

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»**

ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Н.Ю. Сипайлова

Издательство
Томского политехнического университета
2014

УДК 621.31.001.6(0758)

ББК 31.264я73

С39

Вопросы проектирования электрических аппаратов: учебное пособие / Н.Ю. Сипайлова; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 155 с.

Пособие содержит общие сведения о проектировании электрических аппаратов, методические рекомендации по проектированию основных узлов аппаратов, расчетные формулы и примеры расчета, а также справочный материал. Пособие направлено на организацию помощи студентам для выполнения курсового проекта по дисциплине «Электрические и электронные аппараты».

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.31.001.6(0758)

ББК 31.264я73

Рецензенты

Кандидат технических наук, начальник испытательной лаборатории
ТЭМЗ,
Р.Я. Кляйн

Кандидат технических наук, доцент ТПУ
Е.П. Богданов

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2014

© Сипайлова Н.Ю., 2014

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЕКТИРОВАНИИ	5
1.1. Понятие и виды проектирования	5
1.2. Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам, и принципы проектирования аппаратов	7
1.3. Объем и структура курсового проекта	11
2. ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ..	13
2.1. Проектное техническое задание	14
2.2. Обзор существующих конструкций.....	15
2.3. Техничко-экономическое обоснование проекта	16
2.4. Выбор конструктивной схемы.....	17
2.5. Проектирование проводников и контактных соединений токоведущего контура	18
2.6. Проектирование коммутирующих контактов.....	19
2.7. Проектирование дугогасительных устройств	21
2.8. Проектирование электромагнитов	24
3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПУСКАТЕЛЕЙ И КОНТАКТОРОВ	27
3.1. Типы магнитных контакторов и пускателей	27
3.2. Технические параметры контакторов и пускателей	34
3.3. Устройство магнитных контакторов и пускателей	35
3.4. Расчет узлов контакторов постоянного и переменного тока	43
3.4.1. Расчет токоведущей шины.....	43
3.4.2. Примеры расчета токоведущей шины	47
3.4.3. Расчет коммутирующих контактов.....	52
3.4.4. Примеры расчета коммутирующих контактов	66
3.4.5. Расчет дугогасительных устройств постоянного тока.....	71
3.4.6. Пример расчета дугогасительного устройства постоянного тока	82
3.4.7. Расчет дугогасительных устройств переменного тока	84
3.4.8. Пример расчета дугогасительного устройства переменного тока.....	89
3.4.9. Расчет электромагнитов	90
3.4.10. Примеры расчета электромагнитов	100
ПРИЛОЖЕНИЕ I	109
ПРИЛОЖЕНИЕ II	111
ПРИЛОЖЕНИЕ III	119
ПРИЛОЖЕНИЕ IV	123
ПРИЛОЖЕНИЕ V	131
ПРИЛОЖЕНИЕ VI	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	152

ПРЕДИСЛОВИЕ

В связи с увеличением производства и потребления электроэнергии создание электрических аппаратов является важной практической задачей.

Разработка новых материалов и технологических процессов, результаты научных исследований, развитие и применение новых методов расчета позволяют проектировать более совершенные аппараты.

Проектирование электрического аппарата представляет собой творческий процесс, целью которого является создание аппарата, удовлетворяющего требованиям технического задания и соответствующего по своим технико-экономическим показателям современному уровню развития науки и техники, а также технологии и организации производства.

Выполнение курсового проекта формирует у студента компетенции инженерного проектирования, помогает расширить и углубить знания, полученные на лекциях, лабораторных занятиях и при самостоятельном изучении дисциплины «Электрические и электронные аппараты».

Вопросы проектирования электрических аппаратов достаточно широко представлены в литературе [3-5, 7, 10-12, 14, 16, 18, 19, 23]. Также имеется большое количество учебников и учебных пособий, посвященных рассмотрению физических процессов в электрических аппаратах и содержащих необходимые расчетные формулы [1, 2, 6, 8, 9, 13, 15, 21, 22, 25, 27-31].

Цель настоящего пособия – представить в краткой форме логику процесса проектирования электрического аппарата и помочь студентам организовать работу над курсовым проектом по дисциплине «Электрические и электронные аппараты».

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЕКТИРОВАНИИ

1.1. Понятие и виды проектирования

Под проектированием (**проектирование** – от лат. Projectus – брошенный вперёд) понимается процесс создания **проекта**, т.е. прототипа (прообраза возможного объекта), достаточного для организации его производства и эксплуатации.

Проект технического объекта, таким образом, представляет собой совокупность данных и описаний, дающих необходимую информацию для изготовления и эксплуатации объекта.

Проектирование предполагает создание нового объекта, который обладает наилучшими или заранее обусловленными параметрами, свойствами и технико-экономическими показателями. При проектировании, с одной стороны, используются новые научно-технические идеи и знания, а с другой – элементы прежних решений в новом целом.

Проектирование базируется на следующих общих **принципах**:

1) **иерархичности** (разбиение на уровни описания – система – подсистемы – агрегаты – узлы – конструктивные элементы);

2) **декомпозиции** (разбиение соответствующего уровня описания объекта на составные части с целью их отдельного проектирования);

3) **многоэтапности** (подразделение на стадии, этапы, проектные процедуры и операции);

4) **типизации и унификации** проектных решений, методологии и средств проектирования (выбор таких составляющих объекта проектирования и методик его расчета которые применимы для возможно более широкого класса объектов и процедур);

5) **итерационности** (повторение проектных процедур с целью достижения наилучшего результата).

Различают **промышленное** и **учебное** проектирование.

В соответствии с принципом многоэтапности в **промышленном проектировании** выделяются несколько стадий (табл. 1).

При **учебном проектировании** выполняется **курсовой проект**, подразумевающий проектирование одного из видов электрического аппарата (контактного или бесконтактного – например реле, контактора, пускателя, предохранителя, автоматического выключателя), предусмотренного техническим заданием (ТЗ).

Таблица 1

Стадии промышленного проектирования

Название стадии	Цель	Сущность и содержание	Результат
Техническое задание (ТЗ)		Установление назначения, технических характеристик, показателей качества и требований, предъявляемых к разрабатываемому изделию.	Вариант технического задания.
Техническое предложение (предварительное проектирование)	Выбор прототипов и их сравнительный анализ	Отбор из нескольких (в пределах одного) вариантов, подлежащих дальнейшей разработке.	Информация о целесообразных проектных решениях, принимаемых к рассмотрению.
Эскизное проектирование	Выбор окончательного варианта	Детальная проработка возможностей создания изделия, удовлетворяющего ТЗ. Уточнение и корректировка ТЗ задания и технического предложения. Более точная оценка характеристик проектируемого объекта. Проведение расчетных и экспериментальных работ.	Эскизный проект (совокупность документов, содержащих принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия и др.)
Техническое проектирование	Выбор окончательного варианта конструктивного исполнения объекта	Проведение точных расчетов и экспериментальных исследований характеристик объекта и узлов, установление режимов функционирования и порядка эксплуатации, анализ технологических процессов, уточнение оценки экономической эффективности.	Комплект технической документации на изделие, включая конструкторскую, программную, технологическую и эксплуатационную.
Рабочее проектирование	Разработка рабочей документации	Выбор технологических процессов по изготовлению всех узлов, деталей и компоновка объекта проектирования в целом, учитывающая производственные возможности, уточнение конструктивного оформления объекта и определение его показателей, оформление полной проектной документации.	Комплект рабочей документации.

Задачами учебного проектирования являются: 1) выбор прототипа; 2) расчет основных частей, узлов и деталей аппарата с обоснованием принимаемых решений; 3) выполнение чертежа общего вида с разрезами и чертежей узлов и деталей, предусмотренных ТЗ; 4) оформление расчетно-пояснительной записки.

1.2. Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам, и принципы проектирования аппаратов

Спроектированный электрический аппарат должен удовлетворять ряду **требований**, предъявляемых к техническим объектам, которые формулируются в стандартах, технических условиях и заданиях.

1. Функционально-технические требования.

1.1. Нагревостойкость частей аппарата при нормальном рабочем и аварийном режимах.

1.2. Электрическая прочность изоляционных частей и промежутков при продолжительном максимальном рабочем напряжении и наилучших условиях эксплуатации (атмосферные осадки, пыль и т.д.), а также при коммутационных и грозовых перенапряжениях.

1.3. Механическая прочность и износостойкость частей аппарата в пределах гарантируемых чисел операций, срока службы при нормальном рабочем и аварийном режимах.

1.4. Коммутационная способность при нормальном рабочем и аварийном режимах (для коммутирующих аппаратов).

1.5. Специфические требования для отдельных видов аппаратов.

1.6. Простота конструкции, малые массы и габариты.

2. Эксплуатационные требования.

2.1. Учет влияния окружающих условий.

2.2. Надежность.

2.3. Долговечность.

2.4. Ремонтпригодность (простота и удобство осмотра, замены частей).

2.5. Малые эксплуатационные расходы.

3. Социальные требования.

3.1. Облегчение труда условий обслуживающего персонала.

3.2. Безопасность производства, монтажа и эксплуатации.

3.3. Эстетичность конструкции.

4. Экономические требования.

4.1. Низкая себестоимость.

4.2. Низкие капиталовложения при монтаже и эксплуатации.

4.3. Низкие эксплуатационные расходы.

5. Технологические требования.

5.1. Технологичность конструкции.

6. Производственные требования.

6.1. Учет производственных возможностей.

6.2. Учет возможности модификации, встраивания в комплектные устройства, серийности производства.

При проектировании электрического аппарата необходимо учитывать климатические условия и место установки (категория размещения), механические воздействия, параметры окружающей среды (температура, высота над уровнем моря).

Основные принципы проектирования, вытекающие из требований, предъявляемых к электрическим аппаратам, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Принципы проектирования электрических аппаратов

Принцип	Достижимая цель	Средство достижения цели	Количественные показатели оценки результата
Прогрессивность – техническое совершенство конструкции.	Повышение технического уровня аппарата, увеличение производительности и улучшение условий труда.	Принципиально новые конструктивные решения, автоматизация управления, применение более совершенных материалов.	Достигнутые технические параметры (сопоставляются с ранее имеющимися).
Конструктивность – простота и целесообразность конструкции, минимизация массы и габаритов, блочность конструкции.	Получение высоких технико-экономических показателей, облегчение производства и эксплуатации.	Критический анализ аналогичных конструкций, вариантное проектирование, использование нормализованных деталей и узлов, выбор материалов и конструкций, оптимизация.	Материалоемкость (масса и габариты). Количество сборочных узлов, оригинальных и заимствованных деталей. Коэффициент конструктивной приемственности.
Экономичность – высокая эффективность конструкции в производстве и эксплуатации.	Получение минимальных себестоимости и эксплуатационных расходов.	Определение технико-экономических показателей и их корректировка при проектировании, оптимизация по принципу минимума суммарных затрат.	Себестоимость. Эксплуатационные расходы. Экономический эффект. Экономическая эффективность. Срок окупаемости.

Продолжение таблицы № 2

<p>Технологичность – простота и удобство изготовления, сборки и регулировки деталей, узлов и конструкции в целом, технологическая преемственность изделия в производстве.</p>	<p>Уменьшение трудоемкости изготовления деталей и сборки изделия, возможность применения наиболее производительных технологических процессов и их типизация.</p>	<p>Привлечение технологов к участию в разработке конструкции с начальной стадии проектирования.</p>	<p>Общая трудоемкость и трудоемкость по видам работ. Средневзвешенный класс точности изготовления деталей. Средний разряд работ. Коэффициент технологической преемственности.</p>
<p>Надежность – высокие эксплуатационные качества изделия, четкость работы при нормальных и ненормальных режимах работы, долговечность. Простота и безопасность монтажа и обслуживания.</p>	<p>Обеспечение длительной бесперебойной работы, увеличение срока службы, обеспечение требования техники безопасности и производственной санитарии.</p>	<p>Учет при проектировании и конструировании эксплуатационных требований, опыта эксплуатации и аварийной статистики по объектам аналогичного назначения.</p>	<p>Срок службы. Критерии надежности.</p>
<p>Эстетичность – цельность, соразмерность, выразительность формы изделия, наилучшее ее соответствие функции и назначению изделия.</p>	<p>Создание наиболее благоприятных условий для работы обслуживающего персонала, повышение культуры обслуживания.</p>	<p>Привлечение к конструированию дизайнеров.</p>	<p>Рост производительности труда.</p>
<p>Эргономичность – удобство обслуживания и ремонта.</p>	<p>Создание оптимального режима работы человека в системе «человек-машина».</p>	<p>Учет при проектировании человеческого фактора.</p>	<p>Рост производительности труда.</p>

В соответствии с принципом декомпозиции электрический аппарат разбивается на **элементы**.

Составными элементами электрических аппаратов являются **детали, узлы и группы**.

Деталь – элементарная часть аппарата, изготовленная из целого куска материала без применения сборочных операций.

Узел (сборочная единица) – разборное или неразборное соединение двух или большего числа деталей (в узел также могут входить один или несколько мелких узлов). Узел, с которого начинается сборка аппарата, называется базовым.

Группа (часть аппарата) – соединение узлов и деталей, являющееся одной из основных составных частей аппарата, а также совокупность узлов и деталей аппарата, объединенных общностью выполняемых ими функций.

Классифицировать **части** наиболее распространенных аппаратов видов аппаратов можно следующим образом.

1. Проводники токоведущего контура и их контактные соединения.
2. Коммутирующие контакты.
3. Дугогасительные устройства.
4. Механизмы.
5. Электромагниты.
6. Электроизоляционные детали и узлы.
7. Корпусные детали, оболочки и резервуары.

Детали и узлы аппаратов классифицируются по конструктивно-технологическим признакам, следующим образом.

1. Корпусные детали, оболочки и резервуары.
 - 1.1. Корпусы, рамы, каркасы и другие основания аппаратов.
 - 1.2. Шкафы, ящики, коробки, кожухи и другие оболочки.
 - 1.3. Масляные баки, воздушные и другие резервуары.
2. Детали механизмов.
 - 2.1. Валики, валы, подшипники, втулки, рычаги, шестерни, зубчатки, кулачки, кулачковые шайбы и др.
 - 2.2. Держатели контактов, якоря магнитопроводов и другие детали контактных и электромагнитных механизмов.
 - 2.3. Цилиндры, поршни, корпуса вентиляей, детали пневматических и гидравлических механизмов.
 - 2.4. Оси, керны, опоры, основания, платы, детали зацепления и другие детали электромеханизмов.
 - 2.5. Пружины.
3. Детали и узлы токоведущих частей.
 - 3.1. Коммутирующие контакты и контактные детали.

- 3.2. Катушки из меди большого сечения.
- 3.3. Жесткие и гибкие электрические соединения и шунты.
- 3.4. Многовитковые катушки.
- 3.5. Элементы резисторов.
- 3.6. Биметаллические элементы.
- 4. Магнитопроводы.
 - 4.1. Магнитопроводы аппаратов постоянного тока.
 - 4.2. Магнитопроводы аппаратов переменного тока.
 - 4.3. Постоянные магниты.
- 5. Электроизоляционные детали и узлы.
 - 5.1. Детали из пластмассы.
 - 5.2. Детали, получаемые механической обработкой из изоляционных материалов и дерева.
 - 5.3. Детали, имеющие намотанную и слоистую изоляцию.
 - 5.4. Детали из керамики.
 - 5.5. Детали и узлы с литой изоляцией.

1.3. Объем и структура курсового проекта

Курсовой проект – учебная работа, содержащая результаты выполнения задачи, сформулированной в техническом задании, включает текстовую документацию (расчетно-пояснительная записка) и графический материал (сборочный чертеж спроектированного аппарата).

Объем расчетно-пояснительной записки должен составлять 30-35 страниц рукописного текста. В ней должны быть приведены:

- титульный лист;
- задание;
- реферат;
- содержание работы (оглавление);
- введение;
- основные разделы, выполненные в соответствии с ТЗ;
- заключение;
- перечень использованных источников;
- приложения.

Титульный лист является первым листом пояснительной записки и оформляется по форме, регламентируемой СТО ТПУ [37]. Пример оформления титульного листа представлен в прил. I.

Задание (техническое задание) на курсовое проектирование является документом, в котором формулируется тема курсового проекта с указанием типа аппарата, исходных данных в виде номинальных параметров, характеристик объекта проектирования и режимов работы,

указывается содержание пояснительной записки (текстового документа) и графической части.

При учебном проектировании задание, соответствующим образом оформленное преподавателем, выдается каждому студенту.

Пример оформления задания представлен в прил. I.

Пояснительная записка должна в краткой и четкой форме раскрывать тему курсового проекта.

Во введении приводятся общие сведения об исследуемом аппарате (назначение, область применения, классификация, устройство, принцип действия аппарата, схема подключения), отмечаются основные проблемы при разработке и усовершенствовании аппаратов и пути их решения.

Основная часть включает выбор прототипа, обоснование выбора конструктивных форм и расчеты отдельных узлов аппарата.

Обоснование выбора прототипа осуществляется на основе сравнительного анализа нескольких вариантов электрических аппаратов. При этом описываются технические параметры и характеристики аппаратов, их достоинства и недостатки.

Заключение должно содержать краткие выводы по результатам выполненной работы, оценку полноты решений поставленных задач, разработку рекомендаций по конкретному использованию результатов работы.

В **перечень использованных источников** включаются только те, на которые имеются ссылки в пояснительной записке.

Изложение материала в проектной записке ведется по разделам и пунктам. Порядок пунктов зависит от выбранного метода расчета и вида проектируемого аппарата.

В расчетной части записки приводятся расчетные формулы в символьном виде и с числовыми значениями, а также результаты вычислений с указанием размерности. Все расчеты необходимо снабжать пояснениями и ссылками на литературу.

Оформление записки выполняется в соответствии с требованиями СТО ТПУ, действующими в данный период времени [37].

Записка должна быть подписана исполнителем с указанием даты ее окончания.

Графическая часть проекта включает чертеж общего вида аппарата в 2-х или 3-х проекциях с необходимыми разрезами, чертеж наиболее важных узлов аппарата (в соответствии с ТЗ) и спецификацию узлов и деталей аппарата с указанием материалов.

Выполненный курсовой проект предоставляется преподавателю для проверки и (в случае удовлетворительного исполнения) защищается студентом.

2. ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Несмотря на большое разнообразие электрических аппаратов можно наметить общий ориентировочный **порядок проектирования** электрического аппарата. Этот порядок больше подходит к учебному проектированию. При промышленном проектировании порядок изменяется вследствие разделения его на эскизный, технический и рабочий этапы.

1. Подготовительный этап проектирования.
 - 1.1. Получение и согласование проектно-технического задания.
 - 1.2. Обзор современных конструкций.
 - 1.3. Разработка технико-экономического обоснования создания нового аппарата или серии аппаратов.
2. Выбор конструктивной схемы и конструктивных форм, компоновка конструкции. В расчетно-пояснительной записке дается краткое описание конструкции.
3. Выбор и расчет электрической изоляции.
4. Проектирование проводников и контактных соединений токоведущего контура.
5. Проектирование коммутирующих контактов.
6. Проектирование дугогасительного устройства.
7. Расчет электродинамических усилий.
8. Проектирование механизма привода.
9. Проектирование корпусных и изоляционных деталей, оболочек, резервуаров.
10. Тепловой расчет элементов и аппарата в целом.
11. Конструктивная проработка деталей и узлов аппарата.
12. Эргономический и композиционный анализ.
13. Разработка вопросов технологии.
14. Разработка вопросов обеспечения техники безопасности и охраны труда при эксплуатации и производстве аппарата.
15. Разработка организационных мероприятий, связанных с созданием аппарата.
16. Разработка экономической части проекта.
17. Оформление графической части проекта – чертежей, схем, графиков.
18. Составление заключения и оформление расчетно-пояснительной записки.

Для ряда аппаратов, в частности бесконтактных, порядок содержания проекта несколько иной.

Пункты 12–16 выполняются, если это предусмотрено техническим заданием.

Проектирование аппарата выполняется, в основном, методом последовательных приближений.

2.1. Проектное техническое задание

Задание на проектирование электрического аппарата или серии аппаратов должно содержать достаточные для разработки данные технических параметров, а также эксплуатационные, производственно-технические и экономические требования и сведения.

Ниже перечислены основные *данные, требования и сведения*.

1. Наименование аппарата или серии и назначение.
2. Род тока, номинальное напряжение с указанием частоты, номинальный ток.
3. Род тока и номинальное напряжение цепи управления и других вспомогательных цепей.
4. Число и вид коммутирующих контактов – главных (число полюсов), блокировочных и других вспомогательных.
5. Характер нагрузки и основные эксплуатационные параметры.
 - 5.1. Вид нагрузки.
 - 5.2. Число включений в час и продолжительность включения при кратковременном и повторно-кратковременном режимах.
 - 5.3. Предельная отключающая и включающая способность.
 - 5.4. Термическая и электродинамическая устойчивость.
 - 5.5. Электрическая и механическая износостойкость.
6. Вид механизма включения, действия или реагирования (электромагнитный, индукционный, пневматический, гидравлический, электродвигательный, пружинный, ручной и другие).
7. Способ и условия установки, необходимость и вид оболочки и электромонтажа.
8. Условия эксплуатации.
9. Производственно-технические требования и сведения – характер производства, данные об имеющемся оборудовании, транспортных средствах, технологической оснастке и другие сведения.
10. Экономические и другие требования.

Некоторых из перечисленных требований и сведений может не содержать в проектном задании.

При учебном проектировании в техническое задание также не включается ряд пунктов.

2.2. Обзор существующих конструкций

Проектируемый аппарат должен отвечать современному уровню достижений науки и техники. С этой целью необходимо провести **критический анализ** лучших отечественных и зарубежных аппаратов, имеющих с проектируемым аппаратом одинаковое или подобное применение и близкие технические параметры (см. табл. П.5, прил. П).

Принимаемые для сравнения объекты могут быть основаны на отличных от проектируемого принципах, но они должны быть предназначены для выполнения той же функции.

При проведении обзора необходимо учитывать следующие *условия сопоставимости*.

1. Одинаковые основные параметры (номинальное напряжение, ток, число полюсов). Следует сравнивать удельные показатели, отнесенные к одному полюсу, единице тока и т.д.

2. Одинаковый характер производства (единичный, серийный, массовый).

3. Одинаковая технологическая оснащенность производства. Себестоимость опытных образцов, изготавливаемых с минимально возможной оснасткой, обычно выше, чем при хорошо оснащенном производстве.

4. Одинаковые экономические факторы, так как технические решения, экономически выгодные для одной страны, могут быть не эффективны для другой, вследствие различий в соотношении цен на материалы, электроэнергию и т.д.

При проведении обзора существующих конструкций, помимо краткого описания, перечисления достоинств и недостатков конструкции, необходимо дать количественную оценку качества.

Примерная *схема обзора* выглядит следующим образом.

1. Краткое описание особенностей конструкции, ее достоинств и недостатков.

При этом рассматриваются как особенности аппарата в целом, так и особенности основных частей аппарата (контактная и дугогасительная система, механизм включения, корпусные и изоляционные детали и т.д.).

2. Основные параметры аппарата.

2.1. Номинальные и прочие технические параметры аппарата.

2.2. Масса, габаритные размеры и объем, установочная площадь.

2.3. Показатели технологичности – количество основных и крепежных деталей, количественный состав деталей по технологии их изготовления (литых, штампованных, прессованных) и другие показатели.

2.4. Цена.

3. Удельные показатели.

3.1. Масса, отнесенная к габаритному объему, или масса, отнесенная к основному характерному параметру аппарата (току, мощности, усилию электромагнита и т.д.).

3.2. Габариты – габаритный объем, приходящийся на единицу массы, габаритный объем, приходящийся на единицу основного характерного параметра, установочная площадь, приходящаяся на единицу основного характерного параметра.

3.3. Стоимость единицы массы, стоимость единицы основного характерного параметра аппарата.

Технико-экономические показатели целесообразно представлять в виде таблиц и диаграмм, которые затем используются для сравнительной оценки со спроектированным аппаратом.

2.3. Технико-экономическое обоснование проекта

При проектировании аппарата необходимо исходить не только из технических задач, но и из экономической целесообразности.

Технико-экономическое обоснование необходимости разработки нового аппарата заключается в обосновании его технической и экономической эффективности.

Проектируемый аппарат должен обеспечить получение максимального результата в эксплуатации при наименьших затратах при производстве, монтаже и эксплуатации.

Так как организация производства нового аппарата весьма затратная, в некоторых случаях целесообразнее модернизировать конструкцию, а не разрабатывать новую.

Технико-экономическое обоснование разрабатывается на основе проектного задания и обзора существующих конструкций. Расчеты технико-экономического обоснования производятся при сравнении разработанной конструкции с существующими, а также с другими вариантами конструкции.

Технико-экономическое обоснование проекта представляет собой выводы об экономической эффективности, сделанные на основе денежных показателей (себестоимость или оптовая цена, капитальные затраты, экономическая эффективность освоения и эксплуатации, экономия средств и т.д.) и факторов, которые не выражены в денежном эквиваленте, но имеют важное самостоятельное значение (например, повышение надежности и безопасности, улучшение условий труда).

Технико-экономическое обоснование обычно содержит следующие разделы.

1. Определение необходимости проектирования аппарата (указывается область применения и потребность народного хозяйства в нем).

2. Выбор объектов для сравнения.

3. Определение технико-экономических показателей спроектированного аппарата и сопоставление с показателями выбранных для анализа объектов.

4. Расчет экономической эффективности и срока окупаемости капитальных затрат.

5. Общая итоговая технико-экономическая оценка проекта.

Технико-экономическое обоснование производится на всех этапах проекта, при этом на начальном этапе расчеты проводятся на основе укрупненных показателей.

2.4. Выбор конструктивной схемы

Выбор конструктивной схемы, включающий выбор конструктивных форм и общей компоновки конструкции, является ответственным и сложным этапом проектирования. Конструктивная схема и компоновка общего вида аппарата, его основных частей разрабатывается укрупнено, без детализации, при этом важно выделить главное, исключить второстепенное.

При выборе конструктивной схемы учитываются проектное задание, условия работы, требования, предъявляемые к аппарату, принципы проектирования и конструирования аппарата.

При проектировании могут иметь место противоречивые требования и факторы, что приводит к необходимости находить оптимальные сочетания наиболее важных из них. Из них следует отметить форму и размеры токоведущих частей, изоляционные расстояния, блочность конструкции.

Конструктивная схема должна отражать расположение коммутирующих контактов, место и взаимное расположение дугогасительных устройств, вид электрической изоляции отдельных узлов и деталей, структуру кинематической схемы аппарата, расположение приводного механизма, расположение опорных элементов корпусных деталей, расположение оболочки, бака, резервуара.

2.5. Проектирование проводников и контактных соединений токоведущего контура

Токоведущий контур электрического аппарата состоит из *частей*, различных по размерам и конструкции. К ним относятся: зажимы контактных выводов, провода, кабели, шины, стержни, перемычки, катушки, контактодержатели, коммутирующие контакты, траверсы, гибкие шунты шарнирных контактных соединений, термоэлементы токовых реле и расцепителей автоматических выключателей и другие.

Задачей расчета проводников и контактных соединений токоведущего контура является определение их размеров и площади сечения.

Основными расчетами при этом являются

1. Определение площади и размеров сечения при токе продолжительного режима, а также при других рабочих режимах. Эта задача относится к тепловым расчетам. Без теплового расчета можно определить сечение деталей контура, у которых оно не изменяется по длине.

Размеры сечения токоведущих частей при продолжительном режиме лимитируются допустимой температурой (или допустимым превышением температуры), величина которой устанавливаются ГОСТ и приводится в справочной литературе. Величина допустимой температуры зависит от напряжения, класса изоляции, материала и других факторов [18, табл. 15-1, 15-2].

2. Контрольный расчет площади и размеров сечения при кратковременном режиме – пусковом для аппаратов управления и аварийном (при токе короткого замыкания) для аппаратов распределения энергии [18, с. 132].

Расчет при кратковременном режиме ведется с использованием кривых адиабатического нагрева [18, с. 414-416]. В кратковременном режиме допустимые значения температур составляют: для неизолированных проводников из меди – 300, алюминия – 200 градусов Цельсия, а изолированных – в зависимости от класса изоляции.

При проектировании элементов токоведущего контура выбираются их конструктивные формы и принимаются ориентировочные длины проводников. Следует стремиться к уменьшению количества контактных соединений.

Проектирование осуществляется в следующей **последовательности**.

1. Определение конструкций токоведущего провода и контактных соединений.

2. Выбор материалов.

3. Определение площади и размеров сечения при токе продолжительного режима, а также при других рабочих режимах (на основе теплового расчета [18, с. 66-67] или по таблицам [18, табл. 2П4-2П9]).

4. Контрольный расчет площади и размеров сечения при кратковременном режиме – пусковом для аппаратов управления и аварийном (при токе короткого замыкания) для аппаратов распределения энергии [18, с. 414-416].

5. Принятие решения – выбор большего сечения из рассчитанных.

6. Поверочный расчет

6.1. Определение коэффициента теплоотдачи (с учетом конвекции и излучения) и удельного электрического сопротивления для предполагаемой температуры [18, с. 396-405].

6.2. Расчет температуры и сравнение с предполагаемой.

6.3. Корректировка расчетов (в случае отличия рассчитанной и предполагаемой температур более чем на 5 %).

2.6. Проектирование коммутирующих контактов

Конструкция и параметры контактной системы определяют главные параметры всего аппарата.

Контактная система характеризуется следующими *параметрами*.

1 Раствор контактов (определяется при проектировании дугогасительного устройства).

2. Провал (определяется при расчете износа).

3. Проскальзывание и перекатывание (определяется при выборе конструктивных форм и проектировании механизма).

4. Сила нажатия контактов.

5. Материал контактов.

6. Скорость движения контактов (определяется при проектировании дугогасительного устройства и согласовании характеристик действующих и противодействующих сил механизма).

7. Коммутационная способность (определяется при проектировании дугогасительного устройства).

8. Электродинамическая устойчивость.

9. Ток сваривания.

10. Параметры вибрации.

11. Износостойкость.

12. Надежность.

К коммутирующим контактам предъявляются следующие основные *требования*:

- температура контактов в нормальном режиме должна быть меньше допустимой, устанавливаемой ГОСТ;
- температура контактной зоны должна быть ниже температуры рекристаллизации материала контактов;
- контакты не должны свариваться при аварийных токах (требование термической устойчивости);
- контакты должны противостоять электродинамическим силам (требование электродинамической устойчивости);
- контакты должны иметь малый электрический и механический износ.

Проектирование коммутирующих контактов осуществляется исходя из следующих соображений – при заданном номинальном продолжительном токе, принятых материале и размерах контактов определяется необходимая сила контактного нажатия таким образом, чтобы падение напряжения на них и температура не превышали допустимой величины.

Проектирование осуществляется в следующей **последовательности**.

1. Выбор конструктивных форм главных и вспомогательных контактов одновременно со способом и системой дугогашения и определение раствора контактов.
2. Выбор материала и основных размеров коммутирующих контактов.
3. Определение размеров контактов.
4. Определение силы контактного нажатия, их температуры, переходного сопротивления, падения напряжения при номинальном токе основного режима работы.

Расчет силы контактного нажатия во включенном состоянии проводится по теоретическим формулам [18, 5-4], по опытным данным [18, табл. 5-7] или по удельной силе контактного нажатия [18, с. 105-106]. Для дальнейших расчетов выбирается большее из полученных значений.

Переходное сопротивление рассчитывается по теоретическим формулам [18, 5-4], эмпирическим зависимостям или опытным данным [18, табл. 5-7].

Рассчитанное значение температуры контактов [18, с. 105-106] не должно превышать допустимой, устанавливаемой ГОСТ, или хотя бы температуры рекристаллизации [18, с. 106-108, табл. 5-8].

5. Определение величины тока сваривания коммутирующих контактов и величины электродинамических усилий отброса при предельных токах.

Проверка на сваривание контактов производится путем сравнения предельных токов с минимальным плавящим током (током сваривания), который рассчитывается по теоретической [18, 5-20, 5-23, 5-24], либо эмпирической формуле (формула Буткевича) [18, 5-25]. При этом выбирается меньшее значение тока сваривания, рассчитанное разными способами.

Затем рассчитываются электродинамические усилия в контактах при предельных токах [1, с. 104; 18, 7-15, 7-16].

5. Определение параметров вибрации [18, с. 117-120].

Параметры вибрации (амплитуда первого максимального отброса подвижного контакта от неподвижного, время вибрации) на этапе проектирования контактов могут быть оценены лишь приблизительно, так как они зависят от скорости движения, которая может быть рассчитана только после проектирования привода.

6. Определение износостойкости [18, раздел 5-7].

7. Расчет контактных пружин.

Характеристики контактных пружин определяется их видом (плоские, цилиндрические) [18, с. 472-480].

2.7. Проектирование дугогасительных устройств

Процессы дугогашения различных аппаратов отличаются существенным образом, в связи с чем дугогашение рассматривается отдельно для аппаратов на небольшие токи и напряжения (реле и т.д.), аппаратов на напряжение до 1000 В, высоковольтных аппаратов.

Здесь рассматриваются **вопросы проектирования дугогасительных систем низкого напряжения**. Вопросы проектирования высоковольтных дугогасительных систем изложены в [27].

Расчетные параметры дугогасительных устройств для аппаратов до 1000 В следующие.

1. Число разрывов цепи тока.
2. Раствор коммутирующих контактов.
3. Предельная длина дуги.
4. Ширина (внутренняя) камеры (щели) в месте расположения контактов.
5. Ширина продольной щели камеры в месте гашения дуги.
6. Величина рабочего воздушного зазора между пластинами-полюсами системы электромагнитного дутья.
7. Размеры сердечника и пластин-полюсов системы электромагнитного дутья.
8. Число витков дугогасительной катушки.

9. Число пластин дугогасительной решетки.

Проектирование дугогасительной системы заключается в обеспечении следующих **требований**.

1. Заданная коммутационная способность.

2. Минимально возможное время горения дуги.

Время горения дуги аппаратов постоянного тока не должно превышать 0,1 секунды, переменного – одного полупериода (нескольких полупериодов при отключении предельных токов).

3. Отсутствие недопустимых перенапряжений (максимальное напряжение не должно превышать испытательного, определяемого ГОСТ).

4. Минимальные размеры дугогасительного устройства.

6. Удовлетворение температурным ограничениям – температура дугогасительного устройства не должна превышать допустимых значений (например, допустимая температура для теплостойкой керамики составляет 3000 градусов Цельсия).

7. Минимальный выброс пламени и ионизированных газов, минимальные световой и звуковой эффекты.

Так как некоторые требования противоречивы (например, уменьшение времени горения дуги приводит к увеличению перенапряжения), необходимо отыскивать оптимальное решение.

Расчет дугогасительных систем постоянного тока основывается на выполнении условия гашения дуги постоянного тока – статическая вольт-амперная характеристика дуги должна лежать выше вольт-амперной характеристики сети.

Порядок расчета дугогасительных систем постоянного тока следующий.

1. По заданному значению отключаемого напряжения, равного максимальному напряжению источника питания, при нескольких значениях отключаемого тока (от минимально возможного до предельно допустимого) определяется критическая длина дуги и раствор контактов.

Максимальное напряжение источника принимается равным 1,1 от номинального значения.

При заданной конструкции дугогасительной системы расчет производится для следующих токов: критического [18, с.130-131], номинального, предельного, выражающего предельную отключающую способность аппарата.

Определение раствора контактов производится на основе опыта проектирования (по таблицам или кривым) [18, с.148-151, с. 156], либо по упрощенной зависимости – произведение скорости расхождения контактов на время (пока раствор не станет конечным) [18, с.133].

Критическая длина дуги рассчитывается по эмпирическим формулам [18, 6-1, 6-2, 6-9, 6-15, а], определяется по кривым (используются вольт-амперные характеристики дуги при различной длине) [18, рис. 6-8], либо определяется методом последовательных приближений [18, с.141-142, 151] путем сопоставления статических вольт-амперных характеристик сети и дуги [18, 6-16, 6-24, 6-251].

Если для заданной конструкции дугогасительной системы критическая длина дуги окажется недопустимо высокой (более 20 мм), то необходимо принять меры по повышению интенсивности дугогашения, например, использовать камеру с продольной щелью и поперечным магнитным полем.

2. При принятых параметрах и конструкции дугогасительной системы определяется время гашения дуги при нескольких значениях отключаемого тока.

Если рассчитанное время гашения дуги [18, 6-5] превышает допустимое, принимают меры по повышению интенсивности дугогашения.

3. Определяется максимальное перенапряжение.

Величина максимального перенапряжения [18, 6-11. 6-12, с. 143-144] должна быть меньше (с запасом) испытательного.

4. Устанавливаются размеры дугогасительной системы по максимальным значениям длины и стрелы дуги [18, 6-6].

5. Рассчитывается температура стенок камеры (для систем с магнитным дутьем и камерой) или температура пластин дугогасительной решетки [22, с. 111–112].

6. При выполнении требований, предъявляемых к дугогасительной системе, расчет прекращается. Если требования не выполняются, предпринимаются меры по повышению эффективности дугогашения и расчет повторяется.

Расчет дугогасительных систем переменного тока основывается на выполнении условия гашения дуги переменного тока – динамическая кривая напряжения восстанавливающейся прочности должна лежать выше динамической характеристика восстанавливающегося напряжения.

Порядок расчета дугогасительных систем переменного тока следующий.

1. Определение раствора контактов.

Определение раствора контактов производится на основе опыта проектирования [18, с.166-167], либо по аналогии с прототипом.

2. Определение числа разрывов при гашении свободной открытой дуги при первом переходе тока через ноль или числа пластин в системах

с дугогасительной решеткой при аperiodическом характере восстановления напряжения.

3. Проверка выполнения условия аperiodичности.

4. Если условие аperiodичности не выполняется, расчет производится для колебательного характера восстановления напряжения.

5. Расчет времени гашения (для систем с дугогасительной решеткой).

6. Определение размеров камеры (для систем с дугогасительной решеткой).

При гашении дуги переменного тока в камере с продольной щелью в поперечном магнитном поле порядок расчета следующий.

1. Выбор вида дугогасительной камеры (числа разрывов цепи, ширины щели, ориентировочных длины и сечения рогов).

2. Определение индуктивности и собственной частоты отключаемой цепи.

3. Определение критического тока.

4. Выбор конструктивных форм и размеров элементов дугогасительной магнитной системы.

5. Определение средней скорости движения дуги.

6. Расчет диаметра дуги.

7. Установление характера восстановления напряжения.

8. Расчет времени горения дуги.

9. Определение размеров камеры.

2.8. Проектирование электромагнитов

Электромагнит характеризуется следующими *параметрами*.

1. Конструктивная форма.

2. Род тока, номинальные значения напряжения (тока) и частоты.

3. Режим работы (продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный и др.).

4. Потребляемая мощность.

5. Развиваемая сила и ход или тяговая характеристика.

6. Класс нагревостойкости изоляции.

7. Параметры срабатывания (притягивания) и отпускания (напряжение, ток, время).

8. Износостойкость.

9. Масса и габаритные размеры.

10. Стоимость.

Различают *прямую и обратную задачи* проектирования электромагнита.

При прямой задаче по заданной тяговой характеристике определяются конструктивная форма и размеры магнитопровода и катушки.

Обратная задача заключается в поверочном расчете электромагнита.

При решении **прямой задачи** расчеты выполняются в **следующем порядке**.

1. Выбор конструктивной формы электромагнита [18, с. 249–258].
2. Выбор материала магнитопровода [18, с. 258–266].
3. Выбор магнитной индукции, коэффициента выпучивания и рассеяния [18, с. 266–272].
4. Определение основных размеров и параметров электромагнита [18, с. 272–284].
5. Разработка эскиза [18, с. 284–291].

Основой **поверочного расчета электромагнита постоянного тока** является эскиз электромагнита с размерами, разработанный в процессе проектирования.

При этом рекомендуется следующий порядок расчета.

1. Составление схемы замещения магнитной цепи [18, с. 291–293].
2. Расчет магнитных проводимостей участков магнитной цепи (воздушного зазора, промежутков проводимости потоков рассеяния, суммарной) и их производных [18, с. 293–312].
3. Расчет коэффициентов рассеяния и выпучивания [18, с. 316–319].
4. Расчет магнитных сопротивлений ферромагнитных участков [18, с. 312–316].
5. Определение необходимого рабочего потока в воздушном зазоре (используется энергетическая формула) [18, с. 320–322].
6. Расчет магнитного потока на участках магнитной цепи и намагничивающей силы [18, с. 322–330].
7. Расчет и построение тяговых характеристик [18, с. 330–334].
8. Расчет параметров катушки [18, с. 357–372].
9. Тепловой расчет катушки электромагнита [18, с. 428–439].
10. Корректировка размеров электромагнита (при необходимости).

При чрезмерной температуре нагрева катушки электромагнита размеры следует увеличить, при заниженной – уменьшить.

11. Расчет времени срабатывания и отпускания [18, с. 334–340].
12. Определение коэффициента возврата [18, с. 340–341].

Поверочный расчет электромагнита переменного тока с катушкой напряжения производится в следующей последовательности.

1. Составление схемы замещения магнитной цепи [18, с. 291–293].

2. Расчет магнитных проводимостей участков магнитной цепи (воздушного зазора, промежутков проводимости потоков рассеяния, суммарной) и их производных [18, с. 293–312].
3. Расчет коэффициентов рассеяния при отпущенном якоре без учета сопротивления экрана [18, с. 316–319].
4. Определение величины магнитного потока и индукции [18, с. 273–278, с. 343].
5. Расчет числа витков обмотки [18, с. 370–371].
6. Определение величины магнитного потока в воздушном зазоре с учетом экрана при притянutom якоре [18, с. 343, с. 370–371].
7. Расчет электромагнитных экранов [18, с. 344–349].
8. Расчет коэффициентов рассеяния при притянutom якоре [18, с. 316–319].
9. Расчет намагничивающей силы при притянutom якоре [18, с. 349–353].
10. Расчет параметров обмотки [18, с. 353–355]. Расчет катушки [18, с. 357–373].
11. Тепловой расчет обмотки [18, главы 15–19].
12. Корректировка размеров электромагнита (при необходимости).
13. Расчет и построение тяговых характеристик [18, с. 355–356].
14. Построение векторных диаграмм [18, с. 356].
15. Определение времени срабатывания и отпускания [18, с. 357].

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПУСКАТЕЛЕЙ И КОНТАКТОРОВ

Проектирование электрического аппарата начинается с выбора прототипа (ранее спроектированного и запущенного в производство изделия), что подразумевает критический анализ лучших отечественных и зарубежных аппаратов, имеющих с проектируемым аппаратом одинаковое или подобное применение и близкие технические параметры.

Выбор прототипа осуществляется в соответствии с правилами и порядком, описанными в пункте 2.2 настоящего пособия. Если не удаётся найти изделие, подходящее по всем параметрам к проектируемому, тогда за аналог принимается изделие с параметрами наиболее близкими к заданным.

Результатом данного этапа является *конструктивная схема* аппарата, подлежащая дальнейшей детальной проработке – выбору материалов и расчету частей и узлов, а также окончательному конструктивному оформлению.

Ниже приведены основные сведения о наиболее распространенных типах магнитных контакторов и пускателей, позволяющие выполнить первый этап курсового проекта.

3.1. Типы магнитных контакторов и пускателей

Контактор (лат. contactor «соприкасатель») – двухпозиционный коммутационный аппарата с неручным управлением, способный включать, проводить и отключать токи в нормальных условиях работы электрической цепи, в том числе и при рабочих перегрузках. Контактторы предназначены для частых коммутаций силовых цепей. Иногда (при малых токах) контактор рассматриваются как разновидность электромагнитного реле.

Контакторы как постоянного, так и переменного тока содержат: электромагнитную систему, контактную систему, состоящую из подвижных и неподвижных контактов, дугогасительную систему, систему блок-контактов (вспомогательные контакты, переключающие цепи сигнализации и управления при работе контакторов).

Наибольшее распространение получили контакторы, которые включаются с помощью электромагнитного привода. Отключение производится за счет отключающих (возвратных) пружин и/или собственного веса подвижных частей.

Электромагнитные (магнитные) контакторы и пускатели наиболее часто используются в схемах дистанционного управления различными промышленными электроприводами. Высокая эффективность таких аппаратов и несложная конструкция предопределила их широкое распространение, а, следовательно, необходимость в их массовом производстве.

Пределы номинальных токов контакторов и пускателей составляют от 1,5 до 4800 А, напряжение главной цепи – от 27 до 2000 В (постоянного тока) и от 110 до 1600 В (переменного тока).

Напряжение включающей катушки составляет от 12 до 440 В (постоянный ток) и от 12 до 660 В (переменный ток).

Наиболее широко применяются одно- и двухполюсные контакторы постоянного тока и трёхполюсные контакторы переменного тока. К контакторам из-за частых коммутаций (число циклов включения-выключения для контакторов разной категории изменяется от 30 до 3600 в час) предъявляются повышенные требования по механической и электрической (коммутационной) износостойкости.

Основные области применения контакторов: управление мощными электродвигателями (например, на тяговом подвижном составе – электровозах, тепловозах, электропоездах, трамвайных и троллейбусных вагонах, на лифтах), коммутация цепей компенсации реактивной мощности, коммутация больших постоянных токов.

В таблице П.1 (прил. II) приведены характеристики для разных категорий применения контакторов.

Назначение и основные технические данные контакторов постоянного и переменного тока приведены в таблицах П.2–П.3 (прил. II) и в каталогах предприятий-изготовителей (прил. VI).

Контакторы постоянного тока выпускаются в основном на напряжение 22 и 440 В, токи до 630 А в однополюсном и двухполюсном исполнениях.

Контакторы серии КПВ 600 предназначены для коммутации главных цепей электроприводов постоянного тока. Контакторы этой серии предназначены для работы в электрических цепях большой мощности, с токами в сотни ампер. Они используются, если необходимо значительное усилие для нажатия на силовые размыкающие контакты и значительный зазор между ними для исключения возможности пробоя при отключении контактора от сети. Такие контакторы имеют два исполнения: с одним замыкающим главным контактом (КПВ 600) и с одним размыкающим главным контактом (КПВ 620). Управление контакторами осуществляется от сети постоянного тока. Контакторы выпускаются на номинальные токи от 100 до 630 А.

Контакторы серии КП предназначены для переключения силовых электрических цепей постоянного тока напряжением до 220 В (для контакторов КП1 и КП2) и до 440 В для контакторов КП203. Применяются они для работы в качестве линейных и реверсирующих контакторов, а также контакторов ускорения в схемах автоматического управления электрическими двигателями постоянного тока приводов общепромышленных установок.

Контактор КП–207 предназначен для управления силовыми цепями генераторов и электродвигателей постоянного тока при номинальных напряжениях до 660 В и токах до 2500 А. Устройство контактора КП–207 обеспечивает надежное дистанционное управление сетью, быстрый доступ к силовым контактам и легкую замену катушки, вследствие чего они получили широкое распространение.

Контакторы серии КПД 100Е предназначены для коммутации главных цепей и цепей управления электроприводом постоянного тока напряжением до 220 В. Контакторы выпускаются на номинальные токи от 25 до 250 А.

В контакторах типа КМВ-521 применяется двухполюсная система. Эти контакторы предназначены для включения и отключения мощных электромагнитов приводов постоянного тока масляных выключателей. Наличие двухполюсной контактной системы, включенной в оба провода сети постоянного тока, обеспечивает надежное отключение индуктивной нагрузки.

Контакторы переменного тока промышленной частоты изготавливаются, как правило, трехполюсными с замыкающими главными силовыми контактами.

В отличие от контакторов постоянного тока режим включения контакторов переменного тока более тяжел, чем режим отключения из-за пускового тока асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором (табл. П.1, прил. II). Кроме этого наличие дребезга контактов при включении приводит в этих условиях к большому износу контактов. Поэтому борьба с дребезгом при включении приобретает первостепенное значение.

Наиболее распространены **контакторы переменного тока серии КТ6000 и КТ7000**.

Контактор КТПВ является коммутационным аппаратом, выполненным в виде двух размыкающих и замыкающих силовых контактов, которые приводятся в действие электромагнитом. Контакты контактора КТПВ защищены двумя дугогасительными камерами. Помимо главных силовых контактов контактор КТПВ укомплектован вспомогательным блок-контактом, который служит для коммутации тока до 40 А.

Для реверса асинхронных двигателей при большой частоте включений в час (до 1200) применяется сдвоенная контактная система. В этих контакторах *типа КТПВ-500*, имеющих электромагнит постоянного тока, подвижные контакты изолированы от корпуса, что делает более безопасным обслуживание аппарата.

Контакторы электромагнитные серии КТИ (производитель – ИЕК) предназначены для использования в схемах управления для пуска и остановки трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в электрических сетях с номинальным напряжением до 660 В переменного тока частоты 50 Гц, а также могут быть использованы для включения и отключения других электроустановок: освещения, нагревательных установок и различных индуктивных нагрузок. Применяются в системах управления вентиляторами, насосами, печами, кран-балками и автоматических вводах резерва (АВР).

Контакторы малогабаритные переменного тока общепромышленного применения серии КМИ (производитель – ИЕК) на ток нагрузки от 9 до 95 А предназначены для пуска, остановки и реверсирования трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором на напряжение до 660 В (категория применения АС3), а также для дистанционного управления цепями освещения, нагревательными цепями и различными малоиндуктивными нагрузками (категория применения АС1). Контакторы серии КМИ применяются в системах управления ленточными конвейерами, компрессорами, насосами, кондиционерами, тепловыми печами, цепями освещения.

Малогабаритные контакторы серии КМИп (производитель – ИЕК) с катушкой управления постоянного тока общепромышленного применения на ток нагрузки от 9 до 32 А предназначены для использования в схемах управления электроприводами для пуска, остановки и реверсирования асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором на напряжение до 660 В частоты 50 Гц (категория применения АС3), а также для дистанционного управления цепями освещения, нагревательными цепями и различными малоиндуктивными нагрузками (категория применения АС1). Все исполнения имеют одну группу замыкающих или размыкающих дополнительных контактов.

Область применения малогабаритных контакторов с катушкой управления постоянного тока серии КМИп – управление станками, насосами, вентиляторами, тепловыми завесами, печами, кран-балками, освещением, в системах автоматического ввода резерва (АВР), системах бесперебойного питания, устройствах защиты автоматики, охранной сигнализации, в системах управления промышленными установками,

коммутирование трехфазных конденсаторных батарей и первичных обмоток трехфазных низковольтных трансформаторов.

Пускатель электромагнитный (МП – магнитный пускатель) – это низковольтное электромагнитное (электромеханическое) комбинированное устройство распределения и управления, предназначенное для дистанционного управления различными силовыми нагрузками (мощными лампами, электронагревательными приборами, но чаще всего – электродвигателями, прежде всего, асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором). Кроме основной своей функции – дистанционного управления (пуска, реверса и т. д.) – магнитный пускатель может обеспечивать с помощью тепловых реле защиту двигателей от токовых перегрузок и сигнализацию об их работе. По существу пускатель представляет собой контактор, укомплектованный дополнительным оборудованием

В состав пускателя, как в комплектного устройства, могут входить кнопки управления, тепловые реле защиты, сигнальные лампы, размещаемые в одном корпусе. Выпускаемые магнитные пускатели различаются между собой по назначению (неревверсивные, реверсивные), наличию или отсутствию тепловых реле, кнопок управления, степени защиты от воздействия окружающей среды, уровням коммутируемых токов, рабочему напряжению катушки.

Кроме того, пускатели могут снабжаться специальными приставками (приставка с дополнительными контактами серии ПКЛ, приставка типа ПВЛ, обеспечивающая замедление срабатывания контактов на небольшое время и т.д.).

Электромагнитные пускатели общего применения изготавливаются на напряжение переменного тока 127, 220, 380 и 500 В, номинальные токи 6–400 А. При нормальном режиме электромагнитные пускатели могут работать с частотой 150–1200 вкл./час, а пускатели малой мощности – до 3000 вкл./час.

Выпускаются электромагнитные пускатели в обыкновенном, защищенном и взрывобезопасном исполнении.

Технические параметры пускателей представлены в таблицах П.4–П.6 (прил. II).

Электромагнитные пускатели производят следующие компании: ОАО «Уралэлектроконтактор», ЗАО «ЧЭАЗ» (г. Чебоксары, www.cheaz.ru), «Этал» (г. Александрия, Украина, www.etal.ua), «Электроаппарат» (г. Курск, www.keaz.ru), ОАО «Кашинский завод электроаппаратуры» (г. Кашин, www.kzeap.ru), ОАО «Новосибирский завод низковольтной аппаратуры», «Электроаппаратура» (г. Гомель, <http://gomelapparat.org>), TE (Франция), Schneider-electric (Франция),

General Electric (США), АВВ (Швеция), Lovato (Италия), Siemens (Германия), Moeller (Германия), Chint Group Co (Китай) и др.

В настоящее время выпускаются:

МП с токами (предельные значения) до 100 А (пускатели серии ПМЛ на токи 10–95 А, серии ПМУ на токи 9–95 А);

МП с токами до 400 А, представителями которой являются пускатели серии ПМА на токи 40–160 А, серии ПМ12 на токи 10–250 А (Россия) и зарубежные пускатели Chint Group Co серии NC1 и NC3 на токи 9–370 А;

МП с токами до 1000 А, представителями которой являются пускатели фирмы Moeller серии DIL на токи 20–855 А;

МП с токами выше 1000 А, куда относятся МП GE Power Controls серии CL и СК на токи 25–1250 А и МП ЧЭАЗ–Benedikt на токи 10–1200 А.

Наибольшее применение находят **пускатели серии ПМЛ и ПМ12**, более дорогие, но и более качественные **пускатели серии ПМУ** и зарубежных фирм производителей: «Сименс», «Легранд», «АББ», «Шнайдер Электрик».

Пускатели ПМ12 на номинальные токи 10, 25, 40, 63, 100, 160 и 250 А служат в основном для дистанционного пуска, остановки и реверсирования трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором при номинальном напряжении до 660 В, частоте 50 и 60 Гц. Для двигателей мощностью до 45 кВт предназначены пускатели на 100 А, для двигателей до 75 кВт – устройства на 160 А, для двигателей до 132 кВт – устройства на 250 А. При наличии тепловых реле типа РТТ пускатели также осуществляют защиту управляемых ими электродвигателей от перегрузок недопустимой продолжительности, перекоса и обрыва фаз.

Существуют климатические исполнения ПМ12 для эксплуатации в условиях как умеренного, так и тропического климата. Ассортимент продукции включает пускатели с различным исполнением по пылевлагозащищенности: IP00, IP20, IP40, IP54.

До 2002 года контакторы ПМ12 номиналами свыше 100 А выпускались на предприятии «Урал-электро» (г. Медногорск Оренбургской области). В 2002 г. бизнес по производству пускателей ПМ12 величин 5, 6 и 7 был интегрирован в состав одного из мировых лидеров электротехнического рынка – компании Schneider Electric. Производство ПМ12 было выделено в отдельное предприятие, которое получило название ООО «Урал-ЭлектроКонтактор».

Пускатели малогабаритные серий ПМЛ и ПМЛН общепромышленного применения изготавливаются в четырех габаритах на номи-

нальный коммутируемый ток от 9 до 95 А. Они предназначены для работы в электрической сети переменного тока частотой 50 Гц и напряжением до 400 В. Основная область использования – пуск, останов и реверсирование асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором (категория применения АС3), а также дистанционное управление цепями освещения как с лампами накаливания, так и с индуктивными нагрузками, нагревательными цепями и различными индуктивно-активными нагрузками (категория применения АС1).

Ток главных контактов аппарата должен быть больше максимального тока нагрузки (рабочего тока электродвигателя или другого электроприемника, для включения которого проектируется пускатель).

Рабочее напряжение катушки должно соответствовать напряжению цепей управления – стандартные значения переменного напряжения составляют 24, 110, 220, 380 В, постоянного напряжения – 24 В.

Важный параметр пускателя – количество срабатываний. При большом значении количества включений–выключений в час используют бесконтактные пускатели.

Во взрывоопасных зонах используют взрывозащищенные магнитные пускатели вида «е» (повышенной надежности против взрыва) и с масляным наполнением *серии ПМ со знаками взрывозащиты* НМБ (ПМ712А-25, ПМ712-100 и ПМ711А-250), НМГ (ПМ722А-25, ПМ722А-100, ПМ721-250). Они выпускаются на номинальные токи 25, 100, 150 А при напряжении до 500 В.

Пускатели ПМ711А, ПМ712А имеют расцепители для тепловой защиты и нулевую защиту. Остальные пускатели имеют только нулевую защиту. Бак пускателя заливают трансформаторным маслом, без которого эксплуатация пускателя запрещена. В бак погружены искрящие контакты (главные силовые и блокировочные) и шины. Остальные детали (тепловое реле с механизмом включения, присоединительные силовые зажимы) размещаются в коробке пыле- и водозащищенного исполнения. Управляют пускателями при помощи встроенной кнопки. Пускатель допускает дистанционное управление посредством кнопочного поста.

Пускатели (контакторы) DILM (производитель Moeller) выполняются на токи от 7 до 500 А при напряжении 380 В (категория применения АС3), силовые вакуумные контакторы DILM – на токи до 1000 А (АС3). также Moeller производит миниконтакторы DILEM, предназначенные для пуска и останова электродвигателей мощностью до 4 кВт или для коммутации нагрузки до 16 А, и вакуумные контакторы DILH на токи до 2500 А (АС1).

Технические характеристики пускателей приведены в каталогах заводов изготовителей (прил. VI).

3.2. Технические параметры контакторов и пускателей

Основными техническими данными контакторов являются номинальный ток главных контактов, предельный отключаемый ток, номинальное напряжение коммутируемой цепи, механическая и коммутационная износостойкость, допустимое число включений в час, собственное время включения и отключения. Способность контактора, как и любого коммутационного аппарата, обеспечить работу при большом числе операций характеризуется износостойкостью.

Номинальный ток контактора представляет собой ток, который можно пропускать по замкнутым главным контактам в течение 8 часов без коммутаций, причем превышение температуры различных частей контактора не должно быть больше допустимого.

Номинальный рабочий ток контактора – это допустимый ток через его замкнутые главные контакты в конкретных условиях применения. Так, например, номинальный рабочий ток контактора для коммутации асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором выбирается из условий включения шестикратного пускового тока двигателя.

Номинальным напряжением контактора называется наибольшее напряжение коммутируемой цепи, для работы при котором предназначен контактор.

Механическая износостойкость контакторов определяется числом циклов включение-отключение контактора без ремонта и замены его узлов и деталей. Ток в цепи при этом равен нулю. Механическая износостойкость современных контакторов постоянного тока составляет 10–20 млн. операций.

Классы механической износостойкости контакторов приведены в таблице 3.

Коммутационная износостойкость контакторов определяется таким числом включений и отключений цепи с током, после которого требуется замена контактов. Современные контакторы должны иметь коммутационную износостойкость порядка 2–3 млн. операций.

Собственное время включения контактора состоит из времени нарастания потока в электромагните контактора до значения потока трогания и времени движения якоря. Большая часть этого времени тратится на нарастание магнитного потока. Для контакторов постоянного тока с номинальным током 100 А собственное время включения составляет 0,14 с, для контакторов с током 630 А оно увеличивается до 0,37 с.

Таблица 3

Классы механической износостойчивости контакторов

Класс механической износостойчивости	Допустимое число включений в час	Механическая износостойчивость, млн. циклов
I	30	0,25
II	150	1,2
III	600	5
IV	1200	10

Собственное время отключения контактора – время с момента обесточивания электромагнита контактора до момента размыкания его контактов. Оно определяется временем спада потока от установившегося значения до потока отпускания. Временем с начала движения якоря до момента размыкания контактов можно пренебречь. В контакторах постоянного тока с номинальным током 100 А собственное время отключения составляет 0,07 с, в контакторах с номинальным током 630 А – 0,23 с.

Коммутационная износостойкость главных контактов для категорий DC2, DC4 в режиме нормальных коммутаций должна быть не менее 0,1, а для категорий DC3 не менее 0,02 механической износостойкости.

Вспомогательные контакты должны коммутировать цепи электромагнитов переменного тока, у которых пусковой ток может во много раз превышать установившийся.

Технические параметры некоторых типов контакторов и пускателей приведены в таблицах П.1–П.6 (прил. II) и в каталогах производителей (прил. VI).

3.3. Устройство магнитных контакторов и пускателей

Контакторы состоят из системы главных контактов и вспомогательных контактов, электромагнитной и дугогасительной систем.

Главные контакты осуществляют замыкание и размыкание силовой цепи. **Электромагнитная система** обеспечивает дистанционное управление контактором, т.е. включение и отключение. **Дугогасительная система** предназначена для гашения электрической дуги, возникающей при размыкании главных силовых контактов. **Вспомогательные контакты** производят переключение в цепях управления контактора, блокировки и сигнализации.

Главные контакты должны быть рассчитаны на длительное протекания номинального тока и на большое количество включений и отключений при высокой частоте коммутаций.

Для предотвращения вибрации контактов контактная пружина создает так называемое предварительное нажатие.

Контакты контакторов, предназначенных для длительного включения, имеют серебряные или металлокерамические накладки (если сами контакты выполнены из меди). Для увеличения срока службы контакторов предусматривают возможность замены контактов.

В контакторах с поворотным якорем наибольшее применение получили линейные перекатывающиеся контакты, в прямоходовых контакторах – мостиковые контакты, имеющие небольшую массу и выполняемые самоустанавливающимися.

Электромагнитные системы бывают поворотные (Е-образные, П-образные, клапанные и др.) и прямоходные (Ш-образные, Т-образные, соленоидные).

Электромагнитная система, независимо от типа, состоит из сердечника, якоря и катушки с крепежными деталями. Для устранения залипания якоря используются немагнитные прокладки.

При срабатывании контактора происходит значительный удар якоря о сердечник. Частично этот удар принимает немагнитная прокладка. Кроме того, магнитную систему амортизируют пружиной, которая также уменьшает вибрацию контактов.

Электромагнитная система контакторов переменного тока выполняется шихтованной (набрана из отдельных изолированных друг от друга пластин толщиной до 1 мм) для снижения потерь и имеет короткозамкнутый виток на сердечнике для устранения гудения и вибрации.

Как правило, ток в цепи управления (в цепи катушки электромагнита) совпадает с родом тока главной (силовой) цепи. Однако имеются случаи, когда катушка контактора переменного тока питается постоянным током.

Катушка электромагнита должны обеспечивать надежное срабатывание контактора при снижении напряжения до 0,85 номинального значения. По нагреву катушка должна выдерживать повышение напряжения до 1,05 номинального значения.

Иногда в электромагните используют две катушки – мощную включающую и менее мощную удерживающую. В этом случае контактор во включенном состоянии потребляет меньше энергии, так как включающая катушка находится под током в течении короткого времени.

Катушки имеют малое число витков. Основную часть сопротивления катушки составляет ее индуктивное сопротивление, которое зависит от величины зазора. Поэтому ток в катушке контактора переменного тока при разомкнутой системе в 5–10 раз превышает ток при замкнутой магнитной системе.

Блокировочные или вспомогательные контакты применяются для переключения в цепях управления и сигнализации, поэтому они имеют такое же конструктивное исполнение, как и контакты реле. Вспомогательные контакты рассчитаны на проведение тока не более 20 А и отключение тока не более 5 А.

При коммутации главных контактов между ними возникает электрическая дуга, для гашения которой служит **дугогасительное устройство**. Способы гашения дуги и конструкция дугогасительных систем определяются родом тока главной цепи и режимом работы контактора. Как правило, в контакторах постоянного тока применяются дугогасительные камеры с магнитным дутьем, в контакторах переменного тока – двойные разрывы (при небольших токах и напряжениях) и/или дугогасительные решетки. Необходимо отметить, что при большой частоте включений контактора пластины дугогасительной решетки не успевают остывать и эффективность дугогашения снижается.

Основой всякого **магнитного пускателя** является контактор. Магнитный пускатель представляет собой комплектное устройство, состоящее из трехполюсного контактора, тепловых реле и кнопок управления («пуск», «стоп»).

Схема включения реверсивного магнитного пускателя приведена на рис. 1.

Пускатель состоит из двух контакторов КМ1 и КМ2 (на последнем изменено чередование фаз). Кнопочный пост содержит кнопку «Стоп» (SBT) и две кнопки «Пуск» (SBC1 и SBC2) с замыкающими контактами. Одна кнопка (SBC1) включает контактор КМ1 и запускает двигатель в одном направлении («Пуск вперед»), а другая кнопка (SBC2) включает контактор КМ2 и запускает двигатель в обратном направлении («Пуск назад»). Обе кнопки «Пуск» SBC1 и SBC2 шунтированы замыкающими блок-контактами КМ1:4 и КМ2:4 соответствующих контакторов. Защита от одновременного включения контакторов КМ1 и КМ2 выполняется тем, что в цепи между кнопкой SBC1 и катушкой контактора КМ1 включен размыкающий блок-контакт КМ2:5 контактора КМ2. Соответственно в цепи между кнопкой SBC2 и катушкой контактора КМ2 включен размыкающий блок-контакт КМ1:5 контактора КМ1. Таким образом, при срабатывании контактора КМ1 контакт КМ1:5 в цепи катушки контактора КМ2 размыкается и одновременное срабатывание

контактора КМ2 не возможно. Аналогичное явление имеет место при срабатывании контактора КМ2.

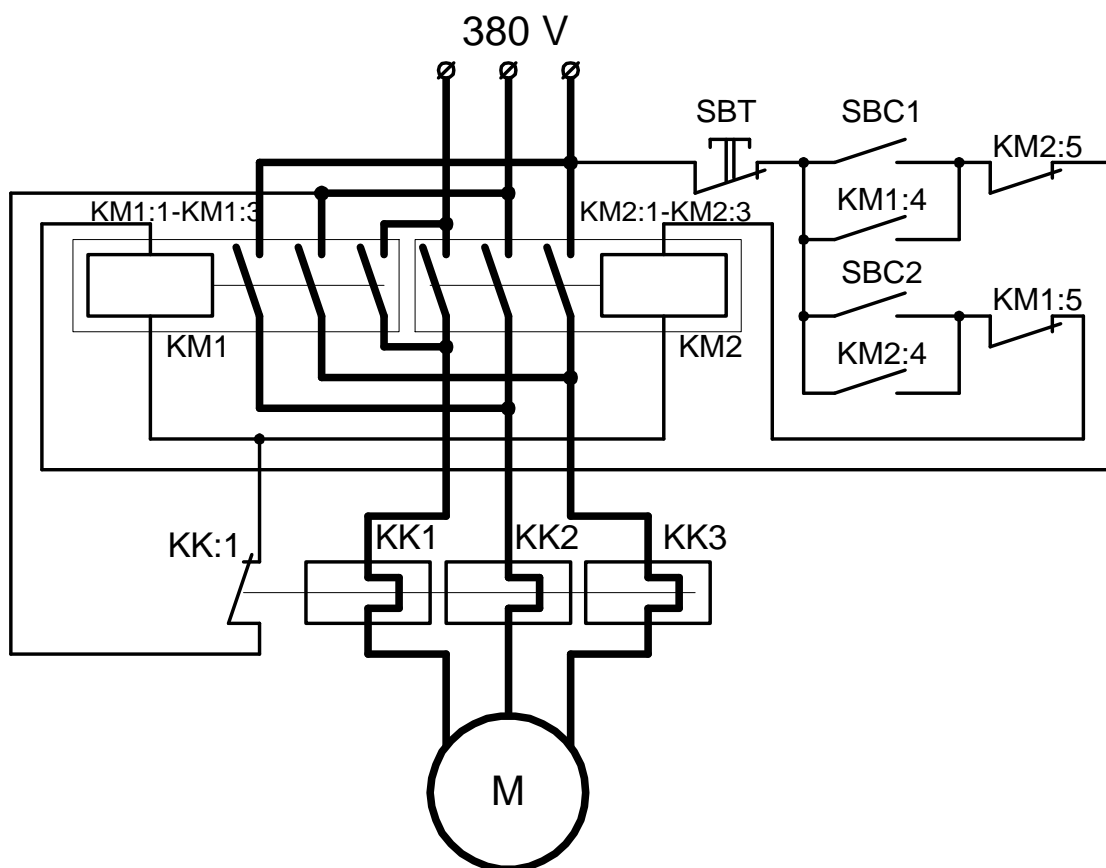


Рис. 1. Схема включения реверсивного магнитного пускателя

Устройство некоторых типов магнитных контакторов и пускателей постоянного и переменного тока приведено на рис. 2–6.

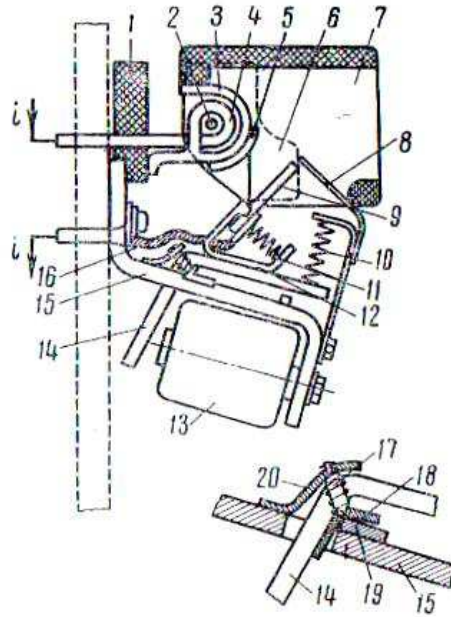


Рис. 2. Устройство контактора серии КПВ

1 – изоляционное основание; 2 – сердечник системы магнитного дутья (МД); 3 и 8 – дугогасительные рога; 4 – катушка МД; 5 и 9 – неподвижный и подвижный контакты; 6 – стальные боковые полюса; 7 – дугогасительная камера; 10 – возвратная пружина; 11 – контактная пружина; 12 – скоба; 13 – включающая катушка; 14 – якорь; 15 – стальная скоба-основание; 16 – гибкая токоведущая связь; 17 – пружина; 18 – призма вращения (сменная пластинка); 19 – призма-вставка; 20 – фасонная планка

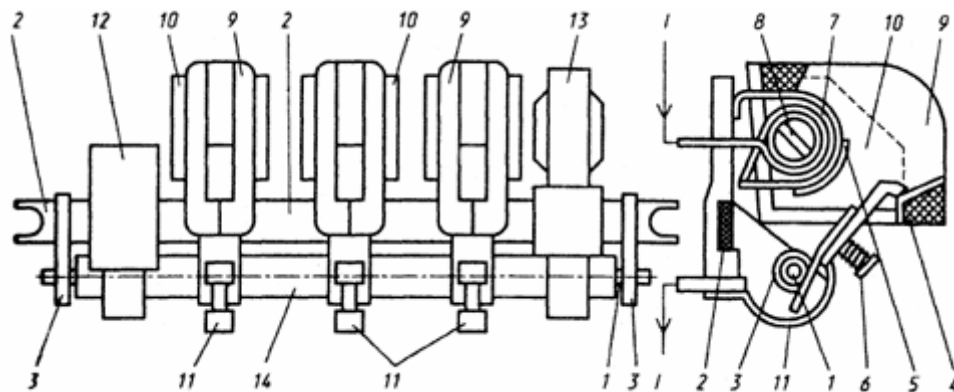


Рис. 3. Устройство контактора серии КТ-5000 (6000, 7000)

1 – вал; 2 – металлическая изолированная рейка; 3 – подшипники; 4 и 5 – подвижный и неподвижный контакты; 6 – контактная пружина; 7 – катушка магнитного дутья (МД); 8 – сердечник системы МД; 9 – дугогасительная камера; 10 – полюса системы МД; 11 – гибкая токоведущая связь; 12 – узел вспомогательных контактов; 13 – электромагнит; 14 – изоляционный слой на металлическом валу

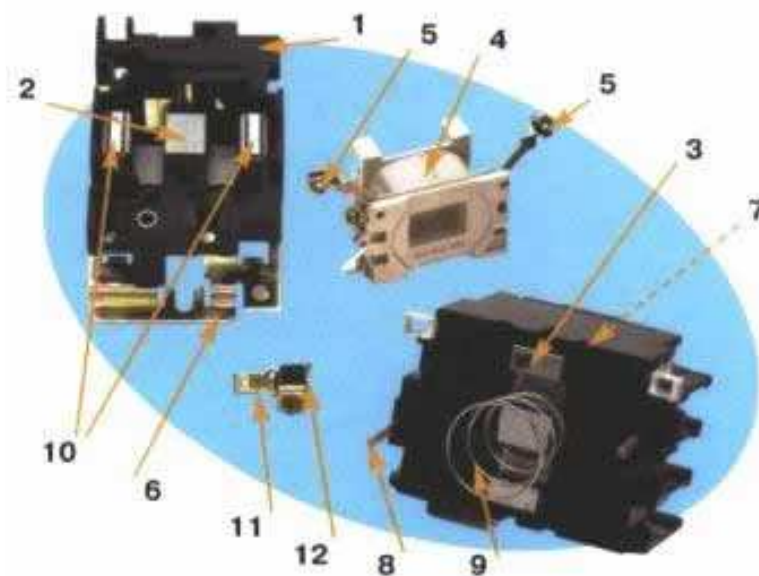


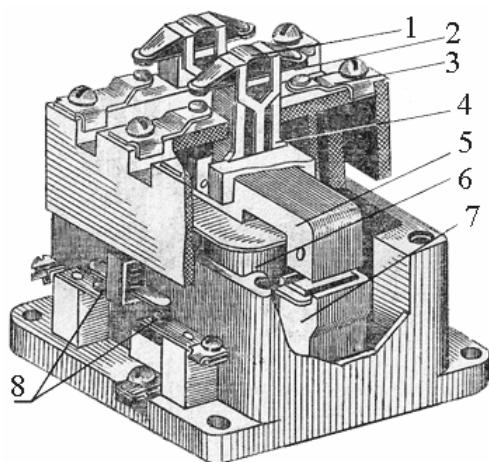
Рис. 4. Устройство контактора серии КМИ

1 – основание из термостойкой ABS-пластмассы; 2 – неподвижная часть магнитной системы; 3 – подвижная часть магнитной системы; 4 – втягивающая катушка; 5 – контактные зажимы; 6 – металлическая платформа (для номиналов свыше 25 А); 7 – траверса с подвижными мостиковыми контактами; 8 – крепежный винт; 9 – возвратная пружина; 10 – алюминиевые кольца; 11 – неподвижный контакт; 12 – присоединительный зажим с насечкой для фиксации внешних проводников

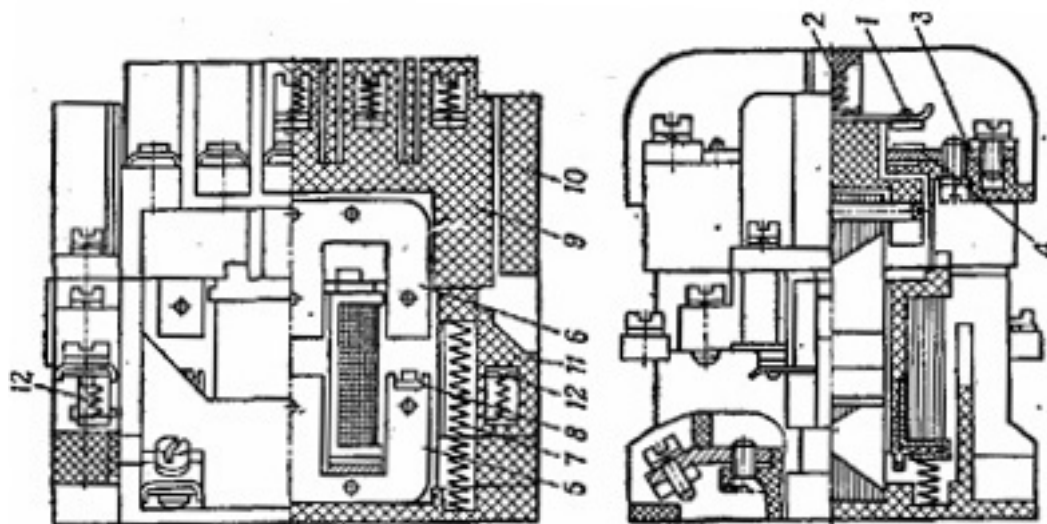
Внутри корпуса пускателя (рис. 5, а) размещена электромагнитная система, включающая в себя неподвижную Ш-образную часть сердечника 7 и обмотку 6, намотанную на катушку. Сердечник набран из изолированных друг от друга (для уменьшения потерь от вихревых токов) листов электротехнической стали. Подвижная часть сердечника 5 (якорь) соединена с пластмассовой траверсой 4, на которой смонтированы контактные мостики 1 с подвижными контактами. Плавность замыкания контактов и необходимое усилие нажатия обеспечиваются контактными пружинами 2. Неподвижные контакты припаяны к контактным пластинам 3, снабженным винтовыми зажимами для присоединения проводов внешней цепи. Кроме главных контактов, пускатели имеют дополнительные (блокировочные) контакты 8, расположенные на боковых поверхностях аппарата. Главные контакты закрыты крышкой, защищающей их от загрязнения, случайных прикосновений и междофазных замыканий.

При включении катушки пускателя по ней проходит электрический ток, сердечник намагничивается и притягивает якорь, при этом главные контакты замыкаются, по главной цепи протекает ток. При отключении пускателя катушка обесточивается, под действием возвратной пружины

7 (рис. 5, б) якорь возвращается в исходное положение, главные контакты размыкаются.



а)



б)

Рис. 5. Устройство магнитного пускателя серии ПМЕ

а) общий вид магнитного пускателя;

б) чертеж магнитного пускателя (1 – подвижный контакт, 2 – контактные пружины, 3 – токоведущие шинки, 4 – неподвижные контакты, 5 – Ш-образный сердечник, 6 – якорь, 7 – возвратные пружины, 8 – короткозамкнутый виток, 9 – изоляционная траверса, 10 – направляющие, 11 – часть литого корпуса, 12 – блок-контакты)

Подвижный контакт 1 (рис. 5, б) выполняется мостикового типа с самоустанавливанием. Токоведущие шинки 3 от зажимов к неподвижным контактам 4 выполняются таким образом, чтобы электродинамические силы сдували дугу с контактов.

Основной особенностью электромагнитного механизма является равенство ходов контакта и якоря электромагнита. Такая система имеет ряд недостатков, которые ведут к большому времени вибрации контактов (более 1 мс) и их быстрому износу. В современных пускателях такая система применяется только при малых мощностях двигателей (номинальный ток 25 А).

При отключении магнитного пускателя вследствие перебоев в электроснабжении размыкаются все его контакты, в том числе и вспомогательные. При появлении напряжения в сети пускатель не включается до тех пор, пока не будет нажата кнопка «Пуск». То же происходит, если напряжение в сети снижается до 50–60 % номинального значения.

Если электродвигатель включается рубильником, пакетным выключателем или контроллером, то при перебое в электроснабжении и остановке двигателя схема не нарушится, при восстановлении напряжения двигатель самопроизвольно включится в сеть. Такой самопроизвольный пуск двигателя может явиться причиной аварии или несчастного случая.

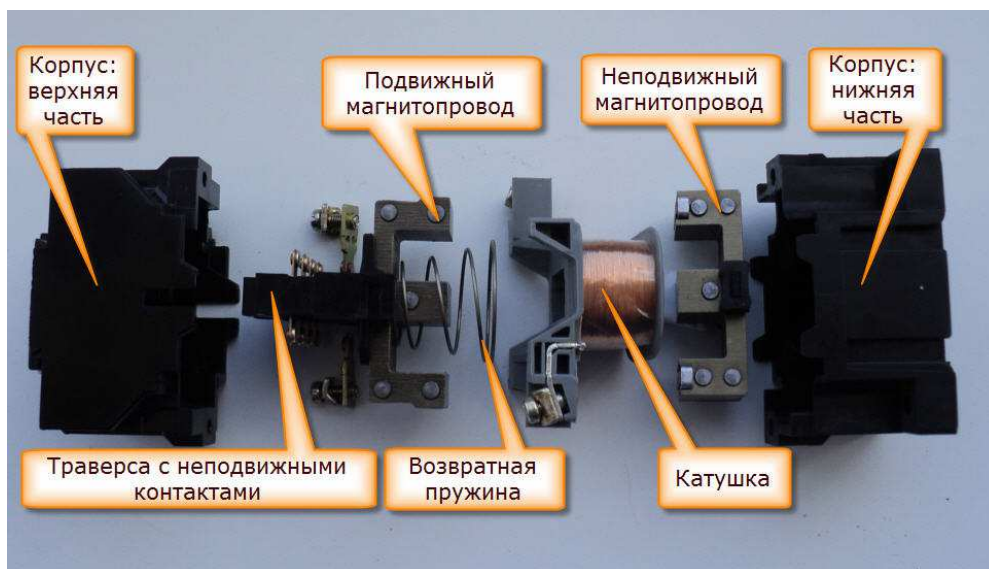


Рис. 6. Устройство магнитного пускателя серии ПМЛ

3.4. Расчет узлов контакторов постоянного и переменного тока

Расчет узлов контактора постоянного и переменного тока проводится в порядке, изложенном в разделах 2.5–2.8.

3.4.1. Расчет токоведущей шины

Параметры токоведущего контура должны быть рассчитаны так, чтобы при протекании тока отдельные его элементы не нагревались выше допустимых температур. Это обеспечивается выбором сечения токоведущих частей и силы нажатия в контактных соединениях.

1. **Конструктивная форма** токоведущих частей определяется в соответствии с конструктивной схемой электрического аппарата (прототипа). В качестве материала токоведущих частей контакторов чаще всего используется медь.

2. Для определения **размеров поперечного сечения** токоведущей шины используются соотношения, полученные на основе закона Ньютона, описывающего теплообмен [18, с. 65–67]:

$$s \cdot p = ab \cdot 2(a + b) = I^2 k_d \rho_\theta / k_{то} \cdot \tau_y;$$

$$n = a / b;$$

$$b = \sqrt[3]{\frac{I^2 k_d \rho_\theta}{2n(n+1) \cdot k_{то} \cdot \tau_y}}.$$

В этих выражениях значение тока принимается равным номинальному $I = I_n$, если контактор работает в продолжительном режиме.

Если контактор работает в кратковременном или повторно-кратковременном режиме в качестве значения тока используется величина эквивалентного длительного тока, которая определяется следующим образом:

$$I_{дл} = I_n \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{100} + \frac{Z}{600} \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{100}}},$$

где I_n – номинальный ток; ПВ – продолжительность включения в %; Z – количество включений в час (эти параметры указаны в техническом задании).

Отношение сторон токоведущей шины $n = a/b$ можно принять в контакторах в пределах $n = 1/2 - 1/5$.

Коэффициент добавочных потерь k_d принимается для постоянного тока равным 1. Для переменного тока промышленной частоты в первом приближении k_d также можно положить равным 1, а после расчета се-

чения шины (в случае необходимости) уточнить его значение [22, с. 102].

Установившееся превышение температуры $\tau_y = \theta - \theta_{cp}$ (здесь θ и θ_{cp} – температуры тела и окружающей среды) соответствует допустимому значению (табл. 4).

Если неизолированная токоведущая часть соприкасается с элементами, выполненными из изоляционных материалов, значение допустимой температуры ограничивается классом нагревостойкости изоляционного материала (табл. П.7, прил. III). Наиболее часто в контакторе используются изоляционные детали, соответствующие классу нагревостойкости А.

Таблица 4

*Допустимые температуры нагрева токоведущих частей
в нормальном режиме, °С*

Материал шины вывода	Наибольшая допустимая температура нагрева	
	До 1000 В	Свыше 1000 В
Медь, алюминий и его сплавы без защитных покрытий контактных поверхностей	95	80
То же с защитными покрытиями неблагородными металлами	105	90
Медь с защитным покрытием серебром	135	105

Температура окружающей среды принимается $\theta_{cp} = 40^{\circ}C$.

Удельное электрическое сопротивление при допустимой температуре рассчитывается по формуле

$$\rho_{\theta} = \rho_0(1 + \alpha\theta),$$

где величина температуры принимается равной допустимой $\theta = \tau_y + \theta_{cp}$; удельное электрическое сопротивление при нулевой температуре ρ_0 и температурный коэффициент сопротивления α выбираются по табл. П.11 (прил. IV) в зависимости от материала токоведущей шины.

Коэффициент теплоотдачи $k_{то}$ выбирается предварительно по табл. П.10 (прил. IV).

Рассчитав значение ширины токоведущей шины b , можно определить ее толщину $a = bn$.

Полученные значения необходимо округлить (округление производится в большую сторону) до величин, соответствующих размерам сортамента шин или лент (табл. П.15, П.16, прил. V).

Для контакторов с небольшими номинальными токами и мостиковыми контактами размеры шины необходимо согласовать с размерами контактных накладок (3.4.3, табл. 8, 9).

По табл. П.15, П.16 также определяется площадь поперечного сечения шины.

3. В режиме протекания тока короткого замыкания электрический аппарат должен быть термически устойчив. Термическая устойчивость определяется током термической устойчивости, который, протекая по проводнику в течение времени термической устойчивости, нагревает его до температуры, допустимой для кратковременного режима (табл. 5).

Контрольный расчет площади шины ведется по формуле

$$S = I_{\text{кз}} \sqrt{\frac{t_{\text{кз}}}{A_{\text{кз}} - A_{\text{н}}}},$$

где ток короткого замыкания (ток термической стойкости, предельный отключаемый ток) принимается равным $I_{\text{кз}} = 10I_{\text{н}}$, время короткого замыкания (время термической стойкости) принимается 1, 3 или 10 секунд (для контакторов $t_{\text{кз}} = 3$ с).

Значение теплового интеграла $A = j^2 t$ (j – плотность тока) в начале и в конце короткого замыкания $A_{\text{кз}}$ определяются по кривым (рис. 7). При этом значение $A_{\text{н}}$ соответствует допустимой температуре в установившемся режиме (см. предыдущий пункт), а значение $A_{\text{кз}}$ – допустимому значению температуры в режиме короткого замыкания (табл. 5).

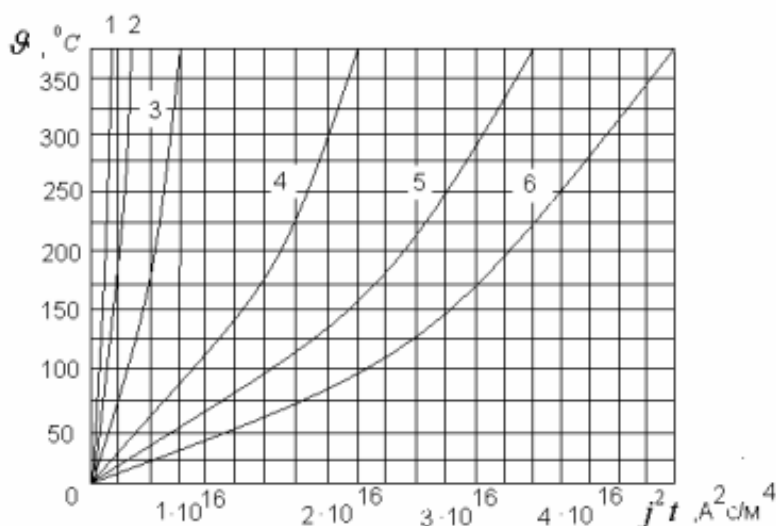


Рис. 7. Кривые нагрева проводников при кратковременном режиме
1 – железо, 2 – сталь, 3 – латунь, 4 – алюминий, 5 – серебро, 6 – медь

Таблица 5

Допустимые температуры нагрева токоведущих частей в режиме короткого замыкания, °С

Токоведущие части	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь
Неизолированные токоведущие части	300	300	200	400
Изолированные токоведущие части с изоляцией класса:				
У	200	200	200	200
А	250	250	200	250
В и С	300	300	200	400

Полученное значение сечения шины необходимо сравнить с сечением, рассчитанным по условию нагрева в продолжительном режиме (предыдущий пункт). Больше из двух сечений (в режимах номинального и предельного токов) и соответствующие этому сечению размеры шины принимаются за расчетные.

Оценка термической устойчивости может быть также проведена с использованием формулы

$$j = \frac{I_{кз}}{s} = \sqrt{\frac{\gamma c}{\rho_0 \cdot \alpha \cdot k_d \cdot t_{кз}} \ln \frac{(1 + \alpha T_{кз})}{(1 + \alpha T_H)}}$$

где j – плотность тока, γ – плотность (удельный вес), c – удельная теплоемкость материала (табл. П.11, прил. IV), T_H , $T_{кз}$ – температуры в начале и конце короткого замыкания в кельвинах. Остальные обозначения соответствуют использованным ранее.

Если полученная плотность тока j превышает допустимое значение (табл. 6), необходимо увеличить площадь сечения токоведущей части s .

Таблица 6

Допустимая плотность тока в режиме короткого замыкания, А/кв. мм

Материал	Время термической устойчивости, с		
	1	5	10
Медь	152	67	48
Алюминий	89	40	28
Латунь	73	38	27

4. Поверочный тепловой расчет шины производится с использованием уточненного коэффициента теплоотдачи (учитывается теплоотдача конвективным путем и излучением)

$$k_{\text{то}} = 1,33 \cdot \frac{(T - T_{\text{ср}})^{0,25}}{L^{0,25}} + 2,04 \cdot 10^{-7} T_{\text{ср}}^3 \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{2,08T}{T_{\text{ср}}} - 1 \right), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{С}).$$

Данная формула справедлива для теплообмена в неограниченном пространстве. Если теплоотвод ограничен (например, аппарат находится в оболочке, на пути тепловых потоков имеются барьеры) коэффициент теплоотдачи необходимо уменьшить в 1,2–1,5 раза.

Здесь температура элемента (шины) T и температура окружающей среды (воздуха) $T_{\text{ср}}$ измеряются в кельвинах ($T = \theta + 273$), определяющий размер L – в метрах. В качестве определяющего размера принимается: диаметр – для горизонтальных круглых проводников; высота шины – для горизонтальных прямоугольных проводников.

Степень черноты ε равна:

алюминиевые проводники – 0,05–0,07;

медь окисленная – 0,5–0,78;

латунь – 0,06–0,22;

сталь окисленная – 0,7–0,82;

сталь оцинкованная – 0,22–0,27;

чугун – 0,25–0,81.

Температура шины определяется с использованием уравнений

$$\tau_y = I^2 k_{\text{д}} \rho_{\theta} / (s \cdot p k_{\text{то}});$$

$$p = 2(a + b);$$

$$\theta = \tau_y + \theta_{\text{ср}}.$$

В этих выражениях периметр $p = 2(a + b)$ и сечение шины s соответствуют выбранным размерам шины.

Если рассчитанная и предполагаемая температуры отличаются более чем на 5 %, расчеты следует скорректировать (повторить до получения удовлетворительной погрешности).

3.4.2. Примеры расчета токоведущей шины

Пример № 1. Рассчитать размеры шины токоведущей части контактора постоянного тока.

Исходные данные: номинальный ток – 400 А, номинальное напряжение – 440 В. Режим работы – длительный.

1. Конструкция токоведущей части представлена на рис. 8.

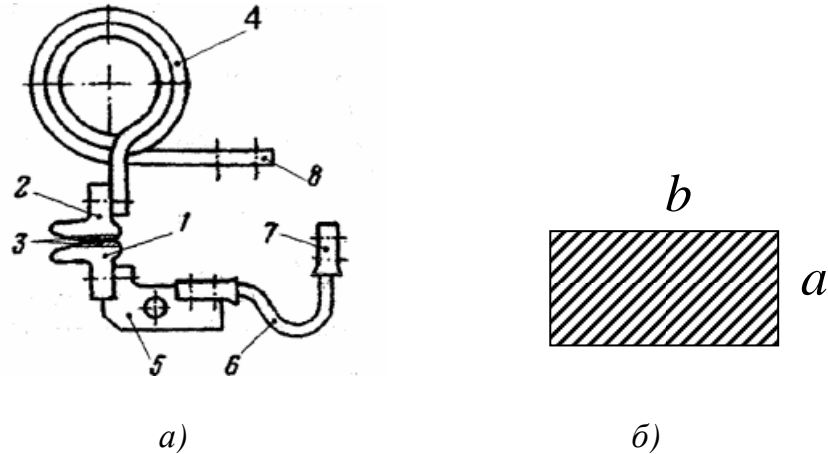


Рис. 8. Токоведущая часть контактора постоянного тока (а) и сечение шины токоподвода (б)

1 – подвижный силовой контакт, 2 – неподвижный силовой контакт, 3 – контактные накладки, 4 – катушка дугогасительной системы, 5, 7, 8 – токоподводы, 6 – гибкие соединения

Используем в качестве проводникового материала медь.

2. Для медной шины без защитных покрытий контактных поверхностей при продолжительном режиме допустимая температура $\theta = 95^{\circ}\text{C}$ (табл. 4). При температуре окружающей среды $\theta_{\text{ср}} = 40^{\circ}\text{C}$ допустимое превышение температуры составит $\tau_y = \theta - \theta_{\text{ср}} = 95 - 40 = 55^{\circ}\text{C}$.

Принимая коэффициент добавочных потерь $k_d = 1$, отношение сторон токоведущей шины $n = a/b = 1/3$, коэффициент теплоотдачи $k_{\text{то}} = 7,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{C})$ (табл. П.10, прил. IV), рассчитываем размеры токоведущей шины

$$b = \sqrt[3]{\frac{I^2 k_d \rho_{\theta}}{2n(n+1) \cdot k_{\text{то}} \cdot \tau_y}} = \sqrt[3]{\frac{400^2 \cdot 1 \cdot 2,28 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 1/3(1/3+1) \cdot 7,5 \cdot 55}} = 0,02 \text{ м},$$

$$a = b \cdot n = 0,02 \cdot 1/3 = 0,0067 \text{ м}.$$

Здесь удельное электрическое сопротивление при допустимой температуре $\rho_{\theta} = \rho_0(1 + \alpha\theta) = 1,62 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0043 \cdot 95) = 2,28 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (удельное электрическое сопротивление меди при нулевой температуре $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 0,0043 \text{ 1}/^{\circ}\text{C}$ по табл. П.11, прил. IV).

В соответствие с полученными значениями и сортаментом шин (табл. 16, прил. V) принимаем размеры $b = 20 \text{ мм}$, $a = 7 \text{ мм}$, $s = 140 \text{ мм}^2$.

3. Принимая ток короткого замыкания равным $I_{кз} = 10I_H = 10 \cdot 400 \text{ А}$, а время термической стойкости $t_{кз} = 3 \text{ с}$, определяем необходимую площадь из условия термической стойкости

$$s = I_{кз} \sqrt{\frac{t_{кз}}{A_{кз} - A_H}} = 4000 \sqrt{\frac{3}{3,75 \cdot 10^4 - 1,2 \cdot 10^4}} = 43,4 \text{ мм}^2.$$

Здесь значения теплового интеграла в начале и в конце короткого замыкания (для температур 95 и 300 градусов Цельсия соответственно) $A_H = 1,2 \cdot 10^4$; $A_{кз} = 3,75 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с/мм}^4$ определяются по рис. 7. Иллюстрация к определению значений интегралов дана на рис. 9.

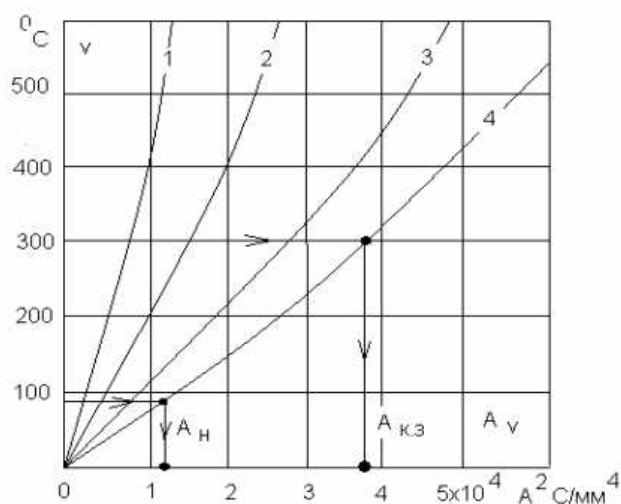


Рис. 9. К определению тепловых интегралов в кратковременном режиме
1 – латунь; 2 – алюминий; 3 – серебро; 4 – медь

Так как сечение, рассчитанное из условия термической стойкости, меньше сечения, рассчитанного из условия длительного протекания тока в нормальном режиме, окончательно принимаем следующие размеры шины: $b = 20 \text{ мм}$, $a = 7 \text{ мм}$, $s = 140 \text{ мм}^2$.

4. Уточненное значение коэффициента теплоотдачи

$$\begin{aligned} k_{то} &= 1,33 \cdot \frac{(T - T_{ср})^{0,25}}{L^{0,25}} + 2,04 \cdot 10^{-7} T_{ср}^3 \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{2,08T}{T_{ср}} - 1 \right) = \\ &= 1,33 \cdot \frac{(368 - 313)^{0,25}}{(7 \cdot 10^{-3})^{0,25}} + 2,04 \cdot 10^{-7} 313^3 \cdot 0,644 \cdot \left(\frac{2,08 \cdot 368}{313} - 1 \right) = \\ &= 18,3, \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{С}). \end{aligned}$$

С учетом ухудшения теплоотдачи в закрытых объемах $k_{то} = 18,3 / 1,5 = 12,2 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{С})$.

Уточненное значение температуры шины

$$\tau_y = I^2 k_{\text{д}} \rho_{\theta} / (s \cdot p k_{\text{то}}) = 400^2 \cdot 1 \cdot 2,28 \cdot 10^{-8} / (140 \cdot 10^{-6} \cdot 54 \cdot 10^{-3} \cdot 12,2) = 39,6 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$p = 2(a + b) = 2(7 + 20) \cdot 10^{-3} = 54 \cdot 10^{-3};$$

$$\theta = \tau_y + \theta_{\text{ср}} = 39,6 + 40 = 79,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отметим, что уточненное значение температуры отличается от ранее принятого $\theta = 95 \text{ } ^\circ\text{C}$ более чем на 5 %, поэтому требуется корректировка расчетов.

Пересчитывая удельное электрическое сопротивление и коэффициент теплоотдачи применительно к температуре $\theta = 79,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, получим окончательно $\theta = 77 \text{ } ^\circ\text{C}$. Данное значение отличается от предыдущего менее чем на 5 %.

Пример № 2. Рассчитать размеры токоведущей части пускателя переменного тока (контакты пускателя мостикового типа).

Исходные данные: номинальный ток – 12,5 А, номинальное напряжение – 380 В. Режим работы – S3, ПВ=40 %, количество включений в час $Z = 600$.

1. Конструкция мостикового контакта с токоведущими частями контактной системы представлена на рис. 11.

Для токоведущей шины используем в качестве проводникового материала медь.

2. Рассчитаем размеры медной шины из условия допустимой плотности тока.

Допустимая плотность тока для медных проводников обычно лежит в пределах от 2 (большие токи) до 6 (малые токи) А/кв. мм.

Пускатель работает в повторно-кратковременном режиме, поэтому в качестве значения тока используется величина эквивалентного длительного тока (раздел 3.4.1)

$$I_{\text{дл}} = I_{\text{н}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{100} + \frac{Z}{600} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{100}}} = 12,5 \cdot \sqrt{\frac{40}{100} + \frac{600}{600} \cdot \sqrt{\frac{40}{100}}} = 12,7 \text{ А}.$$

Принимая допустимую плотность тока в номинальном режиме $j_{\text{н}} = 4 \text{ А/мм}^2$, получим сечение шины

$$s = I_{\text{дл}} / j_{\text{н}} = 12,7 / 4 = 3,175 \text{ мм}^2.$$

Исходя из рекомендуемых размеров контактных накладок (диаметр контактной накладки 6 мм, табл. 8) принимаем ширину шины $b = 6 \text{ мм}$.

Толщина шины $a = s / b = 3,175 / 6 = 0,5 \text{ мм}$.

Исходя из условия механической прочности и в соответствии с сортаментом лент (табл. П.15, прил. V) примем $a=1,25$ мм. При этом $n = a / b = 1,25 / 6 = 0,2$, сечение шины $s = a \cdot b = 1,25 \cdot 6 = 7,5$ мм².

3. Оценку термической устойчивости проведем с использованием формулы (раздел 3.4.1)

$$j = \frac{I_{кз}}{s} = \sqrt{\frac{\gamma c}{\rho_0 \cdot \alpha \cdot k_d \cdot t_{кз}} \ln \frac{(1 + \alpha T_{кз})}{(1 + \alpha T_H)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{8,7 \cdot 10^3 \cdot 390}{1,62 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043 \cdot 1 \cdot 3} \ln \frac{(1 + 0,0043 \cdot (273 + 300))}{(1 + 0,0043 \cdot (273 + 95))}} = 69 \cdot 10^6 \text{ А/мм}^2,$$

где T_H , $T_{кз}$ – температуры в начале и конце короткого замыкания приняты равными допустимым значениям в номинальном режиме ($\theta = 95^0 \text{ C}$) и в конце короткого замыкания ($\theta = 300^0 \text{ C}$).

Полученная плотность тока j не превышает допустимое значение (табл. 6).

4. Принимая коэффициент теплоотдачи $k_{то} = 7,5$ Вт/(м²С) (табл. П.10, прил. IV), рассчитываем значение температуры шины в номинальном режиме

$$\tau_y = I^2 k_d \rho_\theta / (s \cdot p k_{то}) = 12,7^2 \cdot 1 \cdot 2,28 \cdot 10^{-8} / (7,5 \cdot 10^{-6} \cdot 14,5 \cdot 10^{-3} \cdot 7,5) =$$

$$= 4,5^0 \text{ C};$$

$$p = 2(a + b) = 2(1,25 + 6) \cdot 10^{-3} = 14,5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\theta = \tau_y + \theta_{cp} = 4,5 + 40 = 44,5^0 \text{ C}.$$

Здесь удельное электрическое сопротивление при допустимой температуре $\rho_\theta = \rho_0(1 + \alpha\theta) = 1,62 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0043 \cdot 95) = 2,28 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (удельное электрическое сопротивление меди при нулевой температуре $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 0,0043$ 1/⁰С по табл. П.11, прил. IV).

После корректировки удельного сопротивления получим $\theta = \tau_y + \theta_{cp} = 2,3 + 40 = 42,3^0 \text{ C}$.

Очевидно, что при принятых размерах шины перегрева свыше допустимой температуры как в номинальном, так и в аварийном режиме не произойдет.

3.4.3. Расчет коммутирующих контактов

Контакты должны обеспечить не только длительную работу без недопустимого перегрева в условиях нормального режима, но также и требуемую термическую и электродинамическую стойкость в режиме короткого замыкания. Коммутирующие контакты не должны разрушаться под действием высокой температуры электрической дуги, которая образуется при их размыкании, и надежно замыкаться без приваривания и оплавления при включении на короткое замыкание.

Обычно при расчете требуется определить силу контактного нажатия, при которой температура нагрева места контактирования (контактной точки, контактного пятна) не превысит допустимую. В режиме длительного протекания тока контакты рассчитываются из условия, чтобы выделяемая в них тепловая мощность в совокупности с условиями теплоотдачи создавала бы такой нагрев, при котором температура контактной точки не превышала бы допустимую (табл. П.9, прил. III), которая в пределе не должна быть больше температуры рекристаллизации (размягчения) контактного материала (табл. П.12, прил. IV).

1. **Рекомендации** по выбору конструктивных форм контактов заключаются в следующем:

1) **точечный контакт** выбирается при небольших токах (доли и единицы ампер);

2) **линейный контакт** применяется при больших токах (сотни ампер);

3) **поверхностный** (плоскостной) контакт применяется при больших токах;

4) **мостиковые контакты** применяются в электрических аппаратах с прямоходовой подвижной системой. Так как такие контакты имеют плохие условия очистки, они изготавливаются из серебра или металлокерамики;

5) **рычажные (пальцевые) контакты** применяются в электрических аппаратах с поворотной подвижной системой, т.е. когда контакты касаются раньше, чем подвижная система достигнет конечного положения. Такие контакты создают хорошие условия очистки, поэтому в качестве материалов может применяться медь.

Преимущественное распространение в контакторах получили контакты рычажного и мостикового типов (рис. 10, 11).

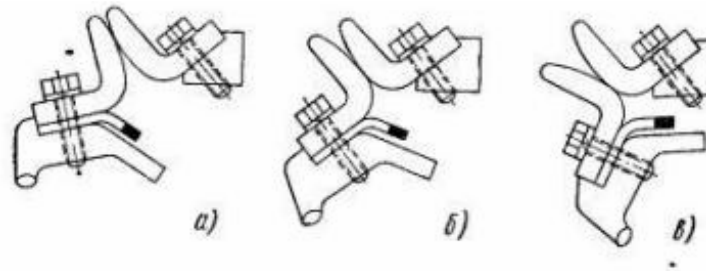


Рис. 10. Рычажные контакты
 а) момент начального замыкания; б) промежуточное положение;
 в) включенное положение

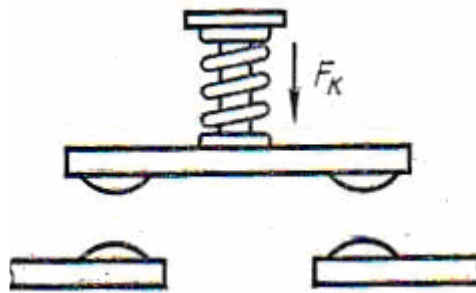


Рис. 11. Мостиковые контакты

2. От материала контакта в сильной степени зависят его срок службы и надежность работы.

Требования, предъявляемые к материалам контактных соединений:

1. Высокая электропроводность и теплопроводность.
2. Стойкость против коррозии.
3. Стойкость против образования пленок.
4. Малая твердость материала (для уменьшения силы нажатия).
5. Высокая твердость (для уменьшения механического износа при частых включениях и отключениях).
6. Малая эрозия.
7. Высокая дугостойкость (температура плавления).
8. Высокое значение тока и напряжения, необходимые для дугообразования.
9. Простота обработки и низкая стоимость.

Существуют три **основные разновидности материалов контактов** – металлы, их сплавы и металлокерамика (табл. 7).

Применение материалов в контактах

Материал	Маломощные контакты (ток менее 5 А)	Мощные контакты (ток более 5 А)
Чистые металлы	Pt, Au, Ir, Pd, Ag, W, Cu	Cu, Ag, W, Cd
Сплавы	Ag–Au, Ag–Pt, Ag–Pd, Au–Zr, Ag–Au–Pt, Pt–Ir, Pd–Ir, Pt–Ru	Ag–Cd, Cu–Pd, W–Mo
Металлокерамика	Ag–Mo, Ag–CrO	Ag–CdO, Cu–W, Ag–W, Ag–Ni, Ag–C, Ag–CuO

Для выбора материала коммутирующих контактов используются рекомендации, полученные на основе опыта проектирования и эксплуатации электрических аппаратов.

Медь – самый распространенный контактный материал, удовлетворяет почти всем перечисленным выше требованиям, за исключением коррозионной стойкости. Оксиды меди имеют низкую проводимость. Медь используется как для разборных, так и для коммутирующих контактов. В разборных соединениях применяют антикоррозионные покрытия рабочих поверхностей.

В коммутирующих контактах медь применяется при нажатиях свыше 3 Н для всех режимов работы, кроме продолжительного. Для продолжительного режима медь не рекомендуется, но если она применена, то следует принять меры по борьбе с окислением рабочих поверхностей. Медь может использоваться и для дугогасительных контактов. При малых контактных нажатиях ($F < 3$ Н) применение медных контактов не рекомендуется.

Серебро – очень хороший контактный материал, удовлетворяющий всем требованиям, за исключением дугостойкости при значительных токах. При малых токах обладает хорошей износостойкостью. Оксиды серебра имеют почти такую же проводимость, как и чистое серебро. Серебро используется для главных контактов в аппаратах на большие токи, для всех контактов продолжительного режима работы. В контактах на малые токи серебро используется при малых нажатиях (контакты реле, контакты вспомогательных цепей).

Применяется серебро обычно в виде накладок – вся деталь выполняется из меди или другого материала, на который приваривается (припаивается) серебряная накладка, образующая рабочую поверхность.

Алюминий по сравнению с медью обладает значительно меньшими проводимостью и механической прочностью. Он образует плохо прово-

дующую твердую оксидную пленку, что существенно ограничивает его применение. Алюминий может использоваться в разборных контактных соединениях (шинопроводы, монтажные провода). При этом контактные рабочие поверхности серебрятся, омедняются или армируются медью. Следует, однако, иметь в виду невысокую механическую прочность алюминия, вследствие чего соединения могут со временем ослабнуть, а контакт – нарушиться (не следует завышать контактное нажатие). Для коммутирующих контактов алюминий непригоден.

Платина, золото, молибден применяются для коммутирующих контактов на очень малые токи при малых нажатиях. Платина и золото не образуют оксидных пленок, контакты из этих металлов имеют малое переходное сопротивление.

Вольфрам и сплавы из вольфрама при большой твердости и высокой температуре плавления обладают высокой электрической износостойкостью. Вольфрам и сплавы (вольфрам – молибден, вольфрам – платина и другие) применяются при малых токах для контактов с большой частотой размыкания. При средних и больших токах они используются в качестве дугогасительных контактов на отключаемые токи до 100 кА и более.

Металлокерамика – механическая смесь двух практически не сплавляющихся металлов, получаемая методом спекания смеси их порошков или пропиткой одного расплавом другого. При этом один из металлов имеет хорошую проводимость, а другой обладает большой механической прочностью, является тугоплавким и дугостойким. Металлокерамика, таким образом, сочетает высокую дугостойкость с относительно хорошей проводимостью.

Наиболее распространенными композициями металлокерамики являются: серебро – вольфрам, серебро – молибден, серебро – никель, серебро – оксид кадмия, серебро – графит, серебро – графит – никель, медь – вольфрам, медь – молибден и другие. Применяется металлокерамика для дугогасительных контактов (композиции с серебром, в основном для переменного тока) на средние и большие отключаемые токи, а также для главных контактов на номинальные токи до 600 А.

Коммутирующие контакты, предназначенные для работы на открытом воздухе, рекомендуется изготавливать из материалов, слабо поддающихся окислению, или покрывать их поверхность антикоррозийным слоем. К таким материалам относится, в частности, серебро, которым можно покрыть контактные поверхности.

Особенно хорошо сопротивляются разрушающему действию электрической дуги контакты из металлокерамики. Такое соединение обладает одновременно хорошей электропроводностью вследствие исполь-

зования меди или серебра и высокой температурой плавления благодаря использованию вольфрама или молибдена.

3. **Размеры накладок контактов** (диаметр и высота – для цилиндрических контактов; длина, ширина, высота – для прямоугольных накладок) выбираются по рекомендациям, полученным на основе опыта проектирования (табл. 8, 9).

Таблица 8

Размеры цилиндрических контактов и контактных накладок

Номинальный ток, А	Диаметр контакта, мм	Высота контакта, мм
до 2	1–2	0,3–1
2–5	2–4	0,6–1,2
5–10	3–5	0,8–1,6
10–20	5–8	1–2
20–40	8–12	1,2–2,2
40–63	12–16	1,4–2,5
61–100	16–20	1,6–3
100–160	20–25	2,2–3
160–250	25–32	2,5–3,5

Таблица 9

Размеры прямоугольных накладок контактов

Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм
4; 5	3; 4; 5	0,8; 1; 1,6
6; 8; 10	3; 4; 6; 8; 10	1; 1,2; 1,4; 1,6; 2,2
12; 14	6; 8; 10; 12; 14	1; 1,4; 1,6; 2,2; 2,5
16; 20	8; 10; 14; 16; 20	1,6; 2; 2,2; 2,5; 3
25; 32	12; 16; 20; 25; 32	3; 3,5; 5
40; 50	14; 20; 25; 32; 40	2,5; 3; 3,5; 5

Примечания: 1. Наименьшая ширина накладки равна половине ее длины. Наибольшая ширина равна длине.

2. Величина номинального тока ориентировочно может быть определена по табл. 8 путем сопоставления площади прямоугольника с кругом.

Размеры контактов на большие токи определяются по сечению токоведущих частей. При этом учитываются следующие рекомендации:

1) сечение контактов должно быть больше сечения вводных шин с целью увеличения механической прочности и износостойкости контактов;

2) ширина неподвижного контакта выбирается несколько большей подвижного вследствие возможного отклонения подвижного контакта от центрального положения.

4. Для **расчета силы контактного нажатия** могут быть использованы следующие выражения:

для сильноточных контактов (теоретическая зависимость для точечного контакта)

$$F_{к1} = I_{н}^2 \frac{B \cdot \pi \cdot HB}{16\lambda^2 \left(\arccos \frac{T_{к}}{T_{а}}\right)^2},$$

где B – число Лоренца (для металлов $B = 2,3 \cdot 10^{-8}$, $(В \cdot ^{\circ}С)^2$); HB – твердость по Бринеллю; $T_{к}$ – температура контакта в кельвинах (принимается равной допустимой температуре по табл. П.9, прил. III), $T_{а}$ – температура контактной площадки в кельвинах (принимается на 5–15 град. Цельсия больше температуры контакта).

Твердость по Бринеллю ($кГ/мм^2$) для материалов коммутирующих контактов:

серебро, окись меди с мелкодисперсионной структурой (КМК-А20м) – 55 – 65;

серебро, никель (КМК-А30) – 55 – 75;

то же с мелкодисперсионной структурой (КМК-А30м) – 65 – 85;

серебро, никель, графит (КМК-А32) – 45 – 65;

то же с мелкодисперсионной структурой (КМК-А32м) – 65 – 85;

серебро, никель (КМК-А31) – 60 – 80;

то же с мелкодисперсионной структурой (КМК-А31м) – 80 – 110;

серебро, графит (КМК-А40) – 25 – 40;

серебро, кадмий, никель (КМК-А50) – 50 – 70;

медь, графит (КМК-Б10) – 20 – 35;

медь твердотянутая (М1-тв) – 80 – 120;

медь металлокерамика (ММ) – 75 – 90;

медь кадмиевая твердотянутая (МК-тв) – 90 – 130;

медь, кадмий, металлокерамика (ММК) – 95 – 110.

На основе опытных данных сила контактного нажатия определяется как

$$F_{к} = f_{к} I_{н},$$

где $f_{к}$ – удельное контактное нажатие (табл. 10).

Для серебряных контактов контакторов $f_k = 0,07 - 0,145$ Н/А, для медных $f_k = 0,145 - 0,24$ Н/А.

В качестве окончательного варианта принимается большее значение из двух рассчитанных.

Для расчета *силы контактного нажатия в слаботочных контактах* используется следующий алгоритм.

Для слаботочных контактов принимают, что допустимое падение напряжения не должно превосходить напряжения размягчения $U_{к.доп} \leq (0,5 - 0,8)U_p$ (напряжение размягчения U_p принимают по табл. 11 в зависимости от материала контактов).

По величине тока I , который должны пропускать контакты, определяют допустимое сопротивление контакта $R_{к.доп} = U_{к.доп} / I$.

Таблица 10

Удельное контактное нажатие

Вид аппарата	Материал контактов	Удельное нажатие, Гс/А
Блок-контакты аппаратов до 1000 В Контакторы электромагнитные пневматические тяговые	Серебро	5
	Серебро	5–10
	Металлокерамика	7–15
	Медь	15–25
	Медь	16–20

Таблица 11

Напряжения размягчения и плавления

Материал	Напряжение размягчения, В	Напряжение плавления, В
Серебро	0,09	0,37
Золото	0,08	0,43
Медь	0,12	0,43
Никель	0,22	0,65
Платина	0,25	0,65
Вольфрам	0,4	1,1

При выбранном материале контактов знание сопротивления контактов позволяет отыскать величину площадки касания контактов и необходимую силу сжатия контактов (см. пункт 5).

Сила предварительного (начального) контактного нажатия составляет $F_{кн} = (0,4 - 0,75) F_к$.

5. Переходное сопротивление рассчитывается по теоретическим формулам $R_к = \rho / 2a$ и эмпирическим зависимостям $R_к = K_0 / F_к^m$ [18, табл. 5-7].

При использовании теоретической формулы радиус площадки касания в случае упругой деформации при сжатии контактов силой $F_к$ гладких поверхностей шар – плоскость из одинаковых материалов определяется формулой Герца

$$a_{шш} = 1,11 \sqrt[3]{F_к r / (En)},$$

где r – радиус шара; E – модуль упругости;

при сжатии двух одинаковых шаровых поверхностей – выражением

$$a_{шш} = 0,86 \sqrt[3]{F_к r / (En)}.$$

Если деформация при сжатии контактов носит пластический характер, то радиус площадки касания определяется как

$$a = \sqrt{F_к / (\pi \sigma_{см})},$$

где $\sigma_{см}$ – временное сопротивление смятия материала контактов.

Значения коэффициента K_0 приводятся в справочных таблицах (табл. 12).

Показатель степени m принимается равным: для точечного контакта ($n = 1$) – 0,5; для линейного ($n = 2$) – 0,5–0,8; для плоскостного ($n \geq 3$) – 1.

Более точной является формула, учитывающая температуру контакта $\theta_к$

$$R_к = K_0 \left(1 + \frac{2}{3} \frac{\alpha \theta_к}{F_к^m} \right),$$

где α температурный коэффициент сопротивления материала контактов (табл. П11, прил. IV).

Также переходное сопротивление может быть определено на основе опытных данных (рис. 12).

Таблица 12

Коэффициент K_0 для расчета сопротивления контакта

Материал контактов	Условия	Значения K_0 , Ом · Н ^m
Алюминий – алюминий	Сильноточные	0,003–0,006
Алюминий – латунь	Сильноточные	0,0019
Алюминий – медь	Сильноточные	0,00098
Алюминий – сталь	Сильноточные	0,0044
Сталь – сталь	Сильноточные	0,0076
Латунь – латунь	Сильноточные	0,00067
Латунь – железо	Сильноточные	0,00304
Латунь – медь	Сильноточные	0,00038
Медь луженая – медь, Медь – медь	Сильноточные	0,0004
Медь луженая – медь луженая	Сильноточные	0,0001
Серебро–серебро	Сильноточные	0,00005
Олово – олово	Сильноточные	0,00048
Медь – медь	Слаботочные, плоскостной контакт	0,00009–0,00028
Медь – медь	Слаботочные, точечный контакт	0,00014–0,00017
Медь – медь	Слаботочные, щеточный контакт	0,0001
Медь луженая–медь луженая	Слаботочные	0,00007–0,0001
Серебро–серебро	Слаботочные	0,00006

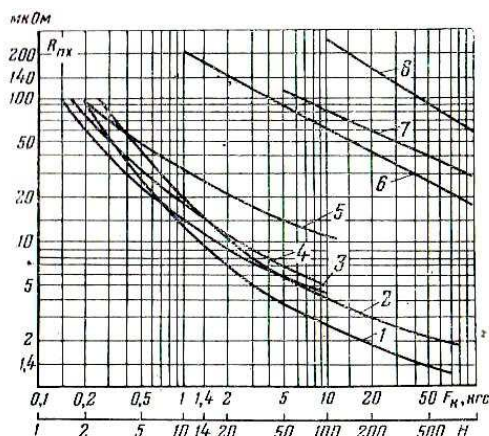


Рис. 12. Зависимости переходного сопротивления контакта от силы нажатия

1 – серебряный плоский; 2 – медный плоский; 3 – серебряный линейный; 4 – медный линейный; 5 – серебряный точечный; 6 – медный свежезачищенный точечный (медь твердая); 7 – медный (медь твердая); 8 – медь-вольфрам

6. **Расчет температуры контактов** производится по формуле

$$\theta_k = \theta + \frac{1}{2} I^2 R_k / (\sqrt{\lambda k_{то} ps}),$$

где θ – температура проводника (шины), p, s – периметр и площадь поперечного сечения токоведущей части, λ – удельная теплопроводность для материала токоведущей части, $k_{то}$ – коэффициент теплоотдачи.

Для мостикового контакта температура контакт-детали определяется как

$$\theta_k = \theta + I^2 R_k / (\sqrt{\lambda k_{то} ps}).$$

При расчете температуры контактной площадки используется формула

$$\theta_a = \theta_k + I^2 R_k^2 / (8\lambda\rho).$$

Рассчитанное значение температуры контактов не должно превышать допустимой, устанавливаемой ГОСТ (табл. П.9, прил. III), или хотя бы температуры рекристаллизации (табл. П.12, прил. IV).

Температуры рекристаллизации составляют: для серебра – $\theta_p = 150^\circ\text{C}$, для меди – $\theta_p = 190^\circ\text{C}$, для железа – $\theta_p = 500^\circ\text{C}$, для алюминия – $\theta_p = 150^\circ\text{C}$, для никеля $\theta_p = 520^\circ\text{C}$, для вольфрама – $\theta_p = 1000^\circ\text{C}$.

Для уменьшения нагрева можно увеличить массу металла контактов и их охлаждаемую поверхность, что усилит теплоотвод. Чтобы снизить переходное сопротивление, необходимо повысить контактное давление, выбрать соответствующий материал и тип контактов.

7. При прохождении через контакты тока такой величины, при которой температура контактных точек достигает температуры плавления материала контактов, между ними появляются силы сцепления и происходит сваривание контактов. Сварившимися считаются такие контакты, когда сила, обеспечивающая их расхождение, не может преодолеть сил сцепления сварившихся контактов.

Проверка контактов на сваривание заключается в проверке условия $I_{кз} \leq I_{св}$.

При этом *ток сваривания для сильноточных контактов* определяется по эмпирической формуле Буткевича $I_{св} = k\sqrt{F_k}$ (коэффициент k выбирается по табл. 13) или по теоретической зависимости

$$I_{св} = A\sqrt{F_k}\sqrt{f_{кпл}}.$$

Здесь $A = \sqrt{\frac{32\lambda\theta_{\text{пл}}(1 + \frac{1}{3}\alpha\theta_{\text{пл}})}{\pi \cdot HV \cdot \rho_0(1 + \frac{2}{3}\alpha\theta_{\text{пл}})}}$ рассчитывается в соответствии с

температурой плавления $\theta_{\text{пл}}$ и теплопроводностью λ для материала контакта (табл. П.11–П.14, прил. IV), величина $f_{\text{кпл}} = 2 - 4$.

Для точечных контактов минимальный плавящий ток (ток сваривания) рассчитывается по формуле

$$I_{\text{пл}\infty} = a_{\text{пл}} \sqrt{\frac{32\lambda_{\text{пл}}\theta_{\text{к}}}{\rho_{\text{пл}}}},$$

где $a_{\text{пл}} = 1,5a$ – радиус площадки касания при температуре плавления, удельное электрическое сопротивление $\rho_{\text{пл}}$ и теплопроводность материала контактов $\lambda_{\text{пл}}$ выбираются при температуре плавления.

Таблица 13

Коэффициент k для расчета тока сваривания

Тип контакта	Материал	$k, \text{А/кГ}^{0,5}$
Щеточный	Медь – латунь	3000 – 4000
Пальцевый несамостоятельный	Медь – медь	4100
	Латунь – латунь	5050
Пальцевый самостоятельный	Медь – латунь	5750
Розеточный (на 1 элемент розетки)	Медь – латунь	5500
	Медь – медь	6000

Если ток сваривания меньше предельного (условие не сваривания контактов не выполняется), предпринимаются меры по повышению устойчивости контактов к свариванию (повышение силы контактного нажатия, уменьшение или устранение вибрации, выбор материалов, выбор формы контактной поверхности и др.). Наиболее простым средством предотвращения сваривания контактов является применение соответствующих материалов, а также целесообразное увеличение контактного нажатия.

8. Электродинамические усилия в контактах определяются при предельных токах (токах короткого замыкания) по формулам:

для одностороннего контакта

$$F_{\text{д}} = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \ln \frac{r}{a},$$

где r, a – радиус контакт-детали и площадки контактирования;

для многоточечного контакта

$$F_{\text{д}} = \frac{\mu_0}{4\pi} (I/n)^2 \ln \frac{r}{a},$$

где n – количество точек контактирования.

В общем случае

$$F_{\text{д}} = I^2 \ln \frac{S}{S_0} \cdot 10^{-7}, \text{ Н}; S_0 = \frac{F_{\text{к}}}{\sigma_{\text{см}}},$$

где S – площадь поперечного сечения контакт-детали (поперечное сечение токоведущей части, подводящей ток к контактной точке); S_0 – площадь в месте касания контактов (сечение площадки смятия); $\sigma_{\text{см}}$ – напряжение смятия для материала контакта.

Напряжение смятия $\sigma_{\text{см}}$ составляет:

для серебра – 30300 Н/см²;

для меди – 49050 – 50500 Н/см²;

для железа – 60000 Н/см²;

для алюминия – 29400 Н/см²;

для вольфрама – 293000 Н/см²;

для окиси кадмия – 13000 Н/см².

При расчете электродинамической силы для переменного тока по вышеприведенным формулам необходимо исходить из максимального мгновенного значения тока короткого замыкания. Как известно, им является ударный ток короткого замыкания $I_{\text{уд}} = k_{\text{уд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{кз}}$. Коэффициент $k_{\text{уд}}$ зависит от степени затухания апериодической составляющей тока и лежит в пределах от 1 до 2. Для сетей низкого напряжения характерна относительно большая степень затухания, определяемая малыми значениями электромагнитной постоянной времени (сотые доли секунды), и коэффициент $k_{\text{уд}} = 1,3$. Для сетей высокого напряжения $k_{\text{уд}} = 1,8$.

Например, при силе контактного нажатия $F_{\text{к}} = 196$ Н, площади сечения контакт-детали $S = 4$ см² и токе $I = 100$ кА величина электродинамической силы в медных контактах составит (для меди $\sigma_{\text{см}} = 49050$ Н/см²)

$$F_{\text{д}} = I^2 \ln \frac{S}{S_0} \cdot 10^{-7} = (1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 100 \cdot 10^3)^2 \ln \frac{4}{0,004} \cdot 10^{-7} = 44496 \text{ Н},$$

$$S_0 = \frac{196}{49050} = 0,004 \text{ см}^2.$$

Если электродинамические усилия превосходят силу контактной пружины, необходимо скорректировать ее значение (увеличить) с тем, чтобы при предельных токах не произошло самопроизвольное размыкание контактов. Также можно использовать ряд мер по компенсации электродинамических усилий в контактах [18, с. 198-199].

9. Определение износостойкости.

Факторами, определяющими **износ контактов**, являются: условия работы, конструкция аппарата, уменьшение провала контакта (линейный износ), объем и масса удаляемого с контактной поверхности материала.

Оценка износа производится, как правило, для электрического износа (эрозия), так как химический и механический износ определяются, в значительной степени, конкретными условиями применения аппарата.

Мерой износа является уменьшение провала (линейный износ), а также масса или объем удаляемого с поверхности контактов материала.

Износостойкость (срок службы) контактов, определяющая гарантируемое число коммутаций, зависит от объема (массы) подвергнутого износу материала и удельного объемного (массового) износа при одном размыкании и замыкании [18, раздел 5-7]. Допускается, что износ каждого контакта может составлять 0,5–0,75 его первоначальной толщины. Показатели удельного износа определяются по опытным данным [18, раздел 5-7]. Повышение износостойкости обеспечивается выбором материалов, уменьшением вибрации и времени горения дуги, увеличением размеров изнашиваемой части.

Коммутационная износостойкость (гарантируемое число коммутаций) определяется допустимым объемом $V_{\text{изн}}$ или массой $M_{\text{изн}} = V_{\text{изн}} \gamma$ износа и объемным v_p, v_z или массовым износом g_p, g_z за один цикл размыкания или замыкания

$$N = \frac{V_{\text{изн}}}{v_p + v_z} = \frac{V_{\text{изн}} \gamma}{g_p + g_z}.$$

Износ массы контакта за один цикл размыкания и замыкания рассчитывается по формуле

$$g_p + g_z = 10^{-9} (k_p I_p^2 + k_z I_z^2) k_{\text{нер}},$$

где коэффициенты износа k_p, k_z определяются по опытным данным (табл. 14, рис. 13). Коэффициент неравномерности $k_{\text{нер}} = 1,1-3$ учитывает разброс величин износа массы контактов.

Таблица 14

Коэффициенты износа

Диапазон токов, А и среда	Режим	Материал контактов	$k_p, k_z, \text{г/А}^2$
200–400 Воздух	Замыкание контактов со сниженной вибрацией (суммарное время менее 0,3 мс)	Серебро, Серебро–15 % окиси кадмия (мелкодисперсионная структура)	0,002 0,001
15–300 Воздух	Замыкание контактов со значительной вибрацией (суммарное время от 1 до 5 мс)	Серебро–15 % окиси кадмия Серебро	0,01 Около 0,05
100–300 Воздух	То же	Медь	Около 0,2
1–500 Воздух	Размыкание	Материалы, указанные на рис. 12	Значения, указанные на рис. 13

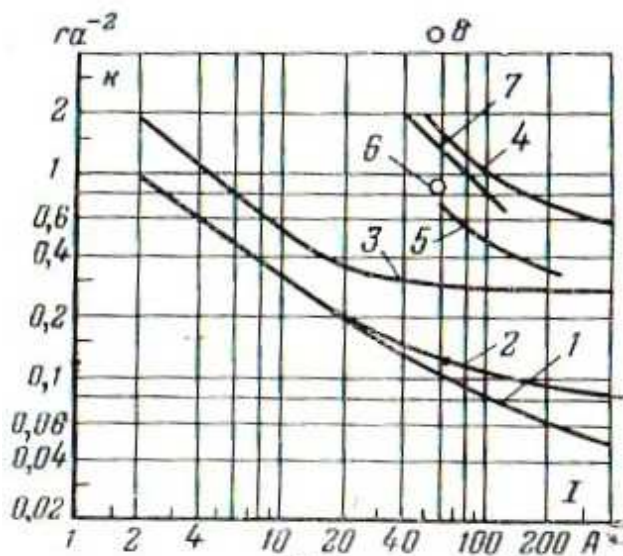


Рис. 13. Зависимость коэффициента износа от тока при размыкании контактов в воздухе

1 – серебро – 30–40 % никеля (мелкодисперсионные); 2 – серебро – 15 % окиси кадмия (мелкодисперсионные); 3 – серебро; 4 – медь; 5 – кадмиевая медь; 6 – серебро – 40 % вольфрама; 7 – серебро – 60 % вольфрама; 8 – серебро – 80 % вольфрама

10. Расчет контактных пружин.

Характеристики контактных пружин определяется их видом (плоские, цилиндрические) и рассчитываются в соответствии с методикой, представленной в [18, с. 472-480].

3.4.4. Примеры расчета коммутирующих контактов

Пример № 1. Спроектировать контакты контактора постоянного тока.

Исходными данными для проектирования контактов контактора постоянного тока являются: номинальный ток – 400 А, режим работы – длительный, размеры токоведущей шины $b = 20$ мм, $a = 7$ мм (определены при проектировании токоведущей шины, см. раздел 3.4.2), допустимая температура контактов – 95 град. (табл. П.9, прил. III).

1. В соответствии с рекомендациями выбираем контакты рычажного типа.

2. В качестве материала контактов выбираем твердотянутую кадмиевую медь МК-тв.

3. Размеры контактов в соответствии с рекомендациями принимаем следующие: подвижного 12×25 мм \times мм, неподвижного – 12×30 мм \times мм.

4. Необходимая сила контактного нажатия для сильноточных контактов

$$F_{к1} = I_n^2 \frac{B \cdot \pi \cdot HB}{16\lambda^2 (\arccos \frac{T_k}{T_a})^2} =$$
$$= 400^2 \frac{2,3 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^8}{16 \cdot 390^2 (\arccos \frac{(95 + 273)}{(95 + 273 + 12)})^2} = 66,4 \text{ Н.}$$

Для линейного контакта (две контактные точки) необходимая сила контактного нажатия $F_k = 2F_{к1} = 2 \cdot 66,4 = 132,83$ Н.

Согласно опытным данным сила контактного нажатия $F_k = f_k I_n = (15 - 25) \cdot 10^{-3} \cdot 400 = 10 \text{ кГ} = 98 \text{ Н}$ ($f_k = (15 - 25) \cdot 10^{-3} \text{ кГс/А}$ по табл. 10). За расчетное значение принимаем большее значение.

Сила предварительного контактного нажатия $F_{кн} = (0,4 - 0,75) \cdot 132,83 = 0,5 \cdot 132,83 = 66,42$ Н.

5. Переходное сопротивление по эмпирической формуле

$$R_k = K_0 / F^m = 400 \cdot 10^{-6} / 132,83^{0,6} = 21,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Здесь коэффициент $K_0 = 400 \cdot 10^{-6}$ Ом/Н^m определен по табл. 12.

По опытным данным $R_k = 70 \cdot 10^{-6}$ Ом (рис. 12, для твердой меди).

Принимаем окончательно большее значение $R_k = 70 \cdot 10^{-6}$ Ом.

6. Падение напряжения на контактах

$$U_k = I \cdot R_k = 400 \cdot 70 \cdot 10^{-6} = 0,028 \leq U_p = 0,12 \text{ В.}$$

Очевидно, что полученное значение напряжения на контактах меньше напряжения рекристаллизации меди (по табл. 11 $U_p = 0,12$ В).

Температура контактной площадки

$$T_a = \frac{T_k}{\cos\left(\frac{I_H \sqrt{B\pi H V}}{4\lambda \sqrt{F_{k1}}}\right)} =$$

$$= \frac{95 + 273}{\cos\left(\frac{400 \sqrt{2,3 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^8}}{4 \cdot 390 \cdot \sqrt{66,4}}\right)} = 379 \text{ К.}$$

7. Ток сваривания

$$I_{св} = A \sqrt{F_k} \sqrt{f_{кпл}} = 428 \sqrt{132,83} \sqrt{4} = 9865,6 \text{ А.}$$

Здесь

$$A = \sqrt{\frac{32\lambda\theta_{пл}(1 + 1/3\alpha\theta_{пл})}{\pi H V \rho_0 (1 + 2/3\alpha\theta_{пл})}} =$$

$$= \sqrt{\frac{32 \cdot 390 \cdot 1083 (1 + 1/3 \cdot 0,0043 \cdot 1083)}{3,14 \cdot 9 \cdot 10^8 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 2/3 \cdot 0,0043 \cdot 1083)}} = 428 \text{ А/Н}^{0,5}.$$

Физические величины приняты для меди по табл. П.11.

Минимальный сваривающий ток по эмпирической формуле

$$I_{св} = k \sqrt{F_k} = 4100 \sqrt{132,83} = 47253,3 \text{ А.}$$

Очевидно, что при коротком замыкании контакты не приварятся, так как условие $I_{кз} = 4000 \text{ А} \leq I_{св} = 9865,6 \text{ А}$ соблюдается (ток короткого замыкания меньше минимального тока сваривания).

8. Электродинамические силы в контактах

$$F_d = 2 \cdot 10^{-7} I^2 \ln \frac{S}{S_0} = 2 \cdot 10^{-7} (1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 4000)^2 \ln \frac{12 \cdot 30 \cdot 10^{-6}}{3,46 \cdot 10^{-7}} = 74,6 \text{ Н,}$$

$$S_0 = \frac{F_{к2}}{\sigma_{см}} = \frac{132,83}{38,3 \cdot 10^7} = 3,46 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2.$$

Электродинамические усилия в контактах в режиме короткого замыкания меньше силы контактной пружины, следовательно, самопроизвольного размыкания контактов не произойдет.

9. Принимая, что износ каждого контакта может составлять 0,7 его первоначальной толщины, рассчитываем объем износа подвижного и неподвижного контактов

$$V_{\text{изн1}} = 0,75 \cdot 12 \cdot 25 \cdot 35 \cdot 10^{-9} = 7,88 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3,$$

$$V_{\text{изн2}} = 0,75 \cdot 12 \cdot 30 \cdot 35 \cdot 10^{-9} = 9,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

При этом масса износа составит

$$M_{\text{изн}} = V_{\text{изн}} \cdot \gamma = (7,88 + 9,45) \cdot 10^{-6} \cdot 8900 = 0,154 \text{ кг.}$$

Износ массы контакта за один цикл размыкания и замыкания составит

$$\begin{aligned} g_p + g_z &= 10^{-9} (k_p I_p^2 + k_z I_z^2) k_{\text{нер}} = \\ &= (0,25 \cdot 1000^2 + 0,25 \cdot 1000^2) \cdot 10^{-9} \cdot 1,2 = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг.} \end{aligned}$$

Принято, что ток размыкания и замыкания $I_p = I_z = 2,5 I_n = 1000 \text{ А}$ (категория применения DC3).

Коммутационная износостойкость контактов

$$N = \frac{M_{\text{изн}}}{g_p + g_z} = \frac{0,154}{0,6 \cdot 10^{-3}} = 0,26 \cdot 10^6 \text{ циклов.}$$

Пример № 2. Рассчитать параметры мостикового контакта пускателя переменного тока.

Исходными данными для проектирования мостикового контакта являются: номинальный ток – 12,5 А, номинальное напряжение – 380 В. Режим работы – S3, ПВ=40 %, количество включений в час $Z = 600$.

1. Выбираем конструкцию мостикового контакта с цилиндрическими напайками.

2. В качестве материала контактных напаяк принимаем металлокерамику КМК-А20м (серебро, окись меди с мелкодисперсионной структурой).

3. Размеры контактных напаяк в соответствии с рекомендациями принимаем следующие: диаметр напайки – $d_{\text{кн}} = 6 \text{ мм}$, высота напайки – $h_{\text{кн}} = 1,5 \text{ мм}$ (табл. 8).

4. Принимаем, что допустимое падение напряжения не должно превосходить напряжения размягчения

$$U_{\text{к.доп}} \leq (0,5 - 0,8) U_p \leq (0,5 - 0,8) 0,09 = 0,045 \text{ В.}$$

Здесь напряжение размягчения для серебра, входящего в состав металлокерамики $U_p = 0,09$ В (табл. 11).

Допустимое сопротивление контакта

$$R_{к.доп} = U_{к.доп} / I = 0,045 / 12,5 = 0,0036 \text{ Ом.}$$

5. Определим силу контактного нажатия различными способами.

Радиус площадки касания можно определить по теоретической формуле

$$a = \rho / 2R_k = 2,5 \cdot 10^{-8} / 2 \cdot 0,0036 = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

где $\rho = 2,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м для металлокерамики серебро – окись меди (табл. П.13, прил. IV).

Для контактных накладок, обработанных под сферу, при упругой деформации справедлива формула $a_{шш} = 0,86 \sqrt[3]{F_k r / (En)}$, из которой определяем силу контактного нажатия на одну точку

$$F_{к1} = a^3 E / (0,86^3 r) = \\ (3,5 \cdot 10^{-6})^3 \cdot 7,4 \cdot 10^{10} / (0,86^3 \cdot 0,0095) = 0,0005 \text{ Н,}$$

где $E = 7,4 \cdot 10^{10}$ Н/м² модуль упругости серебра (табл. П.11, прил. IV), радиус закругления сферической части контакта

$$r = \frac{(d_{кш} / 2)^2 + h_0}{2 \cdot h_0} = \frac{(6 / 2)^2 + 0,5}{2 \cdot 0,5} = 9,5 \text{ мм } (h_0 \text{ – высота сферической части}$$

контактной накладки).

Для мостикового контакта сила контактного нажатия

$$F_k = 2F_{к1} = 2 \cdot 0,0005 = 0,001 \text{ Н.}$$

Используя эмпирическую формулу $R_k = K_0 / F_k^m$ определим необходимую силу контактного нажатия на один контакт (для точечного контакта $m = 0,5$)

$$F_{к1} = (K_0 / R_k)^2 = (0,00006 / 0,0036)^2 = 0,00028 \text{ Н,}$$

где $K_0 = 0,00006$ Ом·Н^m (табл. 12).

Для мостикового контакта сила контактного нажатия

$$F_k = 2F_{к1} = 2 \cdot 0,00028 = 0,00056 \text{ Н.}$$

Согласно опытным данным сила контактного нажатия

$$F_{к1} = f_k I_H = (7 - 15) \cdot 10^{-3} \cdot 12,5 = 0,188 \text{ кГ} = 1,83 \text{ Н,}$$

где $f_k = (7 - 15) \cdot 10^{-3}$ кГс/А (табл. 10).

За расчетное значение принимаем наибольшее значение из рассчитанных $F_k = 2F_{к1} = 2 \cdot 1,83 = 3,66 \text{ Н.}$

Сила предварительного контактного нажатия
 $F_{\text{кн}} = (0,4 - 0,75) \cdot 3,66 = 0,5 \cdot 3,66 = 1,83 \text{ Н.}$

Уточним значение переходного сопротивления.

Найдём радиус площади касания при условии, что имеет место упругая деформация

$$a = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{F \cdot r}{E}} = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{1,83 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3}}{7,4 \cdot 10^{10}}} = 53 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Механическое напряжение в контактной площадке

$$\sigma = \frac{F}{\pi \cdot a^2} = \frac{1,83}{3,14 \cdot (53 \cdot 10^{-6})^2} = 21 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2.$$

Это напряжение меньше, чем напряжение смятия серебра $\sigma_{\text{см}} = 31 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ и, следовательно, будет иметь место упругая деформация.

Переходное сопротивление по теоретической формуле

$$R_c = \frac{\rho}{2a} = \frac{2,5 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 53 \cdot 10^{-6}} = 236 \cdot 10^{-6} \text{ Ом,}$$

по эмпирической формуле

$$R_k = K_0 / F_k^m = 0,00006 / 1,83^{0,5} = 44,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

В дальнейших расчетах принимаем большее значение.

6. Температура контактов

$$\theta_k = \theta + I^2 R_k / \sqrt{\lambda k_{\text{то}} p s} =$$

$$= 42,3 + 12,5^2 \cdot 236 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\sqrt{390 \cdot 7,5 \cdot 14,5 \cdot 10^{-3} \cdot 7,5 \cdot 10^{-6}}} = 44,4^{\circ} \text{ С,}$$

где $\theta = 42,3^{\circ} \text{ С}$ – температура проводника, $p = 14,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – периметр и $s = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ площадь поперечного сечения токоподводящих деталей (раздел 3.4.2, пример № 2), $\lambda = 390 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ} \text{ С)}$ – удельная теплопроводность меди (табл. П.13, прил. IV).

Температура контактной точки с учетом теплоотдачи

$$\theta_a = \theta_k + I^2 R_k^2 / (8\lambda\rho) =$$

$$= 44,4 + 12,5^2 \cdot (236 \cdot 10^{-6})^2 \frac{1}{8 \cdot 350 \cdot 2,5 \cdot 10^{-8}} = 44,5^{\circ} \text{ С.}$$

Рассчитанное значение температуры не превышает температуры рекристаллизации для серебра – $\theta_p = 150^{\circ} \text{ С}$.

7. Ток сваривания

$$I_{\text{св}} = A \sqrt{F_{\text{к1}}} \sqrt{f_{\text{кпл}}} = 380 \sqrt{1,83} \sqrt{4} = 1028 \text{ А.}$$

Здесь

$$A = \sqrt{\frac{32\lambda\theta_{\text{пл}}(1+1/3\alpha\theta_{\text{пл}})}{\pi HV\rho_0(1+2/3\alpha\theta_{\text{пл}})}} =$$

$$= \sqrt{\frac{32 \cdot 350 \cdot 960(1+1/3 \cdot 0,0043 \cdot 960)}{3,14 \cdot 6 \cdot 10^8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-8}(1+2/3 \cdot 0,0043 \cdot 960)}} = 380 \text{ А/Н}^{0,5}.$$

Физические величины приняты для серебра и металлокерамики по табл. П.11 и П.13.

При коротком замыкании контакты не приварятся, так как условие $I_{\text{кз}} = 10I_{\text{н}} = 125 \text{ А} \leq I_{\text{св}} = 1028 \text{ А}$ соблюдается (ток короткого замыкания меньше минимального тока сваривания).

8. Электродинамические силы в контактах

$$F_{\text{д}} = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \ln \frac{r}{a} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} (1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 125)^2 \ln \frac{0,0095}{1,5 \cdot 53 \cdot 10^{-6}} = 0,025 \text{ Н}.$$

Электродинамические усилия в контактах в режиме короткого замыкания меньше силы контактной пружины, следовательно, самопроизвольного размыкания контактов не произойдет.

3.4.5. Расчет дугогасительных устройств постоянного тока

При проектировании дугогасительного устройства необходимо добиться выполнения *следующих требований*.

1. Дугогасительное устройство постоянного тока должно обеспечивать гашение дуги при предельных, номинальных и критических токах.

В контакторах постоянного тока **предельный отключаемый ток** составляет (режим редких коммутаций) $I_{\text{от}} = 10I_{\text{н}}$.

Критический ток соответствует области II (рис. 14). В этой области время гашения дуги максимальное. В существующих конструкциях аппаратов до 1000 В величины критических токов находятся в пределах 3–30 А, а у некоторых аппаратов достигают 100 А.

Для определения критического тока необходимо рассчитать кривую, подобную представленной на рис. 14.

В первом приближении критический ток можно определить при известной величине раствора контактов на основе опыта проектирования по рис. 15 (предполагается, что критический ток близок по величине току, который соответствует раствору контактов).

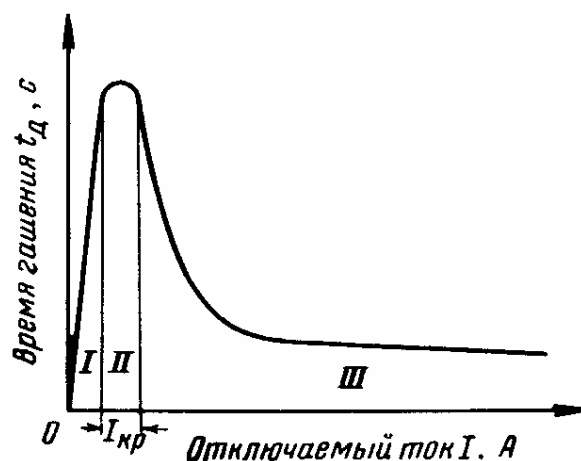


Рис. 14. Типичная зависимость длительности горения дуги (времени гашения) от величины отключаемых токов для аппаратов до 1000 В

2. **Время гашения дуги** при любом токе не должно превышать $t_d \leq 0,1$ с.
3. **Максимальное напряжение** не должно превышать испытательного $U_{\max} \leq U_{\text{исп}}$ (табл. 15).

Таблица 15

Испытательные напряжения

Номинальное напряжение, В	Номинальное напряжение по изоляции, В	Испытательное напряжение, В
12, 24	До 24	500
36, 48. 60	До 60	1000
110, 127, 220	До 220	2000
380, 440. 500	До 500	2500
600, 660	До 660	2500
750	До 750	3000
1000	До 1000	3500

Проектирование дугогасительного устройства осуществляется в последовательности, описанной в разделе 2.7.

На основе анализа прототипа и оценки величины раствора контактов выбирается **тип дугогасительной системы**.

В электрических аппаратах низкого напряжения **раствор контактов** в основном определяется условиями гашения дуги и лишь при значительных напряжениях (свыше 500 В) его величина начинает зависеть

от напряжения между контактами. Как показывают опыты, дуга сходит с контактов уже при растворе 1–2 мм.

Согласно опытным данным можно считать, что при наличии магнитного поля гашения дуги при напряжении до 500 В можно принять значение раствора 10–12 мм для постоянного тока, в то время как для переменного тока принимают 6–7 мм для любых значений тока. Излишнее увеличение раствора нежелательно, так как оно ведет к увеличению хода контактных частей аппарата, и, следовательно, к увеличению габаритов аппарата.

Определение раствора контактов производится на основе опыта проектирования (по таблицам или кривым) [табл. 16, рис. 15, 16], либо по упрощенной зависимости – произведение скорости расхождения контактов на время (пока раствор не станет конечным) $l_k \approx v_k \cdot t$ (здесь t время расхождения контактов) [18, с.133].

Выбранное значение раствора необходимо увеличить в 1,3–2 раза (коэффициент запаса).

В зависимости от вида системы дугогашения используются соответствующие формулы, определяющие параметры системы дугогашения.

Таблица 16

Коммутационная способность аппаратов до 220 В

Коммутируемая мощность, Вт	Наибольший ток, А	Раствор, мм
20	0,5	0,5–1
60	2	1–1,5
200	5	4–6

Гашение механическим растягиванием свободной неподвижной открытой дуги постоянного тока возможно лишь при небольших коммутируемых токах. Длина дуги при этом определяется в соответствии с табл. 16 или рис. 15, 16.

По конструктивным соображениям длина дуги ограничивается величиной раствора 20 мм.

Необходимо отметить, что данные (рис. 15, 16, табл. 16) получены в основном для активной нагрузки. При индуктивной нагрузке можно использовать те же данные, однако считать, что гашение дуги происходит при большем напряжении

$$U_{\text{расч}} \approx U_{\text{от}} \left(1 + \frac{T_{\text{эм}}}{t_{\text{д}}}\right).$$

Здесь электромагнитная постоянная времени $T_{эм}$ электрической цепи выбирается в соответствии с данными табл. 17.

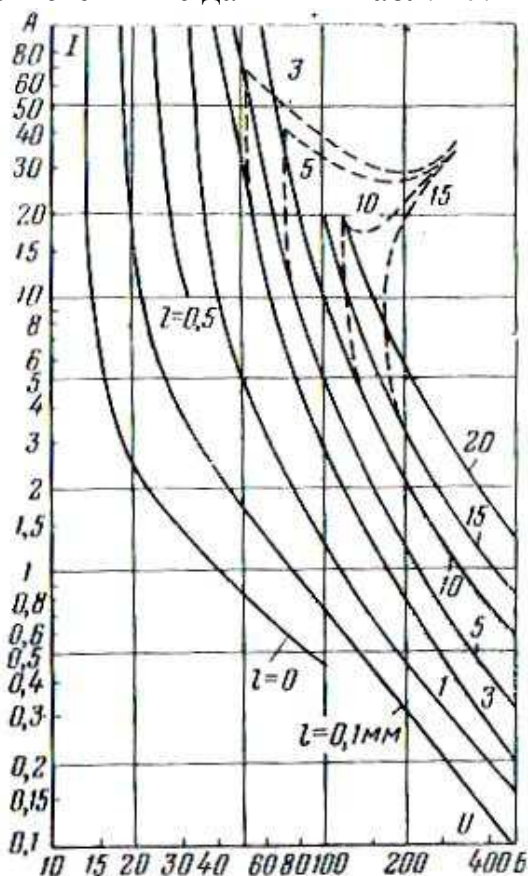


Рис. 15. Зависимость тока от напряжения постоянного тока, при котором электрическая дуга гаснет при разных растворах контактов l (постоянная времени цепи равна 0-0,01 с)

Сплошные линии – при неблагоприятном расположении токоведущих частей (дуга не выходит из области между контактами); пунктирные линии – при расположении токоведущих частей, способствующих выходу дуги из области между контактами

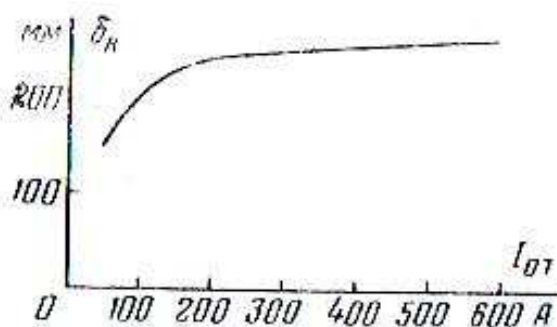


Рис. 16. Зависимость раствора контактов от величины отключаемого постоянного тока 220 В при продольном механическом растягивании открытой свободной дуги (нагрузка активная)

Параметры цепей низкого напряжения

Тип нагрузки	Индуктивность цепи L , Гн	Электромагнитная постоянная времени $T_{эм}$, с
Катушки тормозных электромагнитов до 400 В, ход 2–4 мм	30–65	0,1–0,4
Катушки тормозных электромагнитов до 440 В, ход 40–120 мм	100–700	0,2–3
Силовые цепи с двигателями постоянного тока 2–60 кВт	0,05–0,0015	0,02–0,06

Для расчета **критической длины дуги** можно также использовать эмпирическую формулу, связывающую отключаемое напряжение и отключаемый ток (формула справедлива для отключаемых токов до 20–30 А, для воздуха при атмосферном давлении)

$$l_{кр} = 0,42 \cdot 10^{-2} U_{от} \sqrt{I_{от}}, \text{ см.}$$

Эффективность дугогашения может быть повышена за счет использования электродинамических усилий. При этом детали токоведущего контура (коммутирующие контакты, контактодержатели, дугогасительные рога и т.д.) необходимо располагать в пространстве таким образом, чтобы электродинамические усилия двигали дугу в необходимом направлении.

Критическая длина дуги в этом случае определяется методом последовательных приближений (подбором определяется длина дуги, при которой вольт-амперная характеристика касается нагрузочной).

Для расчета и построения вольт-амперных характеристик при нескольких значениях отключаемого тока, касающихся нагрузочной характеристики используется эмпирическая зависимость

$$U_{д} \approx U_{0э} + l_{д} \frac{92 + 0,092 v_{д}}{\sqrt{I_{д}}}, \text{ В,}$$

где $U_{0э} = 10 - 20$ В – приэлектродное падение напряжения; $l_{д}$ – длина дуги, см.

Скорость движения дуги для рычажных контактов при токах до 200 А определяется по выражению

$$v_d \approx \frac{2,12I_d}{\sqrt{l_k}}, \text{ см/с,}$$

где $I_d = 0,5I_{от}$ – ток дуги (среднее значение тока при снижении его до 0); l_k – раствор контактов.

При токах больше 200 А скорость движения дуги определяется как $v_d \approx 37\sqrt[3]{I_d}$, см/с.

Для определения времени горения дуги используется формула

$$t_d \approx \frac{l_{кр}}{\sqrt{v_k^2 + 9v_d^2}}, \text{ с,}$$

где $v_p = (0,01 - 1)$ м/с – скорость расхождения контактов.

Если не удастся погасить дугу первыми двумя способами (простым растягиванием и за счет действия электродинамических усилий) применяется способ **гашения дуги постоянного тока в камере с продольной щелью в поперечном магнитном поле**. Такие камеры наиболее часто используются в контакторах.

Дугогасительная камера создает условия, способствующие гашению дуги в малом объеме в наиболее короткое время при малом износе токоведущих частей (контактов и рогов); ограничивает звуковые и световые эффекты при гашении дуги, обеспечивает направление потока расплавленных и ионизированных газов в определенное место, где они не могут вызвать перебросов в результате резкого снижения диэлектрической прочности воздуха.

Эскиз одной из возможных конструкций камеры представлен на рис. 17.

Камера имеет две боковые стенки 1, выполненные из дугонагревостойкого электроизоляционного материала (толщина стенки – h_c). Контакты 2 контактора расположены так, что возникающая при их коммутации электрическая дуга находится внутри объема дугогасительной камеры. Расстояние между стенками (щель) в месте расположения контактов – $\delta_{щ}$.

К внешней поверхности стенок прилегают пластины-полюсы 3 электромагнитной системы, имеющей сердечник 4 и дугогасительную катушку 5. Расстояние между пластинами-полюсами – h .

Создаваемый электромагнитной системой поток проходит между пластинами-полюсами в зоне образования и горения дуги. При размыкании контактов 2 между ними образуется дуга, которая вследствие

действующих на нее сил удлиняется и входит в щель. При этом ее опорные точки перемещаются по дугогасительным рогам 6.

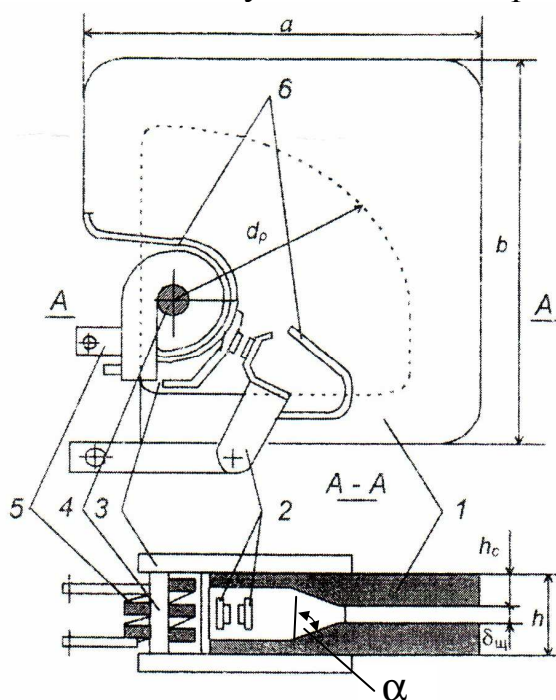


Рис. 17. Эскиз камеры с магнитным дутьем

Алгоритм расчета гашения дуги постоянного тока в камере с продольной щелью в поперечном магнитном поле состоит в следующем.

1. По рекомендациям или на основе прототипа выбирается конструкция дугогасительной камеры, размеры дугогасительных рогов и щели (табл. 18, 19).

Таблица 18

Длина и сечение рогов

Напряжение, В	Длина рога, мм	Отключаемый ток, А	Сечение рога, кв. мм
550	25–35	100–150	25
1500	40–50	250–300	40
3000	80–100	600–750	75
		2000–3000	150–200
		4000–5000	300–350

Таблица 19

Минимальная напряженность магнитного поля, необходимая
для вхождения дуги в узкую щель

Ток, А	δ_1 , мм	Минимальная напряженность магнитного поля, А/см							
					$\delta_{щ} = 2$ мм			$\delta_{щ} = 4$ мм	
		$\alpha =$ $= 30^0$	$\alpha =$ $= 45^0$	$\alpha =$ $= 75^0$	$\alpha =$ $= 30^0$	$\alpha =$ $= 45^0$	$\alpha =$ $= 75^0$	$\alpha =$ $= 30^0$	$\alpha =$ $= 75^0$
2	2	14	12	6	–	–	–	–	–
	4	–	104	–	8	6	2	–	–
	8	–	152	–	–	–	–	2	2
	16	168	164	136	20	12	10	2	2
35	2	22	18	10	–	–	–	–	–
	4	–	120	–	10	10	1,2	–	–
	8	–	155	–	–	–	–	4	1,2
	16	184	172	124	32	14	10	4	1,2
150	2	164	133	128	–	–	–	–	–
	4	–	137	–	10	6	2	–	–
	8	–	164	–	–	–	–	6	1,2
	16	190	176	140	36	28	18	6	1,2
300	2	175	152	144	–	–	–	–	–
	4	–	–	–	15	–	4	–	–
	8	–	–	–	–	–	–	6	1,2
	16	195	176	165	40	–	19	6	1,2
600	2	132	104	54	–	–	–	–	–
	4	–	112	–	46	12	6	–	–
	8	–	148	–	–	–	–	6	1,2
	16	188	168	136	168	114	92	6	1,2

В контакторах используются камеры с узкой и широкой щелью. При узкой щели ее ширина близка к диаметру дуги или меньше, дуга деформируется при входе в щель, обеспечивается более тесное соприкосновение со стенками камеры и интенсивное охлаждение. При широкой щели ширина щели больше диаметра дуги, дуга не деформируется при входе в щель.

2. *Расчет электромагнитной системы магнитного дутья* заключается в выборе основных конструктивных форм системы, установлении ее параметров (число витков катушки дугогашения, сечение и размеры магнитопровода, величина воздушного зазора между полюсами в зоне раствора контактов), расчете напряженности магнитного поля.

В системах с магнитным дутьем применяются **последовательные и параллельные катушки**.

При последовательном дутье (катушка последовательного дутья включается в цепь главного тока, токи при этом большие) электромагнитная сила пропорциональна току в квадрате, число витков – небольшое, направление силы не зависит от направления тока

При параллельном дутье (катушка включается на полное напряжение источника питания, токи при этом небольшие) электромагнитная сила пропорциональна току, требуется усиленная изоляция.

Последовательное дутье является наиболее распространенным вариантом построения дугогасительного устройства. Последовательное дутье хорошо работает в области больших токов (более 100 А), обеспечивает малый износ контактов. При изменении направления тока дуги меняет знак и магнитное поле, а сила, действующая на дугу, не меняет своего направления, поэтому система может работать как при постоянном, так и при переменном токе. При этом обеспечивается высокая надежность при гашении номинальных и больших токов.

Недостатками являются большие затраты меди на катушку; нагрев контактов за счет тепла в дугогасительной катушке.

При параллельном дутье направление электродинамической силы, действующей на электрическую дугу, зависит от полярности тока. При изменении направления тока меняется направление движения дуги и дугогасительное устройство становится неработоспособным.

При коротком замыкании снижается напряжение на источнике, питающем катушку. В результате гашение дуги происходит неэффективно. Параллельное дутье применяется только при отключении небольших постоянных токов (5-10 А) и не применяются на переменном токе.

При определении напряженности магнитного поля используются экспериментальные данные, опыт проектирования и следующие **рекомендации**.

В области малых токов не должно быть насыщения (напряженность поля в зоне горения дуги при этом максимальная).

В области больших токов магнитная система должна быть насыщена, что приводит к снижению напряженности поля в области дуги, уменьшению силы и интенсивности гашения, снижению перенапряжений.

Напряженность должна быть достаточной для удаления дуги из межконтактного промежутка (табл. 19).

Необходимо минимизировать износ контактов. Оптимальная напряженность при этом составляет:

$$I=100 \text{ А} \quad H=105 \text{ А/см};$$

$I=200 \text{ A}$ $H=80 \text{ A/см};$
 $I=400 \text{ A}$ $H=48 \text{ A/см};$
 $I=600 \text{ A}$ $H=0 \text{ A/см}.$

Предполагая, что магнитная система не насыщена (пренебрегаем сопротивлением стали магнитопровода системы магнитного дутья) и учитывая, что необходимая магнитодвижущая сила определяется как $I \cdot w = 0,5 \cdot I_{от} \cdot w$ (w – число витков обмотки системы дугогашения), получим выражение для определения необходимой напряженности магнитного поля

$$H = I \cdot w / h,$$

где h – расстояние между полюсами системы магнитного дутья.

Далее можно построить зависимость $H = f(I_{от})$.

3. **Скорость движения дуги** определяется по следующим формулам (H , А/см; v_d , см/с; ширина щели в мм)

при широкой щели

$$v_d \approx 41,2 \sqrt[3]{\frac{I_d \cdot H^2}{(1 + 0,4 \cdot H^{0,3})^2}}, \text{ см/с},$$

при узкой щели

$$v_d \approx (6 + \delta_{щ}) \sqrt{\frac{10 \cdot I_d \cdot H}{\delta_{щ}}}, \text{ см/с}.$$

Далее необходимо определить **диаметр дуги** для контроля правильности применения формул с точки зрения величины ширины щели.

При неподвижной дуге ее диаметр (в см) $d \approx 0,27 I_{от}$, для движущейся дуги – $d \approx 1,12 \sqrt{\frac{I_{от}}{20 + v_d}}$.

4. Для расчета **вольт-амперных характеристик дуги** (при малой индуктивности и токах от 10 до 2360 А) используются формулы:

при широкой щели

$$U_d \approx l_d \left[\frac{92}{\sqrt{I_d}} + 0,312 \frac{\sqrt{I_d}}{\delta_{щ}^{2/3}} + 0,37 \sqrt[3]{\frac{v_d^2}{I_d}} \right],$$

при узкой щели

$$U_d \approx l_d \left[\frac{92}{\sqrt{I_d}} + 0,312 \frac{\sqrt{I_d}}{\delta_{щ}^{2/3}} + 7 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{\frac{v_d^2 \cdot I_d}{\delta_{щ}^2}} \right].$$

Критическая длина дуги для каждого из отключаемых токов определяется методом последовательных приближений с использованием

вольт-амперных и нагрузочных характеристик (данные расчетов целесообразно свести в таблицу).

5. После определения критической длины дуги для каждого из отключаемых токов рассчитываются **контрольные данные** – время гашения дуги $t_r \approx l_{\text{дкр}} / \sqrt{v_p^2 + 9v_d^2}$, с и уровень перенапряжения $U_{\text{max}} = U_{\text{от}} \left(1 + \frac{2L \cdot I_{\text{от}}}{U_{\text{от}} \cdot t_r}\right)$.

Последняя формула получена в предположении, что ток дуги спадает по прямой.

6. Если полученные данные удовлетворяют требованиям, рассчитываются габариты (размеры) камеры (по критической длине дуги для предельного отключаемого тока).

Если считать длину дуги частью окружности, можно определить расстояние от коммутирующих контактов до наиболее удаленной части траектории дуги. Этот размер можно оценить, рассчитав стрелу дуги $h_d = v_d \cdot t$, см.

7. При закрытой камере и большой частоте отключений z необходимо определить температуру камеры.

Температура дугогасительной камеры в предположении, что вся тепловая энергия дуги A_d расходуется на нагрев стенок камеры, определяется по выражениям

$$zA_d = 3600 \cdot k_{\text{то}} \cdot S(\theta - \theta_0),$$

$$\theta = \theta_0 + \frac{zA_d}{3600 \cdot k_{\text{то}} \cdot S}.$$

Для щелевой камеры температура определяется следующим образом

$$\theta = \frac{P_d}{2v_d \Delta_k \sqrt{4\pi\lambda c \gamma t_0}}.$$

Здесь $t_0 = \frac{b}{v_d}$ – время нагрева; $b = \frac{q_d}{j_d}$; $q_d = \frac{I_d}{j_d}$ – поперечное сечение дуги; $j_d = 5000 \text{ А/см}^2$ – плотность тока дуги, А/кв.см; $P_d = I_d \cdot E_d$ – мощность дуги, Δ_k – толщина боковых стенок камеры, c – удельная теплоемкость материала камеры, γ – удельный вес материала камеры.

Полученное значение температуры должно быть меньше допустимого $\theta \leq \theta_{\text{доп}}$ (допустимая температура для теплостойкой керамики $\theta_{\text{доп}} \approx 3000 \text{ }^\circ\text{C}$).

3.4.6. Пример расчета дугогасительного устройства постоянного тока

Исходными данными для проектирования дугогасительного устройства являются: номинальный ток – 400 А, номинальное напряжение – 440 В, число включений в час – 1200.

Размеры токоведущей шины $b = 20 \text{ мм}$, $a = 7 \text{ мм}$, $s = 140 \text{ мм}^2$ (см. пример расчета токоведущей шины, раздел 3.4.2).

1. В соответствии с исходными данными определим: отключаемое напряжение (принимается равным максимальному напряжению источника и составляет 1,1 от номинального значения) $U_{\text{от}} = 1,1U_{\text{н}} = 1,1 \cdot 440 = 484 \text{ В}$; предельный отключаемый ток $I_{\text{пред}} = 10I_{\text{н}} = 10 \cdot 400 = 4000 \text{ А}$, время горения дуги – 0,1 с (для постоянного тока), максимальное напряжение $U_{\text{max}} \leq U_{\text{исп}} = 2500 \text{ В}$ (табл. 15).

2. Проверим возможность гашения дуги без дугогасительного устройства (свободная дуга, гашение механическим растяжением).

Необходимый раствор контактов при токе 400 А составляет $l_{\text{к}} = 253 \text{ мм}$ (рис. 16).

Так как требуемый раствор при свободной дуге чересчур большой (обычные значения 5–20 мм), то необходимо применять специальные ДГУ. В качестве ДГУ используем систему с магнитным дутьем и камерой с продольной узкой щелью.

Раствор контактов принимаем равным 20 мм.

3. В соответствии с рекомендациями выбираем катушку последовательного дутья, размеры катушки магнитного дутья равными размерам токоведущей шины $b = 20 \text{ мм}$, $a = 7 \text{ мм}$, $s = 140 \text{ мм}^2$; ширину камеры – $h = 40 \text{ мм}$, ширину щели – $\delta_{\text{щ}} = 2 \text{ мм}$ (табл. 19), число витков катушки $w = 1$.

4. Определим параметры дуги при отключении критического $I_{\text{от}} = I_{\text{кр}}$, предельного $I_{\text{от}} = I_{\text{пред}}$ и номинального токов $I_{\text{от}} = I_{\text{н}}$ (пример расчета приведен для критического тока, расчеты для номинального и предельного токов аналогичны представленному примеру).

Критический ток $I_{кр} = 1,5$ А (по рис. 15 в зависимости от раствора контактов $l_k = 20$ мм и отключаемого напряжения 484 В).

Так как в процессе отключения критического тока он изменяется от 1,5 А до 0 А в расчетные формулы подставляем среднее значение отключаемого тока $I_d = 0,75$ А.

Напряженность магнитного поля системы магнитного дутья

$$H = I \cdot w / h = 0,75 \cdot 1 / 4 = 0,19 \text{ А/см.}$$

Скорость движения дуги (при узкой щели)

$$v_d \approx (6 + \delta_{щ}) \sqrt{\frac{10 \cdot I_d \cdot H}{\delta_{щ}}} = (6 + 2) \sqrt{\frac{10 \cdot 0,75 \cdot 0,19}{2}} = 6,75 \text{ см/с.}$$

Для проверки правомерности использования предыдущей формулы, определим диаметр дуги и сравним его с размером щели.

$$\text{Диаметр дуги } d \approx 1,12 \sqrt{\frac{I_{от}}{20 + v_d}} = 1,12 \sqrt{\frac{1,5}{20 + 6,75}} = 0,265 \text{ см больше}$$

размера щели, следовательно, можно считать щель узкой.

Для построения вольт-амперной характеристики дуги выберем произвольно несколько расчетных точек (1,5; 1; 0,75; 0,5 и 0,2 А) и определим напряжения дуги, соответствующие этим точкам по формуле (длину дуги примем равной раствору контактов $l_d = 20$ мм)

$$U_d \approx l_d \left[\frac{92}{\sqrt{I_d}} + 0,312 \frac{\sqrt{I_d}}{\delta_{щ}^{2/3}} + 7 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{\frac{v_d^2 \cdot I_d}{\delta_{щ}^2}} \right].$$

Рассчитанные напряжения при отключаемом токе $I_{от} = 1,5$ А и изменении его от 1,5 А до 0 имеют следующие значения: 152 В, 186 В, 214 В, 261 В, 412 В.

На рис. 18,а представлены реостатная характеристика сети и вольт-амперная характеристика дуги (при $l_d = 20$ мм) для рассматриваемого случая.

Из рис. 18, а следует, что условие гашения дуги не соблюдается – вольт-амперная характеристика дуги лежит ниже реостатной характеристики сети. Методом подбора определим длину дуги, при которой дуга гасится (при $l_d = 25$ мм условие гашения дуги соблюдается, рис. 18, б).

5. Время горения дуги удовлетворяет требованиям

$$t_d \approx l_{кр} / \sqrt{v_k^2 + 9v_d^2} = 2,5 / \sqrt{(10 - 100)^2 + 9 \cdot 6,75^2} = (0,1 - 0,0245) \leq 0,1 \text{ с.}$$

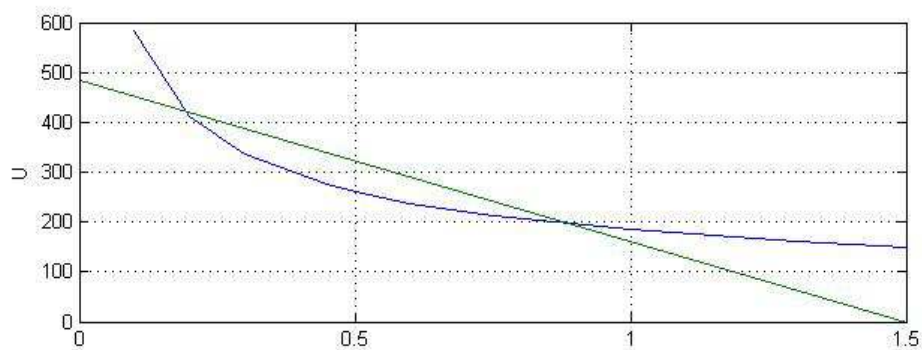
Уровень перенапряжения (в предположении, что ток дуги спадает по прямой)

$$U_{\max} = U_{\text{от}} \left(1 + \frac{2L \cdot I_{\text{от}}}{U_{\text{от}} \cdot t_{\Gamma}}\right) = 484 \left(1 + \frac{2 \cdot 0,00147 \cdot 1,5}{484 \cdot 0,0196}\right) = 484 \text{ В},$$

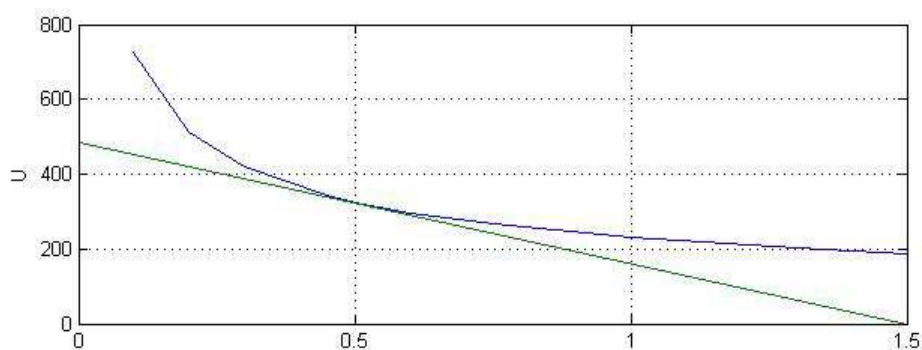
где индуктивность отключаемой цепи для двухполюсного двигателя постоянного тока со скоростью вращения 3000 об/мин рассчитана по формуле

$$L = \frac{4 \cdot U_{\text{н}}}{pn \cdot I_{\text{н}}} = \frac{4 \cdot 440}{1 \cdot 3000 \cdot 400} = 0,00147 \text{ Гн}.$$

Уровень перенапряжения меньше испытательного напряжения $U_{\max} = 484 \text{ В} < 2500 \text{ В}$.



а)



б)

Рис. 18. Реостатная характеристика сети и вольт-амперная характеристика дуги

а) при длине дуги 2 см

б) при длине дуги 2,5 см

6. В соответствии с описанным примером рассчитываются параметры дугогашения для других отключаемых токов.

3.4.7. Расчет дугогасительных устройств переменного тока

В контакторах переменного тока на отключаемые токи до 100 А при напряжении сети до 200 В можно не применять дугогасительные камеры. Как основной способ дугогашения в контакторах переменного

тока для размыкания цепей напряжением до 380 В при частоте от 50 до 500 Гц обычно применяется *двукратный разрыв цепи*.

При высоких значениях отключаемых токов и напряжений аппараты снабжаются *щелевыми камерами* и *дугогасительными решетками*.

1. **Величина раствора контактов** при гашении дуги переменного тока до 1000 В не имеет обычно такого решающего значения, как при постоянном токе. Критические токи бывают в цепях с индуктивной нагрузкой при напряжении выше 500 В.

Определение раствора контактов производится на основе опыта проектирования [18, с.166-167], либо по аналогии с прототипом (табл. П.6, прил. II).

В контакторах с напряжением промышленной частоты до 380 В при токах от 100 до 600 А раствор контактов l_k составляет 6–10 мм.

Наличие мостикового контакта с двумя разрывами позволяет уменьшить ход контакта, сохраняя суммарную величину раствора. В этом случае обычно принимается раствор 4–5 мм на каждый разрыв. Чрезмерное уменьшение раствора (меньше 4–5 мм) обычно не делается, так как погрешности при изготовлении отдельных деталей могут существенно повлиять на величину раствора.

В случае работы контактов в условиях, когда возможно их сильное загрязнение, раствор необходимо увеличивать. Обычно раствор увеличивается и для контактов, размыкающих цепь с большой индуктивностью, так как в момент погасания дуги появляются значительные перенапряжения и при малом зазоре возможно повторное зажигание дуги. Значительно возрастает раствор при увеличении частоты переменного тока, так как скорость нарастания напряжения после погасания дуги очень велика, расстояние между контактами не успевает деионизироваться и дуга зажигается вновь.

Величина раствора на переменном токе высокой частоты обычно определяется экспериментально и зависит от конструкции контактов и дугогасительной камеры. При напряжениях 500–1000 В величина раствора обычно принимается 16–25 мм. Большие значения относятся к контактам, выключающим цепи с большей индуктивностью и большим током.

2. **Необходимое количество разрывов при аperiodическом характере восстановления напряжения** определяется по выражению

$$n \geq \frac{k_{\text{н}} U_{\text{н}} - A(1 + \ln k_{\text{н}} U_{\text{н}} / A)}{U_{\text{вп}}^0 + 0,34 k_{\text{н}}^0 l_{\text{д}}^0 R_{\text{д}}^0 I_{\text{от}}}$$

Коэффициент напряжения $k_n = 0,9k_{cx}\sqrt{1 - \cos\varphi_0}$ зависит от коэффициента схемы, который принимается: $k_{cx} = 1,5$ при отключении трехфазной цепи 3-х полюсным аппаратом; $k_{cx} = 1$ при отключении трехфазной цепи 3-х полюсным аппаратом при глухом заземлении нейтрали источника и приемника.

Величина $A = k_\Sigma \beta_k L / M_0$ зависит от скорости роста прочности k_Σ межконтактного промежутка.

Скорость роста прочности k_Σ при токах $I_{от} = 10 - 80$ А лежит в пределах от 4 до 1 В/мкс; при $I_{от} > 80$ А она остается постоянной и примерно равной 1,5 В/мкс.

Коэффициент β_k учитывает влияние материала контактов на скорость роста прочности (табл. 20).

Индуктивность отключаемой цепи рассчитывается как

$$L = \frac{U_n \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0}}{I_{от} \cdot \omega},$$

где U_n – номинальное напряжение, $\cos \varphi_0$ – коэффициент мощности, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота напряжения, $I_{от}$ – предельный отключаемый ток.

Для токов от 100 до 3600 А величина $M_0 \approx 0,8 \cdot 10^{-5} + 2,5 / I_{от}^2$ Гн/мкс.

Таблица 20

Значения коэффициента β_k при частоте источника 50 Гц

Материал контактов	Обгоревшие контакты	Зачищенные контакты
Медь	1,0	1,0
Латунь	0,8	1,0
Серебро	2,0	3,5
Ag-CgO	2,0	6,0
Ag-W	1,6	1,6
Ag-Ni	2,0	3,2
Ag-C	0,7	0,7

Длина дуги на один разрыв рассчитывается следующим образом:

для токов менее 80 А

$$l_d^0 = l_k, \text{ см};$$

для токов 80–200 А

$$l_d^0 \approx \sqrt{l_k^2 + \frac{40,5 I_{от}^2 t^2}{l_k}}, \text{ см};$$

для токов свыше 200 А

$$l_d^0 \approx \sqrt{l_k^2 + 12300 I_{от}^{2/3} t^2}, \text{ см}.$$

Сопротивление дуги в момент перехода тока через ноль определяется эмпирической зависимостью $R_d^0 \approx 0,015 + 14200 / I_{от}^2$, Ом/см.

Начальная восстанавливающаяся прочность в стадии проводимости (в момент перехода тока через ноль) $U_{вп}^0$ определяется по опытными данным (рис. 19).

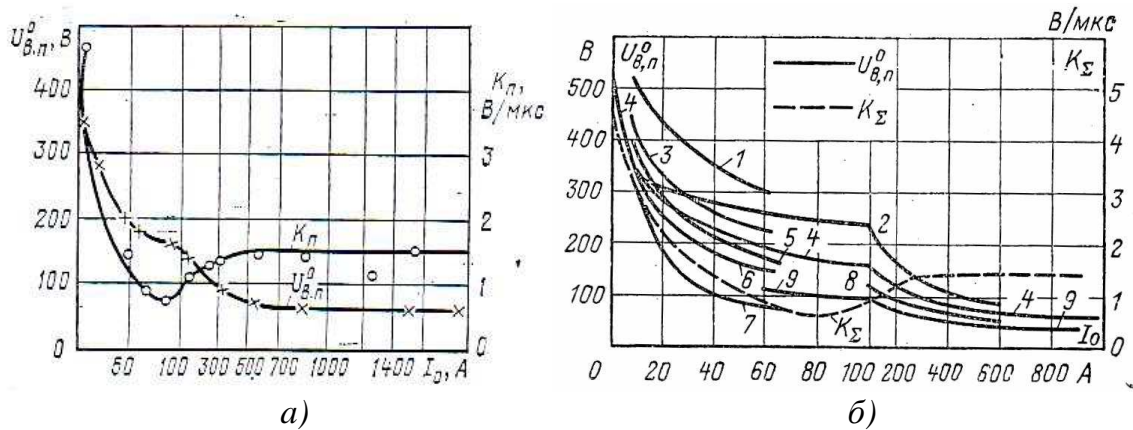


Рис. 19. Начальная восстанавливающаяся прочность и скорость роста прочности от тока

а) для свободной дуги на медных контактах;

б) для разных контактных материалов для свободной дуги в воздухе:

1 – серебро; 2 – латунь; 3 – серебро – никель (40 %); 4 – медь; 5 – серебро – вольфрам (50 %); 6 – серебро – окись кадмия (15 %); 7 – серебро – графит (3 %); 8 – алюминий; 9 – железо

3. Проверка выполнения условия аperiodичности характера нарастания напряжения осуществляется по выражению

$$f_0 \geq \frac{M_0 \cdot n \cdot 10^6}{\pi L},$$

где $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ – частота свободных колебаний.

В простейшем случае, когда отключаемая цепь представляет собой одночастотный контур, состоящий из последовательно соединенных индуктивности L и дугового промежутка аппарата, шунтированного емкостью C , собственная частота определяется формулой $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Емкость и индуктивность фазы статора двигателя напряжением 380 и 500 В в переходном режиме можно определить по эмпирическим формулам:

$$C \approx 3,5 \cdot 10^{-6} \left(1 + 2 \frac{P_n}{10}\right), \text{ Ф};$$

$$L \approx 42 \frac{10^{-3}}{P_n}, \text{ Гн.}$$

В этих выражениях номинальная мощность двигателя P_n подставляется в кВт.

В реальных сетях низкого напряжения $f_0 = 1 - 100$ кГц.

Теоретическое определение частоты собственных колебаний затруднительно, поэтому на практике используют опытные данные, устанавливающие зависимость f_0 от различных факторов.

Частота собственных колебаний может быть принята (в заводских условиях) для воздушных сетей $f_0 = 10000 - 50000$ Гц, для кабельных сетей – $f_0 = 5000 - 20000$ Гц.

Для приближенной оценки величины f_0 в сетях с вращающимися двигателями номинальной мощностью P_n до 50 кВт можно пользоваться эмпирической формулой

$$f_0 \approx \frac{380}{U_n} (A + B P_n^{3/4}), \text{ Гц.}$$

Для кабельных сетей $A = 8000$, $B = 2100$; для воздушных сетей $A = 15000$, $B = 3000$.

Для определения f_0 промышленных сетей при частоте 50 Гц можно использовать формулу $f_0 = (2 - 2,6) \cdot 10^6 \cdot I_{от}^{0,2} \cdot U_n^{-0,8}$, Гц.

Если условие выполняется число разрывов принимается равным n .

4. Если условие аperiodичности не выполняется, расчет производится для колебательного характера восстановления напряжения по выражению

$$n \geq \frac{1,8 U_n}{0,62 I_{отд}^0 R_d^0 + \frac{2 U_{вп}^0 f_0 + k_{\Sigma} \beta_k \cdot 10^6}{f_0 K k_{cx} \sqrt{1 - \cos \varphi_0}}}$$

$$K = U_{в.макс} / U_0 = 1 + e^{-0,0003 f_0},$$

где K – коэффициент амплитуды напряжения для свободной дуги (обычно $K = 1,1 - 1,5$).

3.4.8. Пример расчета дугогасительного устройства переменного тока

Исходными данными для проектирования дугогасительного устройства являются: отключаемый ток – 600 А, номинальное напряжение – 380 В, число включений в час – 1200, коэффициент мощности – 0,35, отключаемая цепь – трехфазная с кабельной системой питания, частота источника – 50 Гц, скорость расхождения контактов – 75 см/с. Контакты рычажные (рис. 3), выполнены из меди.

1. В соответствии с исходными данными определим параметры отключаемой цепи:

мощность

$$P = \sqrt{3}U_n \cdot I_{от} \cdot \cos \varphi_0 = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 600 \cdot 0,35 = 138217,7 \text{ Вт,}$$

коэффициент схемы $k_{сх} = 1,5$,

индуктивность отключаемой цепи

$$L = \frac{x_0}{2\pi f} = \frac{0,343}{2\pi 50} = 0,00109 \text{ Гн,}$$

где полное сопротивление отключаемой цепи $z_0 = U_n / (\sqrt{3}I_{от}) = 380 / (\sqrt{3} \cdot 600) = 0,366 \text{ Ом,}$ а индуктивное $x_0 = z_0 \sin \varphi_0 = 0,366 \cdot 0,936 = 0,343 \text{ Ом.}$

Собственная частота сети

$$f_0 = (2 - 2,6) \cdot 10^6 \cdot I_{от}^{0,2} \cdot U_n^{-0,8} = (2 - 2,6) \cdot 10^6 \cdot 600^{0,2} \cdot 380^{-0,8} = (61824 - 80371) = 71098 \text{ Гц.}$$

2. Необходимое количество разрывов при апериодическом характере восстановления напряжения

$$n \geq \frac{k_n U_n - A(1 + \ln(k_n U_n / A))}{U_{вп}^0 + 0,34 k_n I_{от}^0 R_{д}^0 I_{от}} = \frac{1,09 \cdot 380 - 110 \cdot (1 + \ln(1,09 \cdot 380 / 110))}{70 + 0,34 \cdot 1,09 \cdot 9,2 \cdot 0,0544 \cdot 600} = 0,873.$$

Принимаем $n = 1$.

В этой формуле коэффициент напряжения

$$k_n = 0,9 k_{сх} \sqrt{1 - \cos \varphi_0} = 0,9 \cdot 1,5 \sqrt{1 - 0,35} = 1,09,$$

величина $A = k_{\Sigma} \beta_k L / M_0 = \frac{1,5 \cdot 1,0 \cdot 0,00109}{1,49 \cdot 10^{-5}} = 110 \text{ В}$ (здесь коэффи-

циент $\beta_k = 1$ для медных контактов по табл. 20,

$$M_0 \approx 0,8 \cdot 10^{-5} + \frac{2,5}{I_{от}^2} = 0,8 \cdot 10^{-5} + \frac{2,5}{600^2} = 1,49 \cdot 10^{-5} \text{ Гн/мкс}).$$

Скорость роста прочности $k_{\Sigma} = 1,5$ В/мкс и напряжение начальной восстанавливающейся прочности $nU_{\text{вп}}^0 = 70$ В/мкс определены по рис. 19.

Сопротивление дуги в момент перехода тока через ноль

$$R_{\text{д}}^0 \approx 0,015 + 14200 / I_{\text{от}}^2 = 0,015 + \frac{14200}{600^2} = 0,0544 \text{ Ом/см.}$$

Длина дуги на один разрыв

$$l_{\text{д}}^0 \approx \sqrt{l_{\text{к}}^2 + 12300 I_{\text{от}}^{2/3} t^2} = \\ = \sqrt{0,75^2 + 12300 \cdot 600^{2/3} \cdot 0,01^2} = 9,2 \text{ см.}$$

Здесь раствор контактов определен исходя из принятых значений скорости расхождения контактов $v_p = 75$ см/с и времени гашения дуги $t = 0,01$ с

$$l_{\text{к}} = v_p \cdot t = 75 \cdot 0,01 = 0,75 \text{ см.}$$

Также для определения длины дуги может быть использована формула (раздел 3.4.5)

$$l_{\text{д}}^0 = t \cdot \sqrt{v_{\text{к}}^2 + 9v_{\text{д}}^2} = 0,01 \cdot \sqrt{75^2 + 9 \cdot 312^2} = 9,39 \text{ см,}$$

где скорость движения дуги $v_{\text{д}} \approx 37 \sqrt[3]{I_{\text{от}}} \approx 37 \sqrt[3]{600} = 312$ см/с.

Проверка выполнения условия апериодичности показывает, что процесс восстановления напряжения носит апериодический характер

$$f_0 = 71098 \geq \frac{M_0 \cdot n \cdot 10^6}{\pi L} = \\ = \frac{1,49 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 0,00109} = 4353,4 \text{ Гц.}$$

Следовательно, одного разрыва достаточно для гашения дуги.

3.4.9. Расчет электромагнитов

Расчету электромагнита предшествует **построение характеристики противодействующих сил.**

Построение характеристики осуществляется на основе кинематической схемы, которая является представлением о передаче и преобразовании движения звеньями механизма. На кинематической схеме изображаются звенья и кинематические пары механизма, указывается их взаимное расположение и связь с другими частями аппарата и данные, характеризующие кинематику механизма (величина хода или угла поворота ведомого и ведущего звеньев, длины плеч, передаточные отно-

шения, расположение и направление векторов сил или моментов сил, рабочий воздушный зазор, раствор, провал, проскальзывание и перекачивание подвижного контакта).

Кинематическая схема строится для наиболее характерных положений механизма (например, включённого, отключённого положения аппарата и положения, соответствующего моменту касания коммутирующих контактов).

В электромагнитном контакторе действуют движущие (приложены к ведущему звену) и противодействующие силы (силы полезных сопротивлений, например, силы нажатия контактов, осуществляемые пружинами, силы вредных сопротивлений, например, силы трения). Действие сил тяжести, электродинамических сил и сил инерции может быть как полезным, так и вредным.

При построении характеристики противодействующих сил на оси абсцисс откладывается величина хода или угла поворота ведущего или ведомого звена, а на оси ординат – приведенные значения противодействующих сил или моментов. Заметим, что при прямоходовом движении якоря приведения сил не требуется, результирующие силы получаются алгебраическим сложением действующих сил [18, с. 220–242].

Величина приведенной силы возвратной пружины должна быть достаточной для предотвращения самопроизвольного отскока детали от упора при ударах во время отключения аппарата, при ударных сотрясениях, тряске и т.д. Величины силы нажатия на упор различны для различных аппаратах и составляют для маломощных аппаратов (токи до 2 А), работающих в стационарных условиях, 0,1–0,3 Н. При постоянном и переменном токе от 100 до 600 А минимальная сила нажатия якоря на упор может быть принята равной примерно 0,06 Н/А. В аппаратах, предназначенных для работы в передвижных установках, эти силы должны быть существенно больше (в 6–9 раз).

Наклон характеристики возвратной пружины (жесткость) принимается небольшим, чтобы не увеличивать движущую силу включающего приводного механизма. Наклон характеристики и сила при отключенном состоянии (нажатие на упор) корректируются при согласовании тяговой характеристики и характеристики противодействующих сил.

Необходимо отметить, что полный учет всех факторов, влияющих на работу электромагнита (ЭМ) в аналитической форме, приемлемой для инженерных расчетов, встречает затруднения в связи со сложностью электромагнитных и тепловых процессов в элементах аппарата.

В курсовом проекте используется методика расчета ЭМ, основанная на упрощенных расчетных формулах, обеспечивающих приемле-

мую точность за счет применения установленных экспериментально ряда корректирующих и конструктивных коэффициентов.

Конструкция ЭМ в основном определяется требованием создания необходимой электромагнитной силы при определенных условиях нагрева и охлаждения катушки, то есть зависит от размеров магнитопровода, наличия рабочих и нерабочих зазоров, размеров и обмоточных данных катушки. Остальные элементы конструкции в меньшей степени влияют на работу ЭМ.

В конструкции ЭМ можно выделить *ядро, т.е. часть электромагнита*, состоящую из втягивающей катушки, участка магнитопровода, охватываемого ею, и полюсного наконечника.

Расчет ядра электромагнита заключается в определении размера ядра и обмоточных данных катушки. При этом определяющим размером ядра электромагнита является диаметр сердечника при круглой форме (для электромагнита постоянного тока) или его ширина при прямоугольной форме (для электромагнита переменного тока).

Методика проектирования электромагнита включает три этапа.

1. *Предварительный расчет* с использованием упрощенных соотношений, предусматривающий в первом приближении определение размеров магнитопровода, катушки, сечения и числа витков обмотки.

2. *Разработка конструкции ЭМ* по данным предварительного расчета с применением основанных на опыте проектирования и физическом моделировании ряда конструктивных коэффициентов и параметров.

3. *Проектный расчет ЭМ*, предусматривающий окончательное уточнение полученных в предварительном расчете параметров, геометрических размеров, обмоточных данных, оценка соответствия температурных и энергетических параметров существующим нормам.

Расчету электромагнита должен предшествовать *анализ кинематической схемы механизма*, с которым электромагнит сочленен, с целью определения результирующих характеристик противодействующих сил или моментов, которые необходимо преодолеть при движении якоря.

В результате должен быть установлен *критический зазор* по ходу якоря, при котором электромагниту приходится развивать наибольшую работоспособность для преодоления противодействующей силы. Критическому зазору соответствует *критическая электромагнитная сила*, которая для обеспечения надежной работы должна несколько превышать соответствующую этому зазору противодействующую силу $F_{пр}$

$$F_{эмкр} = k_3 F_{пр},$$

где $k_3 = 1,2 - 1,5$ – коэффициент запаса, принимаемый для самых неблагоприятных условий эксплуатации (понижение напряжения при нагретой катушке).

Значения критической силы и критического зазора являются основными исходными данными расчета ЭМ.

Кроме того, необходимо знать условия работы ЭМ (продолжительный, кратковременный), род тока, напряжение, частоту и т.д.

1. **Выбор конструктивной формы электромагнита** может быть осуществлен на основе прототипа или по оптимальному геометрическому показателю (конструктивному фактору) G :

для электромагнита постоянного тока

$$G = \frac{\sqrt{F_{\text{ЭМ}}}}{\delta_{\text{н}}};$$

для электромагнита переменного тока

$$G = \frac{\sqrt{2F_{\text{ЭМ}}}}{\delta_{\text{н}}}.$$

Каждой конструктивной форме электромагнита, спроектированного оптимально по экономичности в отношении массы, соответствуют определенные значения G (табл. 21).

2. Для **изготовления магнитопроводов** электромагнитов используются *низкоуглеродистые стали* (при постоянном токе) и *кремнистые электротехнические стали* (при переменном токе).

3. При **выборе магнитной индукции** необходимо придерживаться следующих рекомендаций.

1) При притянutom якоря в месте максимального потока индукция должна быть равной индукции на колене кривой намагничивания.

Для электротехнических сталей марок 1212, 1411, 1511, 1521 и других эта величина составляет $B_{\text{max}} = 1,0 - 1,2$ Т.

2) При отпущенном якоря индукция выбирается по рекомендациям (рис. 20–23) в зависимости от конструктивной формы и геометрического фактора.

Максимальная индукция в сердечнике при отпущенном якоря для силовых электромагнитов составляет 0,8–1,2 Т, для электромагнитов высокой чувствительности (реле) – 0,4–0,7 Т.

3) Величина индукции в рабочем зазоре для силовых электромагнитов выбирается в пределах 0,6–1 Т.

При переменном токе расчет производится по амплитудному значению индукции.

Таблица 21

Значения геометрического показателя для различных конструктивных форм электромагнитов

Конструктивная форма электромагнита	G	
	H ^{0,5} / м	кгс ^{0,5} / см
Цилиндрический, с втягиваемым прямоходовым якорем: 1) состоящий из катушки и якоря сердечника 2) с незамкнутой магнитной цепью (без стопа) с усеченным коническим якорем 3) якорь с коническим концом, угол 60° 4) то же, угол 90° 5) якорь с плоским концом	ниже 63	ниже 0,2
	63–316	0,2–1
	380–1600	1,2–5
	1260–5100	4–16
	5100–30000	16–93
Шихтованный из штампованных пластин с прямоходовым втягиваемым Т, Ш-образным якорем и броневой переменной тока	316–25000	1–80
Цилиндрический с внешним притягиваемым дисковым якорем	30000–140000	93–450
Двухкатушечный с двумя сердечниками и внешним плоским притягиваемым якорем	900–90000	2,7–270
Однокатушечный с одним сердечником и внешним притягиваемым якорем	630–63000	1,9–190

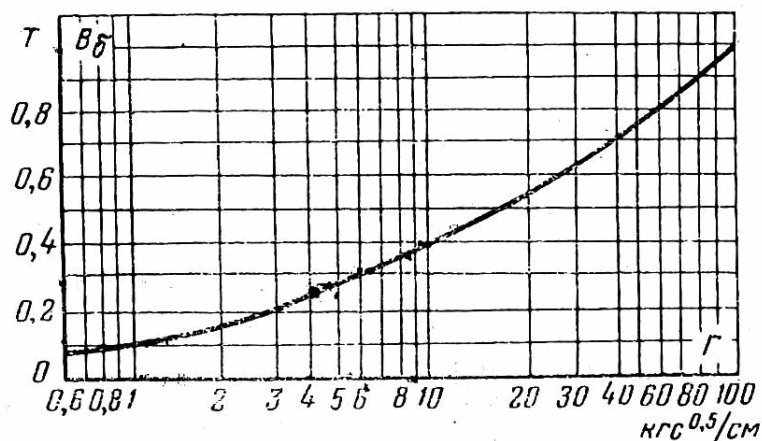


Рис. 20. Зависимость магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре при отпущенном якоря от геометрического показателя для электромагнитов средних размеров с внешним притягиваемым якорем. Максимальная условная полезная работа 0,6 кгс·см. Режим работы – продолжительный. Превышение температуры – 70°С.

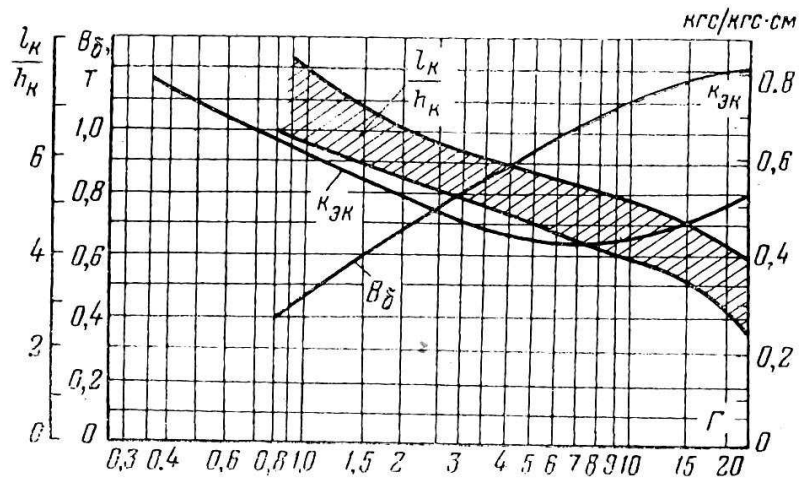


Рис. 21. Зависимости расчетных параметров от геометрического показателя для цилиндрических электромагнитов с втягиваемым якорем-сердечником, имеющим конический конец с углом при вершине 90° . Максимальная условная полезная работа 11,5 кгс·см. Режим работы – продолжительный. Превышение температуры – 70°C . Материал – мягкая сталь.

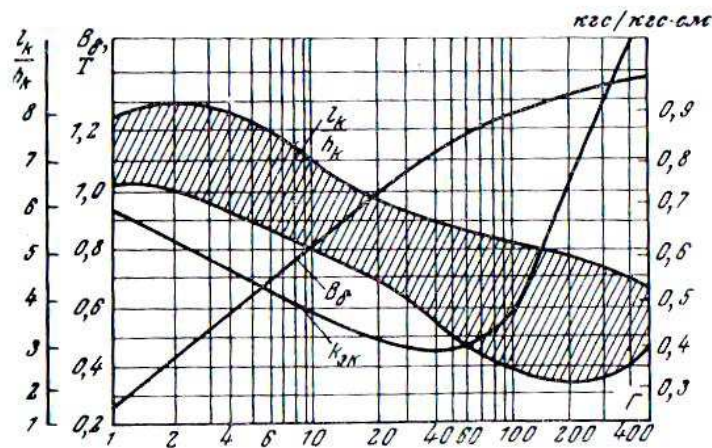


Рис. 22. Зависимости расчетных параметров от геометрического показателя для цилиндрических электромагнитов с втягиваемым якорем-сердечником, имеющим плоский конец. Максимальная условная полезная работа 11,5 кгс·см. Режим работы – продолжительный. Превышение температуры – 70°C . Материал – мягкая сталь.

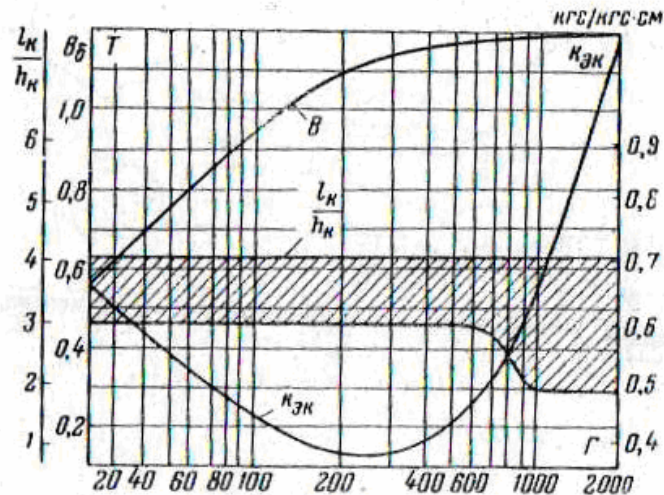


Рис. 23. Зависимости расчетных параметров от геометрического показателя для цилиндрических электромагнитов с внешним притягиваемым дисковым якорем.

Максимальная условная полезная работа 11,5 кгс·см. Режим работы – продолжительный. Превышение температуры – 70°С. Материал – мягкая сталь.

3. Значения коэффициента выпучивания и рассеяния [18, с. 270–272].

Коэффициент выпучивания $\sigma_{\text{вп}} = \Phi_{\delta} / \Phi_{\text{тор}}$ (Φ_{δ} , $\Phi_{\text{тор}}$ – магнитный поток в воздушном зазоре и торце полюса электромагнита) может быть определен, если известны геометрические размеры деталей, образующих рабочий воздушный зазор. В предварительном расчете коэффициент выпучивания принимается ориентировочно $\sigma_{\text{вп}} = 1–1,8$.

При известных величинах воздушного зазора и диаметра сердечника (или размера стороны полюса) коэффициент выпучивания может быть уточнен по рис. 24.

Коэффициент рассеяния σ_p каждой части магнитной цепи (отношение максимального или среднего потока части цепи к потоку в воздушном зазоре) может быть определен, если известны магнитные проводимости рабочих воздушных зазоров и путей потоков рассеяния.

В предварительных расчетах коэффициент рассеяния принимается ориентировочно, исходя из следующих соображений.

При притянutom якорю поток рассеяния мал, поэтому коэффициент рассеяния близок к 1.

При отпущенном якорю коэффициент рассеяния зависит от величины рабочего воздушного зазора и от магнитной проводимости потоков рассеяния. Он изменяется в пределах от 1,1 до 4 и больше.

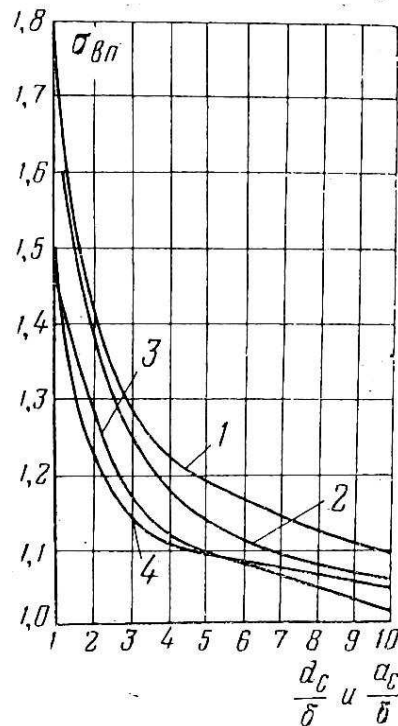


Рис. 24. Зависимости средних значений коэффициента выпучивания от отношения диаметра или стороны прямоугольного сечения сердечника к величине рабочего воздушного зазора

1 – цилиндрический сердечник и бесконечная плоскость якоря, 2 – плоский внешний притягиваемый прямоходовой якорь и прямоугольный сердечник, 3 – прямоугольные якорь и сердечник, 4 – цилиндрические плоские якорь и сердечник

4. После определения по известной механической характеристике критической величина силы и зазора (по максимальному значению произведения силы на величину воздушного зазора), рассчитывается **размеры сердечника** – площадь торца сердечника $S_{\text{тор}}$ или полюсного наконечника $S_{\text{пн}}$, диаметр d (для круглого сердечника) или размеры сторон a и b (для прямоугольного сердечника).

Расчетная сила принимается равной критической для ЭМ с одним воздушным зазором, равной $\frac{1}{2}$ для ЭМ с двумя зазорами и т.д.

Если критический зазор равен начальному, расчет производится для отпущенного состояния. Если критический зазор соответствует моменту касания контактов, то расчет ведется для притянутого состояния.

Для электромагнитов постоянного тока используются выражения

$$F_{\text{эм}} = \frac{\Phi_{\text{тор}}^2}{2\mu_0 S_{\text{тор}}} = \frac{B_{\text{тор}}^2 S_{\text{тор}}}{2\mu_0} = 39,8 \cdot 10^4 B_{\text{тор}}^2 S_{\text{тор}}, \text{ Н}$$

$$S_{\text{тор}} = \frac{F_{\text{эм}}}{39,8 \cdot 10^4 B_{\text{тор}}^2}, \text{ М}^2;$$

для однофазных электромагнитов переменного тока

$$S_{\text{тор}} = \frac{F_{\text{э}}}{19,9 \cdot 10^4 B_{\text{макс тор}}^2}, \text{ М}^2.$$

Диаметр сердечника при отсутствии полюсного наконечника

$$d = \sqrt{\frac{4S_{\text{тор}}}{\pi}}.$$

Диаметр сердечника при наличии полюсного наконечника

$$S_c = \frac{\sigma_{\text{вп.от}} B_{\text{пн.от}} S_{\text{пн}}}{B_{\text{с макс от}}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4S_c}{\pi}}, \quad d_{\text{пн}} / d = 1,1 - 1,5.$$

Размеры прямоугольного сердечника

$$a = \frac{S_{\text{тор}}}{k_c b}; \quad b / a = 1 - 2.$$

По условиям размещения короткозамкнутого витка отношение сторон $b / a = 0,8 - 0,9$.

Коэффициент заполнения сечения пакета сталью, учитывающий изоляционные слои пластин стали, составляет для листов толщиной 0,35 и 0,5 мм, соответственно, $k_c = 0,9$ и $0,95$.

5. Размеры катушки зависят от величины намагничивающей силы, необходимой для срабатывания электромагнита.

Полная МДС срабатывания при постоянном токе

$$F = (1,2 - 1,6) F_{\delta} = (1,2 - 1,6) \cdot \frac{B_{\delta} \cdot \delta}{\mu_0};$$

Сечение обмотки постоянного тока

$$S_{\text{об}} = l_{\text{об}} h_{\text{об}} = \frac{k_{\text{макс}} F}{k_{\text{мин}} k_l j k_{\text{зоб}}}.$$

Полная МДС срабатывания при переменном токе

$$F = \frac{B_{\text{тор макс от}} \cdot \delta_{\text{от}}}{\mu_0} + \frac{B_{\text{тор макс от}} \cdot \sigma \cdot \delta_{\text{пр}}}{\mu_0},$$

где $B_{\text{тор max от}} = B_{\delta \text{ max от}} / \sigma_{\text{вл}}$ – значение индукции в торце сердечника при отпущенном состоянии, $\delta_{\text{от}}$, $\delta_{\text{пр}}$ – воздушные зазоры при отпущенном и притяннутом состоянии якоря соответственно.

Сечение обмотки переменного тока

$$S_{\text{об}} = \frac{k_{\text{max}} F}{k_{\text{min}} k_l k_i j k_{\text{зоб}}}$$

Коэффициент $k_{\text{max}} = U_{\text{max}} / U_{\text{н}}$ в наиболее распространенных случаях $k_{\text{max}} = 1,05$, коэффициент $k_{\text{min}} = U_{\text{min}} / U_{\text{н}} = 0,6 - 0,9$.

Коэффициент перегрузки по току учитывает режим (кратковременный, повторно-кратковременный). Для длительного режима коэффициент перегрузки $k_l = 1$. Коэффициент тока $k_i = F / F_{\text{прит.}} = 4 - 15$ (здесь $F_{\text{прит.}}$ – МДС при притяннутом якоре).

Плотность тока j при продолжительном режиме работы обычно составляет 2 – 4 А/кв.мм.

Коэффициент заполнения обмотки $k_{\text{зоб}} = k_{\text{ф}} k_{\text{нер}} k_{\text{из}}$ зависит от коэффициента формы, коэффициента неравномерности намотки (укладки) и коэффициента изоляции провода $k_{\text{из}} = d^2 / d_{\text{из}}^2$ (d , $d_{\text{из}}$ – диаметр голого и изолированного провода соответственно).

Коэффициент формы провода $k_{\text{ф}} = 1$ (прямоугольный провод), $k_{\text{ф}} = 0,785$ (круглый провод).

Коэффициент неравномерности намотки (укладки) $k_{\text{нер}} = 1$ (прямоугольный провод), $k_{\text{нер}} = 0,8 - 0,9$ (круглый провод, малый диаметр), $k_{\text{нер}} = 0,9 - 0,95$ (круглый провод, диаметр больше 0,3 мм).

Отношение сторон обмотки $l_{\text{об}} / h_{\text{об}}$ в рационально спроектированных электромагнитах составляет от 3 до 8 (в электромагнитах постоянного тока) в зависимости от конструкции и от 2 до 4 в зависимости от силы и хода (в электромагнитах переменного тока).

Анализ существующих конструкций электромагнитов показывает, что можно принимать следующие значения $l_{\text{об}} / h_{\text{об}}$.

Для электромагнитов постоянного тока: с внешним качающимся якорем 6–7 для малых электромагнитов, 4–5 – для больших; с внешним прямоходовым якорем 7–8 для малых электромагнитов, 5–6 – для больших; с втяжным якорем 3–5 для короткоходовых электромагнитов, 6–8 – для длинноходовых.

Также значение $l_{\text{об}} / h_{\text{об}}$ можно принять по геометрическому показателю (рис. 21–23).

Для электромагнитов переменного тока можно принять следующие значения $l_{об} / h_{об}$: при относительно малом ходе и большой силе 2–2,5, при относительно большом ходе и малой силе 3–4.

Для уменьшения вибрации якоря в электромагнитах переменного тока применяются короткозамкнутые витки на полюсе. Оптимальные условия достигаются при соотношении площадей охваченной и не охваченной S_2 витком $S_1 / (S_1 + S_2) \approx 0,75 - 0,8$.

6. После определения основных размеров электромагнита разрабатывается его эскиз [18, с. 284–291] и проводится поверочный расчет, включающий расчет магнитной цепи и катушки электромагнита.

В заключение строятся характеристика противодействующих сил и тяговая. Их сопоставление позволяет сделать заключение о работоспособности электромагнита.

3.4.10. Примеры расчета электромагнитов

Пример № 1. Рассчитать размеры электромагнита контактора постоянного тока.

Исходными данными для проектирования электромагнитного устройства являются: номинальный ток – 400 А, номинальное напряжение – 440 В, число включений в час – 1200, а также ряд параметров элементов конструкции контактора, рассчитанных на предшествующих этапах проектирования.

1. В качестве примера выбрана часто встречающаяся конструкция электромагнита постоянного тока (рис. 25).

На рисунке 25 приведены конструктивная и кинематическая схема во включённом состоянии контактора.

Якорь 11 электромагнита может перемещаться относительно оси вращения О под действием либо электромагнитной силы $F_{эм}$, либо силы $F_{вп}$ возвратной пружины 15 и силы $F_{кп}$ контактной пружины 9. Кроме этого, контактодержатель 7 с подвижным контактом 5 имеет возможность вращения на призме 10, что позволяет создать усилие $F_{кп}$ на главных контактах 2 и 5 при провале контактов.

Электромагнитная сила приложена на плече $l_{эм}$, сила контактного нажатия – на плече $l_{кп}$. Кроме этого, силе $F_{эм}$ противодействуют сила возвратной пружины $F_{вп}$ на плече $l_{вп}$. Действием сил тяжести и прочими силами (моментами) можно пренебречь.

При относительно небольшом рабочем зазоре электромагнита $\delta = 10 - 12$ мм для получения раствора главных контактов, достаточного

для надежного гашения электрической дуги, принимается отношение плеч $l_{кп} / l_{эм} = 1 - 1,9$.

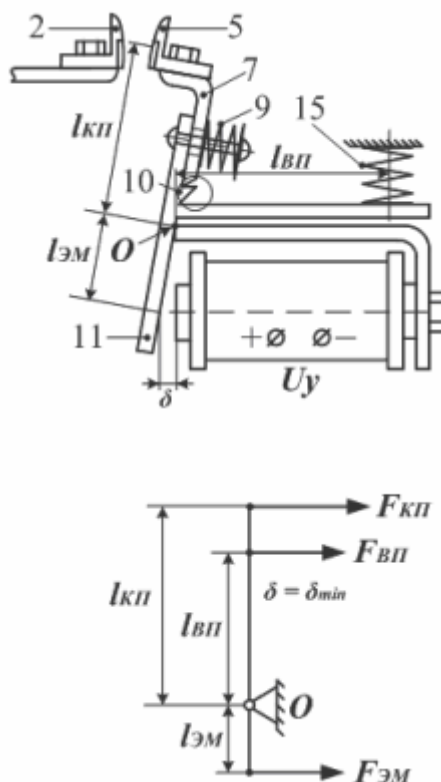


Рис. 25. Конструктивная и кинематическая схема электромагнитно-пружинного механизма контактора

Для возможности согласования движущих и противодействующих сил при включении контактора силы всех пружин необходимо привести к рабочему зазору δ в месте приложения электромагнитной силы по оси симметрии сердечника электромагнита. При этом приведённые силы и моменты сил по своему действию должны быть эквивалентны действию движущих сил и моментов. Величина приведённой силы F' определяется из условия равенства её работы на возможном перемещении точки приложения работе действительной силы (или момента).

В двухзвенном рычажно-шарнирном механизме любая сила, действующая на плече l , может быть приведена к точке приложения электромагнитной силы $F_{эм}$, расположенной на плече $l_э$, на основании зависимости $F' = F \cdot (l / l_{эм})$.

Рассчитаем приведенные силы для рассматриваемого примера.

Значение силы начального сжатия контактных пружин всех полюсов p , приведённое к рабочему зазору

$$F_{\text{кп}}^{\prime\text{н}} = F_{\text{к}}^{\text{н}} \cdot p \cdot (l_{\text{кп}} / l_{\text{эм}}) = 66,4 \cdot 1 \cdot 1,9 = 126 \text{ Н},$$

где $p = 1$ – число полюсов контактора, $F_{\text{к}}^{\text{н}} = 66,4 \text{ Н}$ – сила начального контактного нажатия (определена в разделе 3.4.4), $l_{\text{кп}} / l_{\text{эм}} = 1,9$ – отношение плеч (выбрано в соответствии с рекомендациями).

Приведенная сила конечного нажатия контактной пружины

$$F_{\text{кп}}^{\prime\text{к}} = F_{\text{к}}^{\text{к}} \cdot p \cdot (l_{\text{кп}} / l_{\text{эм}}) = 132,83 \cdot 1 \cdot 1,9 = 252,3 \text{ Н},$$

где сила конечного контактного нажатия $F_{\text{к}}^{\text{к}} = 132,83 \text{ Н}$ (определена в разделе 3.4.4).

Сила конечного сжатия возвратной пружины

$$F_{\text{вп}}^{\prime\text{к}} = k_{\text{вп}} \cdot F_{\text{кп}}^{\prime\text{к}} = 0,5 \cdot 252,3 = 126 \text{ Н},$$

где $k_{\text{вп}} = 0,3 - 0,5$ – расчётный коэффициент возвратной пружины.

Сила начального сжатия возвратной пружины

$$F_{\text{вп}}^{\prime\text{н}} = k_{\text{вп}} \cdot F_{\text{кп}}^{\prime\text{н}} = 0,5 \cdot 126 = 63 \text{ Н}.$$

При полном ходе и провале главного контакта 5 (рисунок 25) из одного крайнего положения (контакты 2 и 5 разомкнуты) во второе крайнее положение (контакты 2 и 5 замкнуты) рабочий зазор электромагнита изменяется в пределах от максимального до минимального значения.

Максимальный рабочий зазор должен иметь минимально возможную длину для обеспечения расчётного значения провала контактов, что положительно сказывается на уменьшении габаритов, мощности, рабочей температуры электромагнита, позволяет исключить вибрацию (дребезг) главных контактов при включении и тем самым увеличить ресурс работы контактора. Максимальное значение рабочего зазора электромагнита не должно быть больше (10÷12 мм). В противном случае, необходимо изменить соотношение плеч $l_{\text{кп}} / l_{\text{эм}}$ или применить иную конструктивную схему электромагнитно-пружинного механизма контактора.

Максимальный рабочий зазор

$$\delta_{\text{max}} = (l_{\text{эм}} / l_{\text{кп}}) \cdot \sigma = 0,526 \cdot 23 = 12 \text{ мм},$$

где $\sigma = l_{\text{к}} + \sigma_{\text{п}} = 20 + 3 = 23 \text{ мм}$, $l_{\text{к}} = 20 \text{ мм}$ – раствор контактов (определен в разделе 3.4.5), $\sigma_{\text{п}}$ – провал контактов определяется на основе рекомендаций (при токах от 25 до 400 А $\sigma_{\text{п}} = 1 - 3 \text{ мм}$) или по прототипу, $l_{\text{эм}} / l_{\text{кп}} = 0,526$ – величина, обратная принятому значению $l_{\text{кп}} / l_{\text{эм}} = 1,9$.

Величина зазора, соответствующая моменту касания главных контактов при движении якоря от разомкнутого до замкнутого положения якоря

$$\delta_{\text{кк}} = (l_{\text{эм}} / l_{\text{кп}}) \cdot \sigma_{\text{п}} = 0,526 \cdot 3 = 1,58 \text{ мм}.$$

Для исключения залипания якоря к полюсному наконечнику за счёт остаточной намагниченности минимальный зазор должен быть отличен от нуля. У больших электромагнитов предусматривается штифт или пластина отлипания размером от 0,1 до 0,4 мм, которые и определяют величину конечного воздушного зазора.

Результирующая характеристика противодействующих сил представляет собой арифметическую сумму характеристик приведенных сил возвратной и контактной пружин от величины воздушного зазора (рис. 26).

Значение силы возвратной пружины при зазоре, соответствующем моменту касания контактов, можно определить по графику или рассчитать по формуле

$$F_{\text{ВП}}^{\text{/кк}} = F_{\text{ВП}}^{\text{/к}} - (F_{\text{ВП}}^{\text{/к}} - F_{\text{ВП}}^{\text{/н}}) \frac{\delta_{\text{кк}}}{\delta_{\text{max}}} = 126 - (126 - 63) \frac{1,58}{12} = 117,7 \text{ Н.}$$

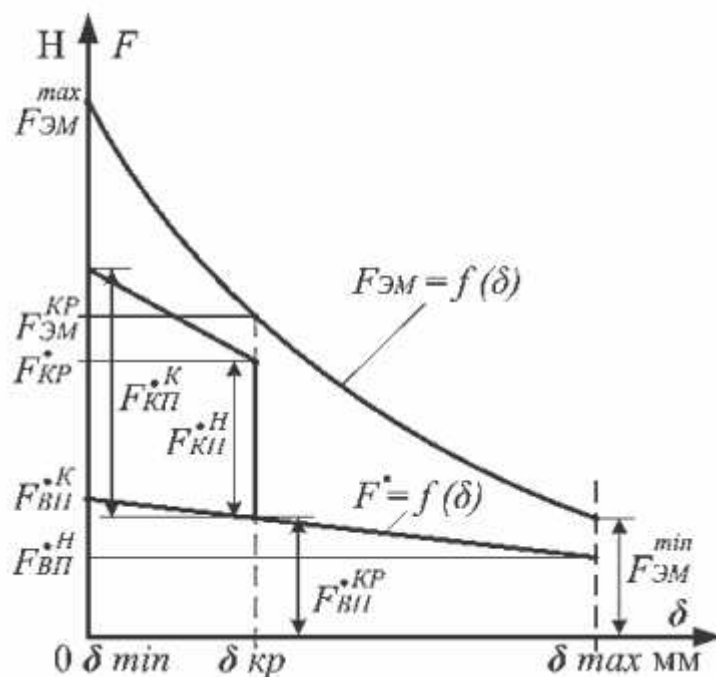


Рис. 26. Тяговая характеристика и характеристик противодействующих сил, приведенных к рабочему воздушному зазору (механическая характеристика контактора)

Результирующая сила при начальном зазоре $\delta_{\text{max}} = 12 \text{ мм}$ равна силе возвратной пружины $F_{\Sigma}^{\text{/н}} = F_{\text{ВП}}^{\text{/н}} = 63 \text{ Н}$, при зазоре $\delta_{\text{кк}} = 1,58 \text{ мм}$ — $F_{\Sigma}^{\text{/кк}} = F_{\text{ВП}}^{\text{/кк}} + F_{\text{КП}}^{\text{/н}} = 117,7 + 126 = 243,7 \text{ Н}$, при конечном зазоре $\delta_{\text{к}} = 0,4 \text{ мм}$ — $F_{\Sigma}^{\text{/к}} = F_{\text{ВП}}^{\text{/к}} + F_{\text{КП}}^{\text{/к}} = 126 + 252,3 = 378,3 \text{ Н}$.

По известной механической характеристике может быть определены критические величины силы и зазора (по максимальному значению произведения силы на величину воздушного зазора).

Для рассматриваемого примера $F_{\Sigma}^{/H} \cdot \delta_{\max} = 63 \cdot 12 = 756 \text{ Н} \cdot \text{мм}$,
 $F_{\Sigma}^{/KK} \cdot \delta_{KK} = 243,7 \cdot 1,58 = 385 \text{ Н} \cdot \text{мм}$, $F_{\Sigma}^{/K} \cdot \delta_K = 378,3 \cdot 0,4 = 151,3 \text{ Н} \cdot \text{мм}$.

Рассчитанные значения позволяют сделать вывод, что критическая точка соответствует начальному воздушному зазору.

2. Так как критический зазор равен начальному, расчет производится для отпущенного состояния.

Необходимое тяговое усилие электромагнита

$$F_{\text{эм}} = k_3 F_{\text{пр}} = (1,2 - 1,5) F_{\Sigma}^{/H} = 1,3 \cdot 63 = 82 \text{ Н.}$$

3. Конструктивный фактор для электромагнита постоянного тока

$$G = \frac{\sqrt{F_{\text{эм}}}}{\delta_H} = \frac{\sqrt{8,2}}{1,2} = 2,39 \text{ кГ}^{0,5} / \text{см.}$$

4. Размеры сердечника:

сечение сердечника электромагнита

$$S_{\text{тор}} = \frac{F_{\text{эм}}}{39,8 \cdot 10^4 B_{\text{тор}}^2} = \frac{82}{39,8 \cdot 10^4 \cdot 0,8^2} = 0,0032 \text{ м}^2,$$

где $B_{\text{тор}} = B_{\delta}$ при $\sigma_{\text{вп}} = 1$, $B_{\delta} = 0,8 \text{ Тл}$ – индукция в воздушном зазоре при отпущенном якоре (принята в соответствии с рекомендациями для силовых электромагнитов);

диаметр сердечника

$$d = \sqrt{\frac{4S_{\text{тор}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0032}{3,14}} = 0,0638 \text{ м.}$$

6. Размеры обмотки постоянного тока:

сечение обмотки

$$S_{\text{об}} = l_{\text{об}} h_{\text{об}} = \frac{k_{\max} F}{k_{\min} k_I j k_{30\text{об}}} = \frac{1,05 \cdot 10700,6}{0,75 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 0,56} = 0,0089 \text{ м}^2,$$

где $F = (1,2 - 1,6) F_{\delta} = (1,2 - 1,6) \cdot \frac{B_{\delta} \cdot \delta}{\mu_0} = 1,4 \cdot \frac{0,8 \cdot 12 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 10700,6 \text{ А}$ –

полная МДС срабатывания при постоянном токе, $j = 3 \text{ А/мм}^2$ – плотность тока в обмотке (принята в соответствии с рекомендациями), коэффициент перегрузки по току для длительного режима $k_I = 1$. Коэффициенты k_{\max} , k_{\min} приняты в соответствии с рекомендациями.

Коэффициент заполнения обмотки
 $k_{\text{зоб}} = k_{\phi} k_{\text{нер}} k_{\text{из}} = 0,785 \cdot 0,9 \cdot 0,787 = 0,56$ зависит от коэффициента формы, коэффициента неравномерности намотки (укладки) и коэффициента изоляции провода $k_{\text{из}} = d^2 / d_{\text{из}}^2 = 0,315^2 / 0,355^2 = 0,787$ ($d, d_{\text{из}}$ – диаметр голого и изолированного провода марки ПЭВ-1 по табл. П.17).

Принимая отношение сторон обмотки $l_{\text{об}} / h_{\text{об}} = 4$ определим размеры обмотки:

толщина обмотки

$$h_{\text{об}} = \sqrt{S_{\text{об}} / (l_{\text{об}} / h_{\text{об}})} = \sqrt{0,0089 / 4} = 0,047 \text{ м,}$$

длина обмотки

$$l_{\text{об}} = S_{\text{об}} / h_{\text{об}} = 0,0089 / 0,047 = 0,189 \text{ м.}$$

Полученные данные корректируются в процессе выполнения эскиза и поверочного расчета электромагнита.

Пример № 2. Рассчитать размеры электромагнита пускателя переменного тока.

Исходными данными для проектирования электромагнитного устройства являются: номинальный ток – 10 А, номинальное напряжение – 380 В, режим работы – продолжительный.

В качестве примера выбрана конструкция электромагнита переменного тока, характерная для пускателя типа ПМЕ (рис. 27).

В соответствии с прототипом принимаем провал контактов $\sigma_{\text{п}} = 3$ мм, раствор контактов $x_{\text{р}} = l_{\text{к}} = 2,5$ мм, сила начального контактного нажатия (сила контактной пружины) $F_{\text{кп}}^{\text{н}} = 2$ Н (табл. П.6).

Начальный рабочий зазор

$$\delta_{\text{н}} = l_{\text{к}} + \sigma_{\text{п}} = 2,5 + 3 = 5,5 \text{ мм,}$$

сила конечного контактного нажатия

$$F_{\text{кп}}^{\text{н}} = F_{\text{кп}}^{\text{к}} / 0,5 = 2 / 0,5 = 4 \text{ Н.}$$

Построение характеристики противодействующих сил производится аналогично рассмотренному примеру № 1.

Необходимо отметить, что при прямоходовой электромагнитной системе приведение сил не требуется. Сила тяжести подвижных частей (якорь и контактная система) не учитываются, так как аппарат предназначен для работы в горизонтальном положении, силой трения ввиду ее малости можно пренебречь. Противодействующими силами являются силы контактных и возвратных пружин.

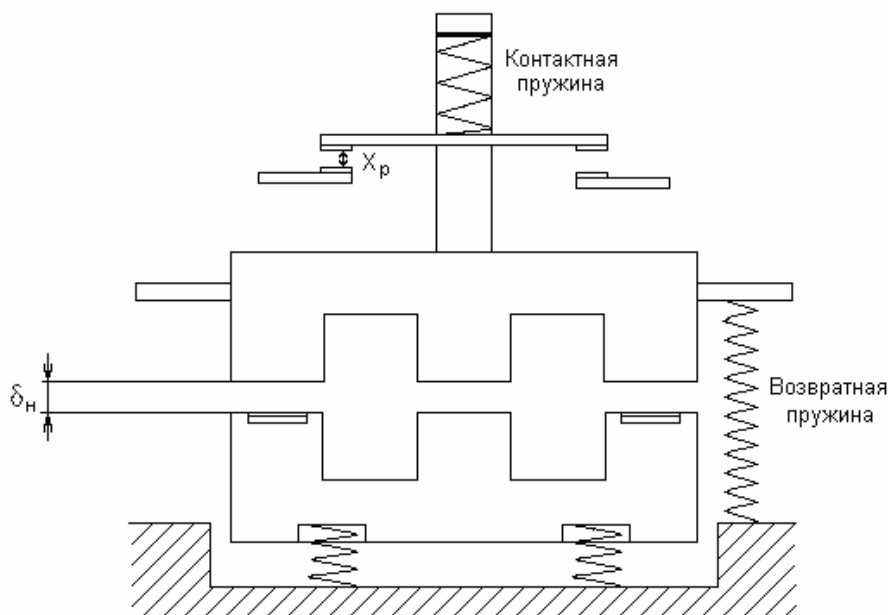


Рис. 27. Конструктивная схема электромагнитного механизма переменного тока

Сила возвратных пружин (на рис. 27 вторая возвратная пружина не показана) при отпущенном якоре принимается равной силе давления на упор. Удельное нажатие на упор принимаем 0,1 Н/А.

Сила начального сжатия возвратных пружин

$$F_{\text{вп}}^{\text{н}} = F_{\text{у}} = 0,1 \cdot I_{\text{н}} = 0,1 \cdot 10 = 1 \text{ Н.}$$

Сила конечного сжатия возвратных пружин

$$F_{\text{вп}}^{\text{к}} = 1,5 \cdot F_{\text{вп}}^{\text{н}} = 1,5 \cdot 1 = 1,5 \text{ Н.}$$

Значение силы возвратных пружин при зазоре, соответствующем моменту касания контактов

$$F_{\text{вп}}^{\text{кк}} = F_{\text{вп}}^{\text{к}} - (F_{\text{вп}}^{\text{к}} - F_{\text{вп}}^{\text{н}}) \frac{\sigma_{\text{п}}}{\delta_{\text{н}}} = 1,5 - (1,5 - 1) \frac{3}{5,5} = 1,23 \text{ Н.}$$

Результирующая сила при начальном зазоре $\delta_{\text{мах}} = 5,5$ мм равна силе возвратных пружин $F_{\Sigma}^{\text{н}} = F_{\text{вп}}^{\text{н}} = 1$ Н, при зазоре $\delta_{\text{кк}} = \sigma_{\text{п}} = 3$ мм – $F_{\Sigma}^{\text{кк}} = F_{\text{вп}}^{\text{кк}} + 3F_{\text{кп}}^{\text{н}} = 1,23 + 3 \cdot 2 = 7,23$ Н, при конечном зазоре $\delta_{\text{к}} = 0,1$ мм – $F_{\Sigma}^{\text{к}} = F_{\text{вп}}^{\text{к}} + 3F_{\text{кп}}^{\text{к}} = 1,5 + 3 \cdot 4 = 13,5$ Н (значение силы контактной пружины умножено на три, так как пускатель содержит три контактных мостика, т.е. имеет три полюса).

По известной механической характеристике может быть определена критическая величина силы и зазора (по максимальному значению произведения силы на величину воздушного зазора).

Для рассматриваемого примера $F_{\Sigma}^H \cdot \delta_H = 1 \cdot 5,5 = 5,5 \text{ Н} \cdot \text{мм}$,
 $F_{\Sigma}^{KK} \cdot \sigma_{II} = 7,23 \cdot 3 = 21,69 \text{ Н} \cdot \text{мм}$, $F_{\Sigma}^K \cdot \delta_K = 13,5 \cdot 0,1 = 1,35 \text{ Н} \cdot \text{мм}$.

Рассчитанные значения позволяют сделать вывод, что критическая точка соответствует моменту касания контактов. В этом случае предварительный расчет электромагнита переменного тока целесообразно начинать при притянтом якоре. При этом сначала рассчитывается короткозамкнутый виток. Расчет короткозамкнутого витка позволяет проверить выполнение отсутствия вибрации якоря в притянтом положении.

После этого рекомендуется провести расчет по условию превышения среднего значения электромагнитной силы над противодействующей при всех положениях якоря, и окончательно остановиться на большем сечении из двух найденных.

2. При притянтом якоре вибрация будет отсутствовать, если минимальная электромагнитная сила больше противодействующей.

Электромагнитная сила в Ш образных электромагнитах делится на три части: $F_{\text{эм}} = 0,5 \cdot k_3 F_{\text{пр}}$ для центрального зазора и $F_{\text{эм}} = 0,25 \cdot k_3 F_{\text{пр}}$ для крайних зазоров (поток, проходящий через центральный зазор делится на две части).

Минимальная электромагнитная сила при притянтом якоре для электромагнита с двумя короткозамкнутыми витками

$$F_{\text{эмпр}2} = 0,5 \cdot k_3 F_{\text{пр}} = 0,5 \cdot (1,2 - 1,5) F_{\Sigma}^K = 0,5 \cdot 1,3 \cdot 13,5 = 8,8 \text{ Н}.$$

Сечение полюсов с короткозамкнутыми витками из условия отсутствия вибрации якоря при притянтом положении определяется по формуле

$$S_{\text{тор}} = \frac{1,1 \cdot F_{\text{эмпр}2}}{10^4 \cdot B_{\text{мактор}}^2} = \frac{1,1 \cdot 8,8}{10^4 \cdot 1,1^2} = 0,0008 \text{ м}^2.$$

Максимальная индукция при притянтом якоре в соответствии с рекомендациями (раздел 3.4.9) $B_{\text{макс}} = 1,1 \text{ Т}$.

Сечение среднего стержня $S_{\text{торср}} = 0,0008 \text{ м}^2$.

3. Размер стороны квадратного полюса для среднего стержня Ш-образного электромагнита из условия превышения среднего значения электромагнитной силы над противодействующей при критических значениях силы и зазора можно определить по формуле (электромагнитная сила для среднего стержня в момент касания контактов $F_{\text{эм}}^{KK} = 0,5 \cdot k_3 \cdot F_{\text{пр}} = 0,5 \cdot (1,3 - 1,5) \cdot F_{\Sigma}^{KK} = 0,5 \cdot 1,3 \cdot 7,23 = 4,7 \text{ Н}$)

$$a = 1,38 \cdot 10^{-2} \sqrt[5]{F_{\text{эм}}^{KK}} = 1,38 \cdot 10^{-2} \sqrt[5]{4,7} = 0,019 \text{ м}.$$

Сечение среднего стержня $S_{\text{торср}} = a^2 = 0,019^2 = 0,00036 \text{ м}^2$.

В дальнейших расчетах используем большее значение площади сердечника $S_{\text{торср}} = 0,0008 \text{ м}^2$.

4. Размеры прямоугольного сердечника (по условиям размещения короткозамкнутого витка отношение сторон $b/a = 0,8 - 0,9$)

$$a = \sqrt{\frac{S_{\text{торср}}}{k_c (b/a)}} = \sqrt{\frac{0,0008}{0,9 \cdot 0,9}} = 0,031 \text{ м.}$$

$$b = a \cdot (b/a) = 0,031 \cdot 0,9 = 0,028 \text{ м.}$$

5. Полная МДС срабатывания при переменном токе

$$F = \frac{B_{\text{тор макс от}}}{\mu_0} (\delta_{\text{от}} + \sigma_p \cdot \delta_{\text{пр}}) = \frac{0,74}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} \cdot (2 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 1,3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}) = 6634,1 \text{ А,}$$

где $B_{\text{тор макс от}} = B_{\delta \text{ макс от}} / \sigma_{\text{вп}} = 0,8 / 1,08 = 0,74 \text{ Т}$ – значение индукции в торце сердечника при отпущенном якоре, коэффициент выпучивания $\sigma_{\text{вп}} = 1,08$ по рис. 24 при $a/\delta_{\text{н}} = 31/5,5 = 5,63$ и коэффициенте рассеяния $\sigma_p = 1,3$.

В формуле величина воздушного зазора умножена на два, так как Ш-образная электромагнитная система эквивалентна электромагнитной системе с двумя рабочими зазорами.

Сечение обмотки переменного тока

$$S_{\text{об}} = \frac{k_{\text{max}} F}{k_{\text{min}} k_l k_i j k_{\text{зоб}}} = \frac{1,05 \cdot 6634,1}{0,8 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 0,5} = 0,000725 \text{ м}^2.$$

Коэффициент $k_{\text{max}} = 1,05$, коэффициент $k_{\text{min}} = 0,8$, коэффициент перегрузки по току для длительного режима $k_l = 1$, коэффициент тока $k_i = F / F_{\text{прит.}} = 8$, плотность тока $j = 3 \text{ А/мм}^2$, коэффициент заполнения обмотки $k_{\text{зоб}} = 0,5$.

Для электромагнитов переменного тока отношение сторон обмотки выбирается $l_{\text{об}} / h_{\text{об}} = 3$, при этом

толщина обмотки

$$h_{\text{об}} = \sqrt{S_{\text{об}} / (l_{\text{об}} / h_{\text{об}})} = \sqrt{0,000725 / 3} = 0,0155 \text{ м,}$$

длина обмотки

$$l_{\text{об}} = S_{\text{об}} / h_{\text{об}} = 0,000725 / 0,0155 = 0,047 \text{ м.}$$

В заключение разрабатывается эскиз электромагнита [18, с. 284–291] и проводится поверочный расчет. При этом корректируются данные предварительного расчета.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Форма титульного листа курсового проекта

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Наименование института (факультета)
Наименование направления (специальности)
Наименование выпускающей кафедры (строчными буквами кроме первой прописной)

Тема работы (прописными буквами)
Курсовой проект

Обозначение (при наличии)

Студент, группа	_____	И.О. Фамилия
	(подпись)	
Руководитель (должность, ученая степень, звание) (дата)	_____	И.О.Фамилия
	(подпись)	

Образец задания
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Энергетический институт
Кафедра «Электромеханические комплексы и материалы»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ЭКМ

_____ А.Г. Гарганеев

«_____» _____ 20__ г.

Задание

Студенту группы _____

1. **Тема проекта** Магнитный пускатель для пуска асинхронного двигателя

2. **Срок сдачи законченного проекта** _____

3. **Исходные данные к проекту**

Ном. мощность асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором $P_{2н} = 21$ кВт;
ном. напряжение $U = 220/380$ В; ном. частота $f = 50$ Гц; число фаз $m_f = 3$; число полюсов
 $2p = 2$; степень защиты IP 44; режим работы – длительный.

Категория применения пускателя – АСЗ.

4. **Содержание пояснительной записки:**

Титульный лист.

Задание на проектирование.

Содержание.

Введение.

Выбор прототипа.

Расчет токоведущего контура.

Расчет системы дугогашения.

Расчет механической характеристики.

Расчет электромагнитного привода.

Заключение.

Перечень использованных источников.

Приложения.

Спецификация к сборочному чертежу магнитного пускателя.

5. **Перечень графического материала:**

Сборочный чертеж магнитного контактора.

6. **Перечень обязательного графического материала в пояснительной записке:**

Эскизы токоведущего контура, дугогасительной системы, электромагнитного привода, механическая и тяговые характеристики

7. **Дата выдачи задания** _____

Руководитель проекта _____ (подпись)

Фамилия, Имя, Отчество

Задание к выполнению принял _____ (подпись студента)

Фамилия, Имя, Отчество

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Таблица П.1

Характеристики режимов, соответствующих разным категориям применения контакторов

Категория применения	Основное применение	Режим нормальных коммутаций						Режим редких коммутаций					
		Включение			Отключение			Включение			Отключение		
		Коммутируемый ток в отношении к номинальному	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи или постоянная времени, мс	Коммутируемый ток в отношении к номинальному рабочему току	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи или постоянная времени, мс	Коммутируемый ток в отношении к номинальному рабочему току	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи или постоянная времени, мс	Коммутируемый ток в отношении к номинальному рабочему току	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи или постоянная времени, мс
<i>Переменный ток</i>													
АС1	Электropечи, сопротивления. Активная или слабоиндуктивная нагрузка	1	1	0,95	1	1	0,95	-	-	-	-	-	-
АС2	Пуск электродвигателей с фазным ротором, торможение противотоком	2,5	1	0,65	2,5	1	0,65	4	1,1	0,65	4	1,1	0,65
АС3	Пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Отключение вращающихся электродвигателей	6	1	0,35	1	0,17	0,35	10	1,1	0,35	8	1,1	0,35
АС4	Пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Отключение неподвижных или медленно вращающихся электродвигателей. Реверсирование электродвигателей	6	1	0,35	6	1	0,35	10	1,1	0,35	8	1,1	0,35

Категория применения	Основное применение	Режим нормальных коммутаций						Режим редких коммутаций					
		Включение			Отключение			Включение			Отключение		
		Коммутируемый ток в отношении к номинальному	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи или постоянная времени, мс	Коммутируемый ток в отношении к номинальному рабочему току	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи или постоянная времени, мс	Коммутируемый ток в отношении к номинальному рабочему току	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи или постоянная времени, мс	Коммутируемый ток в отношении к номинальному рабочему току	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи или постоянная времени, мс
<i>Постоянный ток</i>													
DC1	Электродвигатели, сопротивления. Неиндуктивная или слабо индуктивная нагрузка	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
DC2	Пуск электродвигателей, отключение вращающихся электродвигателей	2,5	1	10	2	0,3	10	10	1,1	10	10	1,1	10
DC3	Пуск электродвигателей, отключение неподвижных или медленно вращающихся электродвигателей	2,5	1	10	2,5	1	10	10	1,1	10	10	1,1	10

Примечания: 1. Режимы, характеризующие применение контакторов для коммутации конденсаторов и ламп с вольфрамовой нитью не нормируются.

2. Переменный ток выражен действующим значением симметричной составляющей.

3. Допуск на коэффициент мощности $\pm 0,05$; допуск на постоянную времени $\pm 15\%$.

Таблица П.2

Технические характеристики контакторов

Тип	Номинальные		Обмотка		Собственное время, с		Износостойкость		Допустимая частота срабатываний, 1/ч	Назначение
	Напряжение, В	Ток, А	Напряжение, В	Мощность, Вт	Включение	Отключение	механическая	комму- тационная		
<i>Контакторы постоянного тока</i>										
КП1	220	20, 40, 75	110	20	0,1	0,04	–	–	1200	Для схем автоматического управления электродвигателями приводов общепромышленных установок
КП2			220							
КП7	660	2500	110, 220	180	0,2–0,3	0,1	–	–	240	
КП207	600	2500	110, 220	180	0,25	0,07	–	–	240	Для управления силовыми цепями генераторов и электродвигателей с токами до 2500 А.
КПВ600	220–600 В	160, 250, 630	110, 220	30-70	0,2	0,25	10 ⁷	–	300–1200	Для тяжелых режимов работы
КМВ621	220	50	48–220	220	–	0,05	–	–	–	Для управления электромагнитными приводами высоковольтных выключателей
КПД100	220	25–250	110–440	35	–	–	10 ⁷	10 ⁶	1200	Для крановых установок и электротранспорта

Окончание табл. № П.2

Тип	Номинальные		Обмотка		Собственное время, с		Износостойкость		Допустимая частота срабатываний, 1/ч	Назначение
	Напряжение, В	Ток, А	Напряжение, В	Мощность, Вт	Включение	Отключение	механическая	коммутационная		
<i>Контакты постоянного тока</i>										
КН100-500, КНУ	до 320	25, 63, 100, 200, 400	24–320	10-50	0,15	0,03	–	150000	1200, 600	Вибро– и ударостойкие, для коммутации цепей постоянного тока в системах автоматического управления электроприводами, включая корабельные
МК	440, 660	40, 63, 100, 160	24–220	38	0,06	0,04	10 ⁷	–	1200	Общего назначения, экспортное и тропическое исполнения
<i>Контакты постоянного и переменного тока</i>										
МК5, МК6		250–400								
КМ2000	220, 380	до 600	до 380	50	–	–	–	–	600	
КМ3-0	220, 380	40	127, 220	–	–	–	10 ⁶	–	–	С магнитным залипанием
РПК1	440, 500	10	до 500	–	–	–	10 ⁷	–	–	С пневматической приставкой выдержки времени до 60 с

Таблица П.3

Технические характеристики контакторов переменного тока

Тип	Наименование		Число полюсов	Допустимая частота включений, 1/ч	Назначение
	Напряжение, В	Ток, А			
КТ6000	380 и 660	100, 160, 250, 400, 630, 1000	2, 3, 4 и 5	1200	Для тяжелых режимов работы $N_M=10^7$, $I_K=10$ кА, $I_{T,C}=7-7$ кА при $t=0,2$ с, $U_{BT}=127-380$ В
КТ700	380 и 660	100, 160	2, 3, 4 и 5	600	$N_M=10^7$, $U_{BT}=127, 220$ и 380 В
КВДК630	660	630	3	3800	Вакуумный контактор, $N_M=2 \cdot 10^6$
КТД121	≤ 500	40	3	1200	-
КТПВ600	≤ 380	63, 100, 160 и 250	2	1200	Для управления асинхронными в тяжелых условиях металлургических приводов, где требуются повышенные N_M и N_K ; $U_{BT} = 110$ и 220 В (пост. ток)
КТП6000	380 и 660	100, 160, 250, 400 и 630	2, 3 и 4	1200	$N_M=15 \cdot 10^6$, $U_{BT} = 24, 48, 110$ и 220 В (пост. ток)
К1000	≤ 1600	400 (без охлаждения водой); 800 (при охлаждении водой и частоте 800 Гц)			Контакторы на повышенную частоту тока от 500 до 8000 Гц, $U_{BT} = 127, 220$ и 380 В
КТИ	≤ 660	115–630			Для пуска и остановки асинхронных двигателей, включения и отключения других электроустановок
КМИп	≤ 660	9–32			Общепромышленного применения
КМ, КМИ	≤ 660	9–95			Общепромышленного применения
КНТ		10, 25, 60, 100, 200			

Обозначения: U_{BT} – напряжение втягивающей обмотки, N_M и N_K – механическая и коммутационная износостойкости; $I_{T,C}$ – ток термической стойкости.

Таблица П.4

Технические характеристики магнитных пускателей

Тип	Напряжение, В	Ток, А	Коммутационная износостойкость, млн. циклов	Механическая износостойкость, млн. циклов	Производитель
ПМ12	до 660 В	10, 25, 40, 63	0,3–2	5–16	ООО «Промаппарат»
ПМ12	до 380	100–800	0,2–2	0,8–1,2	ООО «Урал-ЭлектроКонтактор».
ПМ12П, ПМ12Т	до 660 В	63, 80, 95			ОАО «ЧЭАЗ»
ПМ12П, ПМ12Т		10–95			ООО «Промаппарат»
ПМЛ	до 660 В	10, 25, 40, 63 9–95	0,3–3	3–20	Компания «Этал» (Украина), КЭАЗ
ПМА	до 660 В	40, 63, 100, 160			
ПМЕ	до 660 В	10, 25	0,04–3	5–16	
Tesys D, F, K, E, F		6–500			Schneider Electric (Франция)
DILM		7–1000			Eaton/Moeller
LCE	до 690 В	6–320	0,8–1,4	3–10	Schneider Electric
AF A		6–38 50–300			ABB (Швеция)

Таблица П.5

Технические характеристики магнитных пускателей разных производителей

Номенклатура пускателей	ПМ12-025	ПМЛ-2000А	ПМУ25	NC1-25	DILOAM	CLO3A	КЗ-24А00
Производитель	Кашинский з-д, Ново- сибирский з-д	Этал	Урал- электро- контактор- Teleme- canique	Chint Group Co	Moeller	General Electric	ЧЭАЗ- Benedikt
Ток, А	25	25	25	25	22,5	25	24
Мощность двигателя, кВт	–	11	11	11	11	11	11
Мощность, потребляемая катушками при включении, ВА	74–100	74–100	90	110	100	88	90–115
при удержании, ВА	6,1–8,9	6,2-9	7,5	11	10	9	9–13
Масса, кг	0,49	0,533	0,53	–	0,42	0,49	0,48
Габариты, ВхШхL, мм	76x53x92	77x66x89	84x56x93	86x57x95	91x45x79	87x55x98	74x45x87,5
Механическая износостойкость, час- тота включений в час	3600	3600	3600	3600	9000	9000	7000
Общий ресурс, млн. циклов	20	16	16	10	10	15	10
Коммутационная износостойкость, частота включений в час	1200	1200	–	1200	1000	1200	600
Время срабатывания: замыкание / размыкание, мс	17–27 / –	17–27 / –	15–24 / 5–19	–	9–19 / 5–13	10–19 / 5–25	10–25 / 8– 15
Мин. вкл.способность: напряжение В	24	–	17	–	–	17	–
ток, А	10	–	5	–	–	5	–
Ориентировочная стоимость, руб.	200	200	340	300	1300	980	850

Таблица П.6

Технические параметры пускателей серии ПМЕ и ПАЕ

Параметры	ПМЕ-000	ПМЕ-100	ПМЕ-200	ПАБ-300	ПАЕ-400	ПАЕ-500	ПАЕ-600
Номинальный ток при напряжении 380/500 В	3/1,5	10/6	25/14	40/21	63/35	110/61	146/80
Предельный включаемый и отключаемый ток, А, при напряжении 380 В и $\cos\varphi=0,4$	30	100	280	400	630	100	1500
Провал главных контактов, мм	2,4±0,4	2,5±0,5	3±0,5	2,2±0,5	3,5±0,5	4±0,5	4±0,5
Начальное нажатие на контактный мостик, Н	1,1	2,0	4,6	13	18	33	50
Раствор главных контактов, мм	2,8	2,5	3	3	3,5	3,5	4
Материал контактной накладки	Серебро	КМК-А30	КМК-А30	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А10
Пусковая мощность, потребляемая обмоткой, В·А	65	130	160	260	465	800	3400
Номинальная мощность, В·А	3,6	6	8	17	20	26	38
Масса, кг	0,33	0,64	1,65	2,66	4,3	7,6	10,3

ПРИЛОЖЕНИЕ III

Таблица П.7

*Длительно допустимые температуры
для изоляционных материалов различных классов*

Класс	Материал	Допустимая температура, °С
Y	Непропитанные и непогружённые в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, щёлка и др.	90
A	То же, но погруженные в жидкий электроизоляционный состав	105
E	Некоторые синтетические и органические плёнки и др.	120
B	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами	130
F	То же, но применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами	155
H	То же, но применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, а также кремнийорганические эластомеры	180
C	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими или кремнийорганическими связующими составами	180

Таблица П.8

*Допустимые превышения температуры для многослойных катушек
(температура окружающего воздуха 40°С)*

Класс нагрево- стойкости	Аппараты распределения энергии. Продолжительный режим работы		Аппараты управления приёмниками энергии. Прерывисто-продолжительный, повторно-кратковременный и кратковременный режимы работы	
	в воздухе	в трансформаторном масле	в воздухе	в трансформаторном масле
А	65	60	80	60
Е	80	60	90	60
В	90	60	100	60
F	110	---	120	---
Н	130	---	140	---

Примечания: 1. Измерение температуры катушек производится по изменению их сопротивления.

2. В случае применения в аппаратах трансформаторного масла превышение температуры масла в верхнем слое допускается: в аппаратах распределения энергии до 40°С, в аппаратах управления приёмниками энергии до 60°С.

Таблица П.9

*Допустимые превышения температуры, °С,
для электрических контактов в аппаратах низкого напряжения
(температура окружающего воздуха 40 °С)*

Наименование	Аппараты распределения энергии. Продолжительный режим работы		Аппараты управления приемниками энергии. Продолжительный, прерывисто-продолжительный и кратковременный режимы работы	
	в воздухе	в трансформаторном масле	в воздухе	в трансформаторном масле
Контакты, коммутирующие цепи				
а) из меди	55	40	65 (примечания 1, 2)	65 (примечание 1)
б) гальванически покрытые серебром	примечание 3	50	примечание 3	65
в) с накладками из серебра и металлокерамических композиций на базе серебра с окисью кадмия или меди по ГОСТ 388-67	примечание 4	50	примечание 4	65
г) с накладками из других материалов	примечание 5	50	примечание 5	65
д) массивные скользящие с накладками из серебра	80	50	80	65
Блок-контакты с накладками из серебра	80	50	80 (примечание 2)	65

Наименование	Аппараты распределения энергии. Продолжительный режим работы		Аппараты управления приемниками энергии. Продолжительный, прерывисто-продолжительный и кратковременный режимы работы	
	в воздухе	в трансформаторном масле	в воздухе	в трансформаторном масле
Контактные соединения внутри аппаратов и неразмыкаемые винтовые, болтовые, заклёпочные и другие жесткие (кроме паяных и сварных): а) из меди и её сплавов, из алюминия и его сплавов, без защитных покрытий контактных поверхностей	55	50	55	55
	65	50	65	65
б) из меди и её сплавов, из алюминия и его сплавов и из низкоуглеродистой стали, защищённые от коррозии покрытием контактных поверхностей соответствующим металлом, обеспечивающим стабильность переходного сопротивления лучше меди				

Примечания: 1. При продолжительном режиме превышение температуры должно быть не более 55°C.

2. Указанное превышение температуры при повторно-кратковременных режимах работы не должно быть больше, чем при испытаниях в условиях, когда на контактах возникает электрическая дуга.

3. Температура ограничивается теплостойкостью соседних частей, если слой серебра не повреждается электрической дугой и не стирается при испытаниях на механическую износоустойчивость при нагретых контактах.

4. Температура ограничивается теплостойкостью соседних частей, но не должна превышать 200°C.

5. Температура устанавливается в соответствии со свойствами материала.

ПРИЛОЖЕНИЕ IV

Таблица П.10

Коэффициенты теплоотдачи при естественном свободном движении воздуха

Наименование нагретых деталей и узлов. Характеристики их поверхности и условия охлаждения	$k_{то},$ Вт/(м²С)
Стержни круглые медные горизонтальные, диаметр 10-60 мм	13–9
Шины плоские медные: горизонтальные, поставленные на ребро горизонтальные, расположенные плашмя вертикальные	6–9 5–8 4–7
Шины коробчатые, расположенные горизонтально: медные (наружная поверхность охлаждения) медные (полная поверхность охлаждения) алюминиевые (полная поверхность охлаждения) алюминиевые (наружная поверхность охлаждения)	10–12,5 6–8 5,6–8 9–12
Изоляторы фарфоровые горизонтальные	18
Пакеты штампованных пластин – магнитопроводы	10–12,5
Катушки многовитковые: слаботочных реле ,диаметр 3–14 мм аппаратов управления и распределения энергии	60–8 9–14
Катушки шинные дугогасительные в камерах	12–20
Элементы резисторов (сопротивлений): трубчатые эмалированные трубчатые проволочные, без покрытия плоские на каркасе, проволочные, ленточные ($k_{от}$ отнесен к поверхности проволоки, ленты) цилиндрические фехралевые, намотанные на ребро, горизонтальные ($k_{от}$ отнесен к поверхности элемента) чугунные, вертикальные ($k_{от}$ отнесен к поверхности элемента)	20–25 23 10–20 42–43 10–15
Оболочки и детали с гладкой поверхностью, покрытой лаком или краской	10–14

Таблица П.11

Физические постоянные проводниковых материалов, применяемых в электрических аппаратах

Материал	Плотность, кг/м ³	Удельное сопротивление при 0°С, 10 ⁻⁸ Ом·м	Температурный коэффициент сопротивления, 10 ⁻³ К ⁻¹	Теплопроводность при 0°С, Вт/(м·К)	Температурный коэффициент теплопроводности, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Теплоемкость, (Дж/кг×К)	Температурный коэффициент теплоемкости, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Температура плавления, °С	Температура испарения, °С	Модуль упругости, 10 ¹⁰ Н/м ²
Алюминий твердотянутый	2700	2,62	4,2	210	4,5	950	4,7	660	1800	7,06
Бронза оловянистая твердотянутая	8700	14...16	0,6...0,7	64	17...20	360	-	900...950	-	10,8...11,8
Бронза бериллиевая литая	8220	7,2...9	-	84,0	-	140	-	-	-	-
Бронза бериллиевая твердотянутая	-	5,3	-	170	-	-	-	-	-	10,3
Вольфрам	19300	5,1	4,2	170	3	140	0,3	3410	5900	34,3
Гранит	1700...1800	700...1400	-1,3	160	-5...-10	650...850	35	-	3650	0,3...0,9
Дюралюмин	2750	3,3	2,2	160	-	930	-	650	-	7,0
Железо	7900	9...10	6,5	79,5	-3,9	640	0,5	1530	2450	19,6...21,6
Кадмий	8640	7,0	4,3	92	-1,2	230	-	321	770	4,9...6,7

Продолжение табл. № П.11

Материал	Плотность, кг/м ³	Удельное сопротивление при 0 ⁰ С, 10 ⁻⁸ Ом·м	Температурный коэффициент сопротивления, 10 ⁻³ К ⁻¹	Теплопроводность при 0 ⁰ С, Вт/(м·К)	Температурный коэффициент теплопроводности, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Теплоемкость, (Дж/кг×К)	Температурный коэффициент теплоемкости, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Температура плавления, ⁰ С	Температура испарения, ⁰ С	Модуль упругости, 10 ¹⁰ Н/м ²
Константан (400...700)	8700...8900	45...52	0,003...0,005	-	-	-	-	1270	-	-
Латунь Л68 твердотянутая	8500	7,0	1,5	100	-	380	1,1	900	-	10,8
Латунь Л62 твердотянутая	-	7,2	-	-	-	-	-	900	-	9,8
Латунь Л59 отожженная	8900	7,2	-	-	-	-	-	900	-	19,9...9,8
Манганин (250...300)	8100...8400	42...50	0,03...0,06	-	-	-	-	960	-	-
Медь твердотянутая	8700...8900	1,62	4,3	390	-	390	1,0	1083	2600	10,8...8,12
Молибден	10200	4,5...5,0	4,3	146	-3,0	272	-	2620	3560	34,3
Никель	8800	7,2	6,1	70	-0,5	460	4,3	1455	2730	20,6

Окончание табл. № П.11

Материал	Плотность, кг/м ³	Удельное сопротивление при 0°С, 10 ⁻⁸ Ом·м	Температурный коэффициент сопротивления, 10 ⁻³ К ⁻¹	Теплопроводность при 0°С, Вт/(м·К)	Температурный коэффициент теплопроводности, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Теплоемкость, (Дж/кг×К)	Температурный коэффициент теплоемкости, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Температура плавления, °С	Температура испарения, °С	Модуль упругости, 10 ¹⁰ Н/м ²
Нихром (Х20Н80) (1000...1100)	8200	10...112	0,14	-	-	-	-	1390	-	-
Олово	7300	11,0	4,5	64	-4,7	230	1,3	232	2270	3,9...5,9
Свинец	11300	19,5	4,1	35	-5	130	0,9	327,4	1540	1,57
Серебро твердотянутое	10500	1,5	4,0	420	-0,5	234	0,77	960	1955	7,4
Сталь	7800	10...13	9,0	40	-4	470	7,3	1300...1400	-	20,6...21,6
Кадмий	8640	7,0	4,3	92	-1,2	230	-	321	770	4,9...6,7

Таблица П.12

Свойства контактных материалов (металлы)

Материал	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Температура, °С			Напряжения, В				Теплота кДж/кг	
		размягчения	плавления	кипения	размягчения	плавления	кипения	сваривания (в воздухе)	плавления	испарения
Платина	$10,5 \cdot 10^{-8}$	540	1773	4400	0,25	0,65	1,5	0,4	114	2400
Золото	$2,2 \cdot 10^{-8}$	100	1063	2973	0,08	0,43	0,9	0,43	626	1870
Иридий	$5,5 \cdot 10^{-8}$	–	2450	5300	–	–	–	–	109	–
Палладий	$10,8 \cdot 10^{-8}$	–	1554	4000	–	0,57	1,3	-	151	-
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$	180	960	2000	0,09	0,37	0,68	0,24	104	2320
Вольфрам	$5,5 \cdot 10^{-8}$	1000	3390	5930	0,4	1,1	2,1	1,1	192	5000
Медь	$1,75 \cdot 10^{-8}$	190	1083	2600	0,12	0,43	0,79	0,43	205	4780
Графит	$700 \cdot 10^{-8}$	–	3650	4830	2	5	-	-	-	14 000
Алюминий	$2,910 \cdot 10^{-8}$	150	658	2300	0,1	0,3	-	0,3	406	9360
Галлий	$53,4 \cdot 10^{-8}$	–	30	2227	–	-	-	-	80	4250
Кадмий	$7,5 \cdot 10^{-8}$	–	321	765	–	0,15	-	0,15	55	910
Молибден	$5,2 \cdot 10^{-8}$	900	2620	4800	0,25	0,75	1,1	-	210	6600
Никель	$8 \cdot 10^{-8}$	520	1452	2730	0,22	0,65	-	0,65	305	5830
Олово	$12 \cdot 10^{-8}$	100	232	2270	–	-	-	0,63	59	1140
Цинк	$6,1 \cdot 10^{-8}$	170	419	906	0,1	0,17	-	0,17	100	1800
Железо	$10 \cdot 10^{-8}$	500	1540	2740	0,21	0,6	-	0,35	267	6680
Хром	$20 \cdot 10^{-8}$	–	1615	2200	–	-	-	-	134	-
Ртуть	$94 \cdot 10^{-8}$	–	38,7	357	–	-	-	-	86	2350
Тантал	$14 \cdot 10^{-8}$	800	2996	4100	0,3	1,0	-	-	17,4	4180
Рутений	$7,16 \cdot 10^{-8}$	–	2500	4900	–	-	-	-	96	-
Индий	$8 \cdot 10^{-8}$	–	156	2097	–	-	-	-	28,4	2020
Оксид кадмия	$600 \cdot 10^{-8}$	–	–	900	–	-	-	-	-	-

Таблица П.13

Свойства металлокерамических материалов

Состав материала	Содержание компонентов, %	Плотность, кг/м ³	Электрическое сопротивление, Ом	Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)	Пределы дугообразования		Температура, °С	
					U, В	I, А	плавления	кипения
Медь-графит	95/5	6500	$4,3 \cdot 10^{-8}$	-	-	-	-	-
Медь-вольфрам	80/20	9860	$2,4 \cdot 10^{-8}$	310	-	-	-	-
То же	40/60	13 500	$4,3 \cdot 10^{-8}$	168	-	-	-	-
Серебро-графит	99/1	10 000	$2 \cdot 10^{-8}$	360	-	-	-	-
То же	97/3	9300	$2,6 \cdot 10^{-8}$	-	-	-	-	-
Серебро- молибден	90/10	10 400	$2 \cdot 10^{-8}$	240	-	-	-	-
То же	30/70	10 280	$3,6 \cdot 10^{-8}$	228	-	-	960	2200
Серебро-вольфрам	80/20	11 500	$1,8 \cdot 10^{-8}$	320	16	0,17	961	2200
То же	50/50	13 600	$2,8 \cdot 10^{-8}$	280	-	-	-	-
Серебро-никель	90/10	10 100	$1,8 \cdot 10^{-8}$	-	-	-	-	-
То же	60/40	9500	$3,5 \cdot 10^{-8}$	310	11	0,15	-	-
Серебро-карбид вольфрама	70/30	12 500	$3 \cdot 10^{-8}$	-	18	0,21	960	2200
Серебро-окись меди	90/10	9500	$2,5 \cdot 10^{-8}$	350	-	-	-	-
Серебро-окись кадмия	95/5	10 250	$1,9 \cdot 10^{-8}$	380	-	-	961	1390
То же	85/15	9700	$3,0 \cdot 10^{-8}$	325	12	0,18	962	1390
Серебро- окись хрома	98/2	9900	$2,8 \cdot 10^{-8}$	-	-	-	980	2200
Серебро-кремний	98,5/1,5	10 400	$2,1 \cdot 10^{-8}$	-	-	-	-	-

Таблица П.14

Свойства сплавов, применяемых в контактах

Состав сплава	Содержание компонентов, %	Плотность, кг/м ³	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Удельная теплопроводность, Вт/(м·С)	Число Бринелля	Пределы дугообразования		Коэффициент эрозии 10 ⁻³ мм ³ /Кл	Температура, °С	
						U, В	I, А		плавления	кипения
Серебро-медь	97/3	10 500	1,8·10 ⁻⁸	390	40	-	-	-	900	2200
То же	50/50	9700	2,1·10 ⁻⁸	340	70	-	-	-	730	2200
Серебро-золото	90/10	11 400	3,6·10 ⁻⁸	196	23	11	0,25	1,1/15	-	-
То же	20/80	16 500	9,4·10 ⁻⁸	-	25	14	0,4	-	1035	2200
Серебро-золото-палладий	40/30/30	12 900	22·10 ⁻⁸	34	65	-	-	-	-	-
Серебро-кадмий	95/25	10 450	2,95·10 ⁻⁸	-	35	-	-	-	940	950
То же	80/20	10 100	5,7·10 ⁻⁸	-	60	10	0,3	-	875	906
Серебро-палладий	95/5	10 500	3,8·10 ⁻⁸	-	26	-	-	0,15/15	-	-
То же	40/60	11 400	42·10 ⁻⁸	220	-	-	0,5	-	1330	2200
Серебро-платина	95/5	10 880	4,65·10 ⁻⁸	30	99	-	-	-	-	-
То же	70/30	12 540	20·10 ⁻⁸	-	170	-	-	-	-	-
Золото-никель	95/5	18 240	12,3·10 ⁻⁸	-	100	15	0,38	-	990	-
Золото-палладий	99/1	19 300	3,0·10 ⁻⁸	-	20	-	-	-	-	-
То же	70/30	19 900	34·10 ⁻⁸	-	135	-	-	-	-	-
Золото-серебро-медь	70/20/10	14 300	13,2·10 ⁻⁸	-	114	-	-	-	-	-
Золото-платина	93/7	19 440	10,2·10 ⁻⁸	70	40	-	-	-	1060	-
Золото-серебро-никель	70/25/5	15 400	11,8·10 ⁻⁸	-	80	-	-	-	1050	2200

Окончание табл. № П.14

Состав сплава	Содержание компонентов, %	Плотность, кг/м ³	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)	Число Бринелля	Пределы дугообразования		Коэффициент эрозии 10 ⁻³ мм ³ /Кл	Температура, °С	
						U, В	I, А		плавления	кипения
Золото-серебро-платина	69/25/6	16100	14,9·10 ⁻⁸	55	112	-	-	-	1030	-
Палладий-медь	95/5	11400	21,6·10 ⁻⁸	-	60	-	-	-	-	-
То же	60/40	10600	35·10 ⁻⁸	38	80	-	0,6	-	-	-
Палладий-серебро-кобальт	60/35/5	11100	40,8·10 ⁻⁸	-	192	-	-	-	-	-
Платина-молибден	90/10	20500	58,5·10 ⁻⁸	-	195	-	-	-	1800	-
Платина-вольфрам	95/5	21280	42·10 ⁻⁸	-	103	-	-	-	1850	-
Платина-никель	95/5	23000	20·10 ⁻⁸	-	135	-	-	0,9	1700	-
Платина-родий	95/10	20000	19,2·10 ⁻⁸	-	90	-	-	-	1840	-
Платина-иридий	95/10	21500	10,0·10 ⁻⁸	42	130	20	1,1	1	1800	-
Вольфрам-молибден	95/5	-	6,5·10 ⁻⁸	-	280	-	-	-	3180	-
Вольфрам-родий	80/20	-	24·10 ⁻⁸	-	300	-	-	-	-	-
Медь-кадмий	99/1	8900	2,6·10 ⁻⁸	-	345	-	-	-	-	-
Латунь		8500	7·10 ⁻⁸	38	90	-	-	-	-	-
Серебро-латунь	90/10	10 100	1,8·10 ⁻⁸	-	90	-	-	-	961	2200
То же	60/40	9500	2,7·10 ⁻⁸	310	115	-	-	-	961	2200

ПРИЛОЖЕНИЕ V

Таблица П.15

Номинальные размеры и расчетные сечения медных лент

Номинальный размер по большей стороне <i>b</i> , мм	Расчетные сечения лент (мм ²) при следующих номинальных размерах лент по меньшей стороне <i>a</i> , мм																	
	1,25	1,35	1,45	1,50	1,56	1,68	1,81	1,95	2,00	2,10	2,26	2,44	2,50	2,63	2,83	3,00	3,28	3,53
11,6	14,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12,5	15,3	16,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13,5	16,5	17,8	19,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14,5	17,9	19,2	20,6	-	22,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15,6	19,2	20,7	22,2	-	23,8	25,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16,0	-	-	-	23,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16,8	20,7	22,3	23,9	-	25,7	27,6	29,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18,0	22,2	23,9	25,7	-	27,6	29,6	31,9	34,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19,5	24,0	25,9	27,9	-	29,9	32,2	34,6	37,2	-	40,6	-	-	-	-	-	-	-	-
20,0	-	-	-	29,5	-	-	-	-	39,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22,0	27,2	29,3	31,5	-	33,8	36,4	39,1	42,1	-	45,3	48,6	52,4	-	-	-	-	-	-
25,0	30,9	3,4	35,8	37,0	38,5	41,4	44,6	47,9	49,1	51,6	55,4	59,7	61,2	64,3	-	-	-	-
26,3	32,5	35,1	37,7	-	40,5	43,6	46,9	50,5	-	54,3	58,3	62,8	-	67,7	72,7	-	-	-
28,0	34,7	37,4	40,2	-	43,2	46,4	50,0	53,8	-	57,9	62,2	67,0	-	72,2	77,5	82,1	-	-
30,0	37,2	40,1	43,1	44,5	46,3	49,8	53,6	57,7	59,1	62,1	66,7	71,9	73,7	77,4	83,2	88,1	96,1	-
32,0	39,7	42,8	46,0	-	49,4	53,2	57,2	61,6	-	66,3	71,3	76,8	-	82,7	88,9	94,1	102,7	110,3
35,0	43,4	46,9	50,3	-	54,1	58,2	62,7	67,4	-	72,6	78,0	84,1	-	90,6	97,4	103,1	112,5	120,9
40,0	49,7	53,6	57,6	59,5	61,9	66,6	71,7	77,2	79,1	83,1	89,3	96,3	98,7	103,7	111,5	118,1	128,9	138,5
45,0	55,9	60,4	64,8	-	69,7	75,0	80,8	86,9	-	93,6	100,6	108,5	-	116,9	125,7	133,1	145,3	156,2
47,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	114,4	-	122,1	-	-	-	-
50,0	62,2	67,1	72,1	74,5	77,5	83,4	89,8	96,7	99,1	104,1	111,9	120,7	123,7	130,0	139,8	148,1	161,7	173,8

Окончание табл. № П.15

55,0	-	-	-	-	85,3	91,8	98,9	106,4	-	114,6	123,2	132,9	-	143,2	154,0	163,1	178,1	191,5
60,0	74,7	80,6	86,6	-	93,1	100,2	107,9	116,2	-	125,1	134,5	145,1	-	156,3	168,1	178,1	194,5	209,1
65,0	-	-	-	-	100,9	-	-	125,9	-	-	-	157,3	-	169,5	182,3	193,1	210,8	226,8
70,0	-	-	-	-	108,7	-	-	135,7	-	-	-	169,5	-	-	-	208,1	227,3	244,4
80,0	-	-	-	-	124,3	-	-	155,2	-	-	-	193,9	-	-	-	238,1	-	-
90,0	-	-	-	-	139,9	-	-	174,7	-	-	-	218,3	-	-	-	168,1	-	-
100,0	-	-	-	-	155,5	-	-	194,2	-	-	-	242,7	-	-	-	298,1	-	-

Таблица П.16

Номинальные размеры и расчетные сечения неизолированных медных шин

Номинальный размер по большей стороне <i>b</i> , мм	Расчетный сечения шин (мм ²) при следующих номинальных размерах шин по меньшей стороне <i>a</i> , мм									
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	9,0	10,0
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	198,1
25	-	-	-	-	-	-	-	198,1	223,1	248,1
30	-	-	-	-	179,1	193,1	208,1	238,1	268,1	298,1
32	-	-	-	-	191,1	206,1	-	-	-	-
35	-	-	174,1	191,6	209,1	225,6	-	278,1	-	348,1
40	159,5	179,1	199,1	219,1	239,1	258,1	278,1	318,1	358,1	398,1
45	179,5	201,6	224,1	246,6	269,1	290,6	313,1	358,1	403,1	448,1
50	199,5	224,1	249,1	274,1	299,1	323,1	348,1	398,1	448,1	498,1
55	219,5	246,6	274,1	301,6	329,1	355,6	383,1	438,1	493,1	548,1
60	239,5	269,1	299,1	329,1	359,1	388,1	418,1	478,1	538,1	598,1
65	259,5	291,6	324,1	-	389,1	-	453,1	-	583,1	648,1
70	279,5	314,1	349,1	-	-	-	-	558,1	628,1	698,1
75	-	-	-	-	-	-	-	598,1	-	-
80	319,5	359,1	399,1	-	479,1	-	558,1	638,1	-	798,1
90	359,5	404,1	449,1	-	539,1	-	628,1	718,1	-	898,1
100	399,5	449,1	499,1	-	599,1	-	698,1	798,1	-	998,1
120	-	-	-	-	-	-	-	958,1	-	1198,1

Таблица П.17

Размеры круглых медных проводов с эмалевой изоляцией

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, кв. мм	Диаметр изолированного провода марки ПЭТВ, ПЭТ-155	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, кв. мм	Диаметр изолированного провода марки ПЭТВ, ПЭТ-155
0,06	0,00283	0,080	0,77	0,4660	0,835
0,07	0,00385	0,090	0,80	0,5030	0,865
0,08	0,00503	0,100	0,83	0,5410	0,895
0,09	0,00636	0,110	0,86	0,5810	0,925
0,1	0,00785	0,122	0,90	0,6360	0,965
0,11	0,00950	0,132	0,93	0,6790	0,995
0,12	0,01131	0,142	0,96	0,7240	1,025
0,13	0,01327	0,152	1,00	0,785	1,080
0,14	0,01539	0,162	1,04	0,846	1,120
0,15	0,01767	0,180	1,08	0,916	1,160
0,16	0,0201	0,190	1,12	0,985	1,200
0,17	0,0227	0,200	1,16	1,057	1,240
0,18	0,0255	0,210	1,20	1,131	1,280
0,19	0,0284	0,220	1,25	1,227	1,330
0,20	0,0314	0,230	1,30	1,327	1,385
0,21	0,0346	0,240	1,35	1,431	1,435
0,23	0,0415	0,265	1,40	1,539	1,485
0,25	0,0491	0,285	1,45	1,651	1,535
0,27	0,0573	0,305	1,50	1,767	1,585
0,29	0,0661	0,325	1,56	1,911	1,645
0,31	0,0755	0,345	1,62	2,060	1,705
0,33	0,0855	0,365	1,68	2,220	1,765
0,35	0,0962	0,390	1,74	2,380	1,825
0,38	0,1134	0,420	1,81	2,570	1,905
0,41	0,1320	0,450	1,88	2,780	1,975
0,44	0,1521	0,480	1,95	2,990	2,045
0,47	0,1735	0,510	2,02	3,200	2,115
0,49	0,1886	0,530	2,10	3,460	2,200
0,51	0,2040	0,565	2,26	4,010	2,360
0,53	0,2210	0,585	2,44	4,680	2,540
0,55	0,2380	0,605	2,63	5,430	-
0,57	0,2550	0,625	2,83	6,290	-
0,59	0,2730	0,645	3,05	7,310	-
0,62	0,3020	0,675	3,28	8,450	-
0,64	0,3220	0,700	3,53	9,790	-
0,67	0,3530	0,730	3,80	11,34	-
0,69	0,3740	0,750	4,10	13,20	-
0,72	0,4070	0,780	4,50	15,90	-
0,74	0,4300	0,805	4,80	18,10	-

ПРИЛОЖЕНИЕ VI

Контакторы серии КМИ (производитель – ИЕК)

Технические характеристики силовой цепи

Параметры	Типоисполнения КМИ-										
	10910, 10911	11210, 11211	11810, 11811	22510, 22511	23210, 23211	34012	35012	46512	48012	49512	
Номинальное рабочее напряжение переменного тока U_0 , В	230, 400, 660										
Номинальное напряжение изоляции U_i , В	660										
Номинальное импульсное напряжение U_{imp} , кВ	6										
Номинальный рабочий ток I_n , категория применения АС-3 ($U_0 \leq 400$ В), А	9	12	18	25	32	40	50	65	80	95	
Условный тепловой ток I_{th} ($t^\circ \leq 40^\circ$), категория применения АС-1, А	25	25	32	40	50	60	80	80	125	125	
Номинальная коммутируемая мощность по АС-3, кВт	230 В	2,2	3	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22	25
	400 В	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22	30	37	45
	660 В	5,5	7,5	10	15	18,5	30	33	37	45	45
Макс. кратковременная нагрузка ($t \leq 1$ с), А	162	216	324	450	576	720	900	1170	1440	1710	
Условный ток короткого замыкания I_{nc} , А	1000			3000				5000			
Защита от сверхтоков – предохранитель gG, А	10	20	25	40	50	50	63	80	100	100	
Мощность рассеяния при I_n , Вт	АС-3, АС-4	0,2	0,36	0,8	1,25	2	2,4	3,7	4,2	5,1	7,2
	АС-1	1,56	1,56	2,5	3,2	5	5,4	9,6	6,4	12,5	12,5

Технические характеристики цепи управления

Параметры	Типоисполнения КМИ-										
	10910, 10911	11210, 11211	11810, 11811	22510, 22511	23210, 23211	34012	35012	46512	48012	49512	
Номинальное напряжение катушки управления U_c , В	24, 36, 110, 230, 400										
Диапазоны напряжения управления	срабатывание	$(0,8 \div 1,1)U_c$									
	отпускание	$(0,3 + 0,6)U_c$									
Мощность потребления катушки при U_c , ВА	срабатывание $\cos \varphi = 0,75$	60	60	60	90	90	200	200	200	200	200
	удержание $\cos \varphi = 0,3$	7	7	7	7,5	7,5	20	20	20	20	20
Время срабатывания, мс	замыкание	12–22	12–22	12–22	15–24	15–24	20–26	20–26	20–26	20–35	20–35
	размыкание	4–19	4–19	4–19	5–19	5–19	8–12	8–12	8–12	6–20	6–20
Коммутационная износоустойчивость, млн циклов	АС-1	0,55	0,7	1,0	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	0,7	1,2
	АС-3	1,7	1,7	1,5	1,4	1,6	1,5	1,4	1,4	0,9	1,2
	АС-4	0,2	0,2	0,2	0,15	0,15	0,12	0,1	0,1	0,1	0,1
Механическая износоустойчивость, млн циклов	15	15	15	12	10	10	10	10	5	4	
Мощность рассеяния, Вт	3	3	3	3,5	3,5	10	10	10	10	10	

Контакторы серии КМИп (производитель – ИЭК)

Технические характеристики силовой цепи

Параметры	Типоисполнения					
	КМИп-10910	КМИп-11210	КМИп-11810	КМИп-22510	КМИп-23210	
Номинальное рабочее напряжение переменного тока U_c , В	230, 400, 660					
Номинальное напряжение изоляции U_i , В	660					
Номинальное импульсное напряжение $U_{имп}$, кВ	6					
Номинальный рабочий ток I_n , категория применения АС-3 ($U_c \leq 400$ В), А	9	12	18	25	32	
Условный тепловой ток I_{th} ($t^\circ \leq 40^\circ$), категория применения АС-1, А	20	20	32	40	50	
Номинальная коммутуруемая мощность по АС-3, кВт	230 В	2,2	3	4	5,5	7,5
	400 В	4	5,5	7,5	11	15
	660 В	5,5	7,5	10	15	18,5
Макс. кратковременная нагрузка ($t < 1$ с), А	162	216	324	450	576	
Условный ток короткого замыкания I_{nc} , А	1000		3000			
Защита от сверхтоков – предохранитель gG, А	10	20	25	40	50	
Электрическая износостойчивость, млн ком. циклов	АС-3	1,7	1,7	1,4	1,4	1,6
	АС-1	0,55	0,7	1,0	1,3	1,3
Механическая износостойчивость, млн ком. циклов	2		2			
Мощность рассеяния при I_n , Вт	АС-3, АС-4	0,2	0,36	0,8	1,25	2
	АС-1	1,56	1,56	2,5	3,2	5

Технические характеристики цепи управления

Типоисполнение	Номинальное напряжение катушки управления U_c , В=	Диапазоны напряжения управления		Мощность потребления катушки при U_c , Вт		Время срабатывания, мс	
		срабатывание	отпускание	срабатывание	удержание	срабатывание	размыкание
КМИп-10910 09 А 24 В	24	$(0,85 \div 1,1)U_c$	$(0,1 \div 1,75)U_c$	7	7	70 ÷ 80	15 ÷ 20
КМИп-10910 09 А 110 В	110						
КМИп-10910 09 А 220 В	220						
КМИп-11210 12 А 24 В	24						
КМИп-11210 12 А 110 В	110						
КМИп-11210 12 А 220 В	220						
КМИп-11810 18 А 24 В	110/24			7	7		
КМИп-11810 18 А 110 В	110						
КМИп-11810 18 А 220 В	220						
КМИп-12510 25 А 24 В	24			10	10	80 ÷ 95	
КМИп-12510 25 А 110 В	110						
КМИп-12510 25 А 220 В	220						
КМИп-13210 32 А 24 В	24	10	10				
КМИп-13210 32 А 110 В	110						
КМИп-13210 32 А 220 В	220						

Контакты серии КТИ (производитель – ИЭК)

Технические характеристики силовой цепи

Параметры	КТИ-5115	КТИ-5150	КТИ-5185	КТИ-5225	КТИ-5265	КТИ-5330	КТИ-6400	КТИ-6500	КТИ-7630	
Номинальное рабочее напряжение переменного тока U_n , В	230; 400; 660									
Номинальное напряжение изоляции U_i , В	1000									
Номинальное импульсное напряжение $U_{имп}$, кВ	8									
Номинальный рабочий ток I_n , категория применения АС-3 ($U_n \leq 400$ В), А	115	150	185	225	265	330	400	500	630	
Условный тепловой ток $I_{тп}$ ($t^\circ \leq 40^\circ$), категория применения АС-1, А	200	250	275	315	350	400	500	700	1000	
Номинальная нагрузка по АС-3, кВт	230 В	30	40	55	63	75	100	110	147	200
	400 В	55	75	90	110	132	160	200	250	335
	660 В	80	100	110	129	160	220	280	335	400
Макс. кратковременная нагрузка ($t \leq 1$ с), А	920	1200	1480	1800	2120	2640	3200	4000	5040	
Условный ток короткого замыкания $I_{кз}$, А	5000	10 000					18 000			
Защита от сверхтоков – предохранитель gG, А	200	250	315	315	400	500	500	800	1000	
Повторно-кратковременный режим, циклов оперирования в час	120									
Мощность рассеяния при номинальном токе, Вт/полюс	АС-3	5	8	12	16	21	31	42	45	48
	АС-1	15	22	25	32	37	44	65	88	120

Технические характеристики цепи управления

Параметры	КТИ-5115	КТИ-5150	КТИ-5185	КТИ-5225	КТИ-5265	КТИ-5330	КТИ-6400	КТИ-6500	КТИ-7630	
Номинальное напряжение катушки управления U_c , В	230, 400									
Диапазоны напряжения управления	срабатывание	$(0,8 + 1,1)U_c$								
	отпускание	$(0,35 \div 0,55)U_c$								
Мощность потребления катушки при U_c , ВА	срабатывание	550	550	805	805	1180	650	1075	1100	1650
	удержание	45	45	55	55	84	10	15	18	22
Время срабатывания, мс	закрывание	23–35	23–35	20–35	20–35	40–65	40–65	40–75	40–75	40–80
	размыкание	5–15	5–15	7–15	7–15	100–170	100–170	100–170	100–170	100–200
Электрическая износостойчивость, млн. ком. циклов	АС-3	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
	АС-1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,25	0,25	0,2	0,15
Механическая износостойчивость, млн. ком. циклов	1	1	1	1	1	1	0,8	0,8	0,8	
Мощность рассеяния, Вт	12–16	12–16	18–24	18–24	8	8	14	18	20	

Контакторы серии КТ6600И и КТП6600И (производитель – ИЕК)

Технические характеристики силовой цепи

Параметры		Типоисполнение контактора				
		КТ6610И, КТП6610И	КТ6620И, КТП6620И	КТ6630И, КТП6630И	КТ6640И, КТП6640И	КТ6650И
Номинальное рабочее напряжение частоты 50 Гц U_c , В		400				
Номинальный рабочий ток I_n , А	АС-3	100	150	250	400	500
	АС-4	35	52	85	140	170
Количество полюсов		2, 3, 4				
Условный ток короткого замыкания $I_{пз}$, кА		5	10			18
Защита от сверхтоков – предохранитель gG, А		125	200	400	500	630
Максимальная частота коммутаций, циклов/ч		600	600	600	300	300
Механическая износостойкость, млн циклов		3,0			1,0 (0,1 для 4-полюсных)	
Электрическая износостойкость, млн циклов		0,3			0,15 (0,05 для 4-полюсных)	

Технические характеристики цепи управления контакторов КТ

Параметры		Типоисполнение контактора									
		КТ6610И		КТ6620И		КТ6630И		КТ6640И		КТ6650И	
Количество полюсов		2, 3	4	2, 3	4	2, 3	4	2, 3	4	2, 3	4
Номинальное напряжение катушки управления U_c , В		36, 127, 220, 380									
Диапазоны напряжения управления	срабатывание	$(0,85 \div 1,1) U_c$									
	отпускание	$(0,2 + 0,75) U_c$									
Мощность потребления катушки, ВА	срабатывание	920	1200	1100	1450	2100	2400	4000	9000	5600	10 000
	удержание	75	125	85	100	105	175	150	230	200	330

Технические характеристики цепи управления контакторов КТП

Параметры		Типоисполнение контактора			
		КТП6610И	КТП6620И	КТП6630И	КТП6640И
Количество полюсов		2, 3	2, 3	2, 3	2, 3
Номинальное напряжение катушки управления U_c , В		24, 48, 110, 220			
Диапазоны напряжения управления	срабатывание	$(0,85 \div 1,1) U_c$			
	отпускание	$(0,1 + 0,75) U_c$			
Мощность потребления катушки, ВА	срабатывание	200	250	300	510
	удержание	20	45	50	55

Контакторы постоянного тока серии МК (производитель – ЧЭАЗ)



Контактор серии МК на токи до 160 А с 1 главным контактом.



Контактор серии МК на токи до 160 А с главными контактами: 1"з" и 1"р".



Контактор серии МК на токи до 160 А с 2 главными контактами.



Контактор серии МК с главными контактами: 2"з" и 2"р".

КОНТАКТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА СЕРИИ МК ТУ 16-644.010-85

Контакторы серии МК предназначены для работы в силовых электрических цепях и цепях управления постоянного тока при напряжении до 220 В постоянного тока (кроме контакторов МК1-20Д, МК3-20Д, МК1-30, МК2-30), до 1000 В постоянного тока (контакторы МК1-20М) и до 380 В переменного тока 50, 60 Гц (контакторы МК1-20А, Б; МК1-22А, Б; МК1-30А, Б; МК2-20А, Б; МК2-30А, Б; МК1-20Д; МК3-20Д) общепромышленных установок, а также для коммутирования электрических цепей тепловозов и электровозов на напряжение 220 В постоянного тока.

Контакторы МК1-20Д, МК3-20Д применяются в лифтовых низковольтных комплектных устройствах управления, МК1-20М для вагонов метрополитена.

Контакторы МК1-20, МК2-20, МК3-20, МК4-20 могут применяться при работе в силовых цепях постоянного тока при напряжении 440 В как однополюсные аппараты, при этом главные контакты должны быть соединены последовательно.

Контакторы МК1-20, МК1-30, МК2-20, МК2-30 могут применяться при работе в силовых цепях переменного тока при напряжении 500 В частоты 50 и 60 Гц при снижении номинального рабочего тока.

Контакторы МК1Б-МК4Б предназначены для неавтоматизированного электропривода, отличаются от контакторов МК1А-МК4А коммутационной износостойкостью.

Коммутационная износостойкость контакторов МК1Б-МК4Б составляет не менее половинных значений коммутационной износостойкости соответствующих типоразмеров контакторов МК1А-МК4А.

Конструкция контактов вспомогательной цепи допускает преобразование замыкающих контактов в размыкающие и наоборот. При этом число размыкающих контактов должно быть не более 50% от общего числа контактов вспомогательной цепи.

Два однотипных контактора с замыкающими главными контактами, расположенные рядом, допускают установку механической блокировки.

Контакторы допускают установку как на изоляционных или металлических заземленных панелях, так и на рейках.

Основные технические данные

Номинальный ток, А	20, 40, 63, 100, 160
Номинальное напряжение, В	
постоянного тока	до 1000
переменного тока	до 380
Номинальное напряжение постоянного тока цепи управления, В	24 (27), 48 (50), 75, 110, 220
Номинальный длительный ток вспомогательных контактов, А	10
Номинальное напряжение контактов вспомогательной цепи, В	
постоянного тока	от 110 до 220
переменного тока	от 110 до 660
Механическая износостойкость контакторов, млн. циклов ВО, не менее	
на номинальные токи 40, 63 А и МК1-20М	16
на номинальные токи 100, 160 А	10
Степень защиты	IP00
Режим работы	продолжительный, прерывисто-продолжительный, повторно-кратковременный, кратковременный
Присоединение внешних проводников	переднее
Потребляемая мощность, Вт, не более	45
Климатическое исполнение	УЗ, ТЗ, УХЛЗ

Контакторы постоянного тока типа МК2-20Б (производитель – ЧЭАЗ)

Контакторы типа МК2-20Б предназначены для коммутирования цепей соленоидных приводов высоковольтных выключателей в момент включения последних.

Контакторы обеспечивают трехкратное включение и отключение с интервалом 5 с. токов, указанных в таблице

Коммутируемый ток, А	Номинальное напряжение, В	Постоянная времени, мс
1 н	220	50
2 I н	220	50
4 I н	220	150
6 I н	220	200
8 I н	110	200
8 I н	220	200

Контакторы пригодны для работы только при кратковременном режиме с общей длительностью пребывания втягивающей катушки под током не более 15 с.

Контактор изготавливается без контактов вспомогательной цепи.

Контакторы пригодны для монтажа как на изоляционной, так и на металлической заземленной плите либо на рейках.

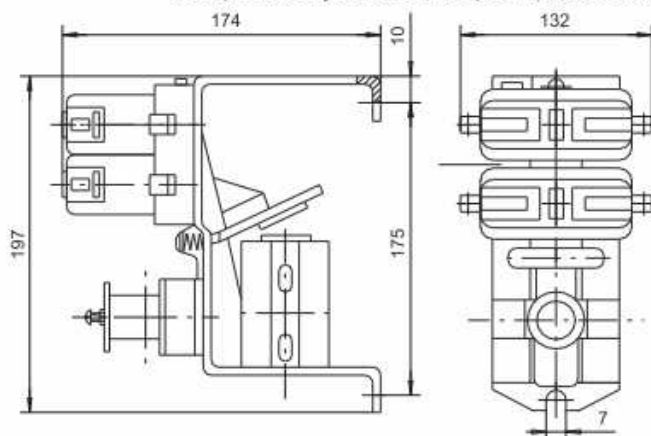
Основные технические данные

Номинальное напряжение	до 220 В постоянного тока
Номинальный ток, А	63
Масса контактора, кг, не более	3

Типоисполнения и технические данные контактора типа МК2-20Б

Номенклатурный номер	Номинальное напряжение цепи управления, В	Номинальный ток катушки, А	Допустимое отклонение номинального тока при холодной катушке	Ток отпадания якоря, А, не менее	Минимальное значение напряжения втягивания	Значение собств. времени срабатывания, с, не более	
						при включении	при отключении
104.404.100	110	2	+25% -15%	0,3	не более 80% от номинального	0,08	0,03
104.404.200	220	1		0,15			
104.404.900	48	4,5		0,7			

Габаритные и установочные размеры контактора типа МК2-20Б



Контактор типа МК2-20Б

Контакторы постоянного тока КПВ604, КПВ605 (производитель – ЧЭАЗ)

Контакторы предназначены в основном для управления электродвигателями постоянного тока и применяются в качестве линейных контакторов, реверсирующих контакторов, контакторов ускорения и др.

Конструкция блок - контакторов, примененных на контакторах, позволяет при монтаже или в условиях эксплуатации производить пересборку элементов за счет изменения положения «З» и «Р» контактов в пределах указанного количества, при этом число замыкающих контактов должно быть не более 2-х от общего числа контактов вспомогательной цепи.

Два однотипных контактора с замыкающими контактами, установленные рядом, можно механически блокировать. При этом правый контактор, к которому с левой стороны крепится механическая блокировка, допускает установку блок - контакторов только с правой стороны 2 «З», 1 «Р».

Основные технические данные

Тип контактора		КПВ604	КПВ605
Число и исполнение главных контактов		1 «З»	
Номинальное напряжение главных контактов, В		220 постоянного тока	
Номинальный ток главной цепи, А		250	630
Максимальная допустимая частота включений в час		1200	
Коммутационная износостойкость, млн. циклов ВО		0,2	
Механическая износостойкость, млн. циклов ВО		3	
Потребляемая мощность, Вт		50	75
Климатическое исполнение		У3, ХЛЗ, ТЗ по ГОСТ15150-69	
Степень защиты		IP00	
Масса, кг, не более		17	33
Габариты ШхВхГ, мм, тах	на металлической плите	195x415x265	235x560x335
	без плиты	195x360x230	235x500x300

Типоисполнения и технические данные контакторов серии КПВ600

Тип контактора				Напряжение цепи управления, В	Способ подсоединения главной цепи	Режим работы	Блок-контакты	
КПВ 604		КПВ 605						
на метал. плите	без плиты	на метал. плите	без плиты					
номенклатурный номер								
106040101	106040113	106050101	106050113	-110	переднее	Повторно-кратковременный	-	
106040102	106040114	106050102	106050114				2*3", 2*P"	
106040103	106040115	106050103	106050115			2*3", 1*P"		
106040104	106040116	106050104	106050116			-		
106040105	106040117	106050105	106050117			2*3", 2*P"		
106040106	106040118	106050106	106050118			2*3", 1*P"		
106040107	106040119	106050107	106050119		заднее	Повторно-кратковременный	-	
106040108	106040120	106050108	106050120				2*3", 2*P"	
106040109	106040121	106050109	106050121			2*3", 1*P"		
106040110	106040122	106050110	106050122			-		
106040111	106040123	106050111	106050123			2*3", 2*P"		
106040112	106040124	106050112	106050124			2*3", 1*P"		
106040201	106040213	106050201	106050213		-220	переднее	Повторно-кратковременный	-
106040202	106040214	106050202	106050214					2*3", 2*P"
106040203	106040215	106050203	106050215	2*3", 1*P"				
106040204	106040216	106050204	106050216	-				
106040205	106040217	106050205	106050217	2*3", 2*P"				
106040206	106040218	106050206	106050218	2*3", 1*P"				
106040207	106040219	106050207	106050219	заднее		Повторно-кратковременный	-	
106040208	106040220	106050208	106050220				2*3", 2*P"	
106040209	106040221	106050209	106050221			2*3", 1*P"		
106040210	106040222	106050210	106050222			-		
106040211	106040223	106050211	106050223			2*3", 2*P"		
106040212	106040224	106050212	106050224			2*3", 1*P"		

Контакты переменного тока КТПВ600 (производитель – ЧЭАЗ)

Контакты серии КТПВ600 предназначены для включения и отключения электрических цепей в стационарных установках.

Основные технические данные

Тип контактора	КТПВ623	КТПВ624
Номинальный ток главной цепи, А	160	250
Номинальное напряжение главных контактов, В	380 переменного тока	
Номинальное напряжение втягивающей катушки, В	110 либо 220 постоянного тока	
Число и исполнение главных контактов	2 «З»	
Максимальная допустимая частота включений в час	1200	
Коммутационная износостойкость, млн. циклов ВО	0,2	
Механическая износостойкость, млн. циклов ВО	3	
Потребляемая мощность, Вт	50	75
Климатическое исполнение	УЗ, ХЛЗ и ТЗ	
Степень защиты	IP00	
Масса, кг, не более	без блок-контактов	29
	с блок-контактами	30
Габаритные размеры ШхВхГ, мм, max	205x340x205	245x425x280

Конструкция блок - контактов, примененных на контакторах, позволяет при монтаже или в условиях эксплуатации производить пересборку элементов за счет изменения положения «З» и «Р» контактов в пределах указанного количества, при этом число размыкающих контактов должно быть не более 2-х от общего числа контактов вспомогательной цепи.

Два однотипных контактора, установленные рядом, можно механически блокировать. При этом правый контактор, к которому с левой стороны крепится механическая блокировка, допускает установку блок - контактов только с правой стороны.

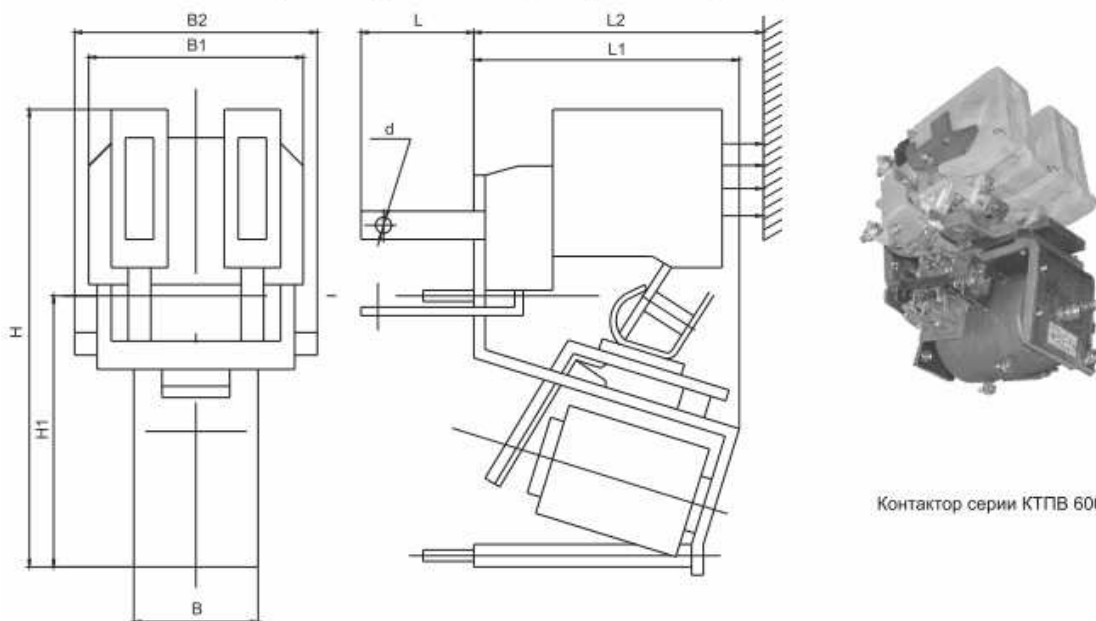
Контакты изготавливаются без плит и допускают установку как на изоляционных или металлических заземленных панелях, так и на рейках.

Типоисполнения и технические данные контакторов серии КТПВ600

Тип контактора		Напряжение цепи управления, В	Способ подсоединения	Режим работы	Блок-контакты	
КТПВ 623	КТПВ 624					
номенклатурный номер	номенклатурный номер					
136230113	136240113	-110	переднее	Повторно-кратковременный	-	
136230114	136240114				2 ³ З, 2 ³ Р*	
136230115	136240115				2 ³ З, 1 ³ Р*	
136230116	136240116			-		
136230117	136240117			Продолжительный	2 ³ З, 2 ³ Р*	
136230118	136240118			2 ³ З, 1 ³ Р*		
136230119	136240119		заднее	Повторно-кратковременный	-	
136230120	136240120				2 ³ З, 2 ³ Р*	
136230121	136240121				2 ³ З, 1 ³ Р*	
136230122	136240122			-		
136230123	136240123			Продолжительный	2 ³ З, 2 ³ Р*	
136230124	136240124			2 ³ З, 1 ³ Р*		
136230213	136240213		-220	переднее	Повторно-кратковременный	-
136230214	136240214					2 ³ З, 2 ³ Р*
136230215	136240215	2 ³ З, 1 ³ Р*				
136230216	136240216	-				
136230217	136240217	Продолжительный			2 ³ З, 2 ³ Р*	
136230218	136240218	2 ³ З, 1 ³ Р*				
136230219	136240219	заднее		Повторно-кратковременный	-	
136230220	136240220				2 ³ З, 2 ³ Р*	
136230221	136240221				2 ³ З, 1 ³ Р*	
136230222	136240222			-		
136230223	136240223			Продолжительный	2 ³ З, 2 ³ Р*	
136230224	136240224			2 ³ З, 1 ³ Р*		

Контакторы переменного тока КТПВ600 (производитель – ЧЭАЗ)

Габаритные и установочные размеры контакторов серии КТПВ600



Контактор серии КТПВ 600

Тип контактора	Размеры, max, мм								
	H	H1	L**	L1	L2	B	B1	B2	d
КТПВ 623	340	185	80	210	350	90	165	180 200*	M8
КТПВ 624	425	270	85	285	430	130	230	245*	M10

* Для переднего присоединения.

** Для заднего присоединения.

L2 - расстояние от установочной плоскости, с учетом вылета дуги за пределы дугогасительной камеры при коммутации 8-кратного тока в отношении к номинальному при 380 В переменного тока и $\cos \varphi$ не менее 0,35.

Контакты серии КМ (производитель – ЧЭАЗ)

КОНТАКТОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СЕРИИ КМ ТУ 16-93 БЖИ.644 413.001 ТУ

Контакты электромагнитные серии КМ предназначены для работы в силовых электрических цепях схем управления электродвигателями электрогрузчиков, а также в схемах высоковольтных выключателей для коммутации цепи оперативного включения привода - контакты КМ 5100 В.

Основные технические данные

Номинальный ток контактов вспомогательной цепи, А	для КМ5103	10
	для остальных	2,5
Номинальное напряжение контактов вспомогательной цепи, В	для КМ5103	40
	для остальных	80
Допустимая частота срабатываний, включений в час		до 300
Механическая износостойкость контактов, циклов срабатываний, не менее	для КМ4110Л, КМ4110П, КМ4113П, КМ5100, КМ5103	1250 000
	для остальных	2 500 000
Климатическое исполнение		У2, УХЛ2, Т2

Катушки могут быть с гибкими выводами с наконечниками или с жесткими выводами для втычного соединения; контакты КМ5100, КМ5103, КМ4110Л, КМ4110П только с гибкими выводами.

Контакты полярны, все исполнения имеют постоянные магниты.

Режим работы - повторно-кратковременный. Для контактов КМ5100В, КМ5102В, КМ1100В режим работы - кратковременный, длительность пребывания катушки под током не более 15с.

Контакты допускают переднее присоединение проводников, контакты вспомогательной цепи допускают присоединение проводников втычным способом. Типоисполнения и технические данные контактов указаны в таблице 1.

Контакты КМ1100

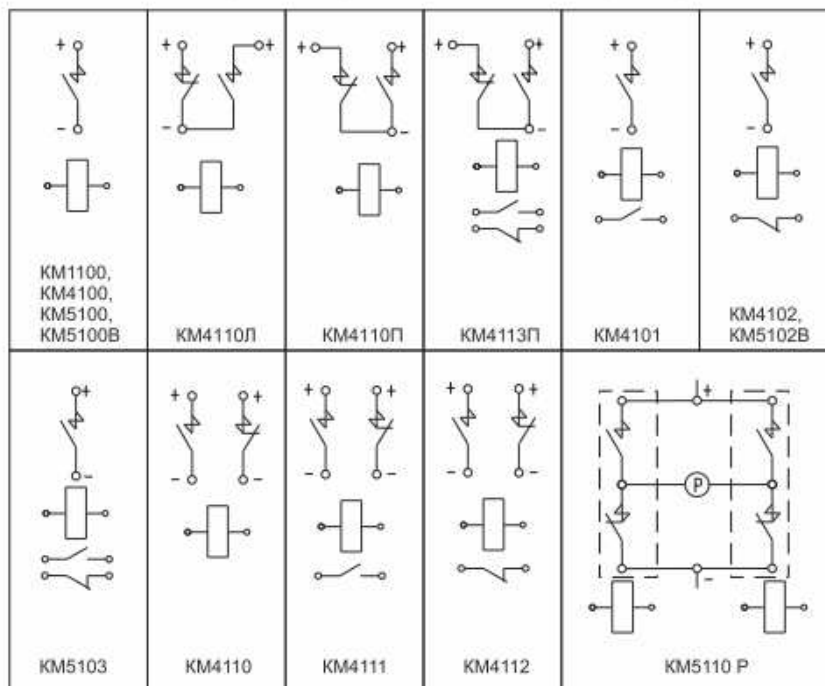
Контакты КМ4110П

Контакты КМ5103

Контакты КМ4101

Контакты КМ5110П

Схемы электрические принципиальные контактов серии КМ.



Контакторы серии КМ (производитель – ЧЭАЗ)

Типоисполнения и технические данные контакторов серии КМ

Тип контактора	Номенклатурный номер	Номинальное напряжение	Номинальный ток, А	Число и исполнение главных контактов	Число и исполнение вспомогательных контактов	Напряжение втягивающей катушки, В	Габаритные размеры, мм, max			Масса, кг, не более	Примечание														
							Ш	В	Г																
КМ1100	188.100.410	=40	40	1"3"	-	-24	51	100	50	0,4															
КМ5100	100.417.302		250		1"3" + 1"Р"	-	-20	64	196	120	1,8														
КМ5103	100.517.312		160	1"3" + 1"Р"	-	-20	74	196			120	1,95													
КМ411ОЛ	100.427.302				250	1"3"	1"3" + 1"Р"		-40	64		196	120	1,8											
КМ411ОП	101.427.302		160	1"3" + 1"Р"	-	-20	74	196	120	1,95															
КМ4113П	101.427.311				250	1"3"	1"3" + 1"Р"			-40	64	196	120	1,8											
КМ5100	100.417.502		160	1"3" + 1"Р"	-	-20	74	196	120	1,95															
КМ5103	100.517.512				250	1"3"	1"3" + 1"Р"			-40	64	196	120	1,8											
КМ411ОЛ	100.427.502		160	1"3" + 1"Р"	-	-20	54	110	85	0,98	*														
КМ411ОП	101.427.502				250	1"3"	1"3" + 1"Р"				-24	60	110	85	**										
КМ4100	102.100.305	= 40+80	160	1"3"	-	-20	54	110	85	1,02	*														
	102.100.405					-24	60				**														
	102.100.415					-40	54				*														
	102.100.505					-40	60				**														
	102.100.515					-48	54				*														
	102.100.525					-80	60				**														
	102.100.905					-20	54				*														
	102.100.915					-40	60				**														
102.100.715	-20					54	*																		
КМ4101	102.101.305					= 40+80	160				1"3"	1"3"	-20	54	118	85	1,02	*							
	102.101.505	-40	60	**																					
	102.101.515	-20	54	*																					
	102.101.525	-40	60	**																					
КМ4102	102.102.305	= 40+80	160	1"Р"	1"Р"			-20	54	118			85	1,02				*							
	102.102.505							-40	60									**							
	102.102.515							-20	54									*							
	102.102.525							-40	60									**							
КМ4110	102.110.306							= 40+80	160									1"3" + 1"Р"	-	-20	54	110	85	1,07	*
	102.110.406																			-24	60				**
	102.110.416					-40	54				*														
	102.110.506					-40	60				**														
	102.110.516					-48	54				*														
	102.110.526					-80	60				**														
	102.110.906	-20	54	*																					
	102.110.916	-40	60	**																					
	102.110.716	-40	60	**																					
	102.110.726	-80	60	**																					
КМ4111	102.111.516	=220	250	1"3"	1"3"	-40	60	118	85	1,12	**														
КМ4112	102.112.516			1"Р"	1"Р"	-40	60																		
КМ5100В	103.100.148	=220	250	1"3"	-	-110	82	110	85	1,1															
	103.100.248			-220	82																				
КМ5110Р	101.220.737	=80	250	2"3" + 2"Р"	-	-80	146	90	2,2																

* Контактор с мягкими выводами катушки, расположенными слева.

** Контактор с жесткими выводами катушки, расположенными слева.

*** Контактор с жесткими выводами катушки, расположенными справа.

Контакторы переменного тока КТ6050, КТП6050 (производитель – ЧЭАЗ)



Контактор КТ6053



Контактор КТ6055



Контактор КТП6053

ТУ 3426-031-00213703-98

Контакторы КТ6050 и КТП6050 замыкающими главными контактами рассчитаны на номинальное напряжение 380 В переменного тока частоты 50, 60 Гц и предназначены для дистанционного включения и отключения силовых электрических цепей в металлургических, крановых и других электроприводах с тяжелым режимом работы.

Два однотипных контактора с одинаковым номинальным током допускают установку механической блокировки, исключающей одновременное их включение.

Основные технические данные

	КТ6052	КТ6053	КТ6054	КТ6055	КТП6052	КТП6053	КТП6054
Номинальный ток главных контактов, А	630		400		630		400
Количество замыкающих главных контактов	2	3	4	5	2	3	4
Количество вспомогательных контактов	Основные - 2"З", 2"Р". Допускают переустановку на 3"З", 1"Р" или 4"З".						
Максимальная допустимая частота включений в час	600		150		1200		150
Механическая износостойчивость, млн. циклов	1,6		1,25		1,6		1,25
Присоединение	универсальное						
Масса, кг	48	57	66	75	56	66	75
Габариты, мм							
ширина (Ш)	580	680	880	980	580	680	880
высота (В)	335						
глубина (Г)	275				405		
Потребляемая мощность, Вт	140				170		
Климатическое исполнение	УЗ, ХЛЗ, ТЗ						
Степень защиты	IP00						

Типоисполнения и технические данные контакторов серии КТ6050

КТ6052	КТ6053	КТ6054	КТ6055	Напряжение цепи управления переменного тока, В	Частота, Гц	Установка	Режим работы
137201101	137301101	137401101	137501101	127	50	на рейке	прерывисто-продолжит.
137201103	137301103	137401103	137501103				продолжительный**
137201105	137301105	137401105	137501105			на плите*	прерывисто-продолжит.
137201107	137301107	137401107	137501107				продолжительный**
137200201	137300201	137400201	137500201	220		на рейке	прерывисто-продолжит.
137200203	137300203	137400203	137500203				продолжительный**
137200205	137300205	137400205	137500205			на плите*	прерывисто-продолжит.
137200207	137300207	137400207	137500207				продолжительный**
137201201	137301201	137401201	137501201	380	на рейке	прерывисто-продолжит.	
137201203	137301203	137401203	137501203			продолжительный**	
137201205	137301205	137401205	137501205		на плите*	прерывисто-продолжит.	
137201207	137301207	137401207	137501207			продолжительный**	

* Для установки на плиту контакторы поставляются комплектно с дистанционными колодками.

** Контакторы, предназначенные для продолжительного режима работы, имеют в обозначении типа дополнительный индекс "С" (например, КТ 6053С).

Контакторы переменного тока КТ6050, КТП6050 (производитель – ЧЭАЗ)

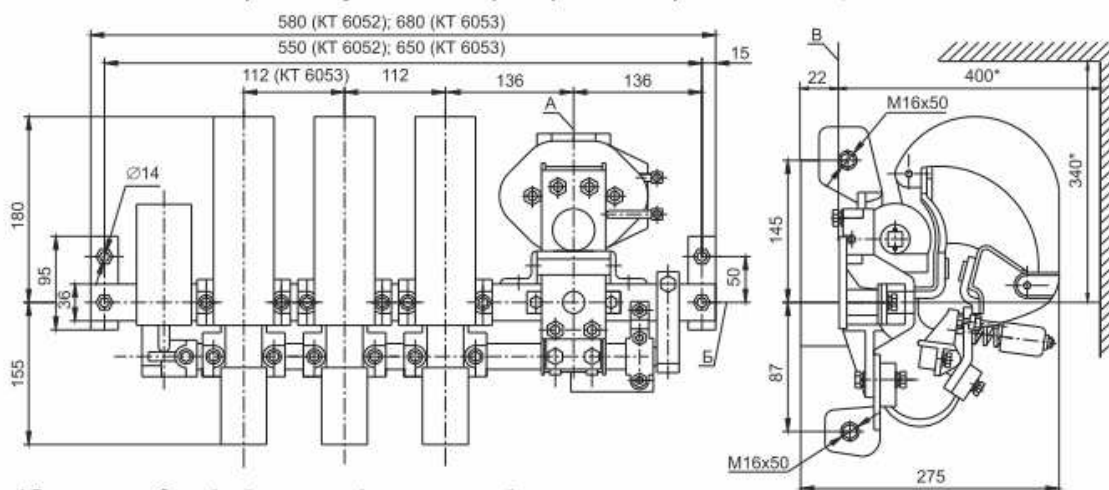
Типоисполнения и технические данные контакторов серии КТП6050

КТП6052	КТП6053	КТП6054	Напряжение цепи управления постоянного тока, В	Установка	Режим работы
107200151	107300151	107400151	110	на рейке	прерывисто-продолжительный
107200153	107300153	107400153	110		продолжительный**
107200155	107300155	107400155	110	на плите*	прерывисто-продолжительный
107200157	107300157	107400157	110		продолжительный**
107200251	107300251	107400251	220	на рейке	прерывисто-продолжительный
107200253	107300253	107400253	220		продолжительный**
107200255	107300255	107400255	220	на плите*	прерывисто-продолжительный
107200257	107300257	107400257	220		продолжительный**

* Для установки на плиту контакторы поставляются комплектно с дистанционными колодками.

** Контактры, предназначенные для продолжительного режима работы, имеют в обозначении типа дополнительный индекс "С" (например, КТ6053С).

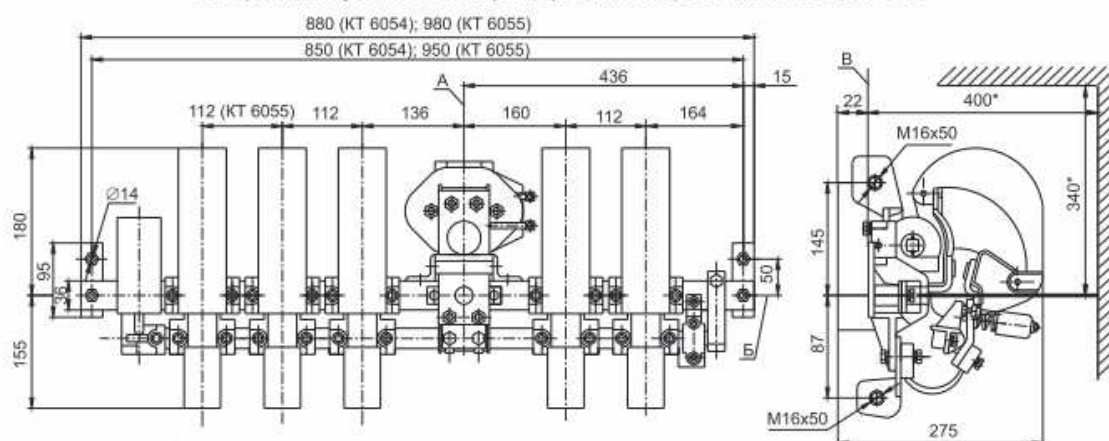
Габаритные и установочные размеры контакторов типа КТ 6052, КТ 6053



* Расстояние до ближайшей токоведущей или заземленной детали.

A - вертикальная установочная ось; Б - горизонтальная установочная ось; В - установочная плоскость.

Габаритные и установочные размеры контакторов типа КТ 6054, КТ 6055



* Расстояние до ближайшей токоведущей или заземленной детали.

A - вертикальная установочная ось; Б - горизонтальная установочная ось; В - установочная плоскость.

Контакторы серий КНЕ и КНИ (производитель – ЧЭАЗ)

Контакторы КНЕ У относятся к одностабильным электромагнитным аппаратам с цепями управления постоянного тока с самовозвратом.

Контакторы КНИ относятся к электромагнитным поляризованным двустабильным коммутационным аппаратам, включение и отключение которых осуществляется подачей импульса напряжения прямоугольной формы длительностью не менее 0,3 с.

Контакторы предназначены для коммутации электрических цепей постоянного напряжения до 132 В и переменного напряжения до 418 В частотой от 50 до 1000 Гц и могут применяться в ответственной аппаратуре как мобильных, так и стационарных объектов: в наземной технике, в судостроении, в авиации и космической аппаратуре, на АЭС и т. д.



Контакторы серии КНЕ У и КНИ

Механическая износостойкость контакторов 100000 циклов включений - отключений.

Коммутационная износостойкость от 5 до 10^5 циклов в зависимости от режима коммутации.

Падение напряжения в цепи контактов при токах от 0,5 А до номинального - не более 0,4 В.

Частота включений - не более 1200 в час.

Время срабатывания контакторов КНЕ У от 10 до 40 мс, время возврата от 1 до 25 мс.

Время срабатывания и возврата контакторов КНИ не более 50 мс.

Степень защиты IP40, выводов IP00.

Гарантийный срок эксплуатации - 20 лет.

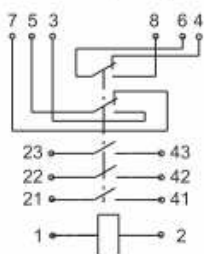
Контакторы могут эксплуатироваться в широком диапазоне внешних воздействий, имеют высокую надежность.

Основные технические данные

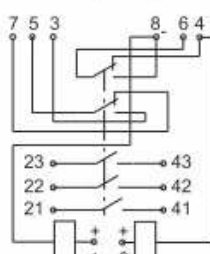
Величина	Тип контактора	Количество контактов		Номинальный ток контактов, I _n , А		Напряжение цепи управления постоянное, В	Масса, кг
		главных, замыкающих	вспомогательных, переключающих	главных	вспомогательных		
0	КНЕ 030У	3	2	16	5	12; 24; 27	0,14
	КНЕ 020У	2		25			
	КНИ 030	3	16				
	КНИ 020	2	25				
1	КНЕ 130У	3	2	25		12; 24; 27; 110; 220	0,22
	КНЕ 120У	2		40			
	КНИ 130	3	25				
	КНИ 120	2	40				
2	КНЕ 230У	3	2	63	12; 24; 27	0,36	
	КНИ 230		1				
	КНЕ 220У	2	2	100			
	КНИ 220		1				

Схемы электрические принципиальные контакторов

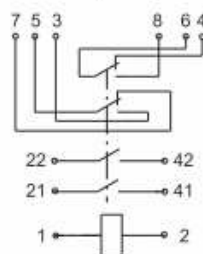
КНЕ 030У, 130У, 230У



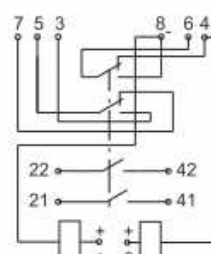
КНИ 030, 130, 230



КНЕ 020У, 120У, 220У



КНИ 020, 120, 220



Контактыры типов ТКД501, ТКС601ДОД, КМ-600Д-В (производитель – ЧЭАЗ)

КОНТАКТОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ТИПОВ ТКД501ДОД, ТКС601ДОД, КМ-600Д-В

Контактыры ТКД501ДОД, ТКС601ДОД, КМ-600Д-В предназначены для коммутации электрических цепей постоянного напряжения до 30В, а ТКД501ДОД и переменного напряжения до 220В частотой от 360 до 1100 Гц, и могут успешно применяться в оборудовании различных видов техники, в том числе в автомобилестроении, тракторостроении, судостроении, железнодорожном транспорте.



Контактыр КМ-600Д-В

Основные технические данные

Наименование параметров	Тип контактовров		
	ТКД501ДОД	ТКС601ДОД	КМ-600Д-В
Количество замыкающих контактов	1	1	1
Напряжение цепи управления, постоянное, В:			
номинальное	27		
рабочее	24 – 30		
Рабочее напряжение цепи контактов и вспомогательного вывода, В:			
постоянное	16 – 30	16 – 30	24 – 30
переменное	20 – 220	-	-
Номинальный ток в цепи главных контактов, А	50	600	600
Диапазон коммутируемых токов, А	1,5 – 50	20 – 600	20 – 600
Ток, потребляемый электромагнитами, А	0,39	0,58	0,67
Ток в цепи вспомогательного вывода (при τ цепи < 0,015с, или $\cos \gamma > 0,5$), для КМ-600Д-В при $\tau = 0,015с$	-	0,2 – 5	0,2 – 5
Падение напряжения на контактах, не более, В	0,15	0,12	0,15
Допустимая частота включений (раз в минуту)	2	1	2
Характер нагрузки:			
τ , не более, с	0,001	0,001	0,002
$\cos \gamma$, не менее	0,5	-	-
Коммутационная износостойкость	10000 включений и отключений номинального тока, или		
	5000 включений четырехкратного номинального постоянного тока при $\tau \leq 0,001с$,		
	5000 отключений номинального постоянного тока, или 15000 включений и отключений номинального тока омической нагрузки.		
Наибольший коммутируемый ток контактов, А	400	4800	4800
Масса, кг, не более	0,22	1,6	1,65
Режим работы	продолжительный		
Климатическое исполнение	В 2		

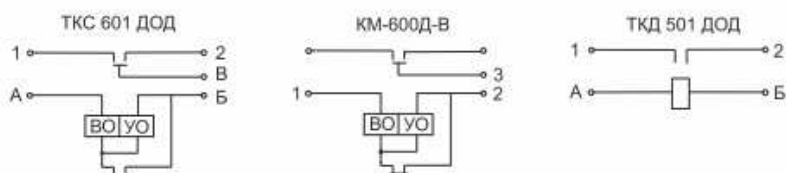


Контактыр ТКД501ДОД



Контактыр ТКС601ДОД

Схемы электрические принципиальные контактовров



Реле-пускатели серии РЭП15П-0000 (производитель – ЧЭАЗ)

Тип пускателя и количество вспомогательных контактов				Номинальное напряжение	Номинальный ток пускателя с тепловым реле, А	Частота, Гц
нереверсивного		реверсивного с механической блокировкой				
без теплового реле	с тепловым реле	без теплового реле	с тепловым реле			
Номенклатурный номер						
РЭП 15П-0101А 3 «З» 2 «Р»	РЭП 15П-0201А 3 «З» 2 «Р»					
111510002 111510058 111510072 111510114	111521.296			24 110 220 380		
			РЭП 15П-0404А 4 «З» 2 «Р»			
			111540367 111540369 111540371 111540373 111540375 111540376 111540377 111540378	220	0,5 0,8 1,25 2 3,2 4 5 6,3	
РЭП 15П-0102А 1 «З» 4 «Р»	РЭП 15П-0202А 1 «З» 4 «Р»	РЭП 15П-0305А 2 «З»	РЭП 15П-0405А 2 «З»			
111510059 111510073 111510115		111530049 111530050 111530053		110 220 380		
РЭП 15П-0103А 5 «З»	111521060 111521061 111521062		111540322 111540323 111540324	110	4 5 6,3	
111510074	111521301 111521310			220	0,32 2,5	
	111521312 111521313 111521314		111540394 111540395 111540396	220	4 5 6,3	
	111522068 111522069 111522070		111540610 111540611 111540612	380	4 5 6,3	
РЭП 15П-0107А 2 «З» 1 «Р»	РЭП 15П-0207А 2 «З» 1 «Р»					
111510076				220		
	111521366 111521368			220	5 6,3	
РЭП 15П-0108А 1 «З» 2 «Р»						
111510077				220		
РЭП 15П-0100Б 1 «З»						
111510064 111510078				110 220		
РЭП 15П-0101Б 3 «З» 2 «Р»						
111510079 111510121				220 380		
РЭП 15П-0102Б 1 «З» 4 «Р»	РЭП 15П-0202Б 1 «З» 4 «Р»	РЭП 15П-0304Б 4 «З» 2 «Р»	РЭП 15П-0404Б 4 «З» 2 «Р»			
111510010				24		
111510066 111510080 111510122	111521440	111530027 111530028 111530031		110 220 380		
	111521188		111540342 111540401 111540405 111540407 111540409 111540411 111540414	110 220	6,3 0,32 0,8 1,25 2 3,2 6,3	
	111521196		111540630	380	6,3	
0,28	0,38	0,62	0,72	Масса, кг		
40×58×104	40×95×104	91×65×112	91×97×112	Габаритные размеры (Ш×В×Г), мм		

50

Пускатели электромагнитные серии РЭВ 1000, РЭВ 2000,2000 (производитель – ЧЭАЗ)

Пускатели серий РЭВ 1000, РЭВ 2000, пускатели в оболочке серии РЭВ 20000 предназначены для применения в качестве комплектующих изделий в схемах управления электроприводами для дистанционного пуска непосредственным подключением к сети, остановки и реверсирования трехфазных электродвигателей с короткозамкнутым ротором мощностью до 4 кВт.

Пускатели допускают установку на них приставок контактных серии ПКЛ, ПК (1«З»+1«Р»; 2«З»; 2«З»+2«Р»; 3«З»+1«Р»; 4«З»; 1«З»+3«Р»; 4«Р»).

Пускатели серий РЭВ 1000, РЭВ 2000 допускают установку приставок времени серии ПВЛ, приставок памяти ППЛ и других приставок с аналогичными характеристиками выше указанных устройств.

Пускатели, комплектуемые ограничителями перенапряжений ОПН, пригодны для работы в системах управления с применением микропроцессорной техники.

Пускатели допускают установку на них тепловых реле серии РТЛ для защиты управляемых электродвигателей от перегрузок, недопустимой продолжительности и от токов, возникающих при обрыве одной из фаз.

Допускается комплектная поставка пускателей с тепловыми реле.

Основные типоразмеры и параметры пускателей приведены в таблице.

Номинальный ток контактов пускателей - 10 А.

Номинальное напряжение контактов: постоянного тока - до 440 В; переменного тока - до 660 В, частоты 50 (60) Гц.

Пускатели отрегулированы на срабатывание при напряжении на зажимах катушки 0,85-1,1 номинального.

Климатическое исполнение пускателей серий РЭВ 1000, РЭВ2000-У3 и Т3, пускателей в оболочке серии РЭВ 20000-У2 и Т2 по ГОСТ 15543-89, ГОСТ 15150-69.



Пускатель серий РЭВ 1000, РЭВ 2000



Пускатель времени на возврат серий РЭВ 1000, РЭВ 2000



Реверсивный пускатель серий РЭВ 1000, РЭВ 2000



Пускатель в оболочке серии РЭВ 20000

Пускатели электромагнитные серии ПМ12 (производитель – Электротехник)

Технические характеристики главной цепи

Параметры	Тип пускателя													
	ПМ12-100	ПМ12-125	ПМ12-160	ПМ12-180	ПМ12-185	ПМ12-225	ПМ12-250	ПМ12-265	ПМ12-330	ПМ12-400	ПМ12-500	ПМ12-630	ПМ12-800	
Количество полюсов	3													
Количество и тип дополнительных контактов	2з+2р				1з			2з+2р		1з				
Номинальное рабочее напряжение U_e , В	110, 127, 36, 220, 380													
Номинальное напряжение изоляции U_i , В	1000													
Номинальное импульсное напряжение $U_{имп}$, В	8													
Номинальный рабочий ток I_e , категория применения АС-1, А	100	125	160	180	185	225	250	265	330	400	500	630	800	
Условный тепловой ток I_{th} ($t^{\circ} \geq 40^{\circ}$) Категория применения АС-1, А	125	150	180	208	275	315	285	350	400	500	700	1000	1000	
Номинальная коммутируемая мощность в категории применения АС-3, кВт	220 В	30	37	40	55	55	63	75	75	100	110	147	200	250
	380В	45	55	75	90	90	110	132	132	160	200	250	335	450
	660 В	50	77	75	110	110	129	185	160	220	280	335	450	475
Максимальная кратковременная нагрузка ($t \leq 1c$), А	800	1050	1280	1480	1480	1800	2000	2120	2640	3200	4000	5040	6400	
Коммутационная износостойкость, млн. циклов	АС-3	2	1,5	1,5	0,8	0,8	0,8	1,2	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4
	АС-4	0,25	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,25	0,25
Механическая износостойкость, млн. циклов	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,8	0,8	0,8	0,8
<p>В категории АС-3 пускателей ПМ12-100/160/250 класс износостойкости А – не менее 1,2 млн. циклов; В категории АС-3 пускателей ПМ12-185/225/265/330/400/500/630/800 класс износостойкости Б – не менее 0,4 млн. циклов; В категории применения АС-4 всех пускателей класс износостойкости В - не менее 0,25 млн. циклов.</p>														

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буль Б.К. Основы теории электрических аппаратов / Б.К. Буль и др.; под ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высш. шк., 1970. – 599 с.
2. Буткевич Г.В. Задачник по электрическим аппаратам: учебное пособие / Буткевич Г.В., Дегтярь В.Г., Сливинская А.Г. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1987. – 232 с.
3. Виттенберг М.И. Расчет электромагнитных реле. – Л.: Энергия, 1975. – 413 с.
4. Гордон А.В. Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. – М.: Энергоиздат, 1972. – 446 с.
5. Грачёв А.С. Электрические аппараты: руководство по решению задач проектирования электрических аппаратов / Мар. гос. ун-т; А.С. Грачёв. – Йошкар-Ола, 2009. – 111 с.
6. Елкин В.Д. Электрические аппараты / В.Д. Елкин, Т.В. Елкина. – Минск : Дизайн-ПРО, 2003. – 76 с.
7. Жукова Г.А. Курсовое проектирование по низковольтным электрическим аппаратам / Г.А. Жукова, В.П. Жуков: Учеб. пособие – М.: Высш. шк., 2006. – 160 с.
8. Кляйн Р.Я. Электрические и электронные аппараты: учебное пособие. Ч. I: Физические явления в электрических аппаратах / Кляйн Р.Я. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2000. – 97 с.
9. Коновалов, О.А. Электрические и электронные аппараты : учеб. пособие / О.А. Коновалов, А.В. Пяталов. – Комсомольск-на-Амуре, 2003. – 145 с.
10. Литовченко В.В., Чумоватов А.И. Тяговые электрические аппараты: Методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине «Электрооборудование электроподвижного состава», раздел «Тяговые электрические аппараты». – М.: МИИТ, 2003. – 63 с.
11. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 392 с.
12. Любчик М.А. Расчет и проектирование электромагнитов постоянного и переменного токов / М.А. Любчик. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 223 с.
13. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока / М.А. Любчик. – М.: Энергия, 1968. – 150 с.
14. Никитенко А.Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов. – М.: Высш.школа, 1983. – 192 с.

15. Основы теории электрических аппаратов / под ред. И.С. Таева. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.
16. Проектирование электрических аппаратов / Под ред. Г.Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 449 с.
17. Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
18. Сахаров, П.В. Проектирование электрических аппаратов / П.В. Сахаров. – М.: Энергия, 1971. – 558 с.
19. Сотсков Б.С. Основы расчета и проектирования электромеханических элементов электрических аппаратов / Б.С. Сотсков. – М.: Энергия, 1965. – 574 с.
20. Ступель Ф.А. Расчет и конструирование электромагнитных реле – М.: Госэнергоиздат, 1950 – 332 с.
21. Таев И.С. Основы теории электрических аппаратов / И.С. Таев. – М.: Высш. шк., 1987. – 351 с.
22. Таев И.С. Электрические аппараты управления. – М.: Высш. школа, 1984. – 247 с.
23. Усатенко, С.Т. Выполнение электрических схем по ЕСКД / С.Т. Усатенко и др. – М. : Изд-во Стандартов, 1989. – 324 с.
24. Фоков К.И. Электрические аппараты: метод. пособие к выполнению курсового проекта для специальности 1004 / К.И. Фоков. – Хабаровск : ДВГАПС, 1995. – 35 с.
25. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Общий курс: учебник для вузов / Чунихин А.А. – 4-е изд., стер. – М.: Альянс, 2008. – 720 с.
26. Шеховцов В.П. справочное пособие по электрооборудованию и электроснабжению / В.П.Шехоцов. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2009. – 136 с.
27. Электрические аппараты высокого напряжения /Под ред. Г.Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 343 с.
28. Электрические аппараты. Учебник для вузов/ под ред. Ю.К. Розанова – 2-ое изд., испр. и доп. – М.: Иформэлектро. 2001. – 420 с.
29. Электрические и электронные аппараты: учебник для вузов / под ред. Ю.К. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 752 с.
30. Электромеханические аппараты автоматики / Под ред. Б.К.Буля и др. – М.: Высш. школа, 1988. – 303 с.
31. Электромеханические аппараты: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Е. Г. Акимов и др.; под ред. А.Г.Годжелло, Ю.К.Розанова. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 352 с.
32. ГОСТ Р 50030.4.1-2002 (МЭК 60947-4-1-2000). Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 4-1. Контактторы и пускатели. Электромеханические контактторы и пускатели.

33. ГОСТ 11206-77 (2002). Контактторы электромагнитные низковольтные. Общие технические условия.
34. ГОСТ Р 51731-2001 (МЭК 61095-92). Контактторы электромеханические бытового и аналогичного назначения.
35. ГОСТ 14312-79. Контакты электрические. Термины и определения.
36. ГОСТ 2491-82. Пускатели электромагнитные низковольтные. Общие технические условия.
37. СТО ТПУ 2.5.01-2011. Система образовательных стандартов. Работы выпускные квалификационные, проекты и работы курсовые. Структура и правила оформления / ТПУ [Электронный ресурс] – Томск, 2011. – Режим доступа <http://standard.tpu.ru/standart.html>, свободный.

Учебное издание

СИПАЙЛОВА Надежда Юрьевна

Вопросы проектирования электрических аппаратов

Учебное пособие

Научный редактор
*Доктор технических наук,
профессор В.Г. Букреев*

В авторской редакции

Верстка *Л.А. Егорова*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати Формат 60×84/16.

Бумага «Снегурочка». Печать Хегох.


Усл. печ. л. 5,46. Уч.-изд. л. 4,95.

Заказ . Тираж экз.



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru