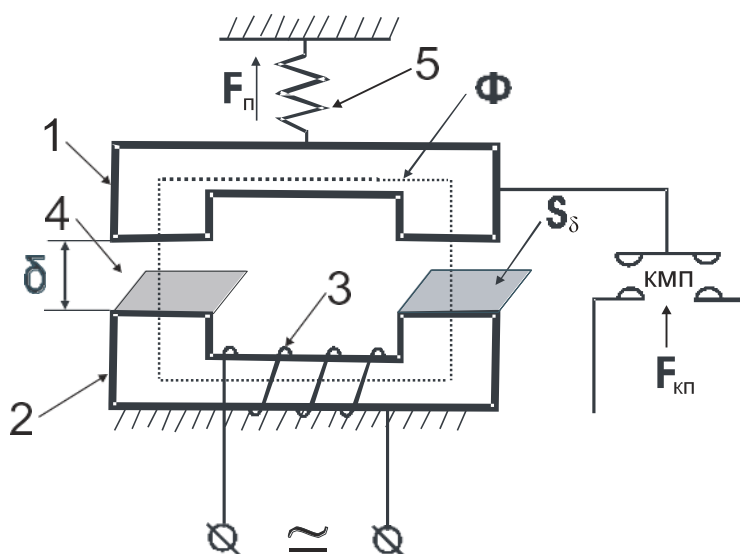


Рис. 5. Схема магнитной цепи электромагнита электрического аппарата

Для ЭА следует выделить магнитную цепь, через которую замыкается магнитный поток. Конструктивно следует учитывать сердечник электромагнита – неподвижную часть электропровода, на которой установлена обмотка и якорь электромагнита [11 – 15].

Соленоидные электромагниты показаны на рис. 7.

На рисунке показан процесс намагничивания в магнитной цепи электрического аппарата.

На рисунке 8 показан процесс намагничивания в магнитной цепи электрического аппарата.

Следует отметить, что в ряде случаев электрический аппарат должен сработать до 0,002 с.

Для работы электромеханические аппараты используют исполнительные механизмы в виде приводов, которые могут быть с ручным или автоматизированным устройством включения/выключения (рис. 9).

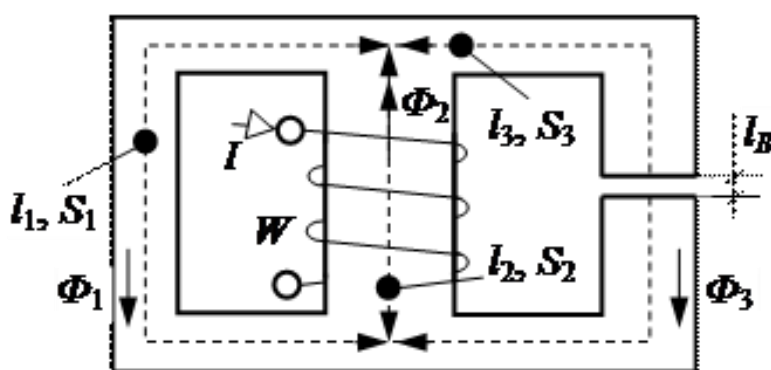


Рис. 6. Магнитная цепь

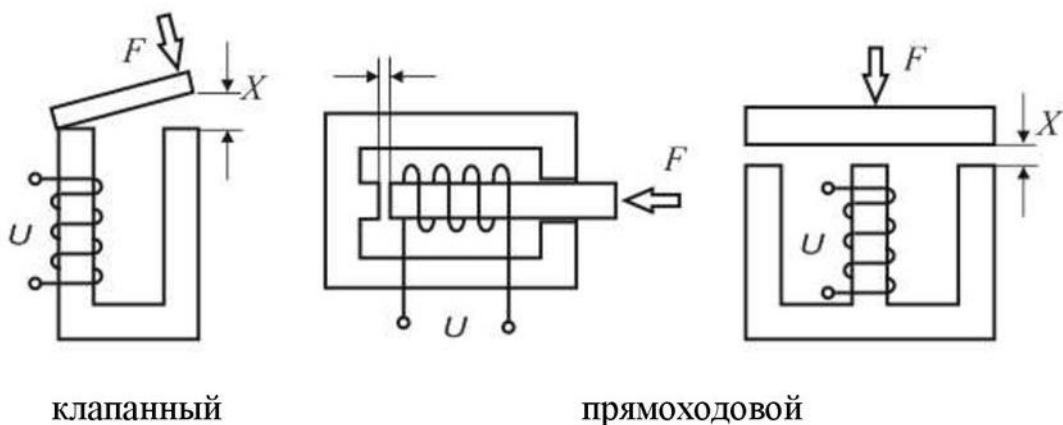


Рис. 7. Соленоидные электромагниты

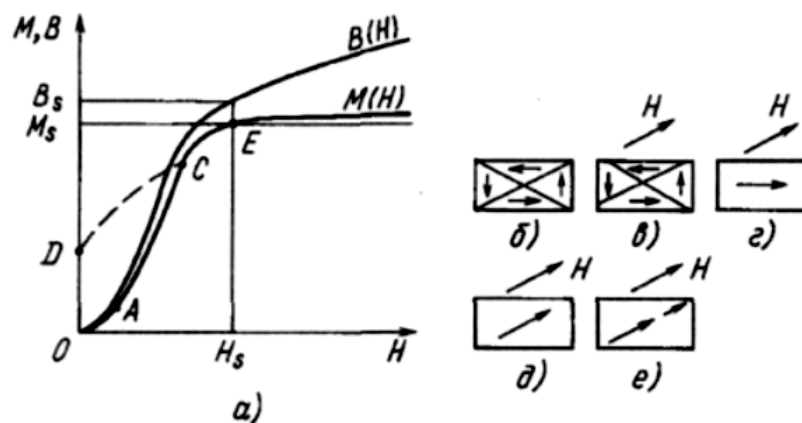


Рис. 8. Процесс намагничивания в магнитной цепи электрического аппарата

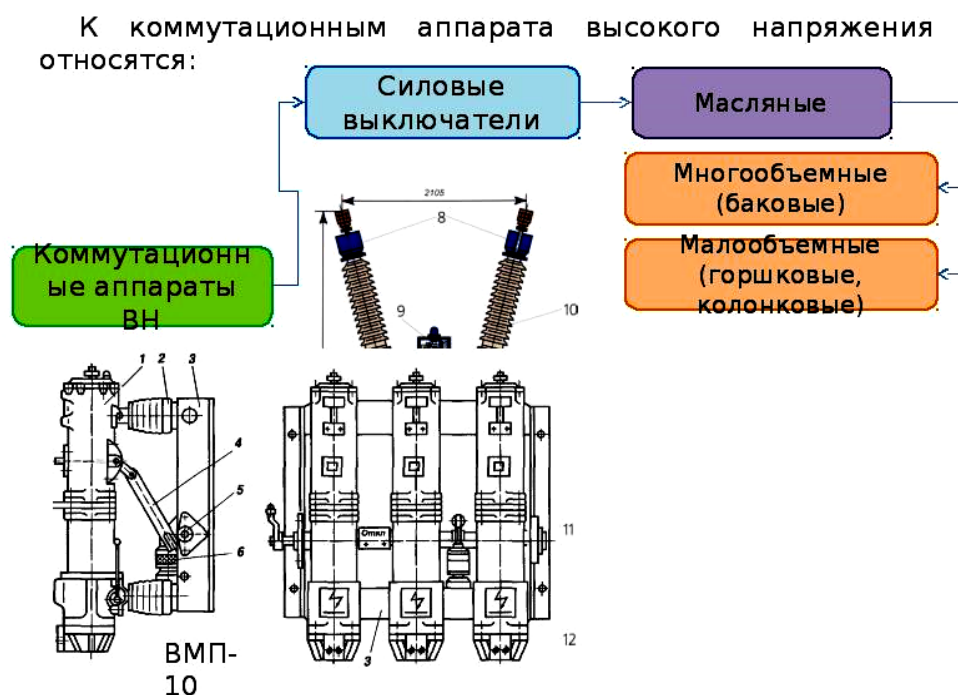


Рис. 9. Аппараты для коммутации

Аппаратура управления (электрические аппараты с функцией управления) показана на рис. 10.

Следует выделить недостатки электромеханических аппаратов, а именно искрообразование, образование дуги. *Электродинамические силы* максимально проявляют себя в случае короткого замыкания, при котором ток взаимодействует с магнитным полем токоведущих частей, относящихся к другим ЭА. *Электродинамические силы* способны деформировать проводники токоведущих частей и повредить диэлектрические элементы, которые обеспечивают крепление к каким-либо корпусным элементам.

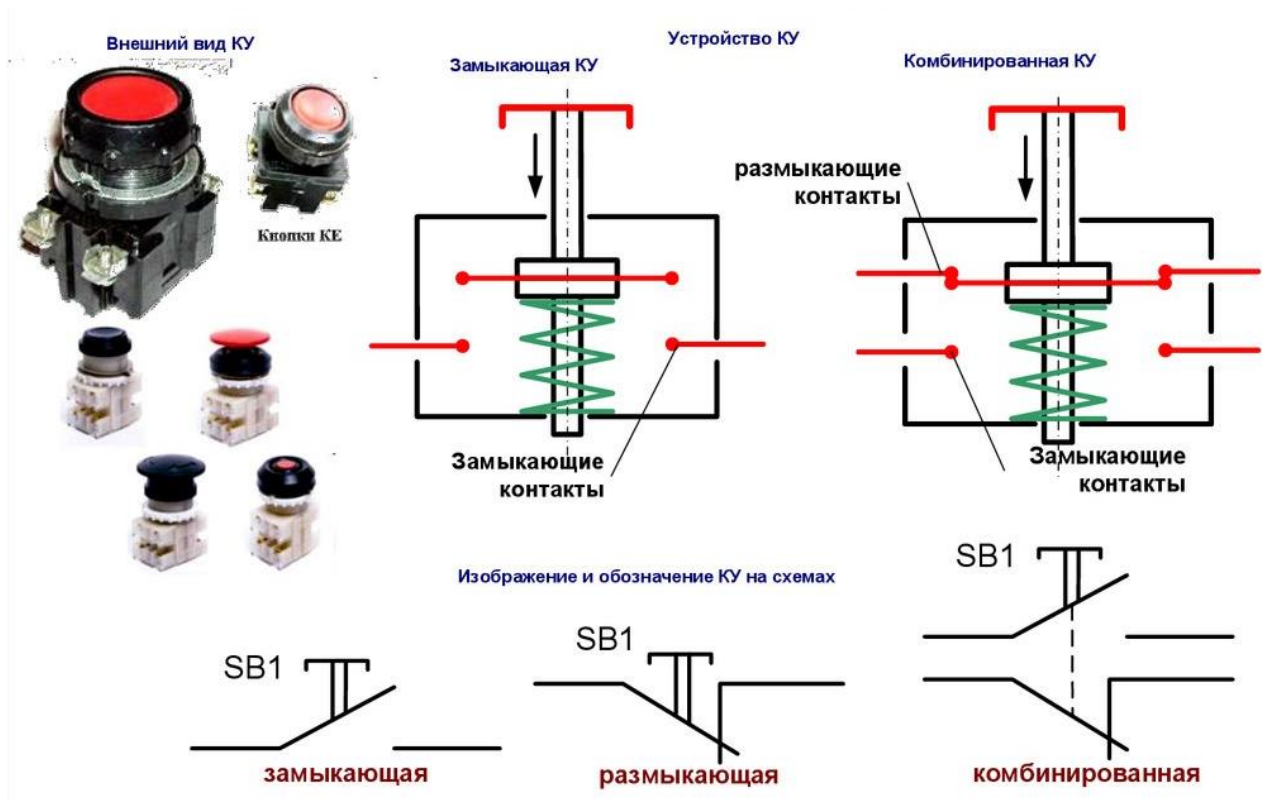


Рис. 10. Аппаратура управления

Технология сети постоянного тока, основанная на гибкой передаче постоянного тока, является одним из эффективных технических средств для сетевого соединения возобновляемых источников энергии, таких как энергия ветра и солнечная энергия. Она обладает характеристиками высокой гибкости и высокой надежности и является направлением развития будущей системы постоянного тока. Однако все еще есть некоторые проблемы, которые необходимо решить при применении технологии сети постоянного тока, связанные с разработкой и применением технологий электронных аппаратов.

Силовые электронные аппараты

Силовые электронные аппараты относятся к новому поколению электрических аппаратов и реализуются с применением различных типов силовых ключей. Можно выделить применение IGBT транзисторов для силовых ключей. Возможность глубокой реализации и принципиально новые функции позволяют на их основе разрабатывать активно-адаптивные электрические сети, которые могут быть совмещенными, переменного и постоянного тока (рис. 11).

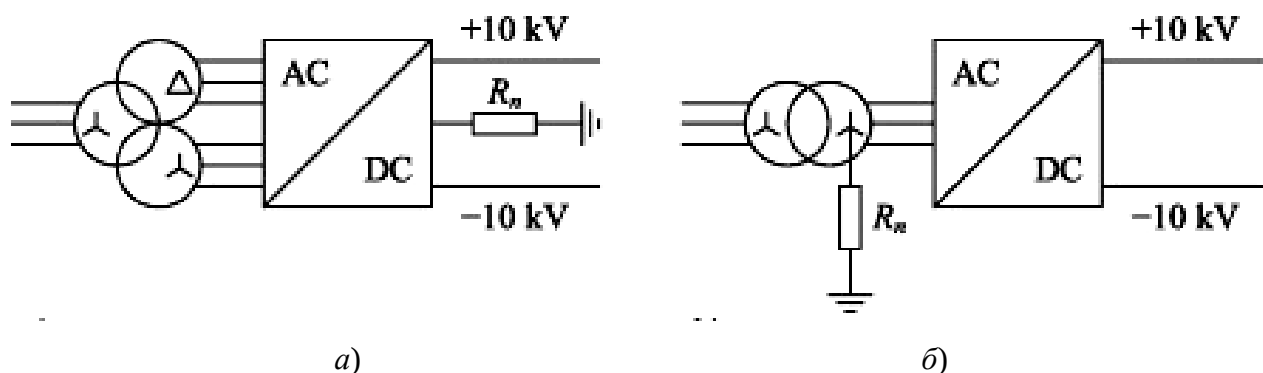


Рис. 11. Схемы совмещения переменного и постоянного тока

Для нахождения тока электродинамической стойкости используется выражение

$$K_{\text{дин}} = \frac{i_{\text{дин}}}{\sqrt{2I_{\text{н}}}}, \quad (1)$$

где $i_{\text{дин}}$ – ток короткого замыкания, А.

Физические процессы в контактах

Электрический контакт – подвижный элемент ЭА, который обеспечивает замыкание и размыкание (коммутацию тока) как в номинальном, так и аварийном режиме работы. По факту является основным элементом электрического аппарата, от которого в первую очередь зависит как надежность, так и срок службы.

Переходное сопротивление стягивания контакта $R_{\text{пер}}$ [16]

$$R_{\text{пер}} = \frac{\rho \sqrt{\pi \sigma}}{P_{\text{конт}}}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление материала, Ом/м; $P_{\text{конт}}$ – сила контактного нажатия, Па; σ – сопротивление на смятие материала контакта.

С ростом давления при нажатии переходное сопротивление $P_{\text{конт}}$ уменьшается. Стоит отметить, что кривые не повторяют друг друга, так как в каждом случае касание происходит в различных точках (рис. 12, а) [16].

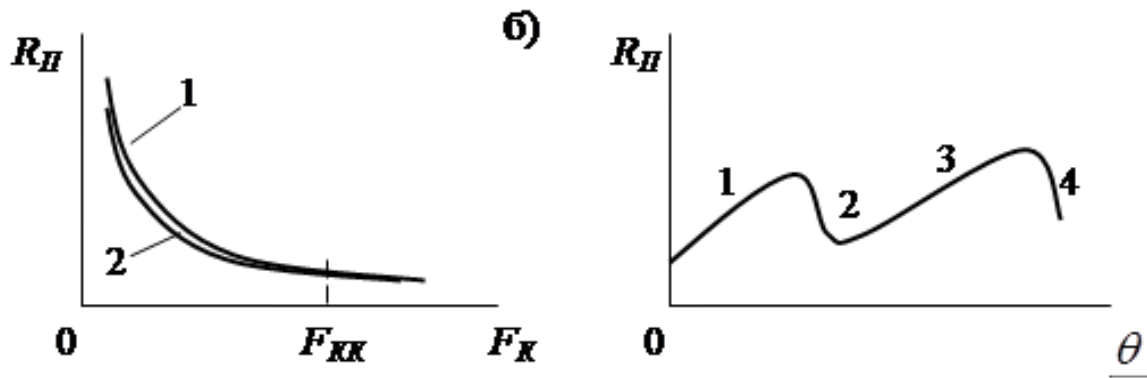


Рис. 12. Параметры переходного сопротивления контакта
от силы нажатия и температуры

Параметры переходного сопротивления контакта от силы нажатия и температуры показаны на рис. 12, а, б [16].

Полное сопротивление контактного соединения [16]

$$R_{\text{конт}} = R_{\text{мат}} + R_{\text{пер}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{мат}}$ – сопротивление собственного материала контактных элементов, Ом;

$R_{\text{пер}}$ – переходное сопротивление в местах их соприкосновения, Ом.

Напряжение смятия σ для материала

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (4)$$

где S – площадь поверхности контактов, м²; F – внешняя сила, Па.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ГАШЕНИЯ ИЛИ НЕДОПУЩЕНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Большой класс устройств относится к защитным типам электрических аппаратов. Защитное включение является их основной функцией для уменьшения и полного устранения негативного воздействия, связанного с токами короткого замыкания, которые формируют в цепи электрическую дугу.

Электрическая дуга возникает в процессе коммутации или каком-либо другом аварийном режиме. По своему электрофизическому воздействию на контактную группу может привести к максимально возможным повреждениям, что связано с процессом резкого нарастания температуры на металлических элементах контактов и, как следствие, к их догоранию или оплавлению. ВАХ электрической дуги на переменном токе показаны на рис. 13.

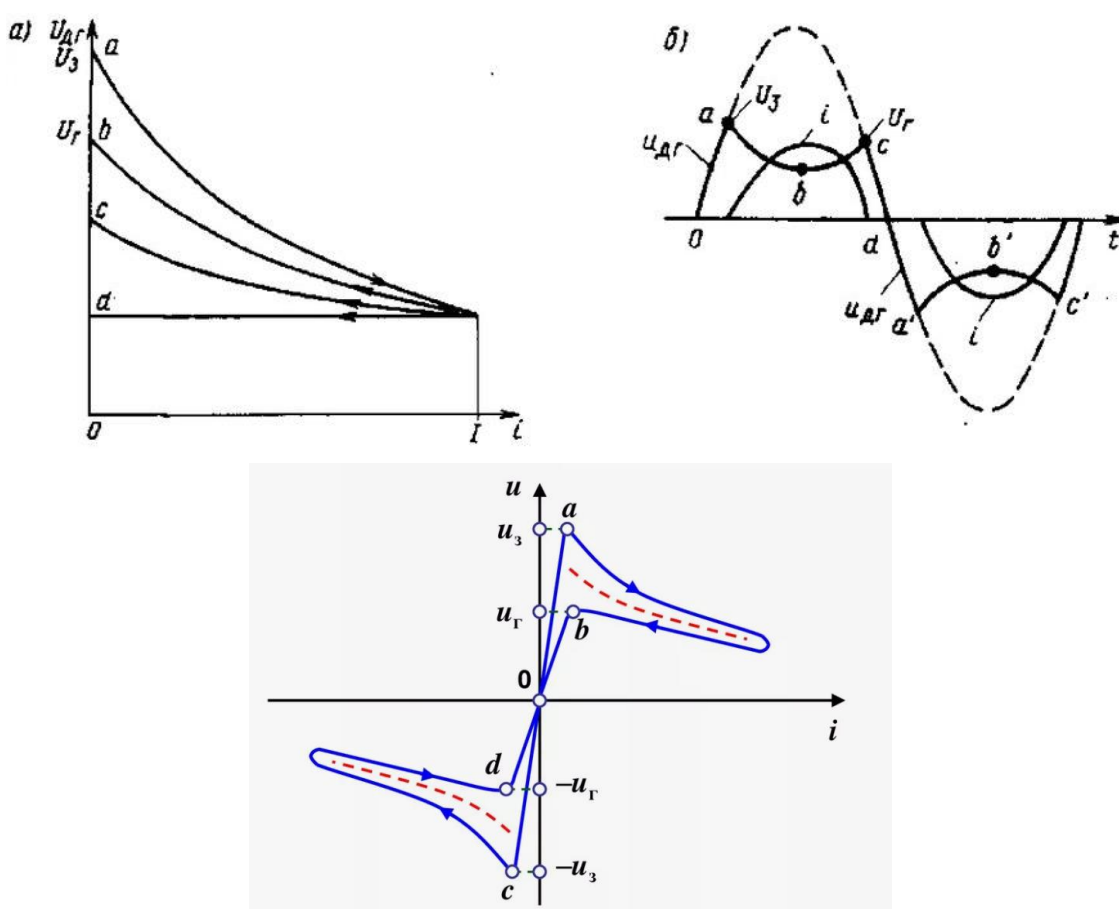


Рис. 13. ВАХ электрической дуги

Уравнение отключаемой сети

$$U = iR + U_{\text{д}} + L \frac{di}{dt}.$$

При устойчивом горении дуги, когда ток не изменяется, уравнение принимает вид

$$U = iR + U_{\text{д}}. \quad (5)$$

На рисунке 14 показано изменение тока и напряжения дуги при различных постоянных времени.

Согласно рис. 15, КВЛ используется для получения аналитического выражения

$$U = L \frac{di}{dt} + Ri + U_{\text{arc}}. \quad (6)$$

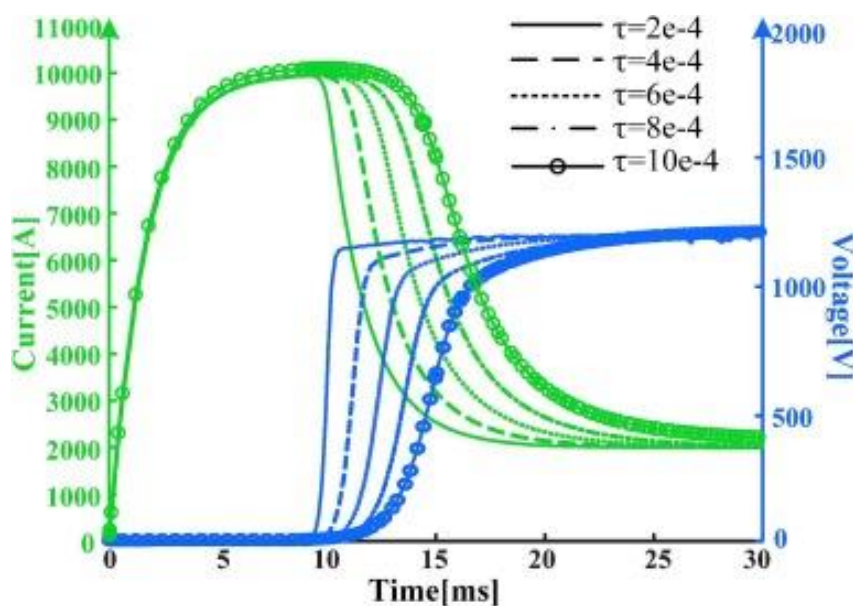


Рис. 14. Изменение тока и напряжения дуги при различных постоянных времени

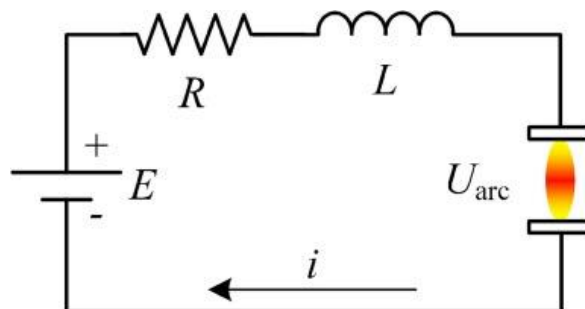


Рис. 15. Схема с параметрами возникновения электрической дуги

Согласно приведенному выше уравнению, можно получить принцип гашения дуги постоянного тока. В случае, когда вольт-амперная характеристика дуги поднимается, внешней цепи трудно поддерживать стабильное горение дуги, и дуга гаснет.

Приборы и оборудование, используемые в эксперименте, включают высоковольтный зонд (Tektronix, P6015A), катушку Роша (Pearson) и систему сбора данных (частота дискретизации 1 МГц, Dewetron).

На рисунке 16 показано экспериментальное устройство схемы испытания дуги и экспериментальные результаты формы волны испытания дуги.

В процессе горения дуги возможны следующие электрофизические процессы:

1. Термоэлектронная эмиссия.
2. Автоэлектронная эмиссия.
3. Ионизация толчком.
4. Термическая ионизация.

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.

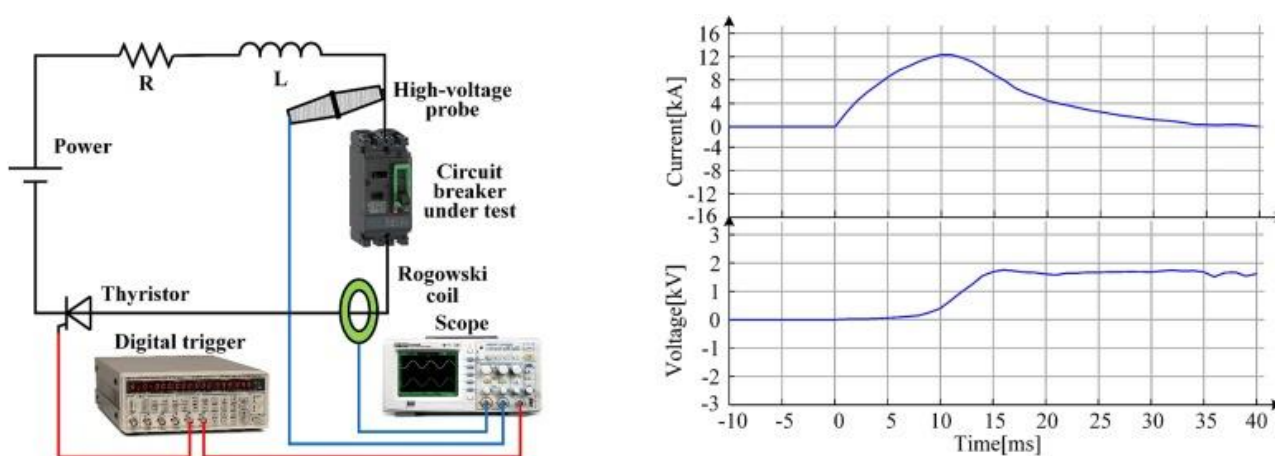


Рис. 16. Экспериментальное устройство схемы испытания дуги (а);
экспериментальные результаты формы волны испытания дуги (б)

Полупроводниковые аппараты применяют в своем конструктиве прогрессивные технологии, которые сочетают новейшие методы компьютерного моделирования, новые типы программного обеспечения и достижения в области микроэлектроники. Для таких устройств характерен ключевой режим, 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.

Электромагнитные и дугогасительные системы.

Электромагнитные системы

Обеспечивают включение элемента практической цепи по какой-либо команде, связанной с работой в дистанционном режиме диспетчеров или же с работой неких систем автоматического включения. Одним из вариантов является магнитный контактор, обеспечивающий включение различных типов электрических цепей в номинальном режиме работы, т.е. в том режиме работы, которому соответствует основное оборудование. В электрических сетях бывают контакторы различного типа. Одно- и двухполосные контакторы от трехполосных не различаются по типу применения. Контактные системы постоянного и переменного тока позволяют обеспечить коммутацию электрических цепей с большой частотой циклов, т.е. от тридцати до трех тысяч в час. В этом случае к контакторам предъявляются повышенные требования по механической и электрической износостойкости контактов. Контактная система контакторов включает в себя подвижный и неподвижный контакты, а также блок-контакт, который монтируется на контактор и обеспечивает сигнализацию при управлении его работой. Если сравнивать контактор и выключатель, то контактор предназначен для работы во включенном состоянии, и он не предназначен для работы в аварийных режимах, связанных с отключением только короткого замыкания. Управление контакторами осуществляется в соответствии с режимом работы.

На катушки контактора может быть подано напряжение 24, 40, 110, 220 и 380 В. Для обеспечения безопасности падение напряжения на катушке контактора и значение тока управления должны быть ниже рабочих значений. Только в сетях, которые не содержат элементов, обеспечивающих контактную группу во взведенном положении при отсутствии управляющего напряжения на катушке, происходит размыкание элементов. Контактная группа контактора для удержания контактов в рабочем режиме использует схему самоподхвата, применяя нормально открытый контакт. Максимальное значение тока, при котором может сработать контакт, достигает 1600 А.

Распространение получило электромагнитное гашение в камерах с узкими щелями, а также в комбинированных камерах – с узкими зигзагообразными и другими щелями в сочетании с пламегасительными решетками, где также исключается выброс дуги и ее пламени за пределы камеры.

Особо следует отметить применение для контакторов переменного тока бездуговой коммутации, что во много раз повышает износостойкость контактов.

На рисунке 17 показано возникновение электрической дуги.



Рис. 17. Электрическая дуга на электрической подстанции

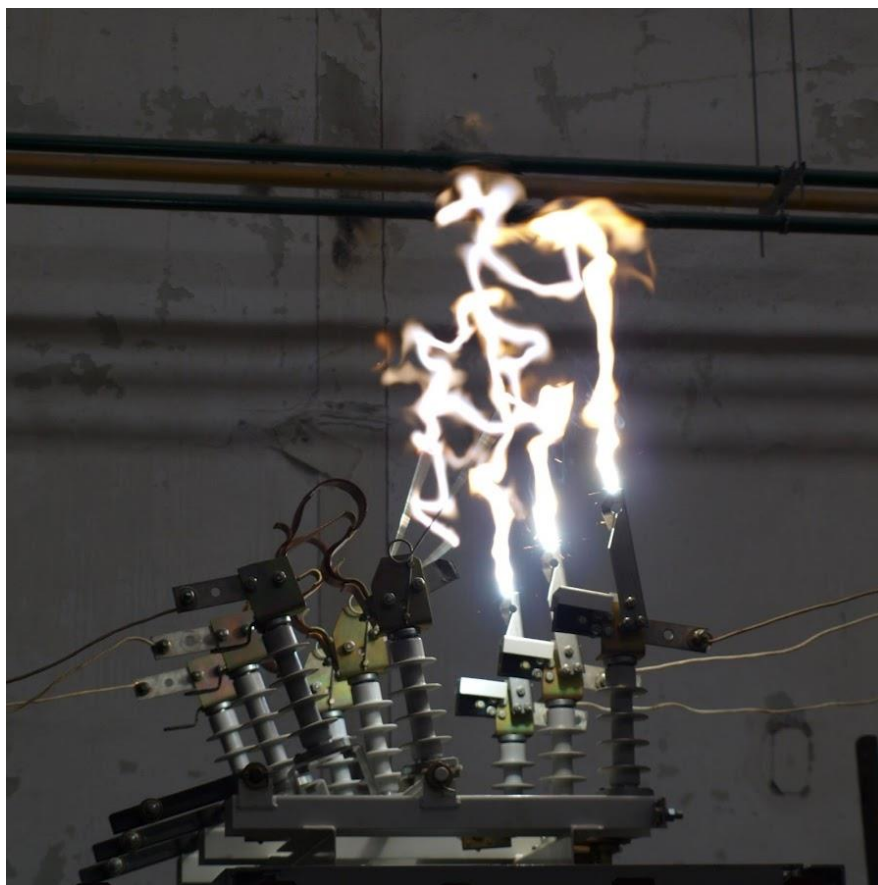


Рис. 18. Электрическая дуга при размыкании контактов

Масляные выключатели

На рисунке 19 показаны различные конструкции дуговых камер и их профили.

- 1) автодутьем, используется энергия дуги;
- 2) принудительным (импульсным) масляным дутьем;
- 3) магнитным гашением дуги в масле.

На рисунке 20 показано гашение дуги в масляном выключателе.

Эльгаз – SF_6 , характеризуется дугогасительными характеристиками, что позволяет оптимизировать массогабаритные параметры электрических аппаратов, а также выполнить трансформаторы и другие типы электротехнического оборудования в герметичном исполнении.

Следует отметить что эльгаз является ядовитым и при использовании оборудования, заполненного эльгазом, требуется соблюдение особых мер безопасности.

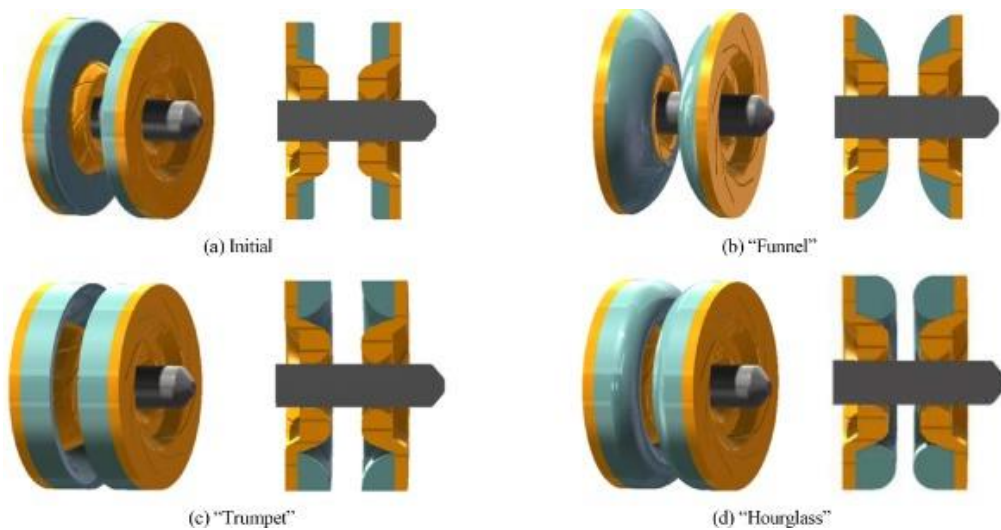
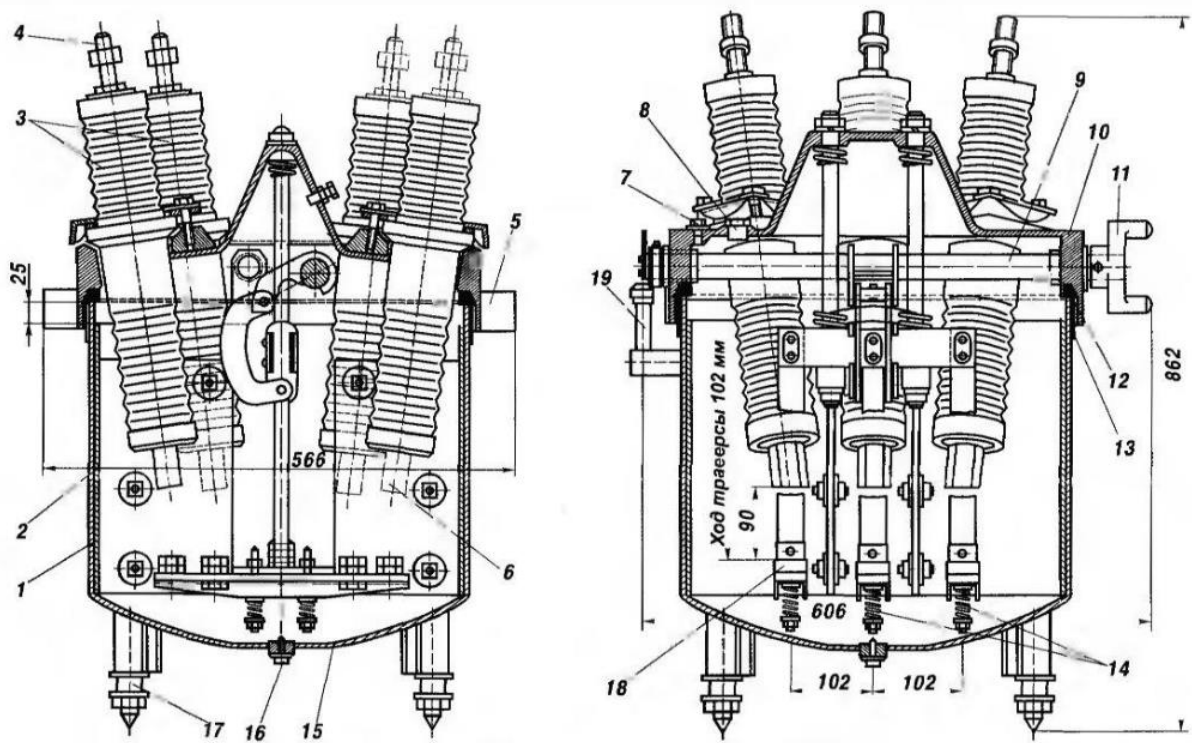


Рис. 19. Различные конструкции дуговых камер и их профили

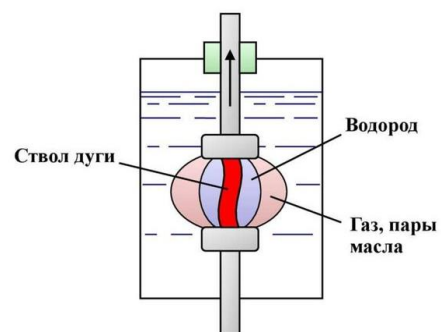
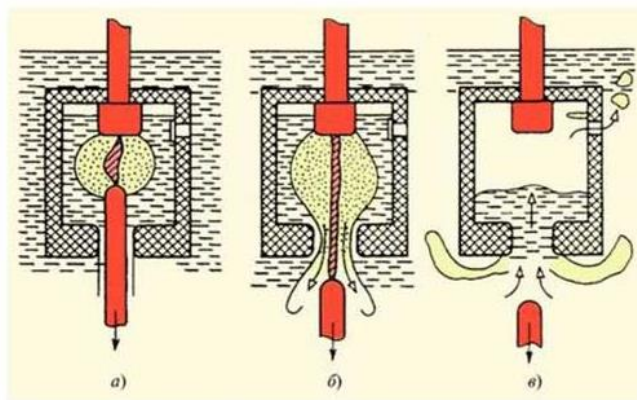


Рис. 20. Гашение дуги в масляном выключателе

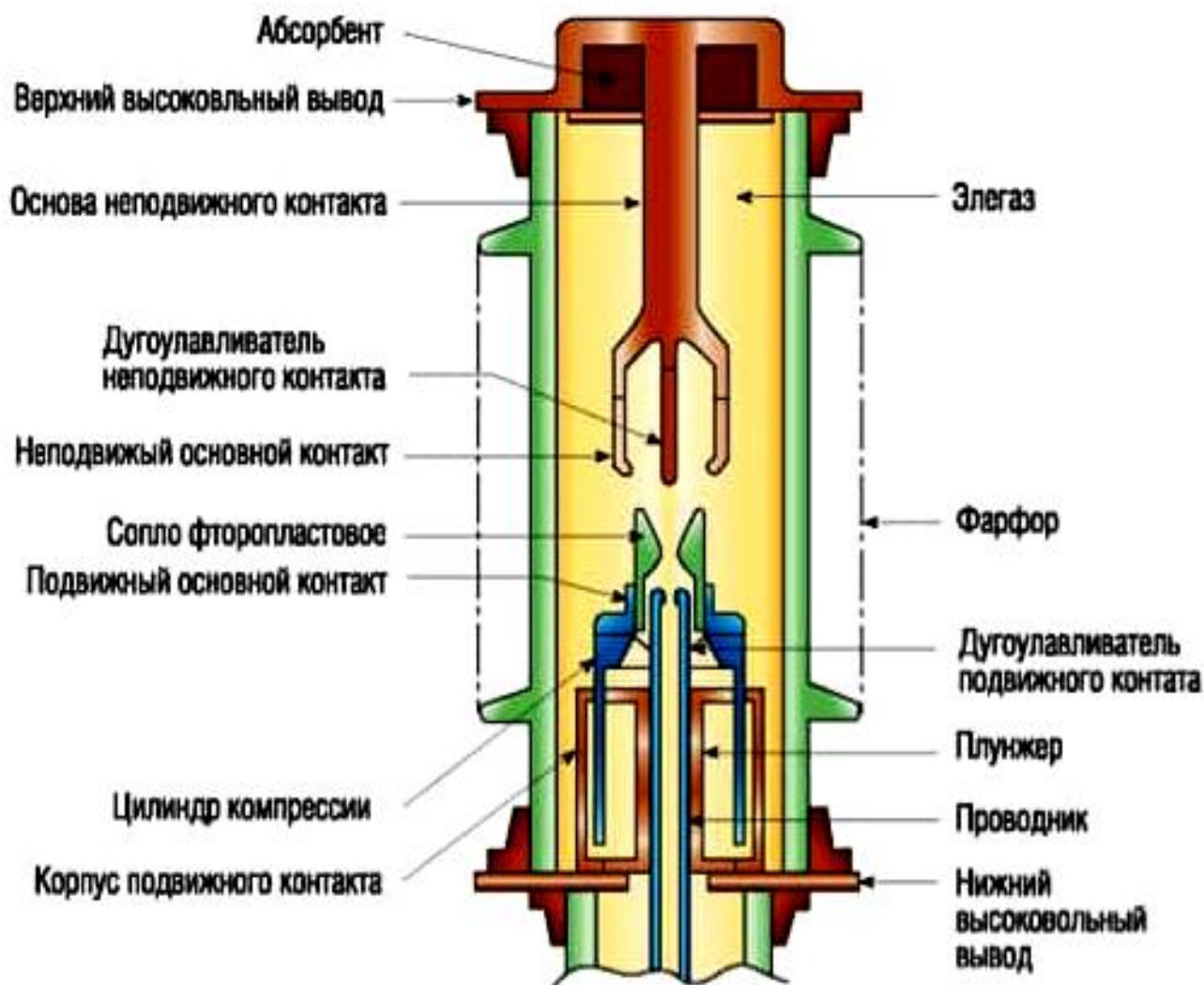


Рис. 21. Система дугогашения в элегазовом выключателе

Вакуумные выключатели

Вакуумные выключатели (ВВ) широко используются в распределительной промышленности. За последние десятилетия ведущие компании провели обширные исследования и разработки для оптимизации механических механизмов и понимания кинематики и динамики поведения ВВ. Механический срок службы этих устройств имеет решающее значение для безопасности и надежности. Современные вакуумные выключатели могут работать при высоком значении в вакууме (разряжения) $1,33 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-6}$ Па на напряжения свыше 6...35 кВ. На рисунках 22, 23 показано, каким образом формируется электрическая дуга в вакуумном выключателе.

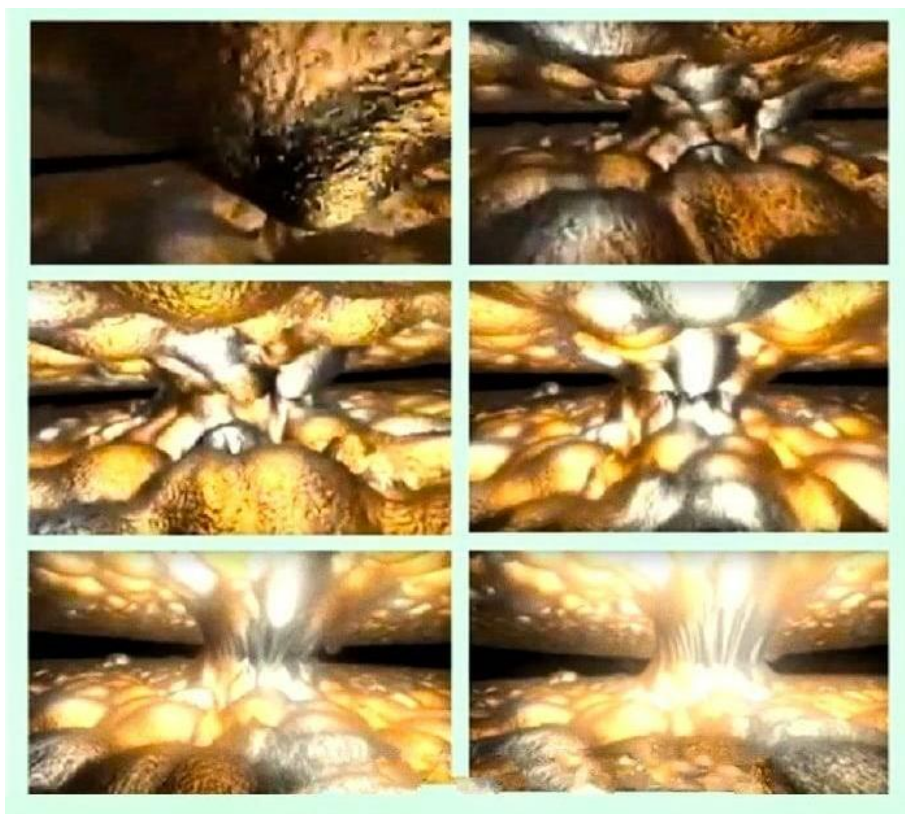


Рис. 22. Электрическая дуга в вакуумном выключателе, фаза 1



Рис. 23. Электрическая дуга в вакуумном выключателе, фаза 2

3. АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Проектирование вакуумного выключателя основано на использовании функциональной декомпозиции высоковольтного выключателя.

Представлена концепция функционального агрегационного блока как расширение аксиоматической теории проектирования. Этот агрегационный блок извлекает существенные характеристики функции и производительности отдельно от их конкретных структур, избегая ограничений структуры пружинного рабочего механизма, вызванных зависимостью от обычной структуры. Этот метод проектирования функционального агрегирования представлен для проектирования передаточного устройства. Эти результаты имеют большое теоретическое значение для руководства инновациями продукта на основе функционального агрегирования в аксиоматической теории проектирования.

Наиболее важный компонент механизма ВВ спроектирован путем оценки напряжения в кулачке с использованием теоретических и численных методов. Кроме того, расчеты подтверждаются исследованием деформированного кулачка в ВВ после 2500 циклов. Методика исследования элементов вакуумного выключателя показана на рис. 24.

Стадия обработки изображения кулачка в ВВ была проведена после 2500 циклов и сравнена с другими методами. Результаты показывают, что кулачок демонстрировал переменные значения напряжения в различных локальных местах на конце своего профиля. Однако в целом напряжение по Мизесу увеличивалось по мере изменения положения кулачка от 0 до 240°.

VCB являются незаменимыми компонентами распределительных систем, критически важными для надежного распределения и защиты электроэнергии. Проектирование и анализ компонентов VCB требуют тщательного учета динамических и кинематических факторов для обеспечения быстрой и точной работы.

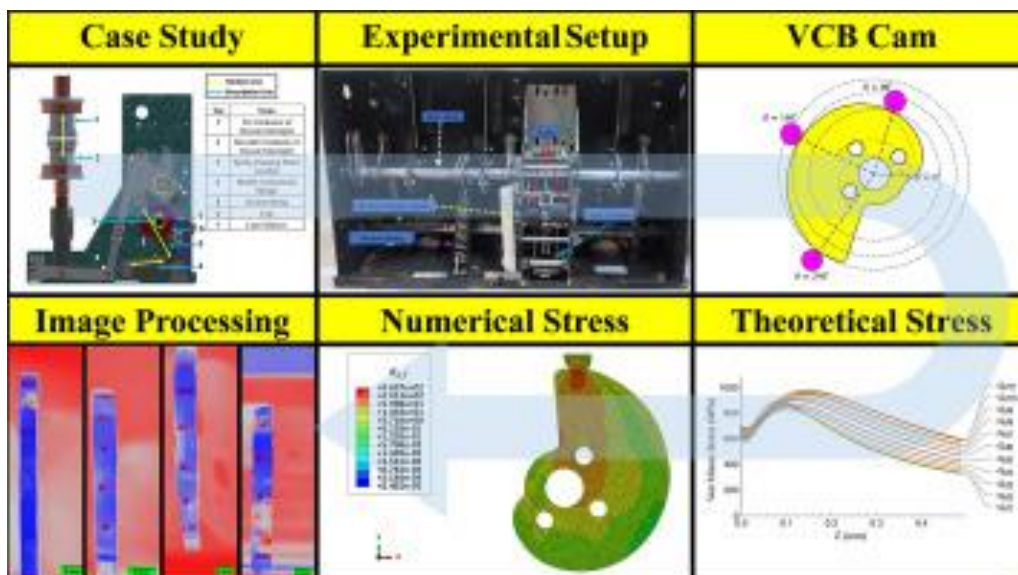


Рис. 24. Технологические подходы, связанные с вакуумным выключателем

Механизм кулачка и толкателя является критически важным компонентом VCB, существенно влияющим на общую производительность выключателя. Используя алгоритм оптимизации, они оптимизировали профиль кулачка, коэффициенты закрытия пружины и конструкцию четырехзвенной связи. Этот комплексный подход не только улучшил производительность механизма, но и значительно снизил максимальные напряжения Герца и сдвига на поверхности кулачка. Разработав многополевую модель, объединяющую механические, электрические и магнитные процессы, возможен анализ динамических механизмов блокировки кулачка, гарантируя, что подвижный проводник остается заблокированным при токах 15 кА и более. Оптимизированная конструкция кулачка значительно повышает надежность автоматических выключателей, предотвращая отскок проводника, что подтверждено моделированием и экспериментами.

Одним из основных требований к оптимизации кулачков является анализ напряжений, который проводился в других отраслях промышленности для решения их специфических задач. Эти задачи включают экспериментальное моделирование, аналитическое моделирование и численное моделирование. Однако в кулачках вакуумного выключателя, которые являются важнейшими компонентами VCB, был отмечен недостаток этих аспектов.

Оценка напряжения кулачка VCB проводится с учетом изменений силы пружины на основе модели SolidWorks. Деформация кулачка в изготовленной модели VCB после 2500 циклов оценивается на основе методов обработки изображений. Наблюдаемая деформация сравнивалась с теоретическими и численными прогнозами напряжения для проверки моделирования напряжения. Эти идеи способствуют выявлению необходимых будущих оптимизаций в производстве VCB.

Кулачок VCB заряжает две пружины двойного сжатия на каждом шаге. На рисунке 25 показан механизм примера VCB, где вращение кулачка задействует храповой механизм. Этот механизм предлагает два варианта работы: ручная ручка или привод от двигателя. Деформация кулачка VCB приводит к тому, что механизм не может заряжать пружины. Кроме того, на рис. 25 не показаны два кулачка, используемые в механизме.

На рисунке 25 показано визуальное представление действия кулачка в текущем примере VCB.

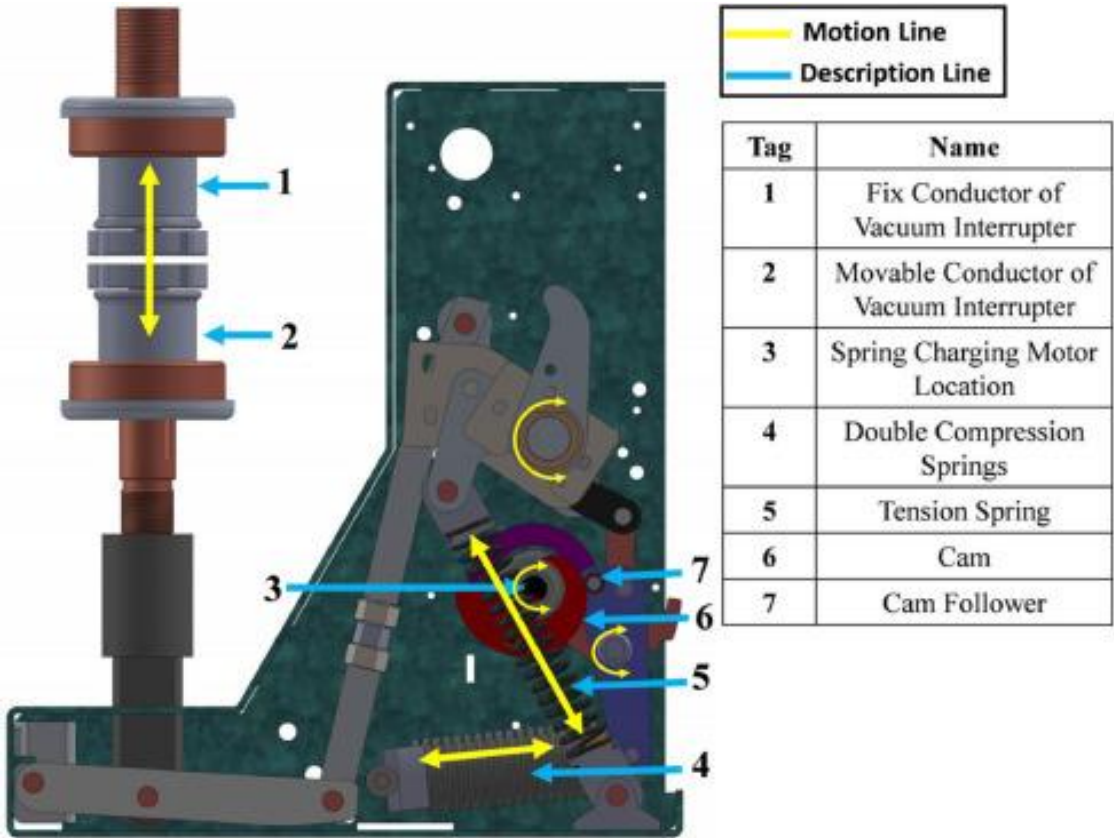


Рис. 25. Визуальное представление действия кулачка в текущем примере VCB

Теоретическое моделирование

Рисунок 26 показывает контактную задачу между двумя цилиндрическими частями.

Для расчета напряжения в кулачке VCB под каждым углом предполагалась окружность с центром вращения кулачка. Эти окружности касательны к толкателю кулачка. После этих предположений для каждого градуса использовалась формула напряжения для двух цилиндров. Рисунок 27 иллюстрирует эти концепции при 80, 160 и 240° кулачка.

На рисунке 28 представлена схема внешних сил, действующих на VCB.

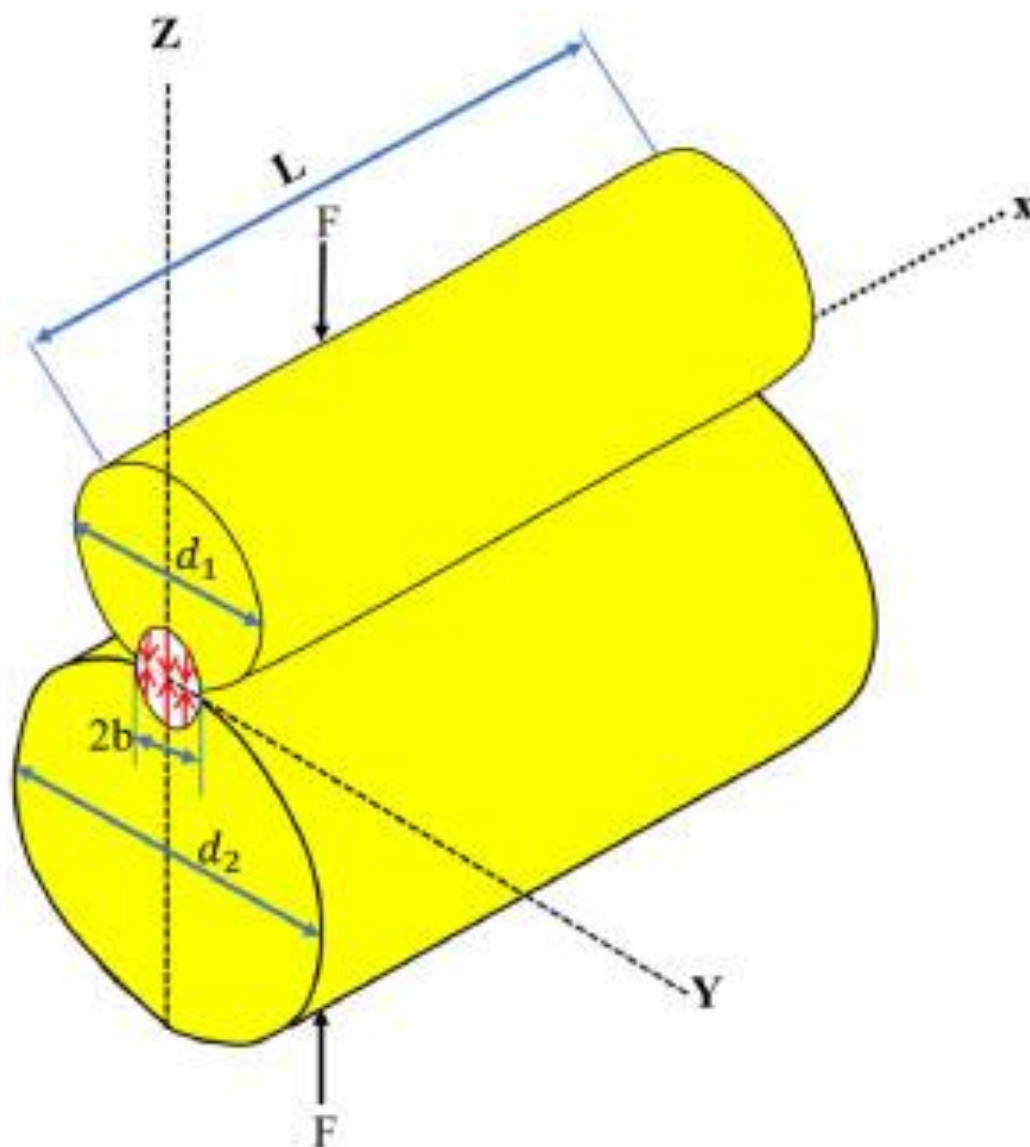


Рис. 26. Две цилиндрические детали,
соединенные равномерно распределенной силой F

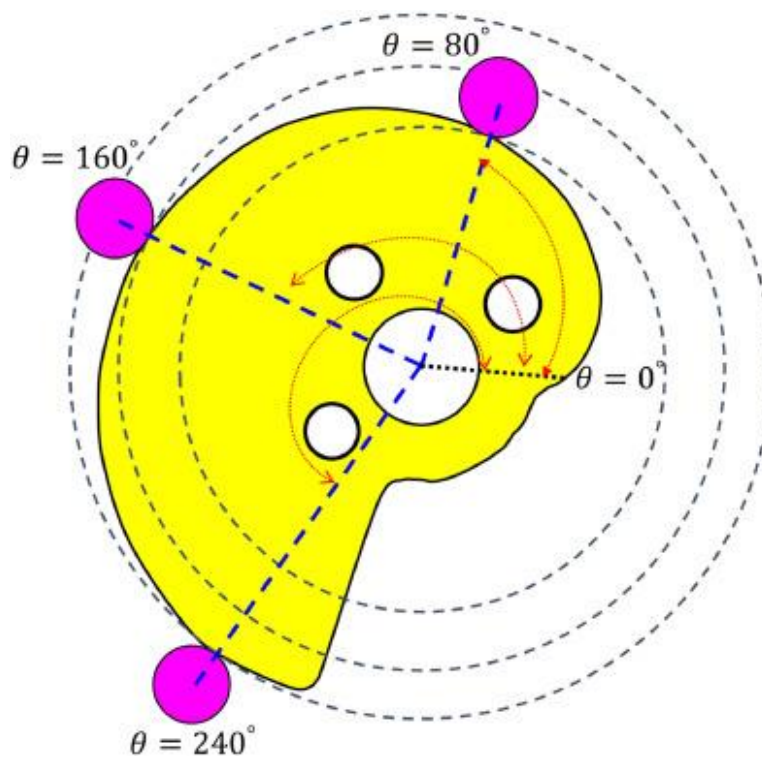


Рис. 27. Концепция использования контактного напряжения для двух цилиндрических деталей в кулачке VCB

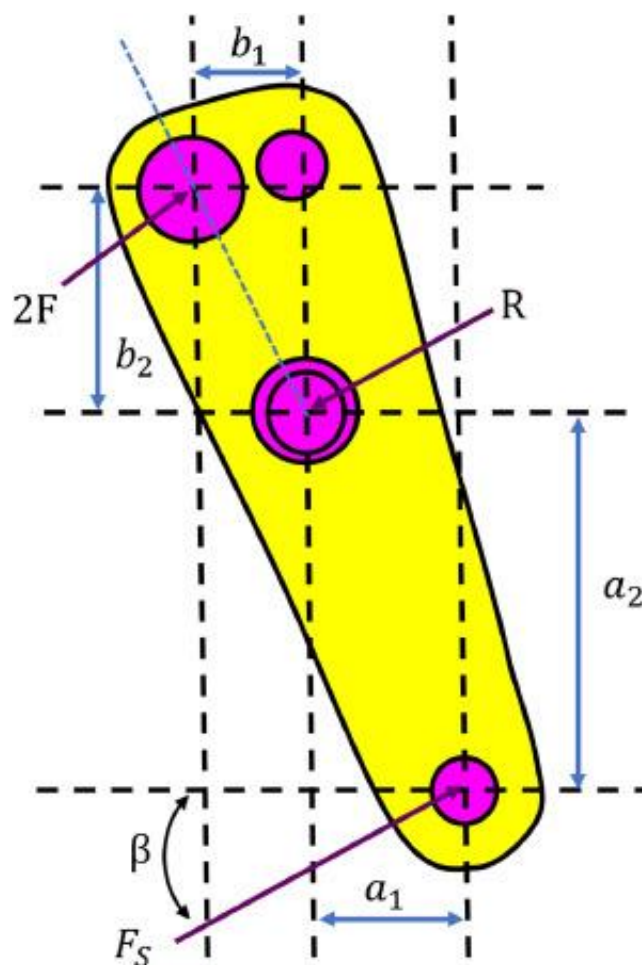


Рис. 28. Диаграмма внешних сил кулачкового толкателя в VCB

Экспериментальное моделирование

Для достижения механического напряжения на кулачок VCB был изготовлен без включения демпфера или прерывателя. Металлический отсек VCB был изготовлен путем листовой формовки деталей, вырезанных волоконным лазером, которые были согнуты с помощью листогибочного пресса. Сталь ST-37 использовалась для изготовления металлических компонентов механизма, в то время как полимерные детали были напечатаны на 3D-принтере с использованием полиэтилентерефталатгликоля (PETG). После изготовления детали были собраны, сварены и скреплены болтами. На рисунке 29 показаны несколько компонентов VCB до сборки. Для измерения жесткости пружин использовалась одноосная испытательная машина, показанная на рис. 30.

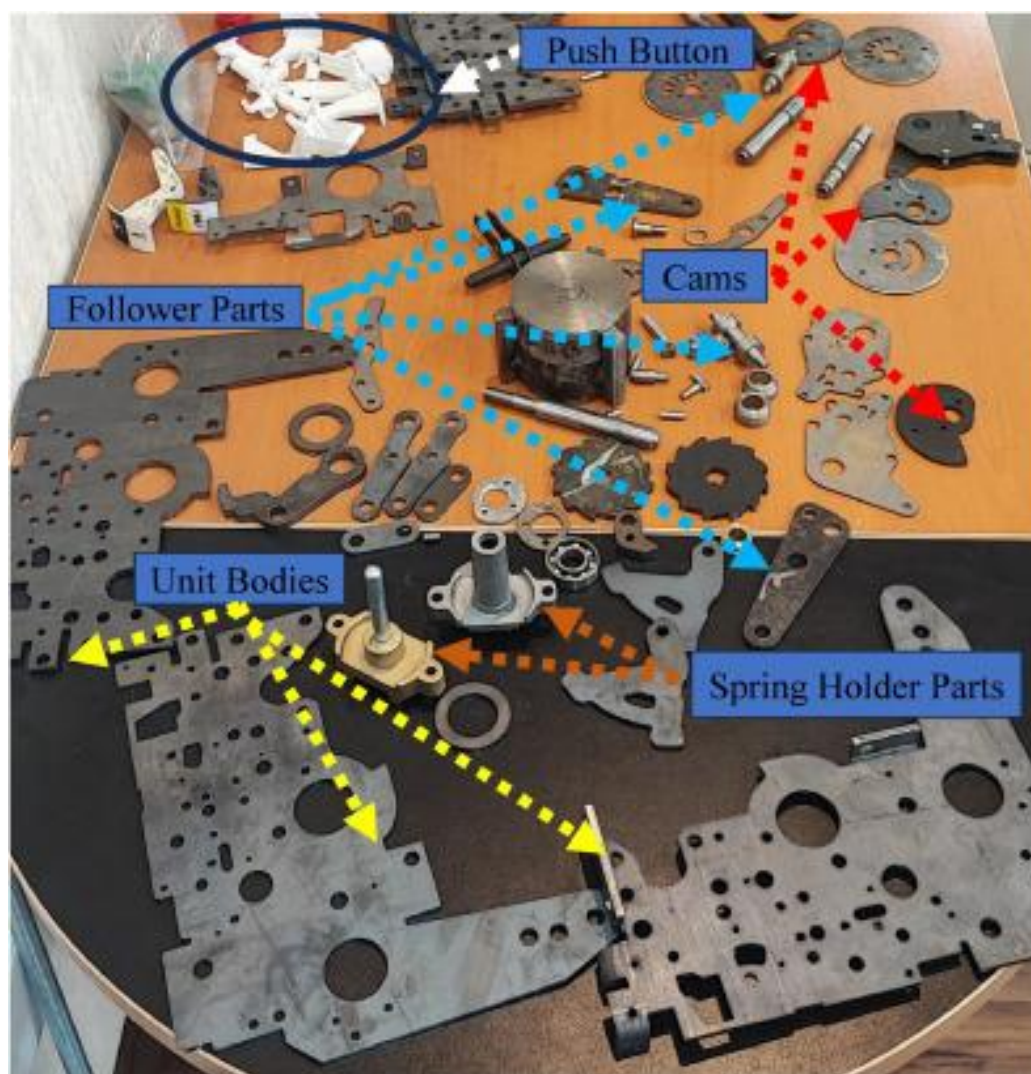


Рис. 29. Некоторые компоненты примера VCB перед сборкой вакуумного выключателя

Механизм зарядки, как показано на рис. 30, включает в себя два кулачка и один толкатель, которые взаимодействуют с пружинами сжатия. Пружины в этом механизме заряжались вручную с помощью руки и зарядки с помощью двигателя; в этом случае зарядка выполнялась вручную через шесть месяцев. Рисунок 30 дает визуальное представление исследования случая и экспериментальной установки в этом исследовании.

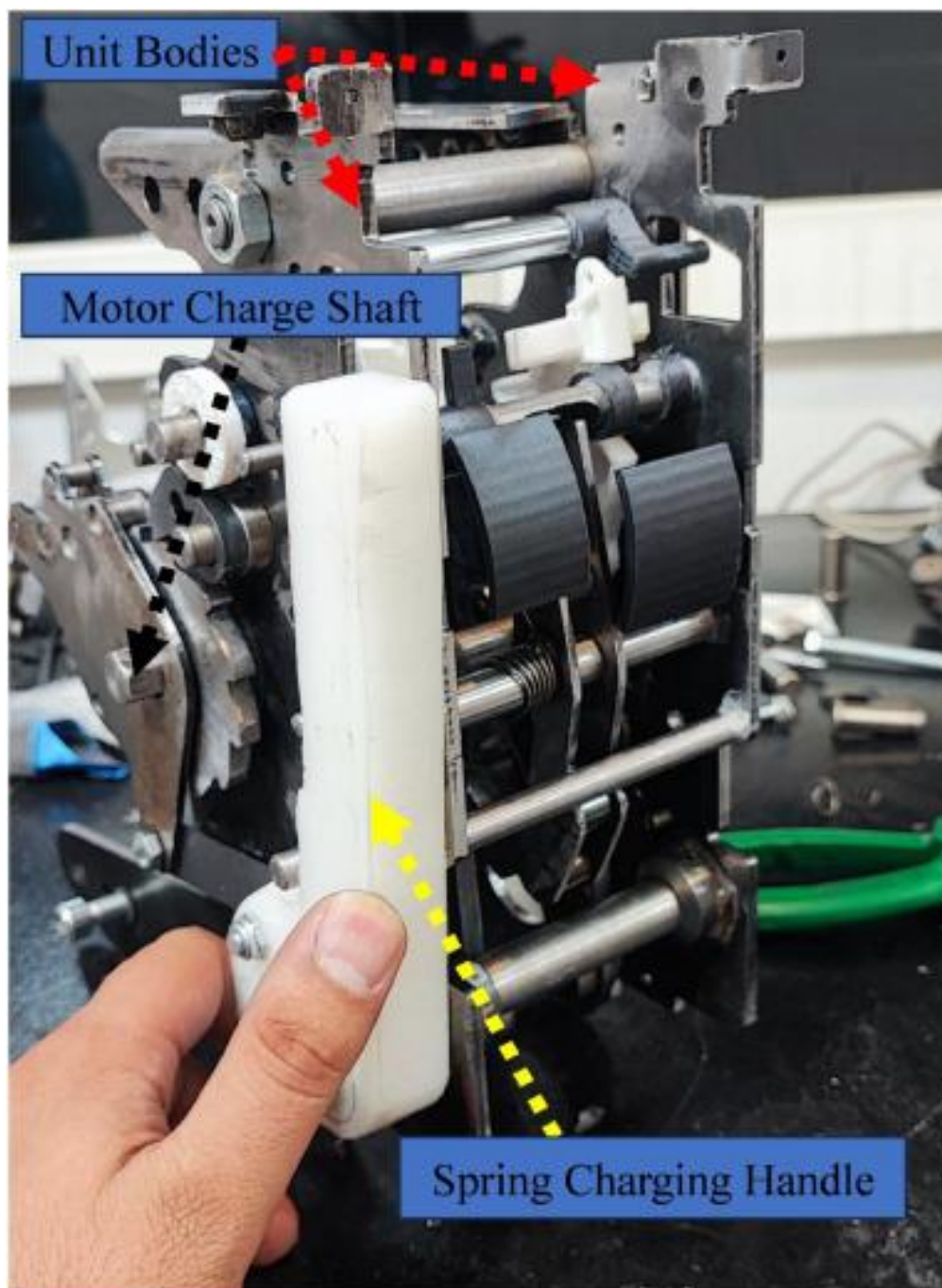


Рис. 30. Механизм зарядки пружин сжатия с кулачками и толкателем, расположенными внутри этого механизма

Напряжение фон Мизеса на кулачке и его следящем элементе показано для углов 0, 120 и 240° на рис. 31. Рисунок иллюстрирует график сходимости сетки для угла 120°, чтобы показать независимость размера элемента от результатов. Распределение напряжения в кулачках показывает, что напряжение не является максимальным в профиле кулачка, что очень распространено при моделировании напряжения в кулачках. Однако сравнение значений напряжения из этой работы с другими не совсем корректно, но демонстрирует чередующиеся значения напряжения для каждой проблемы.

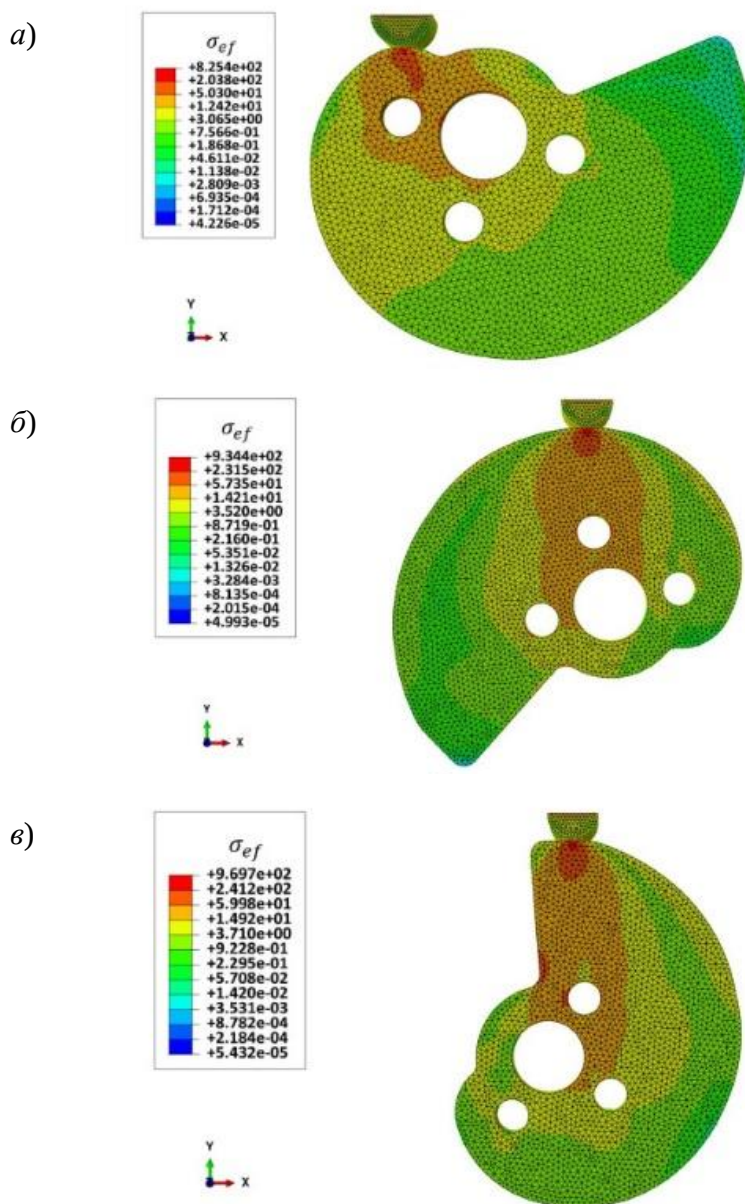
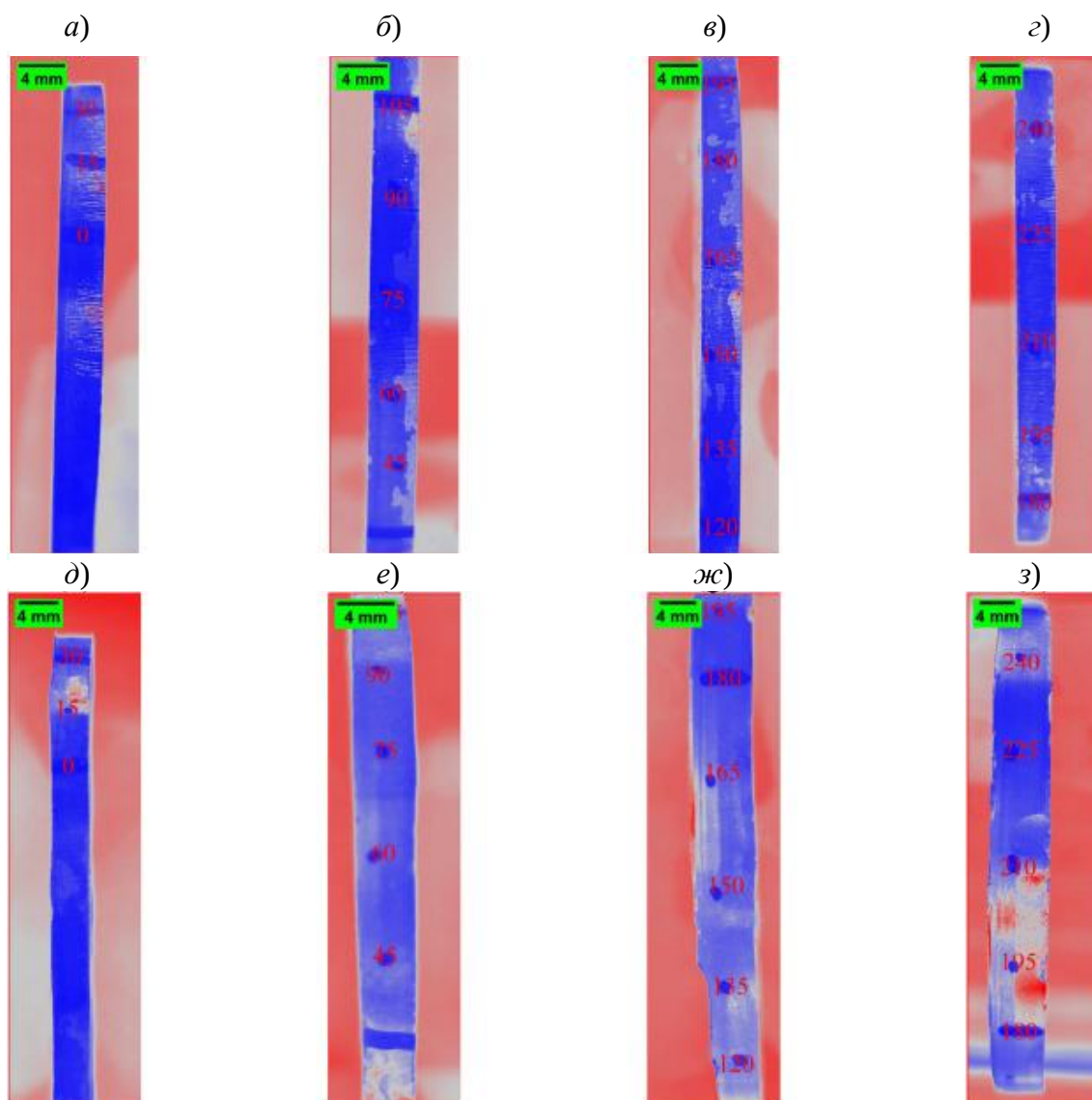


Рис. 31. Напряжение по Мизесу для кулачка под разными углами:

а – 0° ; б – 120° ; в – 240°



**Рис. 32. Обработка изображений на внешней поверхности кулачка
(контакт с его толкателем) для различных сечений кулачка:**

a – z – недеформированный кулачок под разными углами;

д – з деформированный кулачок под разными углами после 2500 циклов

На рисунке 32 показана обработка изображений на внешней поверхности кулачка.

Расхождение между теоретическим и численным методами при углах менее 50° возникает из-за того, что теоретический метод основан на напряжении Герца для цилиндрических контактов. Эта формулировка предполагает, что силы между двумя цилиндрами действуют перпендикулярно осевой линии каждого цилиндра. Однако, как показано на рис. 33, при углах менее 50° сила между кулачком и его толкателем не перпендикулярна, что снижает точность теорети-

ческого метода в этом диапазоне. Несмотря на это, относительная погрешность между численным и теоретическим методами при 0° является самой высокой и достигает 7%, что указывает на то, что оба метода остаются достаточно точными и применимыми в инженерных контекстах.

На рисунке 33 показана толщина внешней поверхности деформированного кулачка для разных углов, извлеченных из программного обеспечения ImageJ. Увеличение толщины внешнего слоя кулачка соответствует как теоретическим, так и численным методам. Более того, деформация при 45° является самой низкой, а при 210° – самой высокой, что указывает на самые низкие и самые высокие значения напряжения в этих положениях кулачка соответственно. Кроме того, изменение деформации является нелинейным, немного отличаюсь от изменений напряжения, наблюдаемых при статическом анализе.

Основная причина этого различия заключается в том, что после возникновения пластического напряжения материал кулачка подвергается значительному упрочнению деформации и локализации деформации.

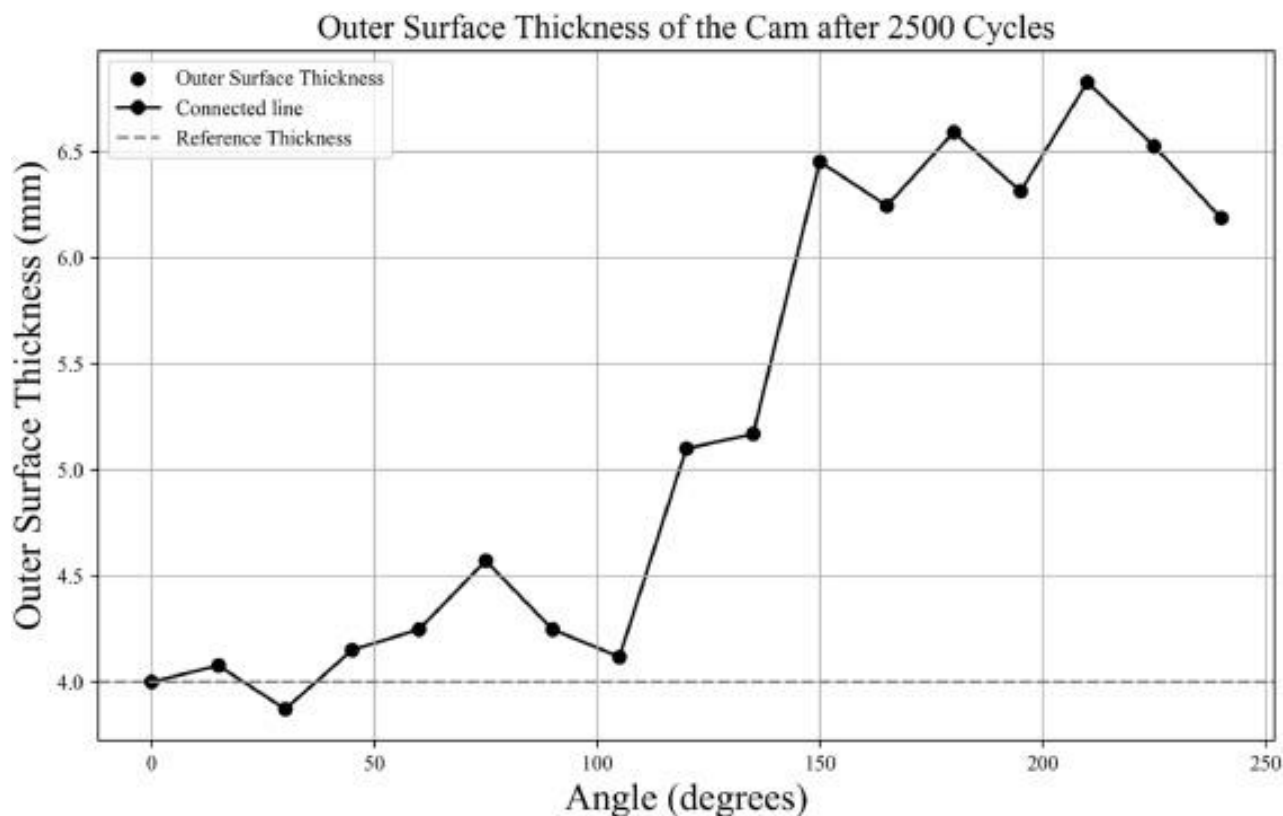


Рис. 33. Обработка изображения деформированной внешней поверхности кулачка VCB для разных углов (исходная толщина 4 мм)

В статическом анализе уровни напряжения обычно ниже и более равномерно распределены по поверхности кулачка. Однако во время циклической нагрузки, особенно при высоких концентрациях напряжения, таких как те, которые наблюдаются при 210° , локализованная пластическая деформация инициируется и распространяется, что приводит к выраженным геометрическим изменениям и увеличению толщины поверхности.

Кроме того, чувствительность деформации к силе увеличивается из-за эффектов смягчения деформации вблизи поверхности кулачка. Это явление возникает, когда материал вблизи поверхности претерпевает изменения микроструктуры, вызванные деформацией, такие как перестройка дислокаций и скольжение границ зерен, которые облегчают крупномасштабное пластическое течение.

4. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СЕТЕЙ

Другим типом аппаратов защиты электрических цепей выступает предохранитель. Предохранитель – это первый элемент электрической сети, который обеспечивает защиту цепи от короткого замыкания. Это устройство исторически давно развивается, начиная с первых технологических этапов. Отличительная особенность предохранителя – наличие в структуре плавкойставки, которая при достижении в цепи значения тока короткого замыкания плавится и размыкает цепь. Токи короткого замыкания – это токи, которые разрушают элементы и устройства, находящиеся в зоне действия электрической сети. Поэтому задача предохранителя состоит в том, чтобы он самостоятельно выключился в цепи 10 кВ и обеспечил таким образом защиту электрической цепи. Это достигается при невысокой стоимости и высокой эффективности. В то же время для предохранителей присущи недостатки, связанные с тем, что в ряде случаев их эффективность срабатывания ниже, чем у автоматических выключателей. Это происходит в том случае, когда токи короткого замыкания формируются на определенном пороговом уровне, т.е. плавкаяставка еще не расплавилась, но находится в определенном промежуточном состоянии, формируется определенное значение токов короткого замыкания, которые негативно действуют на элементы электрической сети.

На рисунке 34 показаны некоторые виды предохранителей.

Режим с превышением тока в электрической цепи более 250...300% для предохранителя вызывает мгновенное срабатывание. Двухкратная перегрузка по току вызывает срабатывание через несколько десятков секунд.

Режим с превышением тока более 25...30% может не вызвать срабатывания предохранителя в течение длительного времени и определяется состоянием предохранителя τ [16].

На рисунке 35 показана времятоковая характеристика.



Рис. 34. Виды предохранителей

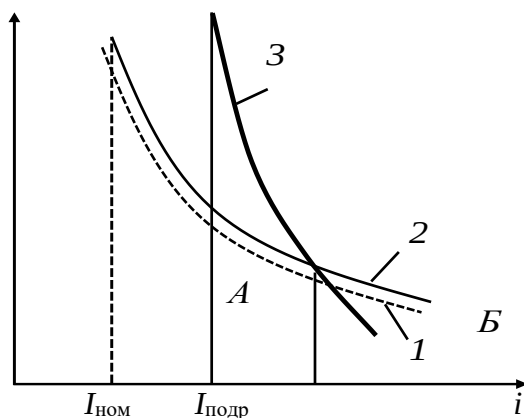


Рис. 35. Времятоковая характеристика

В области больших перегрузок (область *Б*) предохранитель защищает объект. В области *А* предохранитель объект не защищает.

При небольших перегрузках (1,5...2,0) $I_{\text{ном}}$ температурный режим предохранителя меняется монотонно [16].

Ток, при котором плавкая вставка срабатывает (плавится) при достижении установившейся температуры, называется пограничным током $I_{\text{погр}}$ [16].

Для того, чтобы предохранитель не срабатывал при номинальном токе $I_{\text{ном}}$, необходимо условие $I_{\text{погр}} > I_{\text{ном}}$ [16].

В связи с тем, что время плавления вставки при пограничном токе около 1 ч, и температура плавления ее материала доходит до 800...1000 °С, плавкая вставка предохранителя нагревается до высоких температур, что вызывает ее тепловое старение [16].

Электрофизические особенности металлов, используемых в качестве плавкой вставки, компенсируются увеличением сечения. Алюминий имеет температуру плавления 658 °С (табл. 1), что меньше, чем у меди – 1083 °С [16].

Таблица 1

Материал	$U_{к1}$, В	$\vartheta_{к1}$, °С	$U_{к2}$, В	$\vartheta_{к2}$, °С
Медь	0,12	190	0,43	1083
Серебро	0,09	150	0,35	960
Алюминий	0,10	150	0,30	658
Вольфрам	0,40	1000	1,00	3370

При появлении фазопереходного состояния (плавление металла) на участке плавкой вставки проявляются *электродинамические силы*, сжимающие проводник, что приводит к ужению и росту плотности электрического тока и увеличению температуры [16] предохранителей низкого напряжения.

Пробочные предохранители типа ПДС – напряжение 320 В постоянного тока и 380 В переменного тока с номинальным током от 6 до 600 А.

Трубчатые предохранители типа ПК – стеклянные трубки с плавкой вставкой в виде прямой нити.

Суженные участки вставки способствуют быстрому ее плавлению при КЗ и создают эффект токоограничения (гашение дуги происходит очень быстро (0,002 с) [16].

На рисунке 36 показана плавкая вставка с несколькими секциями.

Вставка с четырьмя перешейками после перегорания образует четыре разрыва с 200 В, а в сумме 800 В. Это явление, наряду с высоким давлением, позволяет гасить дуги при напряжении источника до 500 В [16].

На рисунке 37 показаны плавкие вставки на различные номиналы.

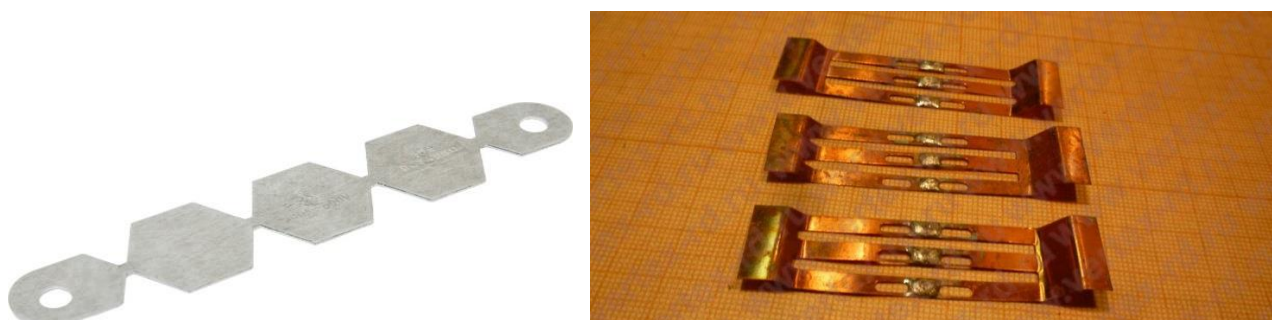


Рис. 36. Плавкая вставка с несколькими секциями

Плавкие элементы, из которых составляются плавкие вставки предохранителей ПН2

№ п/п.	Заводское обозначение	Толщина медной фольги, мм	Эскиз плавкого элемента
1 2 3	5БУ.594.061.1 5БУ.594.061.2 5БУ.594.061.3	0,1 0,15 0,2	
4 5 6	5БУ.594.060.1 5БУ.594.060.2 5БУ.594.060.3	0,1 0,15 0,2	
7 8 9 10 11	5БУ.594.058.1 5БУ.594.058.2 5БУ.594.058.3 5БУ.594.058.4 5БУ.594.058.5	0,1 0,15 0,2 0,25 0,3	
12	5БУ.594.059	0,15	Как № 8, но с прямыми концами

Рис. 37. Плавкие вставки на различные номиналы

Предохранители с мелкозернистым наполнителем ПН-2

ПР-2 (рис. 38) имеют корпус квадратного сечения, изготавливаются из прочного фарфора или стеатита. Внутри корпуса расположены ленточные плавкие вставки и наполнитель – кварцевый песок [16].

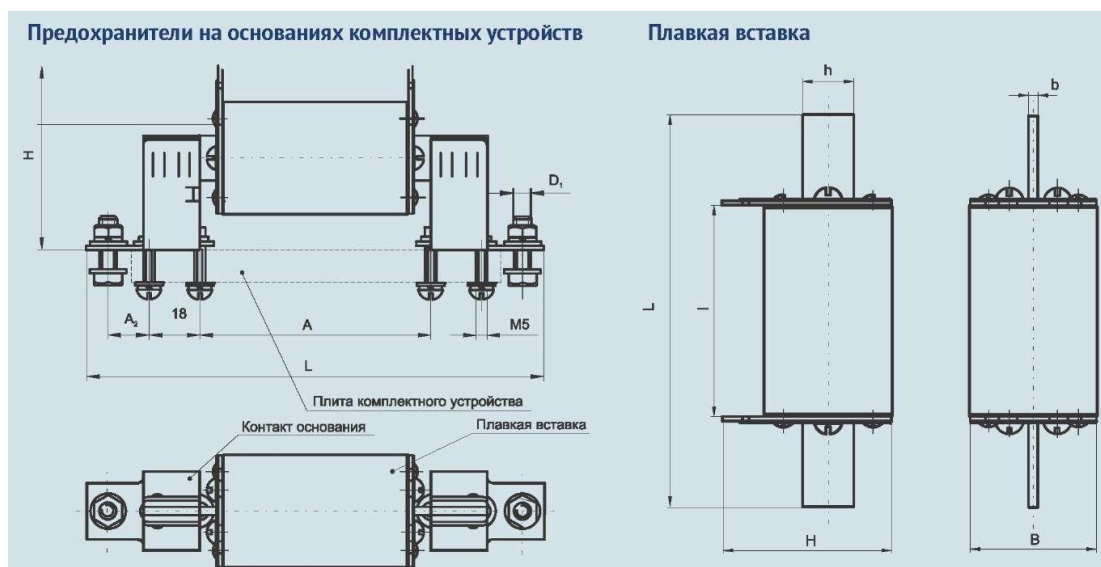


Рис. 38. Предохранители ПН-2



Рис. 39. Предохранитель ПН-2

Плавкие вставки привариваются к диску, который крепится к пластинам, связанным с ножевыми контактами. Пластины крепятся к корпусу винтами (рис. 39) [16].

Существует также проблемы, связанные с идентификацией перегорания предохранителя, т.е. в группе предохранителей, находящихся в щитовом оборудовании, бывает достаточно тяжело быстро оценить сработавший предохранитель потому, что отсутствует индикатор его срабатывания [16].

5. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Автоматические выключатели – это элементы электрической сети, которые обеспечивают защиту. При коротком замыкании, которое может повредить элементы электрической сети, используются автоматические выключатели. Структура автоматического выключателя содержит элементы, которые позволяют в быстродействующем режиме обесточить сеть за счет ее полного размыкания. Автоматические выключатели содержат контактную группу, которая срабатывает при протекании электрического тока по катушке, т.е. в катушке возникает электромагнитное поле, которое из-за этого размыкает элемент электрической сети. Ток короткого замыкания не является основным режимом, это аварийный режим, а значит, со временем при достижении в электрической сети номинального режима работы автоматический выключатель может быстро включиться. Это большой плюс автоматических выключателей. Существуют различные типоразмеры, это связано с тем, что режим работы в разных участках сети определяется ее нагрузкой. Существует некая иерархическая структура, поэтому основываясь на принципе селективности, автоматические выключатели устанавливаются именно в те элементы, для которых они предназначены по своим номинальным значениям. Существуют также автоматические выключатели на разные типы напряжения. На электрических станциях и подстанциях также могут устанавливаться большие по размеру автоматические выключатели.

Автоматические выключатели формируют группу общего назначения, быстродействующие и специальные [16].

Бывают автоматические выключатели переменного, постоянного, переменного/постоянного тока [16].

Токоограничивающий выключатель – выключатель, у которого собственное время отключения таково, что в данной цепи за это время ток не успевает достигнуть установившегося значения $I_{кз}$, и отключаемый ток $I_{откл}$ меньше того,

который был бы в случае отсутствия выключателя или при нетокоограничивающем выключателе [16].

Первые предназначены для осуществления селективной защиты, суть которой заключается в том, что при токе $I_{кз}$, превосходящем ток установки $I_{уст}$ выключателей всех ступеней, отключается ближайший к месту аварии участок, у которого выключатель имеет меньшую выдержку времени t_1 ($t_1 < t_2 < t_3$) [16].

Собственное время размыкания выключателей – 0,02...0,08 с.

Для построения селективно действующей защиты автоматы должны иметь регулировку тока и времени срабатывания.

Внешний вид автоматического выключателя приведен на рис. 40.

На рисунке 41 показано внутреннее устройство автоматического выключателя.

В автоматическом выключателе на ток > 200 А (рис. 41) токоведущая цепь имеет главные и дугогасительные контакты.



Рис. 40. Внешний вид автоматического выключателя

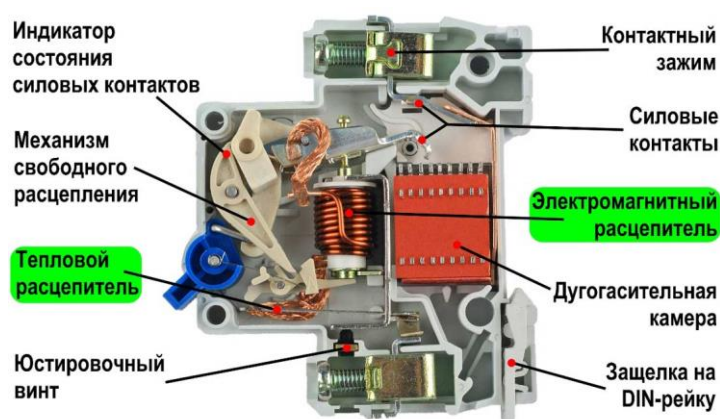


Рис. 41



Рис. 42

На рисунке 42 показаны быстродействующие автоматические выключатели [16].

Быстродействующие автоматические выключатели:

- 1) выключатель с взрывным расцепителем – время отключения 0,001 с – не получили распространения из-за своей сложности;
- 2) вакуумные выключатели, обеспечивающие гашение дуги $t_0 = 0,003... 0,007$ с. Примеры исполнения некоторых выключателей приведены ниже [16].

Выключатель БВП-5. Построен на принципе вытеснения магнитного поля. Он предназначен для защиты силовой цепи электровозов постоянного тока. $U_{ном} = 4000$ В, $U_{max} = 4000$ В, $I_{ном} = 1850$ А, собственное время отключения – 0,003 с [16].

Выключатель постоянного тока вакуумного типа ВПТВ-15-5/400 на $U_{ном} = 15$ кВ, $I_{ном} = 400$ А, $I_{откл} = 5$ кА.

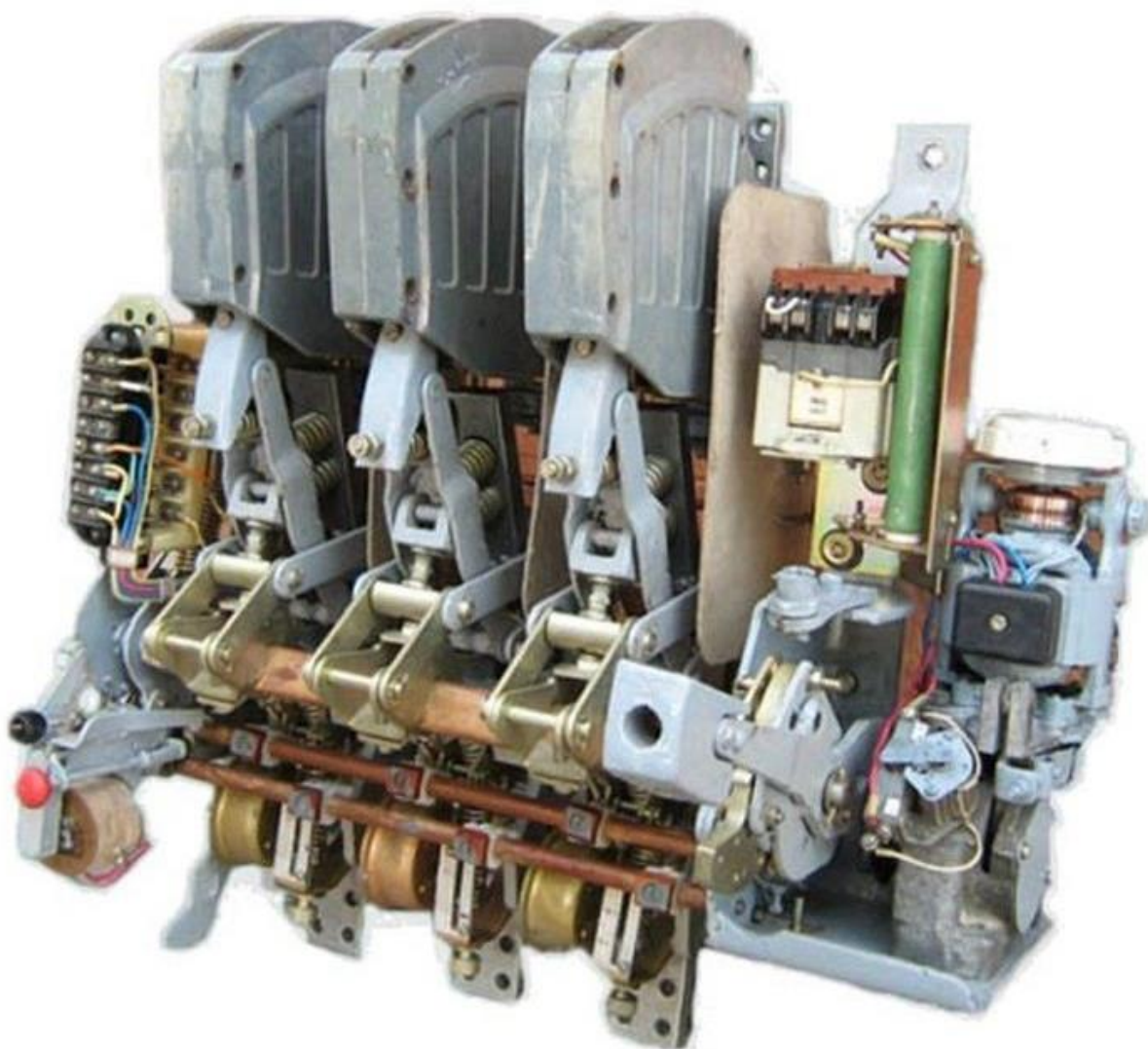


Рис. 43. Автоматический выключатель в электрических сетях с высоким напряжением

Автомат серии ВАБ-28 наиболее универсальный, $I_{\text{ном}} = 1,5 \dots 6,0$ кА, $U = 825 \dots 3300$ В [16].

Автоматический выключатель АВМ 20 с 1000 А, 1250 А, 1500 А, ручной привод.

Выбор, применение и эксплуатация автоматических воздушных выключателей

1. Номинальное значение напряжения $U_{\text{ном.а}}$ и тока $I_{\text{ном.а}}$ автомата, ток нагрузки $I_{\text{ном.н}}$ и напряжения сети $U_{\text{ном.с}}$ должны удовлетворять соотношениям

$$U_{\text{ном.а}} \geq U_{\text{ном.с}}; \quad I_{\text{ном.а}} \geq I_{\text{ном.н}}.$$

2. Для электрического двигателя (повторно-кратковременный режим) номинальный ток расцепителя принимается равным току двигателя в режиме ПВ = 25%.

3. Для автоматов защиты двигателей с КЗ ротором ток уставки электромагнитного расцепителя

$$I_{уст.эм} \geq (2,5 \dots 3,0) I_{ном.дв.}$$

4. Для группы короткозамкнутых двигателей

$$I_{уст.эм} \geq (1,5 \dots 1,8) [\Sigma I_{ном.дв} + (I_{п} + I_{ном.дв})],$$

где разность $(I_{п} - I_{ном.дв})$ берется для двигателей, у которых она наибольшая.

5. Для двигателя с фазным ротором

$$I_{уст.эм} \geq (2,5 \dots 3,0) I_{ном.дв.}$$

6. Для группы двигателей с фазным ротором

$$I_{уст.эм} \geq (1,5 \dots 2,0) I_{ном.дв}^* + \Sigma I_{ном.дв},$$

где $I_{ном.дв}^*$ – ток двигателя с наибольшим пусковым током.

7. Для электрического двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме, номинальный ток теплового или комбинированного расцепителя

$$I_{ном.расц} \geq 1,5 I_{ном.дв.}$$

8. Выбор по току КЗ.

Для автоматов с электромагнитным расцепителем

$$\frac{I_{кз}}{I_{уст.эм}} \geq 1,25 \dots 1,40.$$

Технология гибридной коммутации включает в себя объединение контролируемой твердотельной электроники с механическим выключателем или разъединителем. В выключателях используются полупроводниковые переключатели в качестве основных прерывателей из-за их превосходного времени переключения, потерь проводимости, напряжения пробоя и надежности. Твердотельные переключатели коммутируют гибридные выключатели, которые активируются только при прерывании. Электронные схемы управляют всеми переключателями. В гибридных выключателях контролируют непрерывный ток,

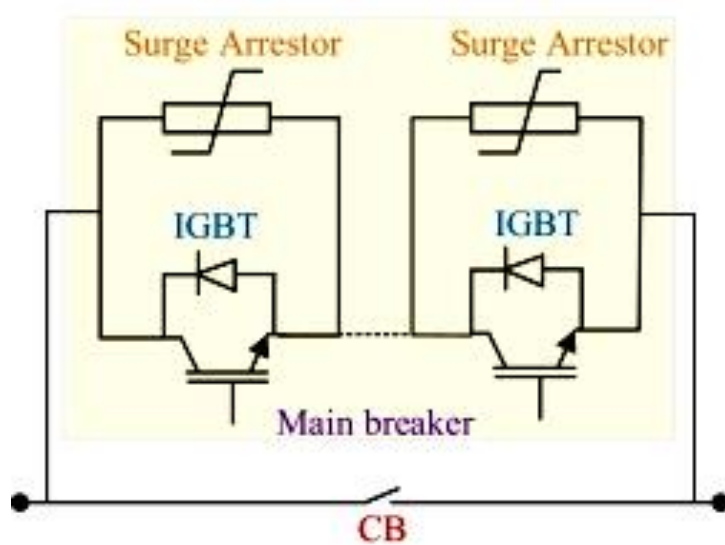
в то время как силовые полупроводниковые приборы включают и отключают процессы с помощью контакта выключателя. Сначала срабатывают полупроводники, чтобы переносить пусковой ток, чтобы избежать дуги при включении. После замыкания основных контактов сопротивление контакта ниже сопротивления полупроводника, поэтому ток коммутируется на контактный путь. Ток непрерывно течет через выключатель с незначительными потерями. При отключении полупроводниковые компоненты воспламеняются, и ток проходит через них многократно, поскольку путь тока имеет меньшее сопротивление, чем путь дуги. Кроме того, дуга рассеется, и полупроводники будут блокировать электричество.

Существует ряд потенциальных топологий для гибридных выключателей, но на практике наибольший интерес вызывают только две структуры. На рисунке 44 изображены переключатели гибридной топологии с использованием выключателей IGBT. Новые критерии производительности для IGBT открывают новые перспективы в подходах к гибридному переключению. Топологии описаны ниже.

Топология 1. Эта топология имеет параллельные твердотельные переключатели и быстрый механический выключатель. Эта архитектура быстрее традиционных выключателей, поскольку дуговой ствол требуется для обеспечения достаточного напряжения для коммутации, но не существующей точки пересечения нуля. Структура может использоваться в приложениях сетей среднего напряжения (рис. 44, а).

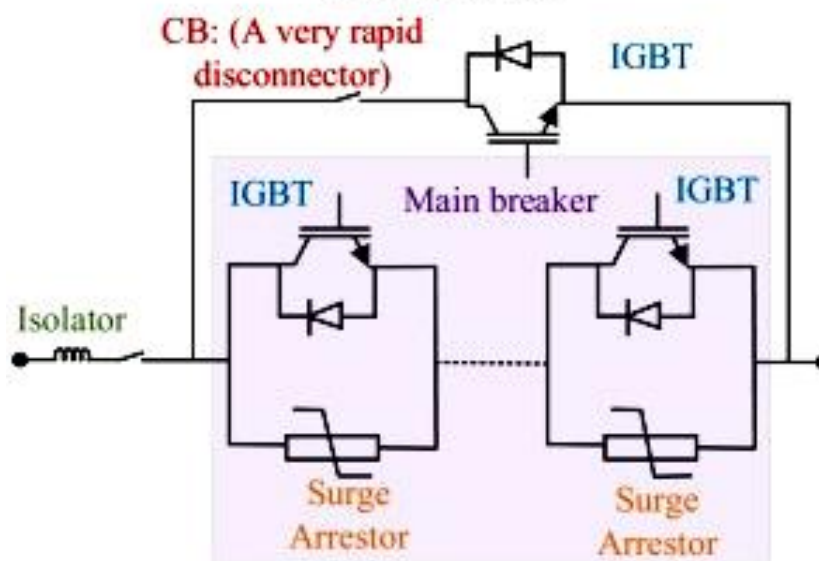
Топология 2. Эта структура была введена Хафнером. Быстродействующее твердотельное устройство в главном пути тока и быстрый механический разъединитель последовательно. Параллельные пути генерируются с использованием последовательно соединенных твердотельных переключателей (например, IGBT). Проводящие потери и падения напряжения обычно уменьшаются путем соединения множества IGBT в ряд (рис. 44, б).

(A) Topology 1



a)

(B) Topology 2



б)

Рис. 44. Схемы транзисторов с различной топологией (полупроводниковый автоматический выключатель)

6. КОНТАКТОРЫ

Электрические аппараты имеют в своем перечне такие устройства, как контакторы.

Контакторы (рис. 45 – 47) предназначены для включений/отключений электрооборудования при нормальных режимах работы.

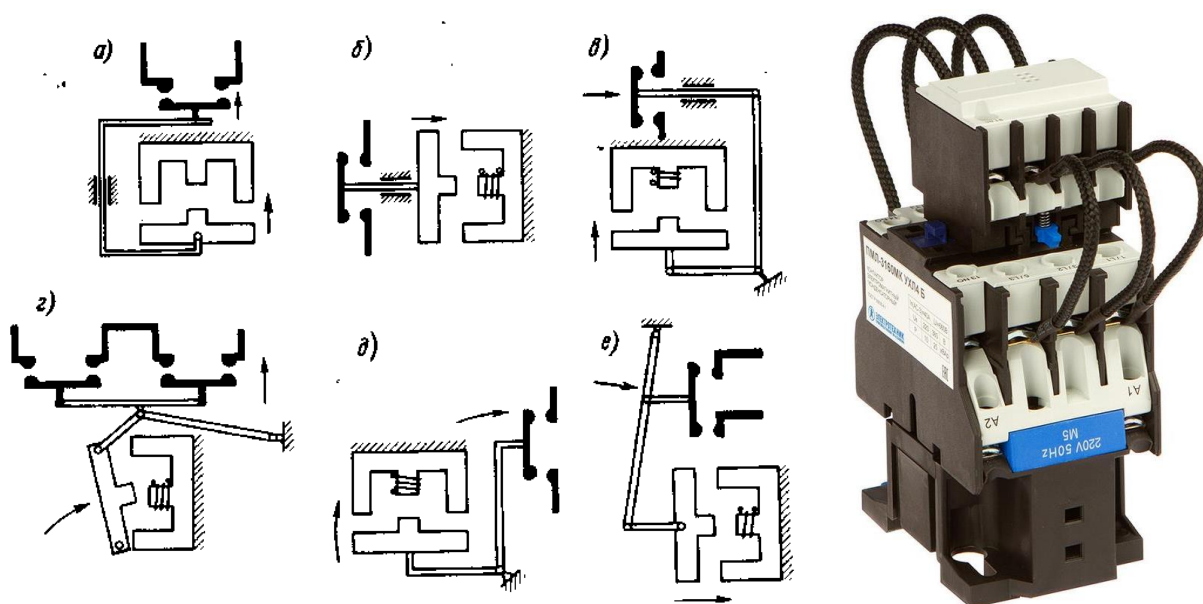


Рис. 45. Контакторы

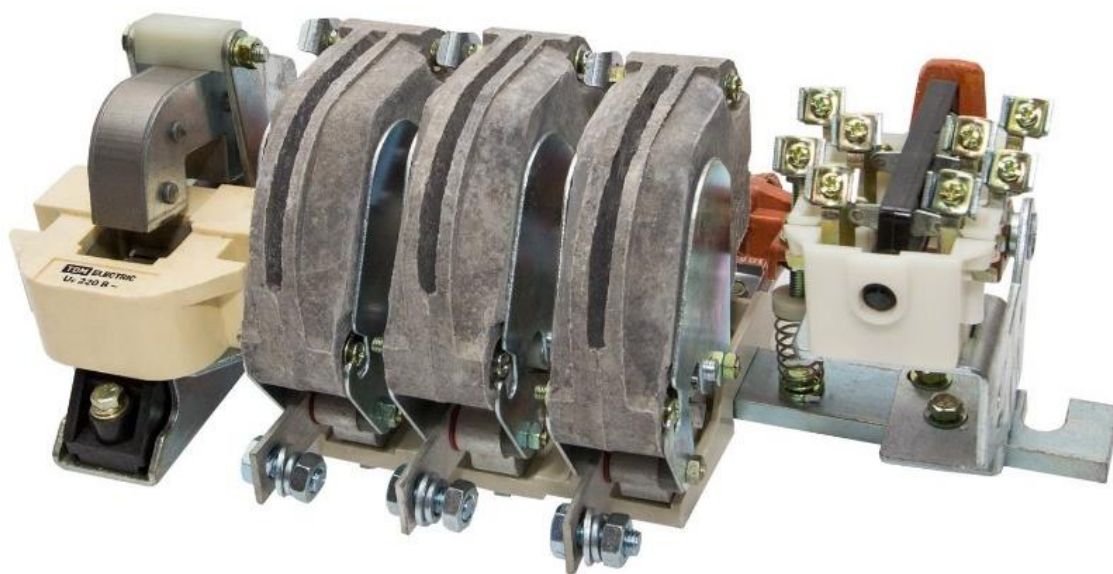


Рис. 46. Контакторы

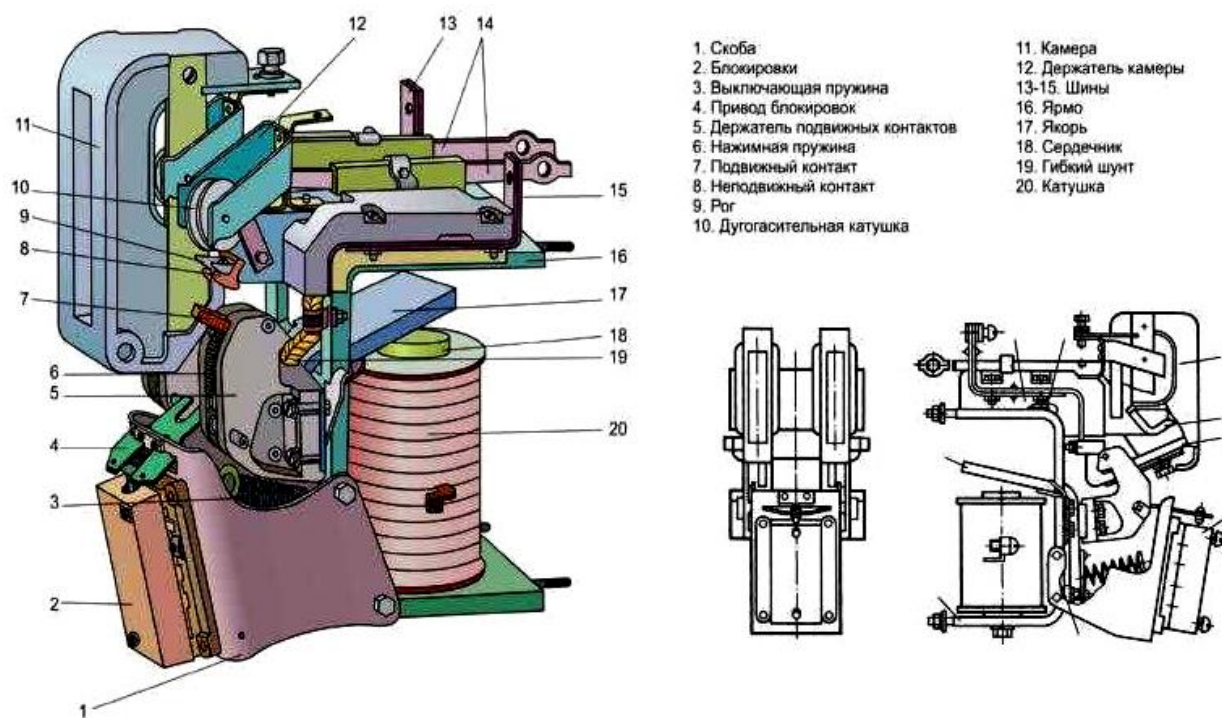


Рис. 47. Контакторы

В зависимости от рода привода контакторной системы различают контакторы *электромагнитные, пневматические и гидравлические*.

Контакторы постоянного и переменного тока

3D-модель контактора показан на рис. 48.

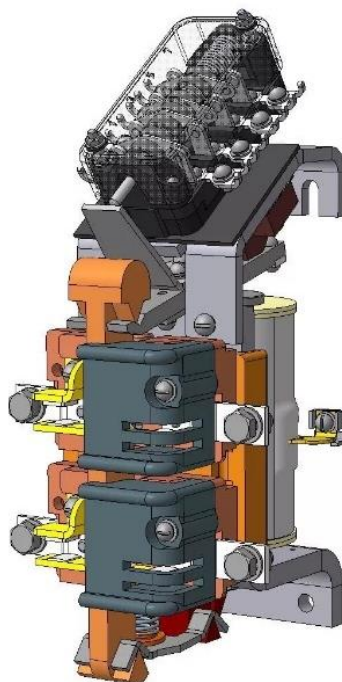


Рис. 48. 3D-модель контактора

На рисунке 49 изображена конструктивная схема контактора прямоходового типа. При подаче напряжения на обмотку электромагнитного привода возникает магнитный поток Φ , который развивает электромагнитную силу и притягивает к полюсам верхний якорь.

Измерения вибрации могут использоваться для оценки рабочего состояния силового оборудования и широко применяются при проверке качества оборудования и выявлении неисправностей. Технология обнаружения событий может определять изменение интенсивности поверхностного света, вызванное вибрацией объекта, и обеспечивать визуальное описание поведения вибрации. На основе анализа принципа преобразования поведения вибрации в данные потока событий с помощью датчика событий предлагается алгоритм реконструкции данных потока событий в отношении, коррелирующее смещение вибрации и время, для извлечения амплитудно-частотных характеристик сигнала вибрации.

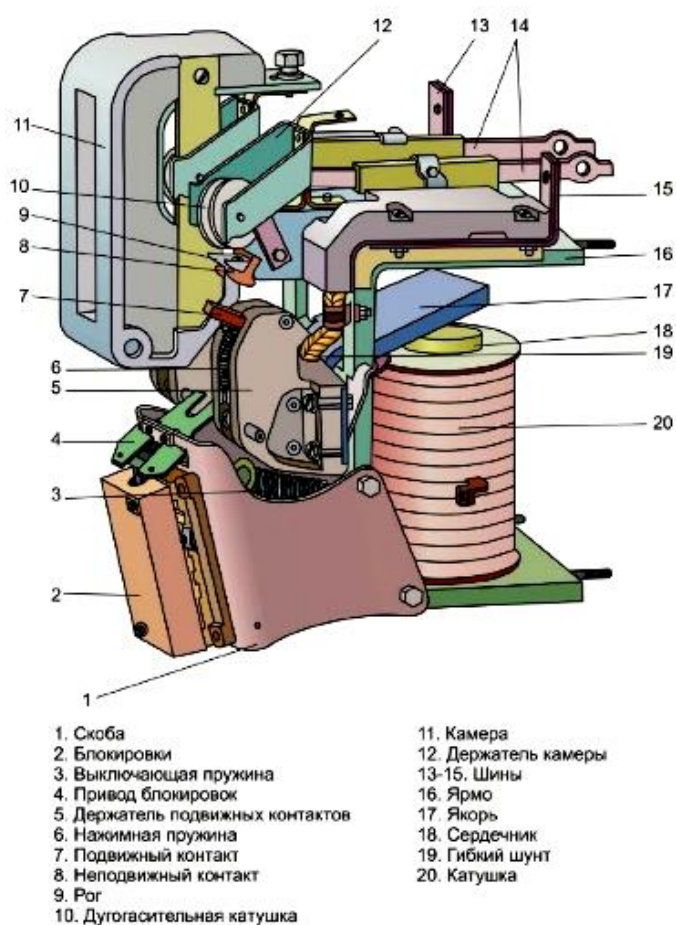


Рис. 49. Контактор с поворотным механизмом

7. СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ КЛЮЧИ

Электронные ключи и бездуговая коммутация связаны с применением силовых ключей. Электрические аппараты имеют ряд проблем, связанных с искрением контактов, механическим износом и возникновением электрического пробоя. Все это приводит к тому, что снижается ресурс этих аппаратов, длительность эксплуатации и надежность. В электромеханических аппаратах коммутация цепи производится замыканием или размыканием электрической цепи посредством контактной пары, имеющей подвижную часть.

Однако при этом имеются такие технические достоинства, как простота конструкции, ремонтпригодность и возможность массового выпуска на предприятиях РФ, которые не обладают специальными технологиями в сфере полупроводников.

Однако применение силовых ключей для таких устройств устраняет проблемы с электрической дугой. Они компактнее, но при этом такие устройства имеют ряд недостатков, связанных со сложностью ремонта, а также с отсутствием гальванической развязки цепи. Другие недостатки связаны с тем фактом, что в таких устройствах отсутствует гальваническая развязка, так как имеется постоянная электрическая связь, которая, исходя из законов коммутации, не позволяет возникать большим электрическим токам, искрению и сложным ситуациям с управлением.

Таким образом, электронные аппараты не содержат подвижных частей, и процессы коммутации в них происходят без дугообразования.

Различные варианты полупроводниковых элементов, которые могут быть использованы в силовых ключах, показаны на рис. 50.

Схема транзисторов показана на рис. 52.

Среди транзисторов различают биполярные транзисторы, полевые транзисторы, транзисторы с изолированным затвором IGBT (Insulated-Gate-Bipolar Transistor).

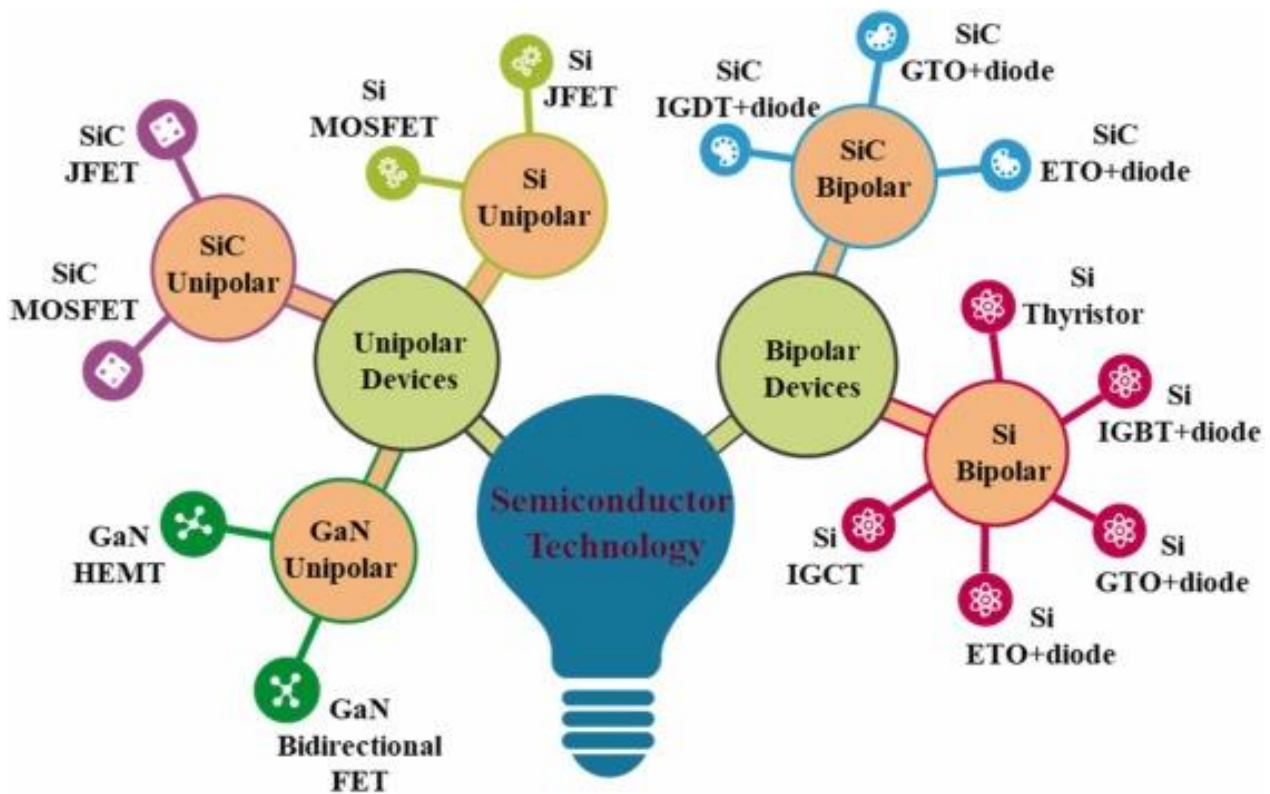


Рис. 50. Классификация технологии силовых полупроводников в устройствах SSCB для обеспечения превосходных характеристик

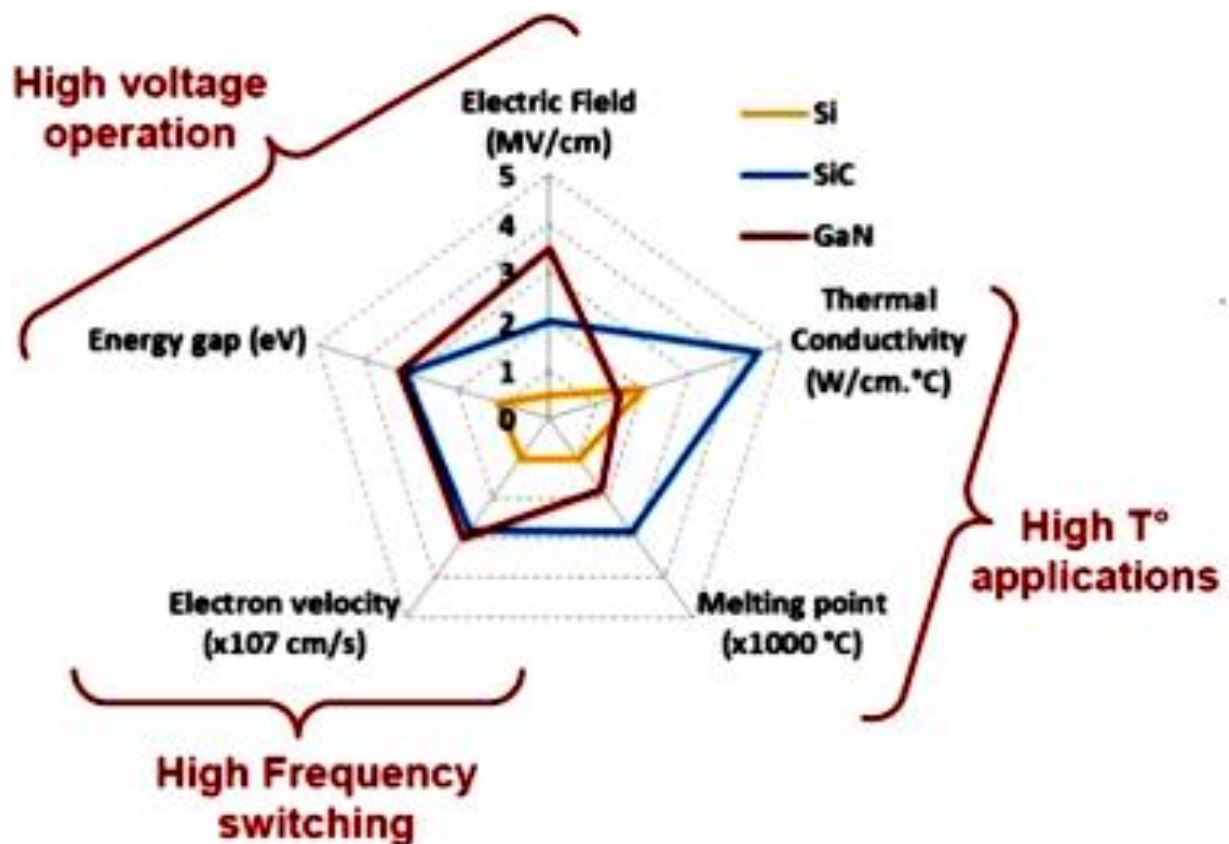


Рис. 51. Материалы для полупроводников Si, SiC и GaN с учетом различных свойств

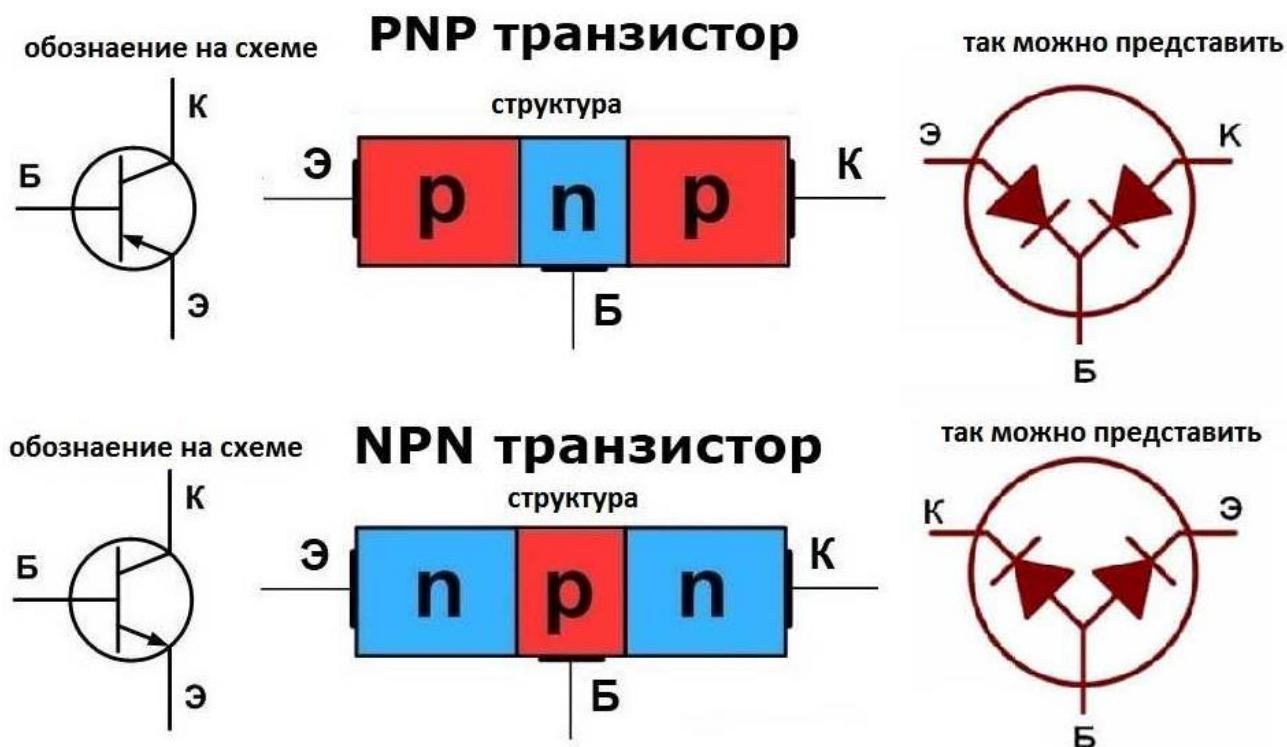


Рис. 52. Структурная схема транзисторов

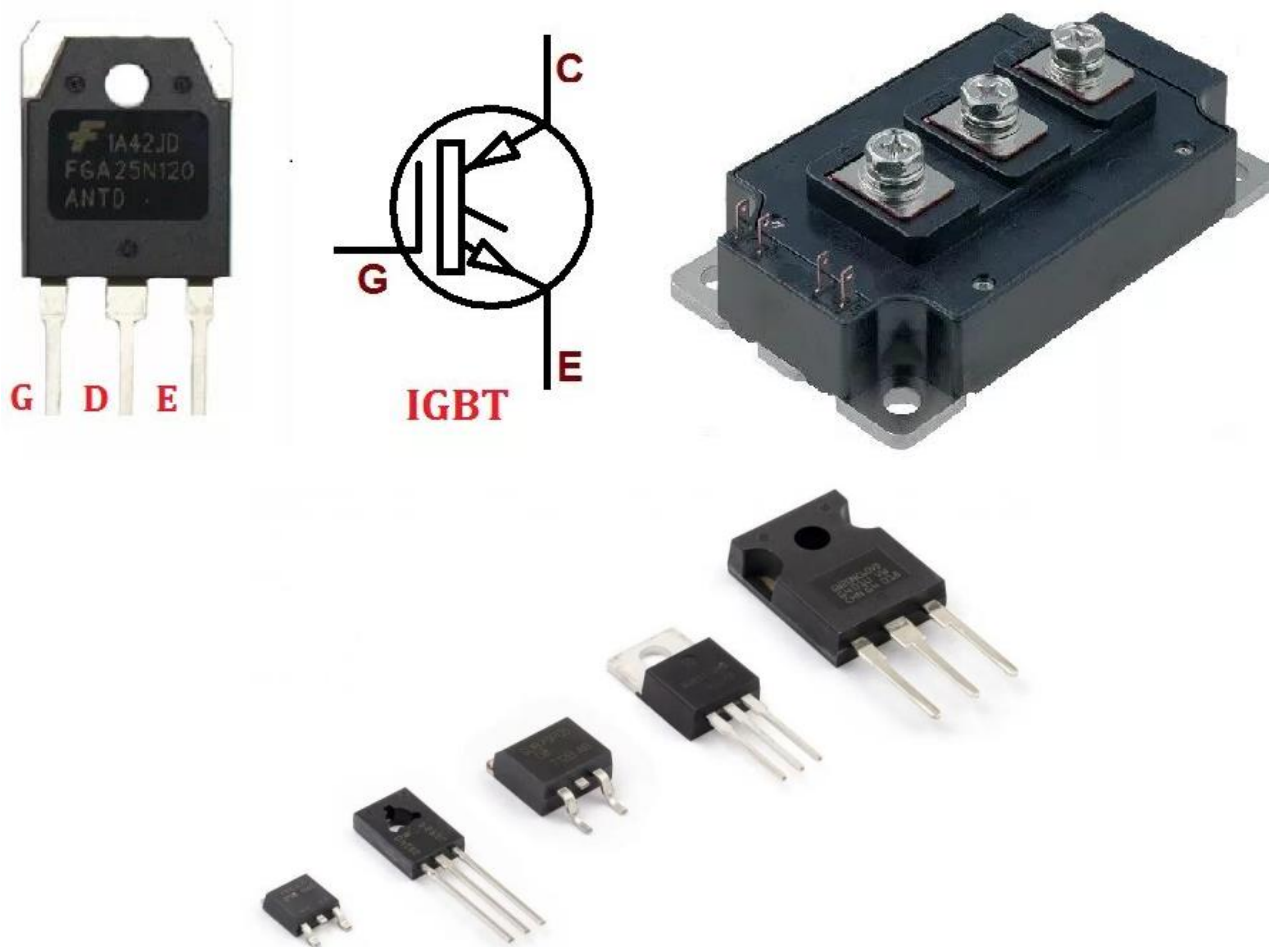


Рис. 53. Виды транзисторов

Некоторые исследования предлагают использовать кремниевые биполярные устройства, включая тиристоры, IGBT, тиристоры GTO, ETO и IGCT для SSCB в распределительных сетях среднего напряжения (до 4,5 кВ и 4 кА). Компоненты демонстрируют отличную устойчивость к коротким замыканиям, перегрузкам по току и надежность.

Биполярные SiC включают GTO, BTO и IGBT. Биполярные SiC-устройства предлагают отличный вариант для сверхвысоковольтных (>10 кВ) силовых устройств благодаря своей работе модуляции электропроводности, которая снижает емкость существенного слоя блокировки напряжения и имеет низкую зависимость.

Si униполярные устройства включают MOSFET и JFET. Эти устройства используются в низковольтных и маломощных приложениях. Например, Si MOSFET были предложены в качестве силовых полупроводниковых приборов в системах распределения электроэнергии SSCB авиации.

8. ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ (LCC) ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТОВ

Стоимость полного жизненного цикла (LCC) оборудования относится к сумме расходов от проектирования и производства оборудования до утилизации и переработки. Как правило, вся стоимость LCC оборудования делится на пять аспектов:

- инвестиционные затраты (IC);
- эксплуатационные затраты (OC);
- затраты на техническое обслуживание (MC);
- затраты на отказ (FC);
- затраты на утилизацию (DC).

1. Инвестиционные затраты (IC).

Инвестиционные затраты относятся к сумме различных затрат, понесенных при покупке, установке и вводе в эксплуатацию и сопутствующих услугах оборудования. Для энергетического оборудования инвестиционные затраты составляют большую долю в общей стоимости жизненного цикла электрических и электронных аппаратов.

2. Эксплуатационные расходы (OC).

Для электрического аппарата характерны потери энергии в режимах включения/выключения. Для улучшения управления и контроля оборудования требуются регулярные патрульные осмотры и техническое обслуживание. Кроме того, необходимо также учитывать расходы на защиту окружающей среды, вызванные электромагнитными помехами, и экологический ущерб, наносимый эксплуатацией оборудования.

3. Стоимость технического обслуживания (МС).

Для обеспечения надежности и эффективности необходимо разработать соответствующий план технического обслуживания при вводе оборудования в эксплуатацию. Для силового оборудования план капитального ремонта и технического обслуживания включает план периодического технического обслуживания и план нерегулярного технического обслуживания. Стоимость технического обслуживания в основном включает плату за оборудование или материалы, плату за обслуживание, плату за рабочую силу и другие расходы.

4. Стоимость отказа (FC).

В течение периода эксплуатации могут возникать различные неисправности из-за аварийных ситуаций или самого оборудования, что напрямую приводит к расходам на обслуживание оборудования и расходам на убыток из-за неисправности. Расходы на обслуживание оборудования относятся к расходам на обслуживание на месте и расходам на возвратное обслуживание, затраченным на обслуживание оборудования. Расходы на убыток из-за отказа относятся ко всем видам потерь, вызванных остановкой оборудования из-за отказа.

5. Стоимость сброса (DC).

Оборудование, списанное с эксплуатации, должно быть утилизировано в соответствии с определенным процессом, который сопровождается финансовыми затратами. Стоимость обработки и остаточная стоимость составляют затраты на утилизацию.

Метод оценки экономической жизни электрических аппаратов

На основе модели стоимости жизненного цикла можно использовать метод оценки симуляции для построения функции LCC и установления модели экономической жизни. Поскольку стоимость утилизации формируется после окончания срока службы оборудования и не имеет никакого отношения

к расчету экономической жизни, игнорируется влияние стоимости утилизации при установлении модели экономической жизни энергетического оборудования.

1. Закон изменения постоянных затрат.

Постоянная стоимость относится к единовременным общим инвестиционным расходам, которые формируются до начала эксплуатации и не проявляются при вводе оборудования в эксплуатацию. Постоянная стоимость постепенно распределяется на весь цикл обслуживания оборудования.

2. Закон изменения динамических затрат.

Динамическая стоимость относится к общей стоимости различных видов эксплуатации, обслуживания и устранения неисправностей в течение жизненного цикла. Согласно теории надежности техники, с увеличением срока службы вероятность отказа оборудования постепенно увеличивается, а надежность постепенно снижается. Таким образом, стоимость различных видов эксплуатации, обслуживания и устранения неисправностей будет постепенно увеличиваться. С ростом периода эксплуатации годовые динамические затраты увеличиваются все больше и больше.

Общая стоимость

LCC представляет собой сумму фиксированных и динамических затрат. На раннем этапе эксплуатации оборудования, из-за большой доли фиксированных затрат в общей стоимости, фиксированные затраты являются доминирующим фактором. Общая стоимость демонстрирует тенденцию к постепенному снижению вместе с периодом эксплуатации. На более позднем этапе эксплуатации оборудования общая стоимость оборудования демонстрирует тенденцию к постепенному росту вместе с периодом эксплуатации. В целом, годовая стоимость оборудования LCC демонстрирует тенденцию сначала к снижению, а затем к росту, что показано на рис. 54.

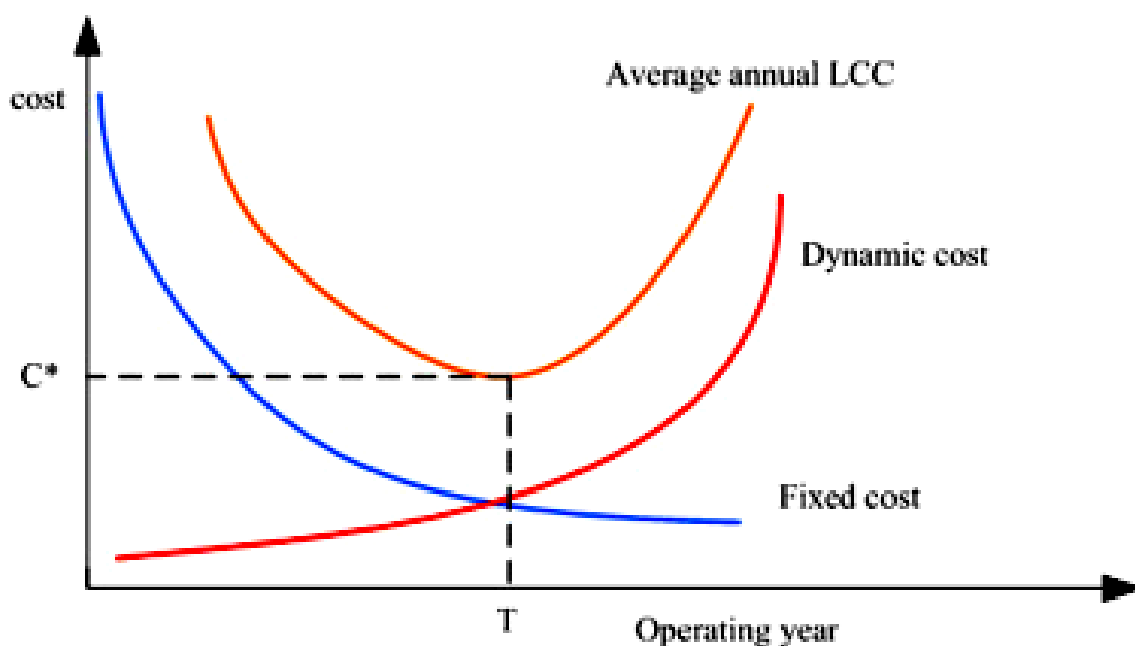


Рис. 54. Тенденция экономической жизни оборудования

Метод оценки эффективности на основе срока экономической жизни электрических аппаратов

Комплексная система индексов эффективности

Система индексов комплексной оценки производительности энергетического оборудования включает четыре показателя: надежность, доступность, ремонтпригодность и экономичность. Метрики четырех показателей – надежность оборудования $R(t)$, фиксированная доступность оборудования $Ass(t)$, ремонтпригодность оборудования $M(t)$, стоимость жизненного цикла оборудования $LCC(t)$. Из-за различных измерений каждого индекса, чтобы еще больше повысить точность расчета комплексной оценки производительности и упростить объем расчета, принят метод стандартизации дисперсии для стандартизации четырех показателей.

Вакуумные выключатели 35 кВ на подстанции. Используя модель экономической жизни силового оборудования и комплексную модель оценки эффективности на основе экономической жизни, был рассчитан и проанализирован инженерный пример обслуживания выключателей. Основные технические параметры оборудования приведены в табл. 2.

2. Технические параметры трех производителей

Проект	Производитель А	Производитель Б	Производитель С
Тип	КИН61-40.5	КИН61-40.5	КИН61-40.5
Цена покупки/(¥)	85 400	96 500	92 800

3. Различные данные параметров для динамического коэффициента стоимости трех производителей

Заказ	Проект	Производитель А	Производитель Б	Производитель С
1	Средняя потеря мощности/кВт	12 600	12 600	12 600
2	Цена на электроэнергию в реальном времени/(RMB/кВт·ч)	0,54	0,54	0,54
3	Ежегодная стоимость капитального ремонта и технического обслуживания/(RMB)	63 400	56 700	59 800
4	Среднегодовое время простоя	1,23	1,18	1,31
5	Среднегодовое количество дней простоя/(день)	1,4	1,7	1,2
6	Средняя стоимость обслуживания при простое/(RMB·ч)	2800	3400	3200
7	Среднегодовое время простоя/(ч)	12	10	11

Оценка экономических параметров

Подставив параметры оборудования поставщика в функцию затрат, можно получить кривую LCC и экономическую кривую срока службы, которая показана на рис. 55.

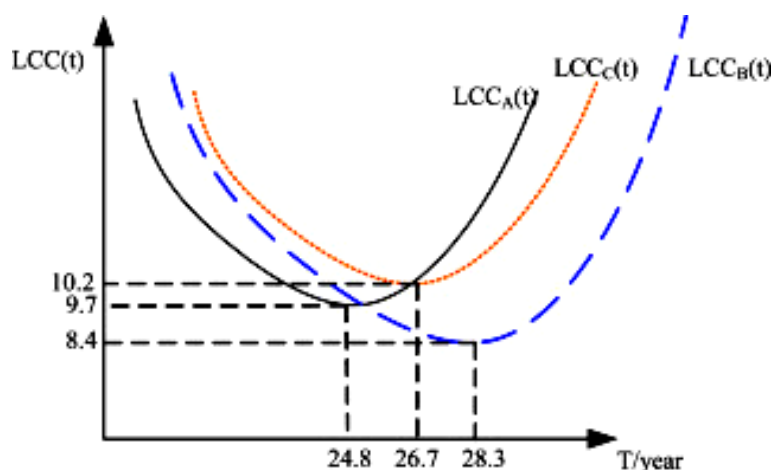


Рис. 55. Распределение срока службы автоматических выключателей трех производителей

4. Результаты LCC автоматических выключателей трех производителей

Проект	Производитель А	Производитель Б	Производитель С
Оптимальный экономический срок жизни (год)	24,8	28,3	26,7
Минимальная среднегодовая стоимость (¥)	9,7	8,4	10,2
Оптимальная стоимость жизненного цикла (¥)	288,6	306,4	292,5

Из результатов экономической жизни в табл. 4 мы можем узнать, что:

1. Оптимальный экономический срок службы вакуумного выключателя на 35 кВ от производителя В был самым продолжительным. Если бы единственным соображением был оптимальный экономический срок службы, то производитель В был бы оптимальным производителем.

2. LCC вакуумного выключателя 35 кВ от производителя А был наименьшим. Если бы оптимальная стоимость жизненного цикла была единственным соображением, то оборудование производителя А было бы оптимальным.

3. Оптимальный LCC и экономичный срок службы вакуумного выключателя на 35 кВ от производителя С находились посередине.

Формирование схемы технического обслуживания на основе комплексной оценки эффективности

При капитальном ремонте оборудования устанавливается пороговое значение технического обслуживания при условии оптимальной экономической жизни. Соответствующие результаты оценки эффективности используются в качестве порогового значения обслуживания для оценки технического состояния оборудования.

Окончательный результат обслуживания или замены производителя А показан на рис. 56.

Если результат оценки был ниже порогового значения, обозначенного пунктирной линией, оптимальной стратегией было техническое обслуживание или замена.

При использовании результатов для 200 реальных схем технического обслуживания оборудования обнаружено, что состояние оборудования улучшилось, а затраты снизились, что подтвердило правильность модели оценки.

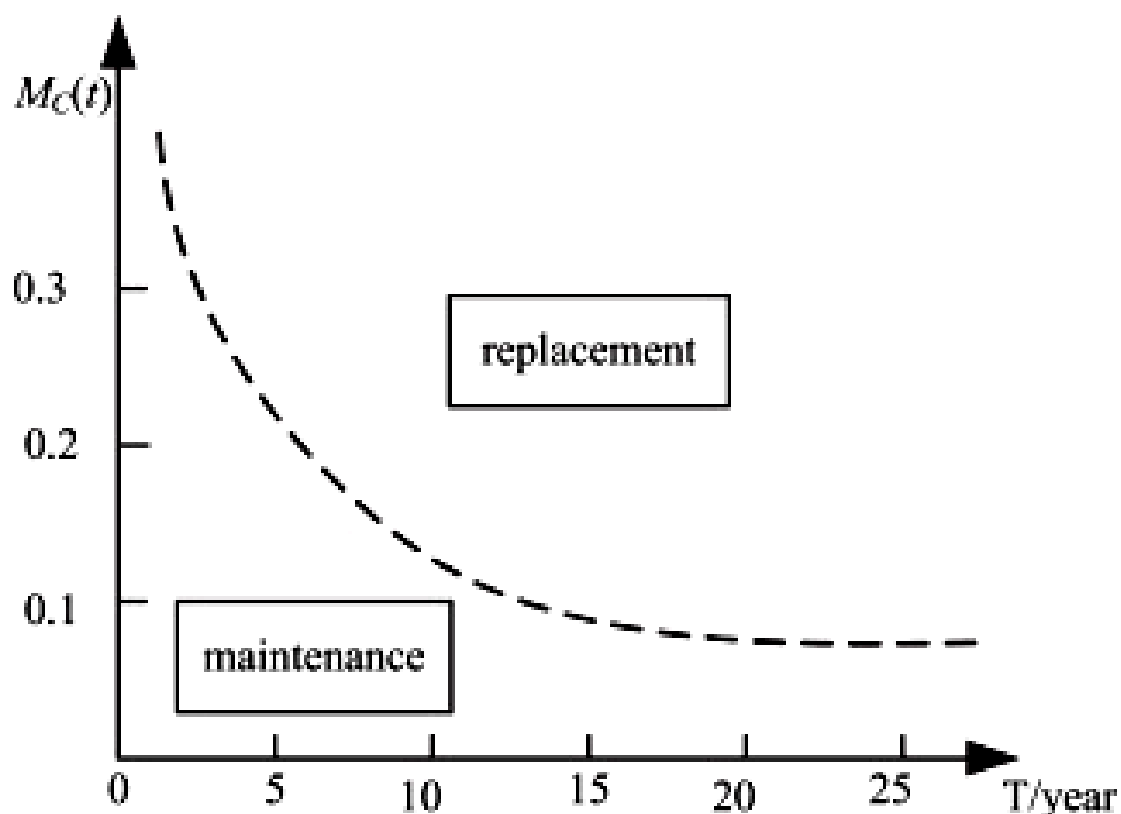


Рис. 56. Стратегия обслуживания электрических аппаратов

Начиная со стоимости жизненного цикла оборудования, экономическая модель срока службы оборудования и комплексная модель оценки эффективности основаны на экономической жизни. Жизненный цикл связан с динамикой стоимости и может быть определен экономической моделью, которая включает все затраты, связанные с эксплуатацией электрических аппаратов.

Была создана комплексная система индексов оценки эффективности, которая включала надежность, доступность, ремонтпригодность и экономичность. В качестве базовой модели комплексной оценки эффективности введена модель пропорционального отказа Вейбулла, и создана комплексная модель оценки эффективности, основанная на экономической жизни. На примере выключателя 35 кВ проанализированы и рассчитаны экономическая модель срока службы и комплексная модель оценки эффективности силового оборудования и их применение. Результаты оценки экономической жизни и комплексной оценки производительности могут предложить дифференцированные стратегии обслуживания, учитывая комплексное рабочее состояние оборудования и снижая входные затраты.

9. СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ

Интерфейс DG определяется как любая технология производства электроэнергии, которая может быть легко установлена в самых разных географических и физических местах, независимо от того, где она подключена (сторона передачи, распределения или потребления) и ее размера, будучи распределенной по всей энергосистеме или изолированной. Таким образом, она охватывает ветровую энергию, фотоэлектрические системы, топливные элементы, малые гидроэлектростанции, когенерацию, энергию биомассы, малые тепловые генераторы и другие источники.

Однако эти технологии имеют наиболее четкие электрические выходы, в то время как энергосистема требует стандартизированных параметров тока, напряжения и частоты. Чтобы решить эту проблему таким образом, чтобы ни одно из этих устройств не было нарушено или повреждено, должны быть средства для их соединения. Оборудование, которое выполняет эту задачу, называется «интерфейсом». По мнению некоторых авторов и стандарта IEEE 1547, интерфейсы можно разделить на три основные категории: синхронные машины (СМ), индукционные машины (ИМ) и преобразователи силовой электроники. Первые два являются частью систем, которые должны преобразовывать механическую энергию в электрическую. Выход может быть присвоен или не присвоен энергосистеме. Преобразователи в свою очередь необходимы для некоторых источников и могут улучшить характеристики других, даже если они уже состоят из СМ или ИМ. На рисунке 57 показано соединение DG с энергосистемой через силовую электронику.

Результатом использования статических преобразователей является то, что все требования энергосистемы удовлетворяются с высокой эффективностью.

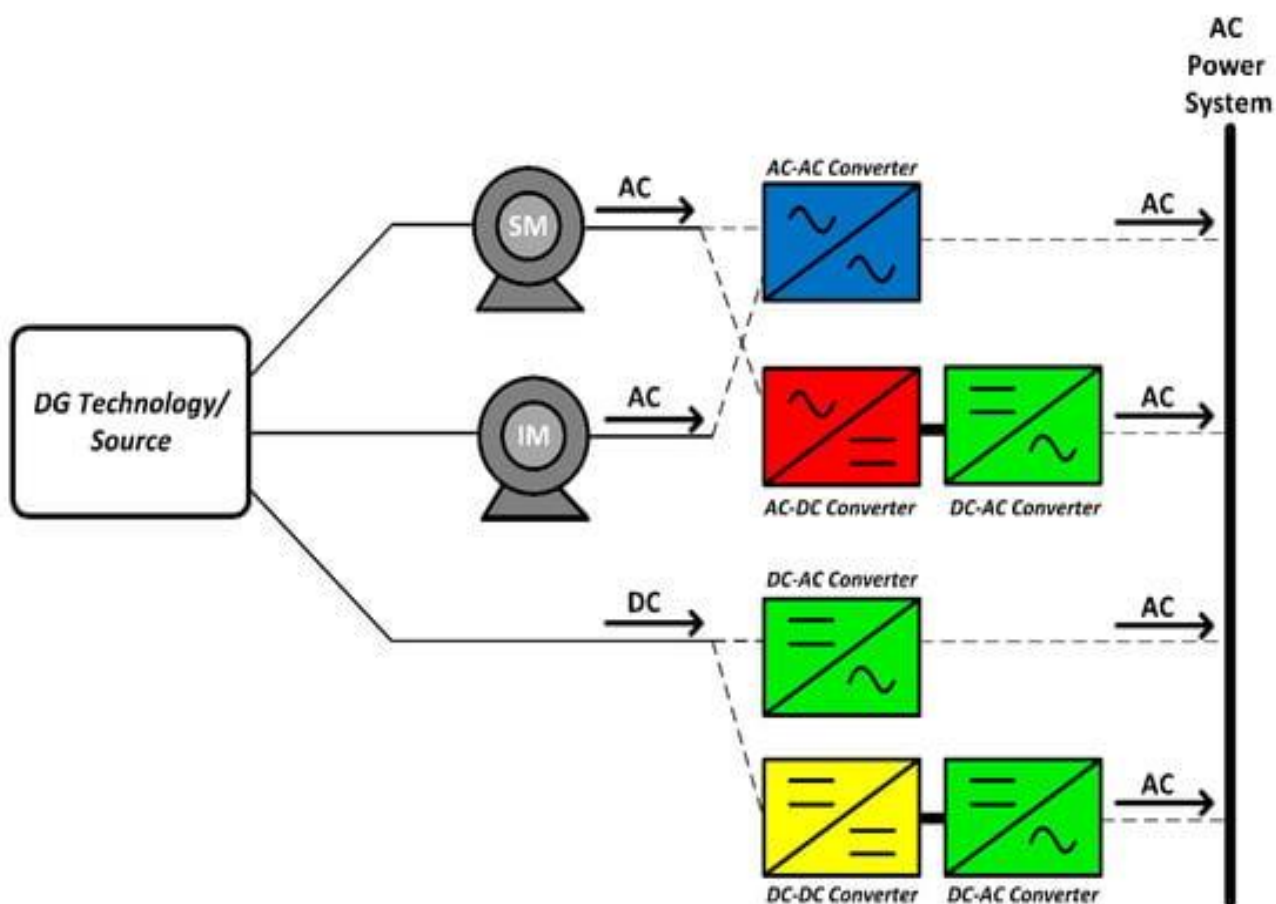


Рис. 57. Основные конфигурации интерфейса DG с силовыми преобразователями.
Переменный ток (AC) и постоянный ток (DC)

Могут быть предоставлены и другие положительные характеристики устройств DG, такие как предоставление вспомогательных услуг, активное управление сетью, максимальное извлечение мощности, контроль гармоник, реактивная поддержка и регулирование напряжения.

Силовая электроника и ветроэнергетика

Цель этой категории заключается в начальном подключении турбины к энергосистеме. Когда это происходит, возникает переходный процесс с высокими пусковыми токами. Эти токи могут иметь свои значения существенно сниженными с использованием тиристорного преобразователя, устройства плавного пуска. После этого переходного режима обходной переключатель подключает ветровую турбину напрямую к сети.

На рисунке 58 показаны конфигурации ветряных турбин.

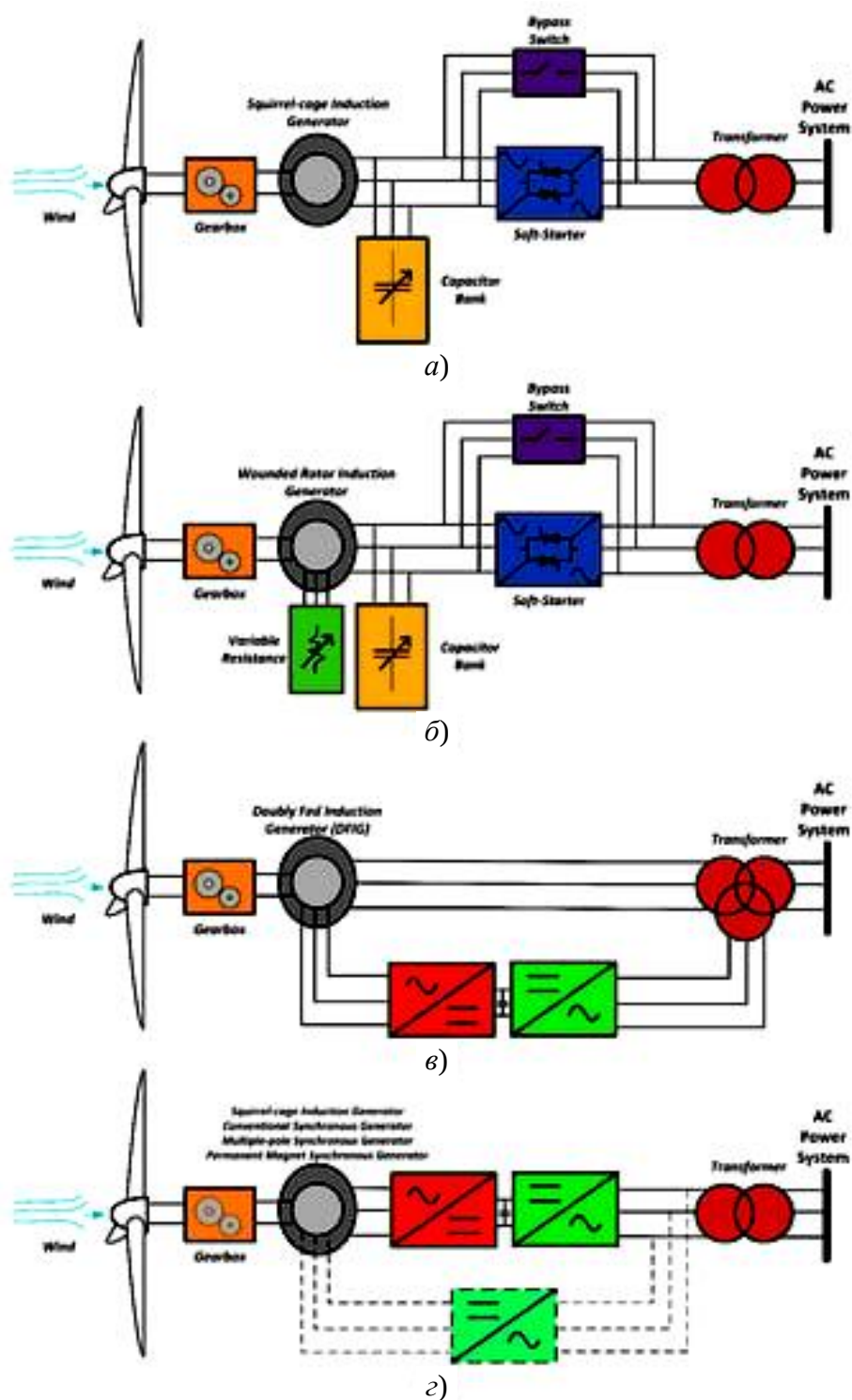


Рис. 58. Конфигурации ветряных турбин:

a – независимая; *б* – частично зависимая с сопротивлением ротора;
в – частично зависимая DFIG; *г* – полностью зависящая от силовой электроники

Вторая классификация турбин, частично зависимых, может быть разделена следующим образом: роторное сопротивление и асинхронный генератор с двойным питанием (DFIG).

Аппараты, которые обеспечивают соответствующую электрическую связь между фотоэлектрическими батареями и системами переменного тока, называются нечетко солнечными инверторами и могут состоять из одной ступени AC-DC или из двух ступеней, имея один или несколько преобразователей DC-DC на передней стороне самого инвертора. В зависимости от расположения между батареями и преобразователями и их количества солнечные инверторы можно классифицировать по пяти категориям.

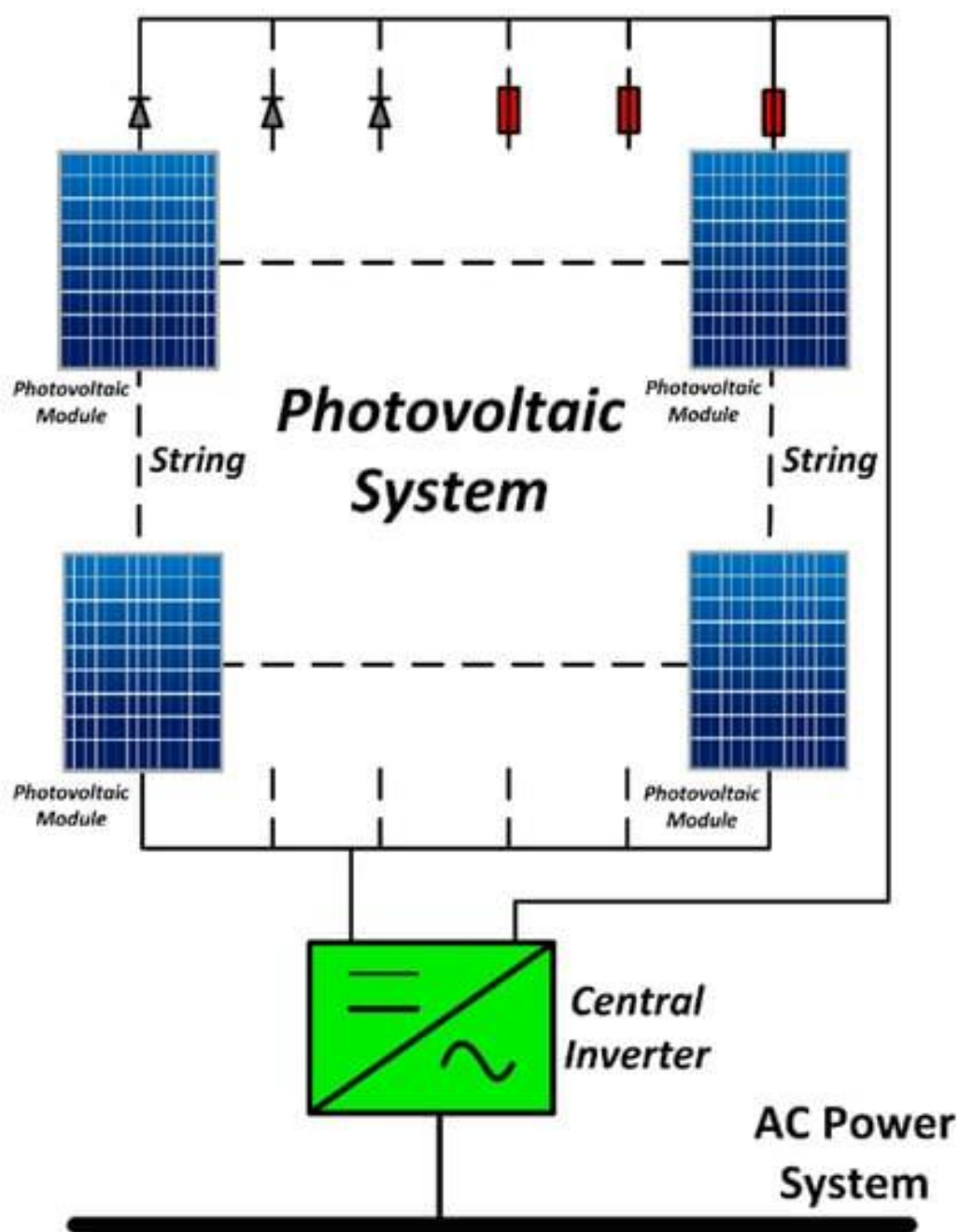
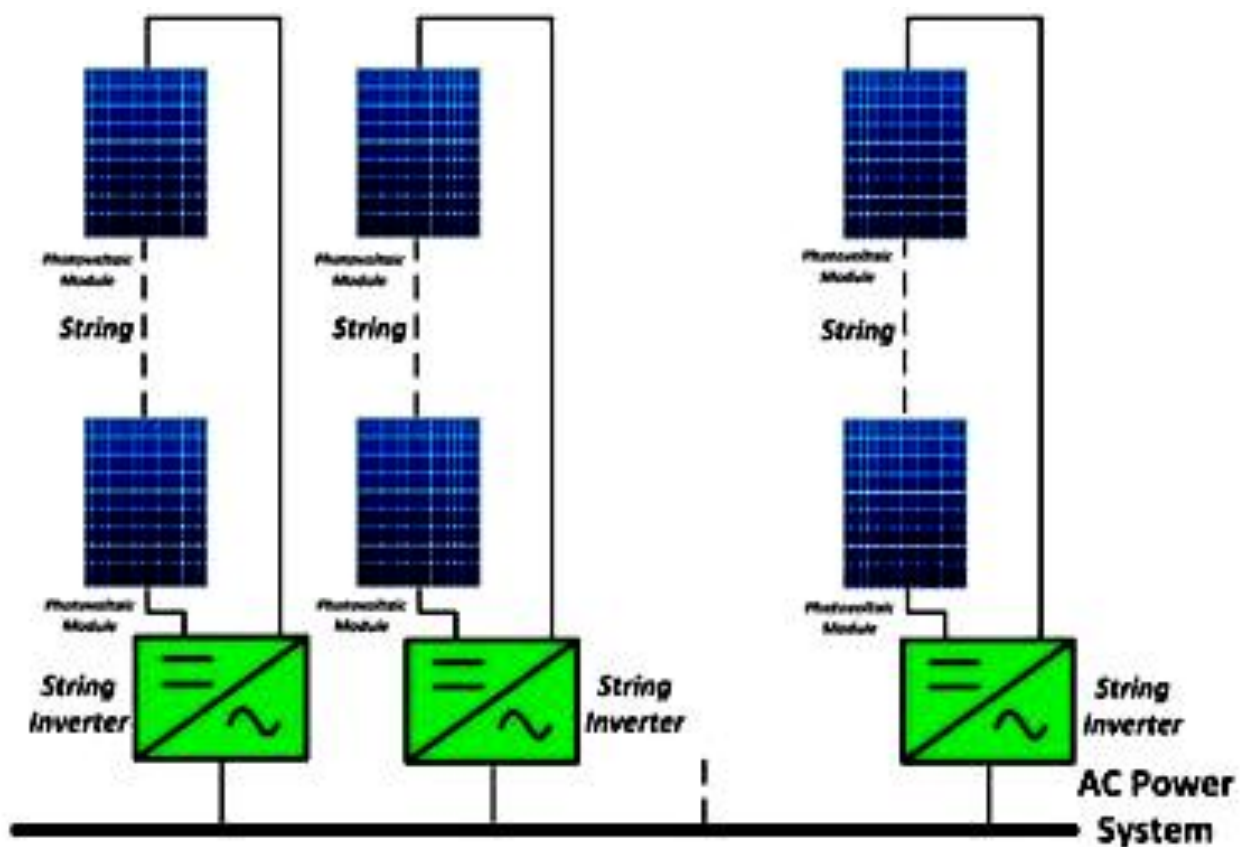
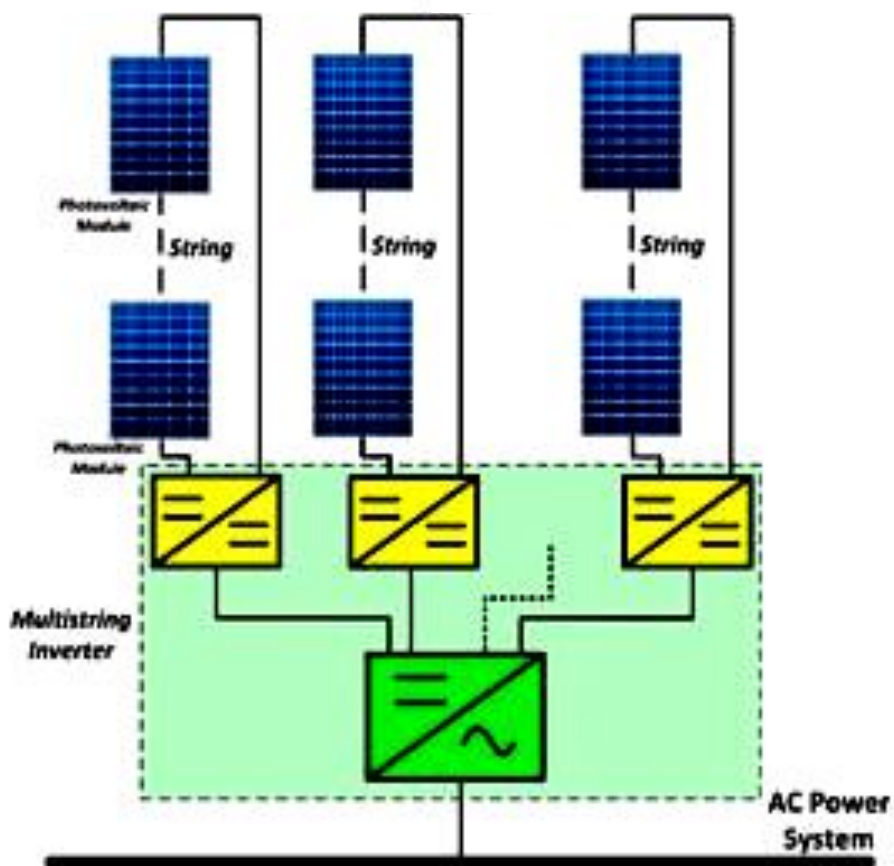


Рис. 59. Конфигурация центрального солнечного инвертора



a)



б)

Рис. 60. Конфигурации солнечных инверторов:
а – строчный инвертор; б – многострочный инвертор

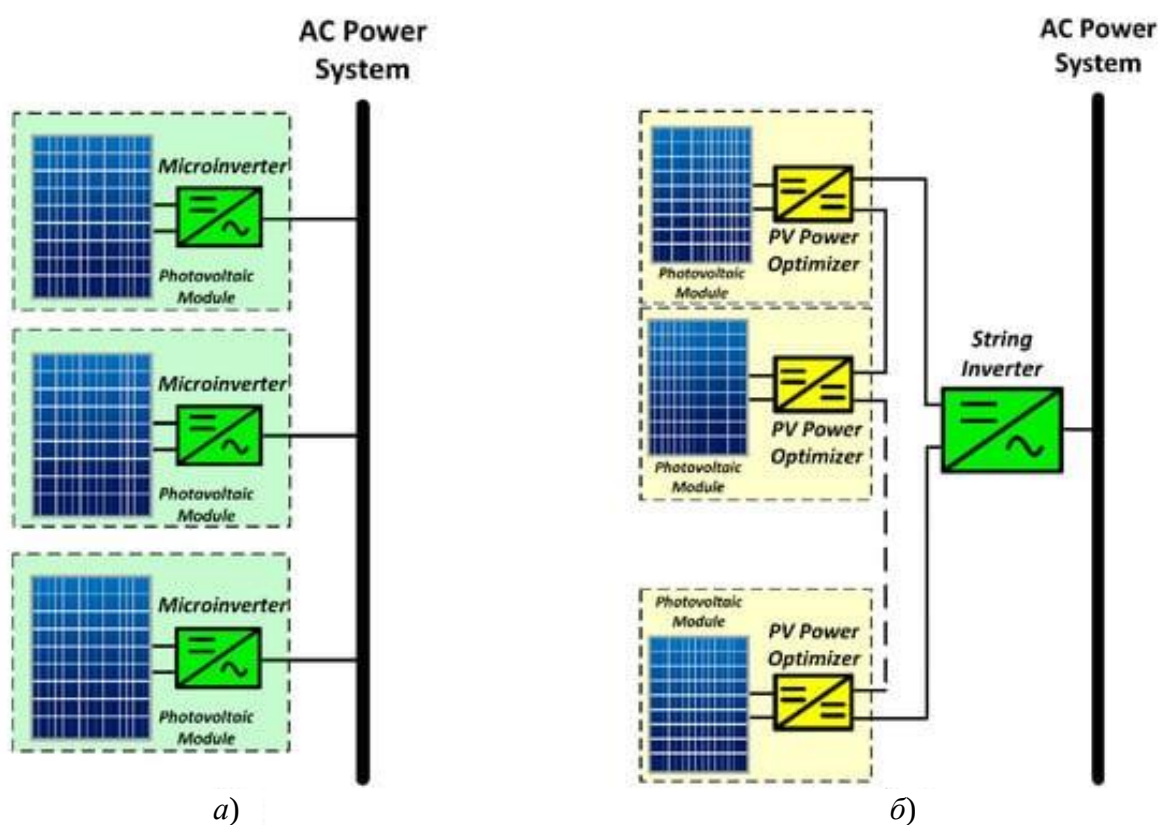


Рис. 61. Конфигурации солнечного инвертора:

a – микроинвертор; *б* – фотоэлектрическая мощность с оптимизатором мощности

Силовая электроника и микротурбины

Микротурбины – это современная технология маломасштабной системы выработки электроэнергии. Микротурбины соединены с генератором в одно-вальной конструкции, что исключает необходимость в редукторе. Поэтому скорость очень высока, достигая от 50 000 до 120 000 об/мин. По этим причинам обычно выбирают генераторы PM SM.

Выходной ток – переменный ток высокой частоты, и соединение с сетью не может быть выполнено напрямую, использование преобразователя силовой электроники является обязательным для этой задачи. Чтобы достичь частоты сети (60 или 50 Гц), к выходу электрической машины можно подключить трех-фазный тиристорный или диодный выпрямитель, за которым следует инвертор источника напряжения, связанный с сетью. На рисунке 62 показан этот тип структуры микротурбины.

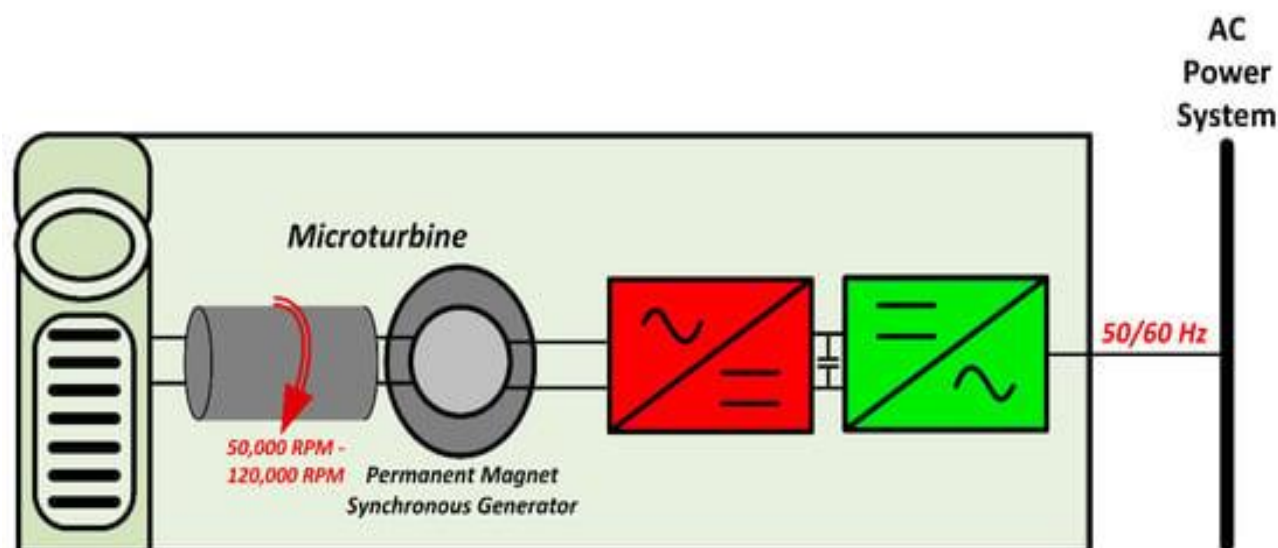


Рис. 62. Структура микротурбины с выпрямителем и инвертором

Однако в последнее время предпочтительным выбором стал выпрямитель с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) из-за снижения производимых гармонических составляющих, которые могут увеличить потери и повысить температуру генератора.

Гибридный DCCB

Компания ABB успешно разработала гибридный DCCB, как показано на рис. 63, который состоит из ветви проводимости и главного выключателя, соединенных параллельно. Ветвь проводимости состоит из сверхбыстрого разъединителя (UFD) и переключателя связи нагрузки (LCS) последовательно. Главный выключатель состоит из нескольких выключающих устройств, соединенных последовательно, и оснащен независимым разрядником.

Стоимость главного выключателя составляет большую часть всего оборудования DCCB. Гибридный DCCB выпрямительного типа, как показано на рис. 64, IGBT по-прежнему использует последовательное соединение, но главный выключатель использует четыре диода D1~D4, который может удовлетворить двухстороннюю способность прерывания тока короткого замыкания только путем одностороннего последовательного соединения, экономя

половину IGBT. В настоящее время цена коммерческого пресованного IGBT примерно в десять раз выше, чем у диодов того же уровня напряжения, поэтому инвестиционные затраты на гибридный DCCB выпрямительного типа, очевидно, снижаются.

Аналогично, для снижения стоимости выключателя предлагается много-портовый DCCB (MDCCB), как показано на рис. 65. Он перепроектирует выключатель на основе всей концепции и объединяет шину постоянного тока и несколько гибридных DCCB, подключенных к той же шине постоянного тока. Этот выключатель может значительно сократить совокупное количество IGBT, используемых во всех DCCB в сети постоянного тока.

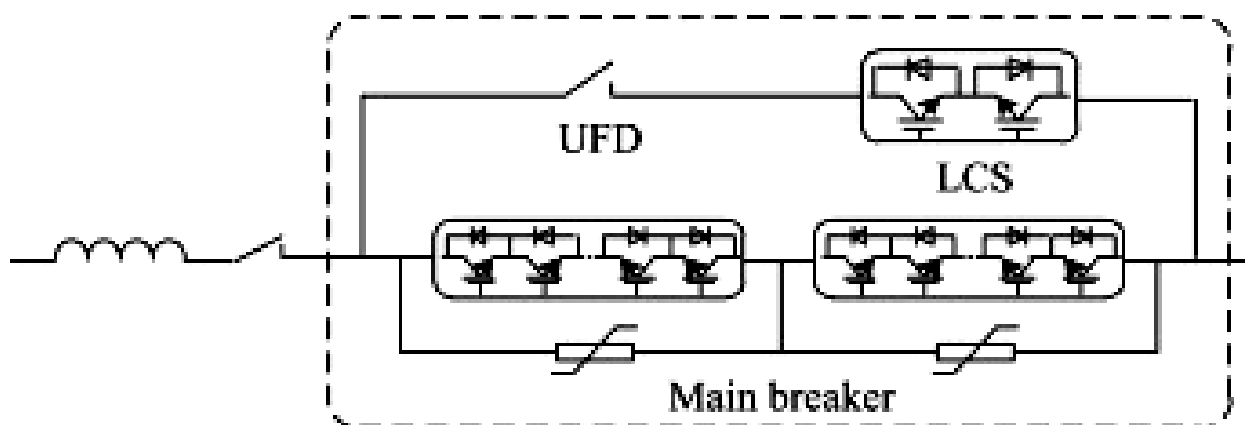


Рис. 63. Гибридный DCCB

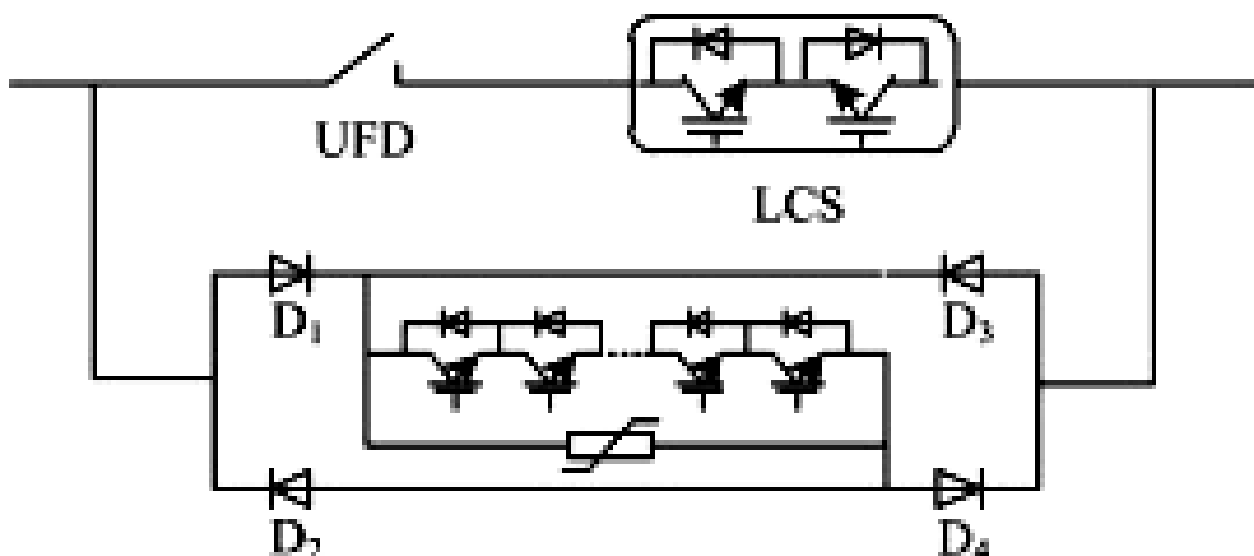


Рис. 64. Гибридный DCCB выпрямительного типа

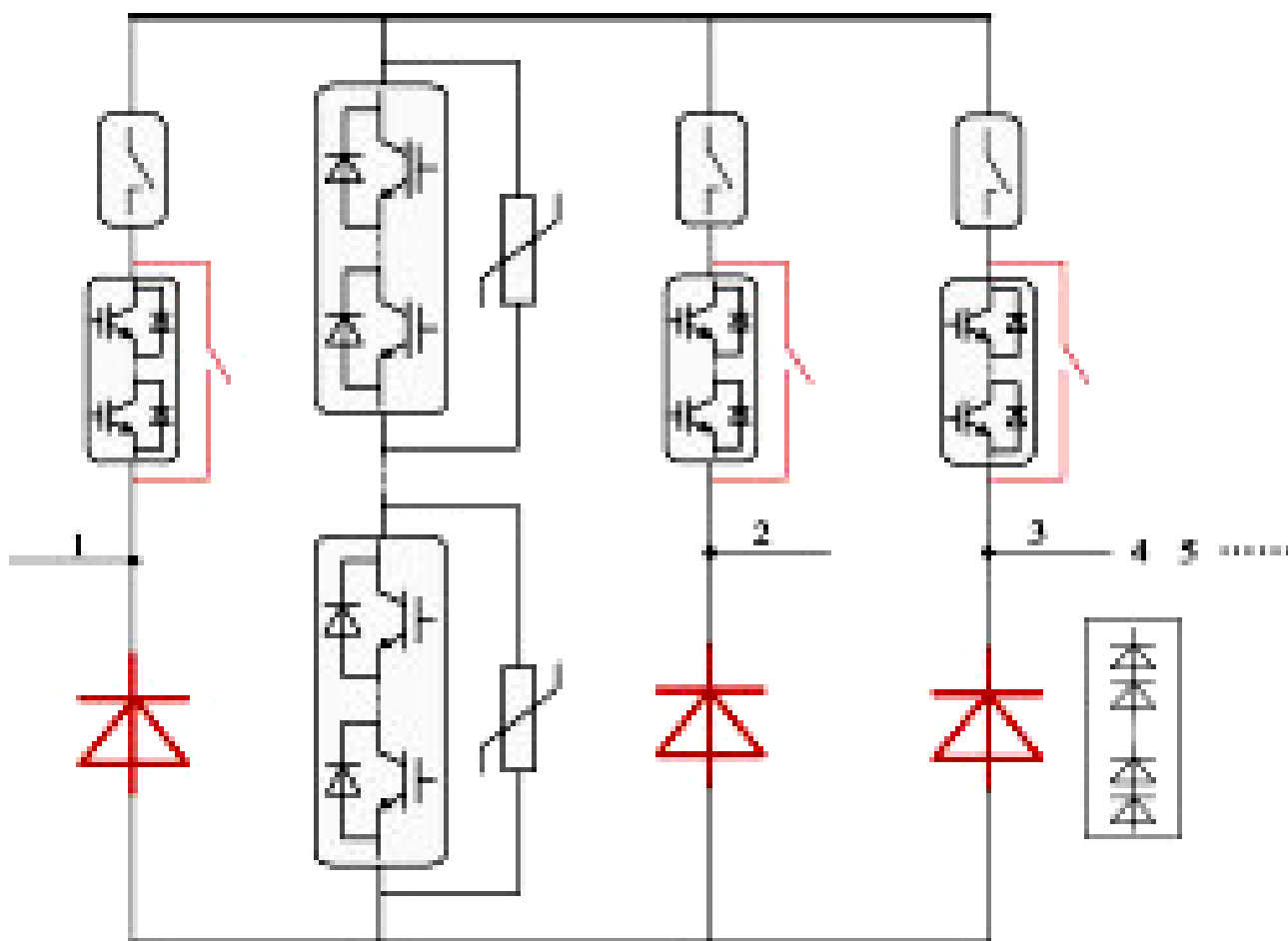


Рис. 65. Многопортовый DCCB

Помимо вышеперечисленных топологических структур, существует множество других форм гибридных DCDC, таких как DCCB токопередающего типа, сборные DCCB, взаимосвязанные DCCB и т.д.

ДКПФК

Сетка постоянного тока обычно содержит сетчатую или кольцевую структуру для повышения эксплуатационной гибкости и надежности системы постоянного тока. Однако легко уменьшить размерность управления потоком мощности постоянного тока, что приводит к неконтролируемому потоку мощности некоторых линий постоянного тока. DCPFC может эффективно увеличить размерность управления потоком мощности и эффективно регулировать распределение потока мощности.

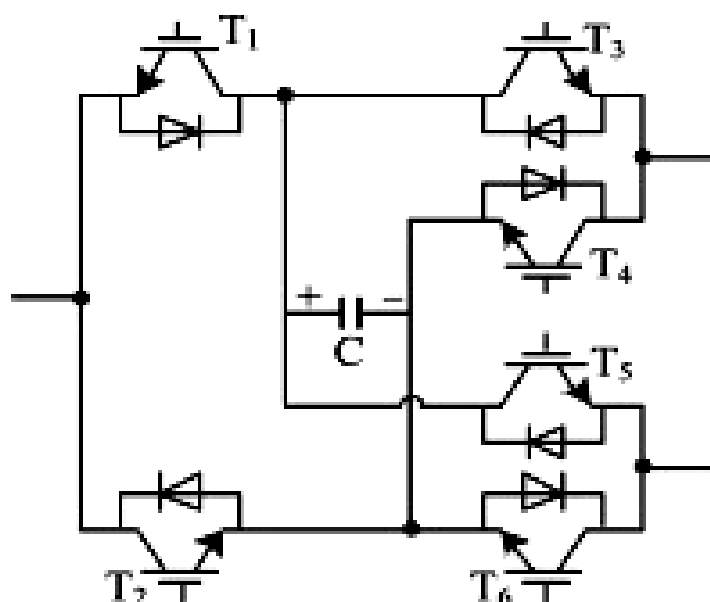


Рис. 66. Межлинейный DCPFC

В настоящее время схемы DCPFC в основном делятся на две категории: одна из них предназначена для изменения сопротивления линии; другая – для изменения постоянного напряжения. Первая может быть реализована с помощью последовательного переменного резистора, а вторая – с помощью последовательного источника напряжения, трансформатора постоянного тока, межлинейного DCPFC и т.д. Среди них межлинейный DCPFC имеет меньшие инвестиционные затраты и низкие эксплуатационные потери, что имеет хорошие перспективы инженерного применения. Один из межлинейных DCPFC показан на рис. 66.

MDCCB с управлением потоком постоянного тока

Топологическая структура

Предлагается управляемый потоком постоянного тока MDCCB (PFC-MDCCB), как показано на рис. 67. Он объединяет несколько гибридных DCCB, подключенных к одной шине постоянного тока, в один. Топология состоит из n обходных ветвей и одного главного выключателя. n представляет собой общее количество преобразовательных станций и линий постоянного тока, подключенных к PFC-MDCCB.

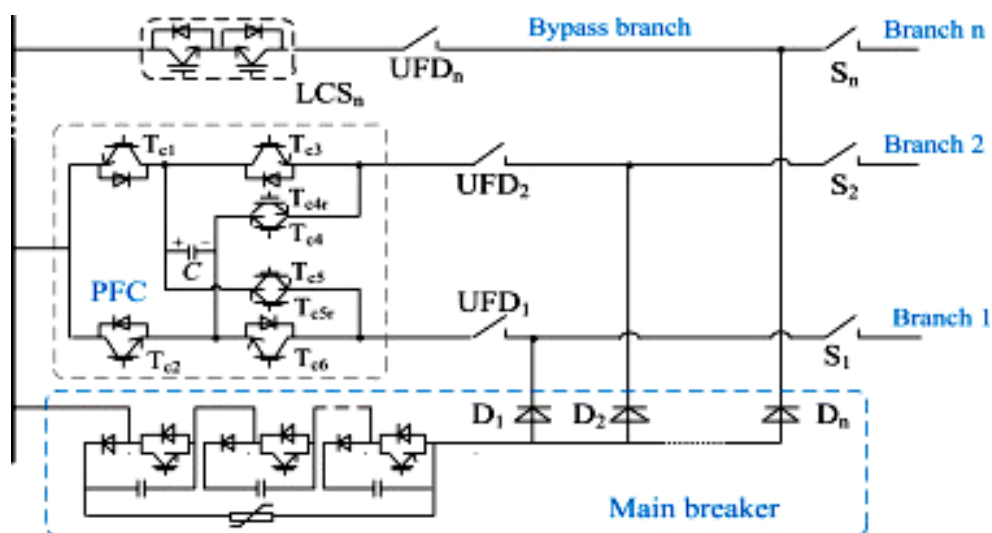


Рис. 67. Топологическая структура PFC-MDCCB

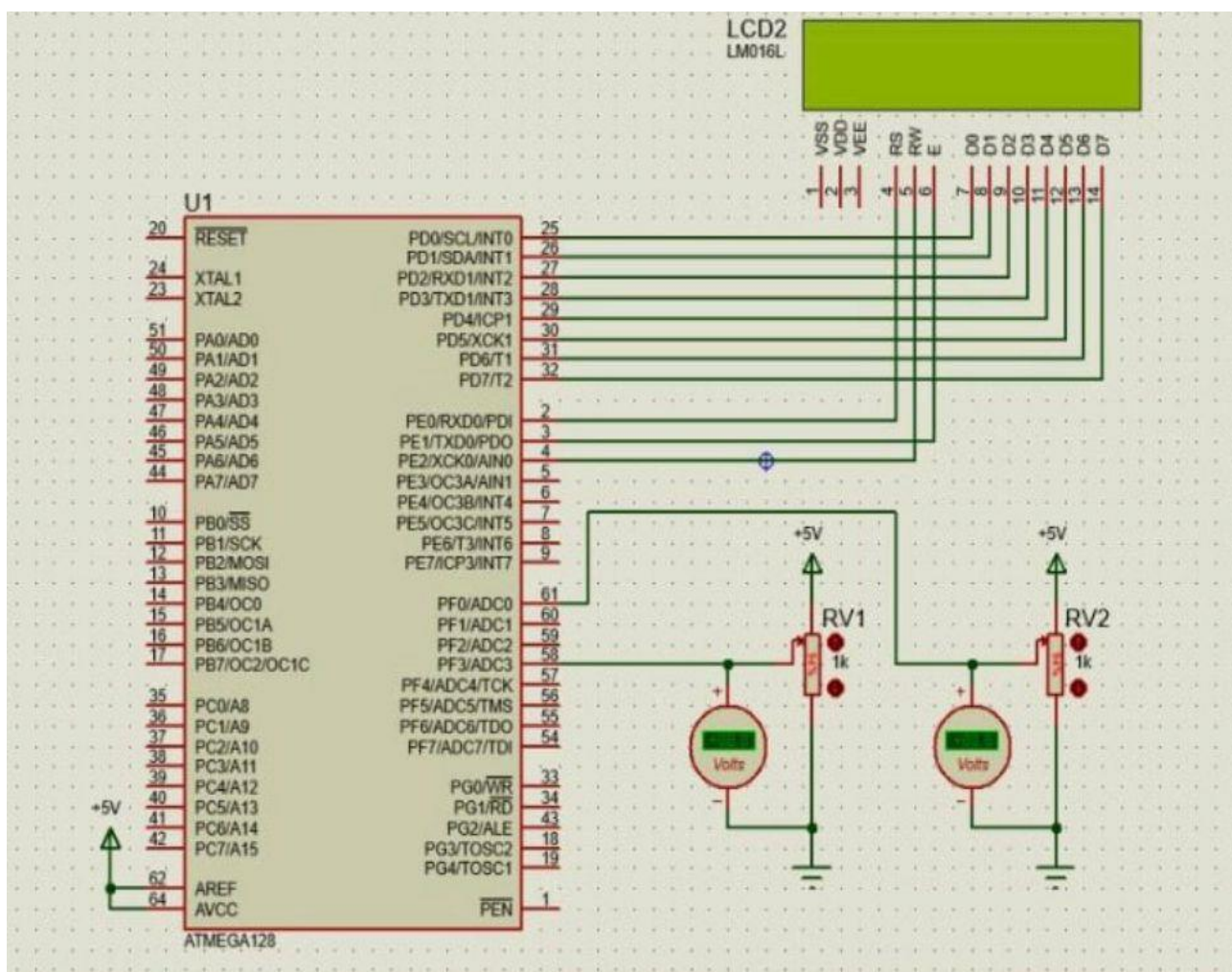
Главный выключатель включает каскадную ветвь, состоящую из подмодулей, ветвь грозозащиты и n диодных ветвей. Подмодуль изменен с полумостового подмодуля, в котором удален верхний IGBT.

В последние десятилетия наблюдается существенный рост исследований и разработок, связанных с адаптацией информационных технологий и микроэлектроники, и электротехники, направленных на улучшение электрических и электронных аппаратов и соответствующего им оборудования. Основной целью этих усилий является повышение эксплуатационной эффективности, безопасности и механического срока службы.

Для унификации процесса проектирования электрических и электронных аппаратов с целью удовлетворения более высоких требований к функциям и производительности представлена практическая реализация технического устройства, в котором имеется возможность применения программного управления.

Для управления электронными аппаратами может быть использована технология проектирования, как на уровне схем, так и с разработкой программного обеспечения. Программирование микроконтроллеров (Atmega128) проиллюстрировано на рис. 68.

Схема контроллера с подключенными измерителями напряжения представлена ниже.



Комплексный подход для проектирования электронных аппаратов с учетом возможности реализации специализированного программного обеспечения показан на рис. 68.

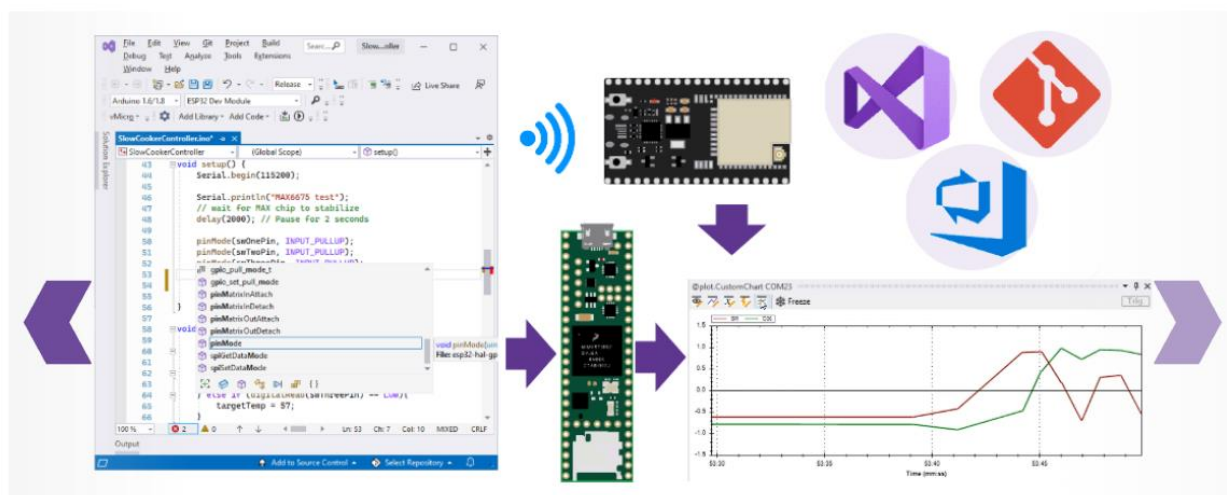


Рис. 68

В среде Atmel studio и моделирование в Proteus.

Язык программирования СИ

Программа для измерения напряжения с помощью контроллера.

```
#define F_CPU 1000000
#include "LCD.h"
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include <avr/interrupt.h>
int D_1, D_2, D_1_1, D_2_1, D_1_2, D_2_2 = 0;
void Init_Port ()
{
    DDRA = 0b11111100;
    DDRC = 0b11110000;
    DDRF = 0x00;
}
void Init_ADC ()
{
    ADMUX = 0b01100011;
    ADCSRA = 0b10110011;
    ADCSRA |= 0b00001000;
}
int Measure_Current ()
{
    ADMUX &= ~(1<<3); //выбор нулевого канала АЦП
    ADCSRA |= (1<<6); //запуск преобразования
    while (!(ADCSRA&(1<<4))) {} //ожидание окончания преобразования
    ADCSRA |= (1<<4); //сброс флага
    return ADCH; //возвращение в точку вызова функции
    //значения регистра ADCH
```

```

}
int Perevod_celoe(int D_0_255)
{
    int D_CELOE;
    D_CELOE = D_0_255/51;
    return D_CELOE;
}
int Perevod_ne_celoe(int D_0_255)
{
    int D_NE_CELOE;
    D_NE_CELOE = D_0_255%51*2;
    return D_NE_CELOE;
}
int main(void)
{
    Init_Port ();
    Init_ADC ();
    LCD_Init();
    LCDSendCommand(DISPLAY_ON);
    ADCSRA |= (1<<ADSC);
    while(1)
    {
        cli();
        ADMUX = 0b01100011;
        D_1 = Measure_Current();
        LCDSendTxt("D: ");
        D_1_1 = Perevod_celoe(D_1);
        D_2_1 = Perevod_ne_celoe(D_1);
        LCDSendInt(D_1_1);
        LCDSendTxt(",");
    }
}

```

```

LCDSendInt(D_2_1);
LCDSendTxt("---");
sei();
ADMUX = 0b01100000;
D_1_2 = Perevod_celoe(D_2);
D_2_2 = Perevod_ne_celoe(D_2);
LCDSendInt(D_1_2);
LCDSendTxt(",");
LCDSendInt(D_2_2);
// while (D > 200)
// {
// LCDSendCommand(CLR_DISP);
// D = Measure_Current ();
// LCDSendTxt("NONONO MR FISH");
// _delay_ms(500);
//
// }
_delay_ms(1000);
LCDSendCommand(CLR_DISP);
}
}
ISR(ADC_vect)
{
D_2 = ADCH;
}

```

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний момент времени сложилась проверенная временем практика эксплуатации электрические и электронных аппаратов, которые обеспечивают выполнение важных и ответственных задач, связанных с коммутацией в номинальных и аварийных режимах электрических сетей. Классические аппараты продолжают эксплуатировать. Однако современные тенденции в сфере разработки полупроводниковых элементов позволяют получать новые типы силовых ключей для выполнения различных функций в электрических сетях, что приводит к распространению электронных аппаратов, которые могут обеспечить реализацию недоступных для электрических аппаратов функций и режимов. Развитие электроэнергетики и появление новых энергоемких потребителей также оказывает влияние на совершенствование и появление новых типов электрических и электронных аппаратов. Следует отметить влияние развития возобновляемой электроэнергетики, которая также активно использует различные виды электрических и электронных аппаратов. Для правильной эксплуатации электрических сетей возобновляемой энергетики требуется новый тип активно адаптивных электрических сетей, которые также будут реализовываться на новых типах электрических и электронных аппаратов.

Следует также отметить возможность дистанционной коммутации и использования информационных потоков для координации и контроля работы различных типов электрических и электронных аппаратов. Возможно совмещение в практике применения электронных и электрических аппаратов, что приводит к повышению надежности и реализации новых функций как самодиагностики, мониторинга, так и управления.

Развитие электронных аппаратов также основано на новых методах математического моделирования и применения для их управления программного обеспечения. Новые технологии 3D-печати позволяют существенно улучшить многие механические элементы электрических аппаратов, что связано с более точным и оптимальным сочетанием формирования деталей при аддитивной технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е изд. – М. : Энергоиздат, 2003. – 648 с.
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, СО 153-34.20.501-2003, ОРГРЭС.
3. ГОСТ 17703–72. Аппараты электрические коммутационные. Основные понятия (от 01.06.2005).
4. ГОСТ Р 50345–99. Аппаратура малогабаритная электрическая. Автоматические выключатели для защиты от сверхтоков бытового и аналогичного назначения.
5. ГОСТ 12434–83. Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия.
6. Электрические и электронные аппараты. Ч. 1. Электрические аппараты : учебное пособие / сост. : П. С. Гура и др. ; Петрозав. гос. ун-т. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2016. – 71 с.
7. Электрические аппараты [Электронный ресурс] : учебник и практикум для вузов / под ред. П. А. Курбатова // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – М. : Юрайт, 2024. – 250 с. – URL : <https://urait.ru/bcode/538695> (дата обращения: 01.12.2024).
8. Чунихин, А. А. Электрические аппараты. Общий курс: выставочные материалы / А. А. Чунихин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Альянс, 2013. – 719 с.
9. Электрические и электронные аппараты / Ю. К. Розанов и др. – М. : Информэлектро, 2001.
10. Беляков, Ю. С. Электромагнитные переходные процессы и токи короткого замыкания в электрических системах Ч. 1. Основные положения электромагнитных переходных процессов и токов короткого замыкания : учебное пособие для студентов физико-технического факультета / Ю. С. Беляков. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2014. – 68 с.

11. Задачник по электрическим аппаратам / Г. В. Буткевич и др. – М. : Высшая школа, 1977.
12. Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией / Г. Е. Агафонов, И. В. Бабкин, Б. Е. Берлин и др. ; под ред. Ю. И. Вишневого. – СПб. : Энергоатомиздат, 2002. – 727 с.
13. Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией / Г. Е. Агафонов, И. В. Бабкин, Б. Е. Берлин и др. ; под ред. Ю. И. Вишневого. – СПб. : Энергоатомиздат, 2002. – С. 708 – 722.
14. Выбор и применение низковольтных электрических аппаратов распределения, управления и автоматики : справочное пособие / Е. Г. Акимов, Ю. С. Коробков, В. П. Соколов, Е. В. Таланов. – М. : МЭИ, 2016. – 345 с.
15. Проектирование электрических аппаратов : учебник для вузов / Г. Н. Александров, В. В. Борисов, Г. С. Каплан и др. ; под ред. Г. Н. Александрова. – Ленинград : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 448 с.
16. Электрические и электронные аппараты : учебное пособие / А. Е. Сидоров, О. Ю. Маркин, Л. В. Долманюк и др. – Казань : Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – 126 с.
17. Theoretical and Numerical Stress Analysis in the CAM of a Medium Voltage Switchgear Vacuum Circuit Breaker Supported by image Processing of Deformation / M. Matin, E. Fatahi, H. Darijani, A. Arjmand // Forces in Mechanics. – 2024. – No. 17. – P. 100298.
18. Hasan, M. M. DC Circuit Breaker: A Topology with Regenerative Current Breaking Capability for DC Microgrid Applications / M. M. Hasan, R. Kannan, S. M. Muyeen // Electric Power Systems Research. – 2024. – No. 234. – P. 110544.
19. Diode Clamped Solid-State Circuit Breaker: A Novel Solid-State Circuit Breaker without Dynamic Voltage Unbalancing Issues / T. Pang, M. F. Rahman, E. Shoubaki, M. Manjrekar // 2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2020. – No. 360. – P. 2715 – 2720.
20. Development of a Novel Full Thyristors Hybrid DC Circuit Breaker Combining Vacuum and Gas Integrated Series Switch / Xian Cheng, Yadong Yu,

G. Ge, T. Wu // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2024. – No. 162. – P. 110257.

21. State-of-the-Art on Advanced Technologies of Solid-State Circuit Breaker for Reliable and Sustainable Power Supply: A Bibliometric Analysis and Future Guidelines / M. F. Roslan, Rahman Reza, M. Mansor, et al. // Alexandria Engineering Journal. – 2024. – No. 104. – P. 636 – 664.

22. Analysis of Multiple-Faults of High-Voltage Circuit Breakers Based on Non-Negative Matrix Decomposition / Y. Zhou, Z. Ma, H. Chen, R. Wang // Global Energy Interconnection. – 2024. – No. 7(2). – P. 179 – 189.

23. Duan, Y. Prediction and Scheduling of Multi-Energy Microgrid Based on BiGRU Self-Attention Mechanism and LQPSO / Y. Duan, P. Li, J. Xia // Global Energy Interconnection. – 2024. – No. 7(3). – P. 347 – 361.

24. Power equipment Vibration Visualization Using Intelligent Sensing Method Based on Event-Sensing Principle / M. Zhao, X. Shen, L. Su, Z. Dong // Global Energy Interconnection. – 2024. – No. 7(2). – P. 228 – 240.

25. Малые гидроэлектростанции России: именной указатель, навигатор и указатель географических координат GPS/ГЛОНАСС : электронный справочник / сост. : А. О. Егоров и др. ; Петрозав. гос. ун-т, физико-техн. ин-т. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2022.

26. Олышанский, М. А. Анализ многосеточного метода для уравнений конвекции-диффузии с краевыми условиями Дирихле / М. А. Олышанский // Вычисл. матем. и матем. физ. – 2004. – Т. 44, № 8. – P. 1450 – 1479.

27. Цветков, С. В. Метод конечных элементов для решения одного класса трехмерных внешних задач электродинамики / С. В. Цветков // Вычисл. матем. и матем. физ. – 1992. – Т. 32, № 7. – P. 1035 – 1045.

28. Голубцов, М. С. Микроконтроллеры AVR: от простого к сложному / М. С. Голубцов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2003.

29. Брайан Керниган, Деннис Ритчи. Язык программирования Си. – СПб. : Невский диалект, 2000. – 352 с.

30. А. Хейлсберг, М. Торгерсен, С. Вилтамут, П. Голд. Язык программирования C#. Классика Computers Science. 4-е изд. – СПб. : Питер, 2012. – 784 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТОВ	5
2. ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ГАШЕНИЯ ИЛИ НЕДОПУЩЕНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ.....	13
3. АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ	22
4. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СЕТЕЙ	33
5. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ.....	38
6. КОНТАКТОРЫ	45
7. СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ КЛЮЧИ	48
8. ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ (LCC) ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТОВ.....	52
9. СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	75
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	76

Учебное электронное издание

ЩЕГОЛЬКОВ Александр Викторович
КОБЕЛЕВ Александр Викторович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Учебное пособие

Редактор Л. В. Комбарова
Графический и мультимедийный дизайнер Т. Ю. Зотова
Обложка, упаковка, тиражирование Л. В. Комбарово й

ISBN 978-5-8265-2912-6



Подписано к использованию 02.06.2025.

Тираж 50 шт. Заказ № 70

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел./факс (4752) 63-81-08.
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru