



КГЭУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева, А.Р. Петров, Р.М. Петрова,  
Т.В. Синюкова

## **РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ**

Монография

Казань  
2024

УДК 621.311

ББК 31.21

A13

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры «Электрические станции им. В.К.Шибанова» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

*Федотов А. И.*

доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ).

*Гизатуллин З. М.*

**Абдуллазянов Э.Ю. и др.**

A13

Работоспособность и надежность электрических контактов: монография/ Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева, А.Р. Петров, Р.М. Петрова, Т.В. Синюкова – Казань: Отечество, 2024. – 126 с.

ISBN 978-5-9222-1804-7

В монографии изложены основные подходы к оценке и анализу функциональных характеристик электрических аппаратов.

Приведены общие положения об электрических контактах, моделях и методиках расчёта их основных параметров. Приведены примеры определения параметров электрических аппаратов. Представлены основные методы диагностического контроля технического состояния аппаратов.

Книга предназначена для специалистов в области проектирования и эксплуатации электрических аппаратов, а также для аспирантов и студентов энергетических вузов.

**УДК 621.311**

**ББК 31.21**

ISBN 978-5-9222-1804-7

© Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева, А.Р. Петров, Р.М. Петрова, Т.В. Синюкова, 2024

© Казанский государственный энергетический университет, 2024

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем, существующих в системах электроснабжения, является обеспечение качества контактных соединений.

В общем случае электрический контакт – поверхность соприкосновения составных частей электрической цепи, обладающая электропроводимостью, или приспособление, обеспечение такое соприкосновение (соединение).

Принято различать 4 состояния электрических контактов: 1) разомкнутое; 2) замыкание; 3) замкнутое; 4) размыкание. Во всех состояниях происходит механический износ контактов.

Материалами для электрических контактов служат как чистые металлы (платина, серебро, вольфрам, родий, медь и др.), так и сплавы (платина-иридий, палладий-медь, золото-никель и др.) и металлические композиции (серебро-окись кадмия, серебро-графит и т.п.), выбор которых зависит от назначения контакта и условий его работы.

Для улучшения условий контактирования электрических контактов прибор, устройство или его часть, содержащие электрический контакт, помещают в баллон, наполненный водородом, элегазом, азотом или из которого вообще откачен воздух, т.е. контактная пара работает в вакууме.

Механические электрические контакты также разделяются на неподвижные (разъёмные и неразъёмные) для длительного соединения и подвижные для включения на определённое время.

Разъёмные электрические контакты осуществляются зажимами, болтами, винтами и т.п.; неразъёмные – пайкой, сваркой или клёпкой. Подвижные электрические контакты, в свою очередь, делятся на разрывные (в кнопках, переключателях, реле и др.), скользящие (соединение коллектора и щеток в электрическом генераторе и т.п.) и катящиеся (соединение контактных проводов и токосъёмных роликов троллейбуса и др.)

Выключатель – это коммутационный аппарат, предназначенный для включения и отключения тока в любых режимах: длительная нагрузка, перегрузка, короткое замыкание, холостой ход, несинхронная работа.

К основным параметрам выключателей в соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК) относятся: номинальное напряжение  $U_{ном}$  и номинальный ток  $I_{ном}$ ; номинальный ток отключения  $I_{о,ном}$  и номинальный ток включения  $I_{в,ном}$ ; наибольшее рабочее напряжение  $U_{н.р.}$ ; номинальное переходное

восстанавливающееся напряжение (ПВН) при коротком замыкании на выводах выключателя и др.

Как известно, надёжность работы контакта, определяемая как вероятность выполнения функций замыкания и размыкания цепи, равна произведению вероятностей выполнения каждой из этих функций. Коммутационная надёжность – это свойства объекта сохранять работоспособное состояние на малом интервале времени.

«Надёжность объекта» (в рассматриваемом случае – надёжность выключателей) – свойство, основанное на сохранении во времени в установленных пределах значений всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

В монографии рассмотрены два вида задач исследования: первый объединяет первые два раздела, а второй – посвящен надёжности и оценке технического состояния электрических контактов.

В первой группе исследуются элементы контактов, в которых при изменении механических величин – параметров перемещения, усилия и ускорения – осуществляется замыкание или размыкание цепи контактов. При этом изменения механических величин преобразуются в изменения параметров электрической цепи: сопротивления, индуктивности, ёмкости. Во второй группе рассматривается применение тепловизионного мониторинга электроконтактных соединений для прогнозирования надёжности и их остаточного ресурса.

## 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ

### 1.1. Электрические аппараты. Классификация электрических аппаратов

В области теории электрических аппаратов (ЭА) учеными опубликован ряд работ, посвящённых электрическим контактными соединениям. В них представлены результаты разнообразных исследований процессов на контактных поверхностях, влияние свойств металлов, механических усилий, интегральные характеристики и многое другое.

Известно, что надёжная работоспособность электрического аппарата, предназначенного для функционирования при больших токах (свыше 200 А), определяется, в основном, надёжностью и стабильностью выходных параметров контактных узлов. При этом одним из основных параметров контактного узла является контактное сопротивление стягивания контактов  $R_c$ , которое зависит от конструктивных параметров контактного узла, физико-технических параметров материалов контактов и параметров технического состояния поверхностей контактирования электрических аппаратов.

Как известно, ЭА служат для коммутации (включения и отключения), сигнализации и защиты электрических сетей и электроприемников, а также управления электротехническими и технологическими установками и находят исключительно широкое применение в различных областях народного хозяйства.

В основе функционирования большинства видов ЭА лежат процессы коммутации электрических цепей.

Такой широкий диапазон областей применения ЭА определяет многообразие видов их классификации.

ЭА классифицируют по следующим признакам:

- 1) по величине рабочего напряжения: низковольтные (до 1 кВ) и высоковольтные (более 1 кВ);
- 2) по величине рабочего или коммутируемого тока: слаботочные (до 5 А) и сильноточные (от 5 до сотен килоампер);
- 3) по выполняемым функциям:
  - коммутирующие аппараты, выключатели, разъединители, контакторы, магнитные пускатели;
  - управления, защиты, сигнализации (реле различного типа, путевые и конечные выключатели (контактные и бесконтактные));

- командные (кнопки управления, ключи, командоконтролеры и командоаппараты);
- аппараты защиты (разрядники, плавкие предохранители).

По процессам коммутации и элементной базе ЭА разделяются на:

- электромеханические;
- статические;
- гибридные.

Электромеханические аппараты отличаются наличием в них подвижных частей, имеют подвижную и неподвижную контактные системы, осуществляющие коммутацию электрических цепей.

В 1948 г. изобретён первый транзистор и в 1956 г. создан мощный управляемый полупроводниковый прибор – тиристор. Полупроводниковые диоды, тиристоры и симисторы резко расширили сферу применения электронных систем.

Статические аппараты выполняются на основе приведённых силовых полупроводниковых приборов, а также управляемых электромагнитных устройств: магнитных усилителей, дросселей насыщения и др. Гибридные ЭА представляют собой комбинацию электромеханических и статических аппаратов.

## **1.2. Электрические аппараты низкого напряжения**

В работе наиболее часто встречаются:

1. Автоматические выключатели, обеспечивающие одновременно функции коммутации силовых цепей и защиты электроприёмника, а также сетей от перегрузки и коротких замыканий.

Основные виды автоматов: универсальные, установочные, быстродействующие, гашения магнитного поля, защиты от утечек на землю. Автоматы имеют тепловой расцепитель.

2. Контактторы служат для многократных включений и отключений электрической цепи при токах нагрузки, не превышающих номинальный, также для редких отключений при токах нагрузки, обычно 7–10-ти – кратных по отношению к номинальному току. Контактторы имеют магнитную систему, на которой расположена катушка управления. Подвижная часть магнитной системы (якорь) механически связана с группой подвижных контактов – силовых и вспомогательных (или блок-контактов).

3. Магнитные пускатели предназначены для пуска, остановки, реверсирования и тепловой защиты, главным образом, асинхронных двигателей. Наибольшее применение находят магнитные пускатели с

контактными системами и электромагнитным приводом типов ПМЛ. Пускатели выполняются открытого, защищённого, пылебрызгонепроницаемого исполнения, реверсивные и нереверсивные с тепловой защитой и без неё.

4. Контролеры – это ЭА с ручным управлением, предназначенные для изменения схемы подключения электродвигателей к системам питания, а также для коммутации обмоток трансформаторов.

5. Рубильники применяются для отключения силовых цепей с созданием видимого разрыва цепи и рассчитаны практически на весь диапазон номинальных токов. Отключение электрической цепи рубильником обычно производится в обесточенном состоянии или при небольших токах.

6. Пакетные выключатели предназначены для работы в электрических цепях напряжением до 400 В переменного тока частотой 50 Гц и напряжением до 220 В постоянного тока в качестве вводных выключателей цепей управления и распределения электрической энергии, а также для ручного управления асинхронными двигателями.

### **1.3. Электрические аппараты высокого напряжения**

К ЭА высокого напряжения относят аппараты, рассчитанные на длительную работу при напряжениях более 1 кВ. Приведём общепринятую классификацию данных аппаратов по функциональному признаку. В соответствии с ней аппараты делятся на:

- коммутационные аппараты;
- ограничивающие аппараты;
- компенсирующие аппараты;
- комплектные распределительные устройства (КРУ).

В главе 3 приведена оценка параметров надёжности и прогнозирования долговечности контактных соединений, работающих при высоком напряжении на ОАО «Колэнерго».

При этом рассматривались коммутационные и распределительные системы, располагаемые на трех уровнях (4 УР–6УР) «Колымэнерго».

Как известно, выключатели служат для коммутации (включений и отключений) рабочих токов при эксплуатации оборудования. Одной из наиболее сложных проблем при коммутации больших токов является гашение дуги, возникающей между контактами.

В соответствии с методами гашения дуги определяют типы выключателей:

- *Масляные выключатели.* В этих аппаратах дугогасительное устройство заполнено трансформаторным маслом. Гашение электрической дуги осуществляется путём эффективного её охлаждения потоком газа, возникающего при разложении масла дугой.
- *Маломасляные выключатели* на напряжение 10–20 кВ и 110–220 кВ.
- *Электромагнитные выключатели.* В этих системах на электрическую дугу, возникающую в процессе отключения, действует магнитное поле, которое «загоняет» дугу в керамическую гасительную камеру. Охлаждение дуги в камере создаёт условия для её гашения.
- *Воздушные выключатели.* Гашение дуги в аппаратах этого типа осуществляется посредством потока сжатого воздуха.
- *Элегазовые выключатели.* Гашение дуги в элегазовых устройствах производится либо потоком элегаза, либо путем подъёма давления в камере за счёт дуги, горящей в замкнутом объёме газа.
- *Вакуумные выключатели* – ЭА, предназначенные, в основном, для включения и отключения нагрузочных токов цепей и до номинальных токов.
- *Разъединители* применяются для коммутации элементов цепи при отсутствии тока, что позволяет выводить оборудование для ревизии и ремонта (сначала ток отключается выключателем, потом цепь отсоединяется разъединителем).

КРУ предназначены для распределения электрической энергии и защиты систем от аварийных режимов. Для напряжения 10(6) кВ и выше в электроснабжении применяется понятие «распределительная подстанция» с набором коммутационных аппаратов типов:

- комплектные распределительные устройства для наружной установки (КРУН);
- комплектные распределительные устройства, заполненные элегазом (КРУЭ);
- комплектные распределительные устройства вакуумные (КРУВ) и др.



#### 1.4. Типы электрических контактов и процессы, протекающие на границе раздела

Следует напомнить, что электрический контакт – поверхность соприкосновения составных частей электрической цепи, обладающая электропроводностью, или приспособление, обеспечивающее такое соприкосновение (соединение). Различают электрический контакт проводников тока (механические контакты), проводника тока и полупроводника, двух полупроводников.

Об электрических контактах типа «металл полупроводник» и «полупроводник – полупроводник» можно пояснить на основании теоретических представлений об электронных процессах в полупроводниках.

В основе работы полупроводниковых приборов и устройств лежит, как известно, использование эффекта односторонней проводимости при протекании тока через запирающий слой электронно–дырочного перехода ( $p-n$ -перехода), при этом ток в одном направлении может в 10 раз и более превышать ток в другом направлении.

Сочетание двух  $p-n$ -переходов даст транзисторный эффект: эффект управления током запертого перехода с помощью тока отпертого перехода. Сочетание трех  $p-n$ -переходов в одном кристалле, разделяющих четыре области попеременно электронной и дырочной проводимости, образует тиристор. Решающее значение для полупроводниковой электроники имеет транзисторный эффект: именно на его основе работают полупроводниковые приборы основного типа – транзисторы, которые определили коренные изменения в технике и обеспечили широкое применение систем автоматического управления.

Исключительно важную роль в развитии полупроводниковой электроники сыграло появление и быстрое распространение планарной технологии. Большое значение планарной технологии определяется тем, что она обеспечила:

- широкий переход групповому методу изготовления полупроводниковых приборов (одновременно на одной полупроводниковой пластине изготавливается несколько тысяч приборов);
- существенное повышение точности и воспроизводимости конфигурации элементов приборов и связанное с этим повышение воспроизводимости электрических параметров;

- резкое уменьшение размеров элементов и зазоров между ними – до микронных и субмикронных – и создание на этой основе СВЧ усилительных и генераторных транзисторов;
- реализацию, так называемых «полезных приборов», в том числе – полевых транзисторов;
- возможность создания на одном полупроводниковом кристалле законченного электронного устройства – полупроводниковой интегральной схемы, включающей в себя необходимое число отдельных проводниковых приборов (диодов, транзисторов и др.), резисторов, конденсаторов и соединений между ними.

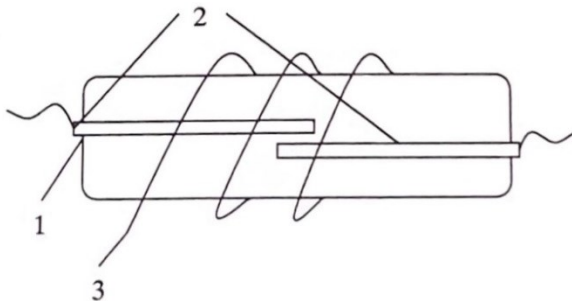
В работе механических электрических контактов принято различать 4 состояния: разомкнутое, замыкание, замкнутое и размыкание.

Механические электрические контакты применяются в радио, телефонной, телеграфной аппаратуре, электроэнергетических устройствах, прецизионных приборах и т.д. Они делятся на неподвижные (разъёмные и неразъёмные) для длительного соединения и подвижные – для включения на определённое время.

Разъёмные контакты осуществляются зажимами, болтами, винтами и т.п.; неразъёмные – пайкой, сваркой или клепкой.

Подвижные электрические контакты, в свою очередь, делятся на разрывные (в кнопках, переключателях, реле и др.), скользящие (соединение коллектора и щеток в электрическом генераторе и т.п.) и катящиеся (соединение контактных проводов и токосъёмных роликов троллейбуса и др.).

К подвижным контактам относятся также магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы). Простейший геркон (рис. 1.1) представляет собой миниатюрную стеклянную колбу 1, в которую впаяны две плоские контактные пружины 2 из магнитомягкой стали.



**Рис. 1.1.** Модель магнитоуправляемого герметизированного контакта (геркона)

Если геркон поместить в магнитное поле, созданное обмоткой 3 или постоянным магнитом, то пружины намагнитятся и притянутся друг к другу. Произойдёт замыкание контактов и, следовательно, замыкание электрической цепи. После исчезновения магнитного поля контакты вновь разомкнутся за счёт силы упругости пружин. Контактующие поверхности пружин покрывают тонким слоем металла с очень малым удельным электрическим сопротивлением (Ag, Au, Pt). Колбу геркона заполняют инертным газом или вакуумируют. Герконы позволяют производить коммутации в цепях при значениях тока 0,5–1 А.

Малая масса элементов геркона определяет высокое быстродействие этих контактов – время срабатывания составляет 0,5–1,0 мс. Важным свойством герконов является их высокая износостойчивость. Некоторые виды герконов позволяют производить до двух тысяч переключений в секунду и допускают сотни миллионов срабатываний.

Разновидностью герконов являются магнитоуправляемые герметические силовые контакты – герсиконы. Они позволяют производить коммутации в цепях при значениях тока 60, 100, 180 А и напряжении 220–440 В.

Важной характеристикой, определяющей работу контактов, является их электрическое сопротивление. Как известно, оно определяется, в основном, переходным сопротивлением, зависящим от площади контактирования.

Для уменьшения переходного сопротивления стремятся увеличивать силу прижатия контактов. Наличие тока в цепи вызывает их нагрев, который пропорционален переходному сопротивлению. По мере нагревания контактов переходное сопротивление возрастает, что приводит к ещё большему нагреву. Допустимые рабочие температуры контактов, видимо, лежат в пределах 100–120 °С. Следовательно, по мере увеличения номинального тока коммутирующего аппарата переходное сопротивление контактов должно быть снижено, т.е. необходимо повышать контактное нажатие. Кроме того, с ростом коммутируемого тока необходимо увеличивать поверхность охлаждения, т.е. размеры контактирующих поверхностей.

Во всех четырёх состояниях происходит механический износ контактов. Особенно в тяжелых условиях оказывается подвижной контакт при размыкании цепи. Размыкание электрической цепи при значительных токах и напряжениях, как правило, сопровождается электрическим разрядом между расходящимися контактами. При расхождении контактов резко возрастает переходное сопротивление контакта и плотность тока в последней площадке контактирования. Контакты разогреваются до

расплавления, образуется контактный перешеек из расплавленного металла, который при дальнейшем расхождении контактов рвётся, и происходит испарение металла контактов.

Воздушный промежуток между контактами ионизируется и становится проводящим, в нём под действием высокого напряжения, возникающего вследствие законов коммутации, появляется электрическая дуга.

Электрическая дуга способствует разрушению контактов и снижает быстродействие коммутационного аппарата, так как ток в цепи спадает до нуля не мгновенно. Воспрепятствовать появлению дуги можно увеличением расстояния между контактами либо применением специальных мер дугогашения.

Произведение предельных значений напряжения и тока в цепи, при которых электрическая дуга не возникает при минимальном расстоянии между контактами, называется разрывной или коммутируемой мощностью контактов. По мере повышения напряжения в цепи предельный коммутируемый ток приходится ограничивать. Коммутируемая мощность зависит также от  $\tau = L/R$  – постоянной времени цепи: чем больше  $\tau$ , тем меньшую мощность могут коммутировать контакты (здесь  $R$  – сопротивление,  $L$  – индуктивность в системе).

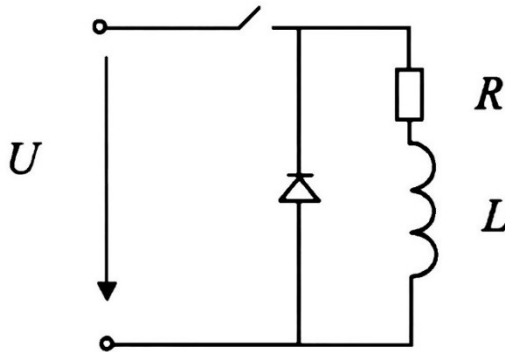
В цепях переменного тока электрическая дуга гаснет в момент, когда мгновенное значение тока равно нулю.

Дуга может вновь появиться в следующий полупериод, если напряжение на контактах возрастает быстрее, чем восстанавливается электрическая прочность промежутка между контактами. Однако, во всех случаях дуга в цепи переменного тока менее устойчива, а разрывная мощность контактов в несколько раз выше, чем в цепи постоянного тока.

На контактах маломощных электрических аппаратов электрическая дуга появляется редко, но часто наблюдается искрение – пробой изоляционного промежутка, образованного при быстром размыкании контактов в слаботочных цепях. Это особенно опасно в чувствительных и быстродействующих аппаратах (реле), в которых расстояние между контактами очень мало. Искрение сокращает срок службы контактов, может привести к ложным срабатываниям. Для уменьшения искрения на контактах применяют специальные устройства искрогашения.

В разделе 1.3 при рассмотрении выключателей высокого напряжения кратко охарактеризованы способы гашения электрической дуги в таких аппаратах. Наиболее эффективным способом гашения электрической дуги является её охлаждение за счёт перемещения в воздухе, в трансформаторном масле, элегазе или путём магнитного дутья. Для

уменьшения искрения на малоомощных контактах постоянного тока применяют включение диода параллельно нагрузочному устройству (рис. 1.2). При этом цепь после коммутации, т.е. после отключения источника, замыкается через диод, таким образом, уменьшается энергия искрообразования.



**Рис. 1.2.** Включение диода для уменьшения искрения

Согласно принятым в России нормам, электрические сети напряжением 6–35 кВ относятся к сетям с малыми токами замыкания на землю и должны работать с изолированной или заземлённой через дугогасящей реактор нейтралью. Опыт эксплуатации показывает, что подавляющее большинство нарушений нормальной работы таких сетей связано с повреждением изоляции относительно земли – с однофазным замыканием на землю. Для благоприятного течения процесса необходимо, чтобы ток в месте повреждения был настолько мал, что было бы обеспечено самогашение или переход в устойчивое состояние горения с малой вероятностью перехода в межфазные повреждения – как наиболее опасные для системы. Такими допустимы токами считаются токи не более 5 А для сетей, содержащих высоковольтные электрические машины.

Одним из источников, создающих перенапряжение в сети, является работающий выключатель. Перенапряжение может возникнуть даже в том случае, если выключатель работает идеально, т.е. замыкание контактов происходит мгновенно (без предпробоев), а размыкание в нуле тока промышленной частоты без повторных зажиганий и гашений дуги.

Однако, в реальных условиях работа выключателя будет отличаться от нормальной, когда возникают следующие явления:

- срез тока до его нулевого значения;
- пробой межконтактного промежутка в процессе включения и отключения;

- гашение дуги высокочастотного тока переходного процесса.

Срез тока – внезапное снижение тока к нулю до его естественного нулевого значения. Это связано с нестабильностью дуговой плазмы, обусловленной высокочастотными колебаниями тока и возможностью восстановления электрической прочности после прерывания тока.

Сам срез тока зависит от многих факторов. В первую очередь, это: величина отключаемого тока, характеристики цепи, сосредоточенная ёмкость параллельно выключателю, момент отделения контактов, конструкция аппарата.

При оптимальном выборе материала контактов в вакуумных и элегазовых выключателях, работающих на среднем напряжении до 35 кВ, срез тока, как правило, не превышает 5 А.

### **1.5. Материалы и конструкции контактов**

В разделе 1.1 отмечалось, что износ контактов наблюдается как при включении, так и при отключении ими электрических цепей постоянного и переменного тока и зависит от следующих основных факторов:

- Условия работы:

- а) вид тока (постоянный или переменный);
- б) величина тока и напряжения;
- в) характер нагрузки (при включении постоянного тока износ тем больше, чем меньше индуктивность нагрузки; во всех других случаях с увеличением индуктивности коммутируемой цепи износ контактов увеличивается);

- г) частота циклов (включений – отключений), если это вызывает чрезмерный нагрев контактов;

- д) среда, в которой происходит коммутация тока контактами.

- Конструктивные параметры аппаратов:

- а) длительность горения дуги на контактах;
- б) время и амплитуда вибрации контактов при включении, которые сильно зависят от начального нажатия на контакты, скорости движения контактов в момент замыкания, массы контактов с контактодержателями, жесткости контактных пружин, ударов магнитной системы;

- в) материал контактов, их размеры, форма, чистота и гладкость контактирующей поверхности и однородность структуры;

- г) величина и направление магнитного поля в зоне гашения дуги;

- д) скорость расхождения контактов при отключении.

Конструирование контактов зависит от формы, размеров и материала контактов, расчёта механической части: контактного усилия,

кинематики и динамики контактов для определения ударов, и вибрации; и электрической части: вольт–амперных характеристик контакта и максимально допустимых величин тока и напряжения в цепи контактов.

Электрический износ контакторов для тяжелого режима работы в 10–20 раз меньше их механической износоустойчивости и при частоте 1200 включений в час требуется частая их замена, что в эксплуатации, в ряде случаев, бывает достаточно сложным.

Разработка новых контакторов и особенно их внедрение занимают много времени, а разработанные новые конструкции контакторов для тяжелого режима работы серий КПВ–600 и КТ–5000 обладают теми же недостатками. Поэтому возникла потребность в создании износоустойчивых контактных систем, требующих при внедрении минимальных конструктивных изменений.

Наиболее простыми решениями могут быть:

- 1) замена материала контактов более износоустойчивыми;
- 2) выбор наиболее рациональной величины магнитного поля в зоне гашения дуги;
- 3) выбор скорости расхождения контактов при отключении.

Для контактов, работающих при малых токах, т.е. когда  $I < I_0$ , применяются драгоценные материалы: Ag, Au, Pt и их сплавы (в частности с иридием) – типа твёрдых растворов.

Известно также, что для контактов, работающих в области токов  $I > I_0$ , наиболее подходящими оказываются твёрдые тугоплавкие материалы и их сплавы – типа твёрдых растворов: серебро + палладий; платина + иридий; вольфрам + молибден; вольфрам + платина + иридий и др.

Для контактов, работающих в области особо высоких токов, перечисленные выше твёрдые тугоплавкие металлы оказываются недостаточно износоустойчивыми – они окисляются, оплавляются, имеют большой износ вследствие испарения, разбрызгивания и обладают способностью свариваться. Для таких контактов рекомендованы материалы, представляющие собой двухфазные системы, так называемые специальные композиции.

Специальные композиции состояются из двух, практически несплавлиющихся между собой, компонентов. Один из компонентов должен обладать хорошей электропроводностью, а второй компонент, электропроводность тока которого имеет второстепенное значение, должен быть механически особо прочным и более тугоплавким, чем первый.

Специальные композиции изготавливаются методами металлокерамики, главным образом путём спекания смеси порошков

исходных металлов (А + Б). Получаемая тесная механическая смесь компонентов А и Б должна представлять собой непрерывные, взаимно переплетающиеся системы, при этом тугоплавкий компонент препятствует свариванию контактов. К тугоплавким обычно относят материалы с температурой плавления выше 1500 °С [платина – 1770 °С, палладий – 1554 °С, сплавы платины с иридием (20 %) – 1780 °С, палладия с иридием (20 %) – 1815 °С и др.].

Особую группу представляют сплавы серебра с легко окисляющимися металлами или композиции с их окисями. При контактировании легко окисляющийся металл образует плёнку, которая защищает сплав от испарения дугой и препятствует свариванию, но одновременно при этом не нарушает электрического контакта при замыкании. Таким свойством обладает, например, кадмий и его окись. В частности, опытным путём было установлено, что окись кадмия при нагреве дугой выделяет значительный объём газов, которые гасят дугу, облегчая тем самым условия работы контактной системы.

Эрозию контактов можно снизить в условиях гибридной коммутации, ограничивающей дугообразование на силовых контактах. В гибридных аппаратах (ГА), построенных на принципе параллельного включения контакта и силовых полупроводниковых приборов, длительность существования дуговой стадии определяется характером переходного процесса из цепи главных контактов в цепь полупроводниковых приборов.

Контакты, предназначенные для частых включений и отключений, выполняются, как правило, в виде сплошного тела, ограниченного сферической, цилиндрической или плоской поверхностью. Сами контакты, служащие для редких включений и отключений, делаются щётчными из пакета пластин. За счёт этого достигается лучшее прилегание и лучшее охлаждение контактов вследствие большой поверхности пластин.

Конструктивно контакты размещаются на плоских (пластинчатых) пружинах из сплавов: фосфористой бронзы (94,7% Cu, 5–8% Sn); нейзильбера (18% Ni, 22% Zn, 60% Cu); хромистой бронзы (0,6–0,8% Cr, остальное Si); кадмиевой бронзы (99% Cu, 1% Cd); латуни (70% Si, 30% Zn); бронзы (99% Cu, 1% Sn) или реже стали.

К материалу пружин и технологии их производства предъявляются высокие требования, так как от постоянства механических свойств пружин зависит возможность работы контактов в течение длительного срока, часто исчисляемого десятками миллионов срабатываний. В табл. 1.1 приведены основные физические параметры для наиболее распространённых материалов для пружин.



Таблица 1.1.

Основные физико–механические свойства материалов для контактных пружин

Материал	Физические свойства		Механические свойства			Предел прочности при нагрузке, $\text{кГ/см}^2$
	Электропроводность, (% от электропроводности чистой меди)	Теплопроводность $\text{Вт/с} \cdot \text{см} \cdot \text{град}$	Предел упругости $\text{кГ/см}^2$	Пределное напряжение разрыва, $\text{кГ/см}^2$	Модуль упругости, $\text{кГ/см}^2 \cdot 10^6$	
Фосфористая бронза	16	0,75–1,0	4720	1200	1,1–1,2	$\pm 1600$
Нейзильбер	6,3	0,25	3600	1200	1,4	$\pm 1600$
Медь	98	3,84–3,92	2200	4000	1,2–1,3	$\pm 1100$
Кадмиевая бронза	85	3,42	2350	5500	1,2–1,3	–
Бронза	50–55	2,08	2350	5500	1,2–1,3	–
Латунь	25	1,29	3150	7000	1,0–1,1	$\pm 1500$
Хромистая бронза	80–85	3,34	2350	5800	1,2	$\pm 2500$
Бериллиевая бронза	23–25	1,04	7500	11500	1,2–1,3	$\pm 3000$

Контактные усилия создаются за счет сил реакции при прогибе пластины. В зависимости от жёсткости пластины для получения одного и того же контактного усилия  $P_k$  необходимы разные величины прогиба  $y$  в месте расположения контакта, а именно

$$P_k = c'y, \quad (1.1)$$

где для прямоугольных пластин

$$c' = \frac{3EJ}{l} \text{ и } J = \frac{\delta h^3}{12}, \quad (1.2)$$

где  $E$  – модуль упругости при изгибе, кг/см<sup>2</sup>;

$h$  – толщина пластин, см;

$J$  – момент инерции;

$l$  – длина пластин, см.

Следует иметь в виду, что после износа контактов на величину  $\Delta y$  контактное усилие будет меньше, а именно

$$P_k = c'(y - \Delta y) \quad (1.3)$$

Наконец, при некотором значении  $\Delta y = \Delta y_0$  значение контактного усилия станет равным  $P_k = P_{k \text{ min}}$ . При этом сопротивление контакта  $R_k$  настолько увеличится, что при рабочем токе  $I$  напряжение на контактах возрастает до значения  $U_k = IR_k \geq U_{k 2}$ , тогда контакты расплавятся и откажут в работе.

Выше показано, что уменьшение упругости пружины, увеличивает рабочий объём контакта. Одновременно увеличивается и притирание поверхностей контактов друг о друга, что очищает поверхности от пыли и пленок окислов или других соединений, кроме того, место контакта и место, где происходит разрыв тока, удаляются друг от друга, радиус плоского контакта не может быть меньше пути притирания контактов, который равен примерно

$$z = ytg\theta = y \frac{P_k l^2}{2EJ} = \frac{3y^2}{2l} = \frac{3}{2l} \left(\frac{P_k}{c}\right)^2; \quad (1.4)$$

$$y = \frac{P_k}{c},$$

где  $y$  – прогиб верхней пружины;

$tg\theta$  – тангенс угла изгиба пружины в точке контакта;

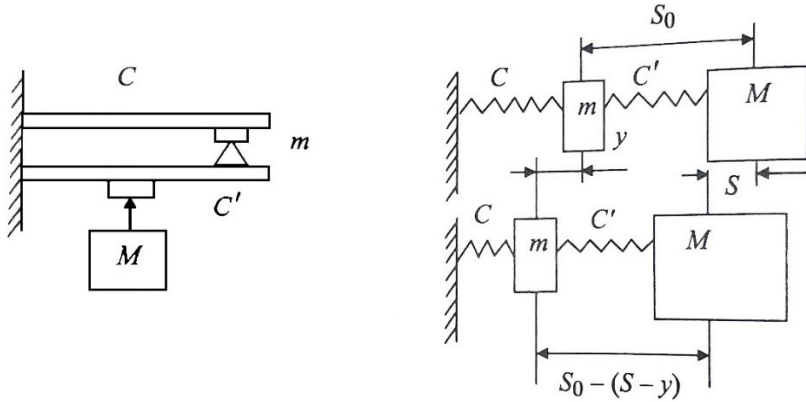
$l$  – длины пружины;

$c$  – жёсткость верхней пружины;

$P_k$  – контактное усилие.

При выборе жёсткости пружины с учитывают тот факт, что существуют механические вибрации при замыкании контактов. Для упрощения можно предположить, что масса  $M$  якоря много больше массы  $m$  верхнего контакта и его пружины, и что можно считать скорость якоря

при ударе неизменной. Эквивалентная схема такой контактной пары представлена на рис. 1.3.



**Рис. 1.3.** Эквивалентная схема контактной пары

Для устранения вибрации контактных пружин при выключении применяют жёсткие упоры, на которые пружина ложится с некоторым усилием, которое обычно называют предварительным натяжением пружины и обозначают  $P_0$ .

Другой типичной конструкцией контакта является укрепление неподвижного контакта на жёстком упоре, а подвижного – на якоре. Условие отсутствия вибраций в этом случае определяется из следующие соображений. Энергия, которой обладает подвижная системы после замыкания контакта, равна

$$W = \frac{mv_0^2}{2} + P_{k0}\delta, \quad (1.5)$$

где  $P_{k0} = P_\delta - P_M$  – статическая сила нажатия в контакте;

$mv_0^2/2$  – кинетическая энергия подвижных частей;

$m$  – масса подвижных частей;

$\delta$  – деформация контактов;

$v_0$  – скорость в момент соприкосновения контактов.

Часть энергии  $W$  теряется из-за внутреннего трения, т.е. потерь при деформации, а остаток, равный  $\mu W$ , где  $\mu$  – коэффициент удара, остаётся и вызывает обратное движение подвижного контакта.

Для того чтобы контакты не размыкались, необходимо, чтобы энергия  $\mu W$  была израсходована на преодоление усилия нажатия  $P_{k0}$ , т.е.

$$\mu \left( \frac{mv^2}{2} + P_{k0}\delta \right) \leq P_{k0}\delta \quad (1.6)$$

Вся энергия  $W$  при  $\mu = \delta$  затрачивается на деформацию контакта, поэтому справедливо равенство

$$W = \int_0^\delta c_0 \mu^{\frac{3}{2}} d\mu = \frac{2}{5} c_0 \delta^{\frac{5}{2}} \quad (1.7)$$

Для предельного положения, при котором контакты еще не начинают расходиться, справедливо следующее уравнение

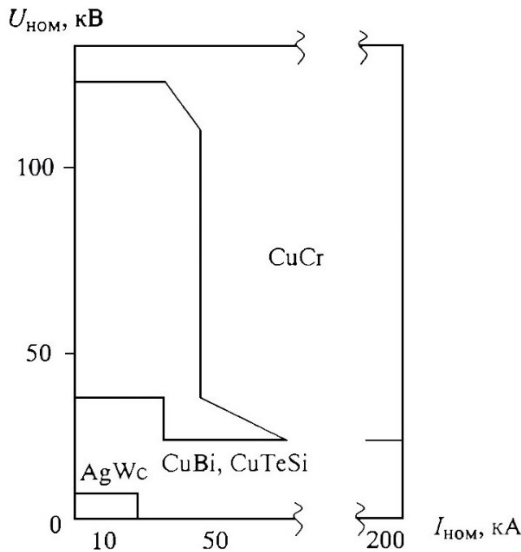
$$\frac{2}{5} \mu c_0 \delta^{\frac{5}{2}} = P_{k_0} \delta \quad (1.8)$$

Тогда итоговое значение

$$P_{k_0} = 0,7 \frac{\mu}{(1-\mu)^{\frac{3}{5}}} c_0^{\frac{2}{5}} \left( \frac{mv^2}{2} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (1.9)$$

Для серебра  $\mu = 0,2 - 0,3$ .

Представлялось интересным рассмотреть фактическое использование контактного материала в современных аппаратах, например, в вакуумных электрических выключателях. На рис. 1.4 представлены контактные материалы, используемые в современных выключателях типа *ЗАН* и *НХСТ* фирмой *Siemens*.



**Рис. 1.4.** Контактные материалы, используемые в *Siemens*

Каждый контактный материал имеет свои положительные стороны и подходит для определённых коммутационных задач и номинальных параметров.

Кроме контактных материалов для разных номинальных параметров очень важную роль играет сама структура контактной системы вакуумного выключателя. Например, для коммутации токов до 40 кА рекомендуется использование, так называемой, «радиально–магнитной контактной системы» (RMF–radial magnetic field electrode). Как показано на рис. 1.4, для изготовления контактов используются в основном три разных композиции материалов, каждую из которых рекомендуется применять для определённых коммутационных задач и номинальных параметров.

Сплав CuCr применяется для коммутации на более высоких напряжениях (до 145 кВ); сплавы CuTeSi и CuBi работают на средних напряжениях (до 24 кВ) и при высоких отключаемых токах (до 200 кА); AgWC рекомендован для низких напряжений (до 7,2 кВ).

В настоящее время более 90% рынка коммутационной техники среднего напряжения составляют коммутационные аппараты с номинальными токами отключения до 63 кА, из них около 80% – до 25 кА. В связи с этим наибольшее практическое применение нашёл контактный материал CuCr. Следует отметить, что контактный материал CuCr, в отличие от других материалов по параметрам: отключающей способности и восстановлению диэлектрической прочности промежутка между контактами; устойчивости к эрозии; току среза при его переходе через нуль и переходному сопротивлению контактов в течение срока службы на порядок превосходит другие контактные материалы.

Также можно улучшить отдельные коммутационные характеристики за счёт добавления достаточно малых примесей: например, добавка Te (0,1–4 %) уменьшает эрозию поверхности контактов, добавка Bi (2,5–15 %) снижает токи среза, а при добавке C (0,18–1,8 %) снижается содержание кислорода в металле. Для улучшения ряда других коммутационных характеристик фирмой Siemens рекомендованы добавки W, Si, Ti, Zr, Sb.

С начала 70–х гг. – до 1980 г. только фирмы *Siemens* и *Mitsubishi* использовали CuCr как контактный материал для серийного производства.

После 1992 г. CuCr стал основным материалом в производстве контактов вакуумных выключателей среднего напряжения. Однако известно, что при использовании CuCr для изготовления контактов при коммутации малых индуктивных токов, в ряде случаев, могут возникать опасные перенапряжения из–за повторных зажиганий при отключении. В основном, опасные перенапряжения возникают при отключении пусковых токов менее чем 600 А небольших двигателей при моменте начала расхождения контактов за 0,5–0,1 мс до перехода тока через нуль. Для таких случаев фирмой Siemens разработано руководство по защите

изоляции при эксплуатации вакуумных выключателей, где приводятся надёжные схемы защиты от перенапряжений, в основном с использованием ограничителей перенапряжений (реакторы и т.п.).

Проблему опасных перенапряжений, как указано в разделе 1.1, при коммутации малых токов с успехом также решают применяемые для этой цели отдельные сплавы контактного материала AgW или AgWC.

На рис. 1.5 представлена частота появления перенапряжений при коммутации электродвигателей вакуумными выключателями с разными контактными материалами.



**Рис. 1.5.** Частота появления перенапряжений при коммутации двигателей вакуумными выключателями с различными материалами контактов

Например, фирма *Toshiba* в настоящее время производит вакуумные выключатели специально для коммутации малых электродвигателей на основе контактных материалов AgWC. Такие вакуумные выключатели имеют номинальные параметры напряжения и тока до 7,2 кВ и 1200 А – 40 кА соответственно.

Для коммутации силовых цепей мощных генераторов, конденсаторных батарей, шунтирующих реакторов и др. современные производители выпускают мощные вакуумные силовые выключатели. Например, фирмой *Toshiba* в настоящее время производятся выключатели с номинальной отключающей способностью 100 кА на номинальное напряжение 13,8 кВ и с номинальным током 3000 А. Номинальное число коммутационных циклов этого выключателя составляет 20000. Фирмой *Siemens* с 1996 г. в производство запущены вакуумные генераторные выключатели с номинальной отключающей способностью 80 кА, на номинальное напряжение 17,5 кВ и с номинальным током 12000 А.

## 2. ПЕРЕХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

### 2.1. Контактное сопротивление и определяющие его факторы

Большинство исследователей считают, что основными механизмами проводимости контактов являются омическая проводимость и проводимость посредством «туннельного эффекта».

Омическая проводимость соответствует, как известно, случаю металлического контакта, а проводимость посредством «туннельного эффекта» – «квазиметаллического» контакта, при котором контактные поверхности разделены тонкой плёнкой (порядка нескольких ангстрем), которую электроны сравнительно легко преодолевают посредством туннельного эффекта.

Как известно, по вопросу природы переходного сопротивления металлического контакта обсуждались две основные теории: Хольма Р., трактующая переходное сопротивление как сопротивление стягивания, и Чельчина В., трактующая переходное сопротивление – как сопротивление микровыступов.

Ученые Бабаев А.Я., Усов В.В. и Займовский А.С. в работах «Основы электроаппаратостроения» и «Проводниковые, расчётные и контактные материалы» исследовали обе теории, которые приводят к совершенно различным расчётным соотношениям, характеризующим природу переходного сопротивления контакта с различных сторон. При этом, объединение обеих теорий дает полное представление о природе переходного сопротивления контактов.

Ученые Савченко В.С., Фокин Ю.А., Рюденберг Р. и Алиев Р.С. в работах «Уравнение переходного сопротивления электрических контактов», «Структурно–функциональная надёжность электроэнергетических систем и их объектов. Проблемы комплексной оценки» и «Переходные процессы в электроэнергетических аппаратах» в соответствии с приведёнными выше положениями проводимость электрического контакта представили как сумму проводимостей контактных пятен

$$\frac{1}{R_{\text{пер}}} = \sum_{i=1}^{n_K} \frac{1}{R_{1 \text{ стяг } i} + R_{1 \text{ выст } i} + R_{\text{пл } i} + R_{2 \text{ выст } i} + R_{2 \text{ стяг } i}} \quad (2.1)$$

Где  $R_{1 \text{ стяг } i}$ ,  $R_{2 \text{ стяг } i}$  – сопротивления стягивания  $i$ –го контактного пятна в 1–ом и 2–ом контактных элементах;

$R_{1 \text{ выст } i}$ ,  $R_{2 \text{ выст } i}$  – сопротивления микровыступа, образующего  $i$ –е контактное пятно в 1–ом и 2–ом контактных элементах;

$R_{пл\ i}$  – сопротивление плёнки, разделяющей обе контактные поверхности  $i$ -го контактного пятна;

$n_k$  – количество контактируемых микровыступов.

Выше отмечалось, что сопротивление стягивания обусловлено неравномерным распределением плотности тока по сечению контакта благодаря стягиванию линий тока к контактному пятну, увеличивающему градиент напряжения в области стягивания линий тока.

При отсутствии микронеровностей контакта на поверхностях внутри контактирующих электродов выступают полуэллипсоиды, описываемые уравнением вида

$$\frac{x^2}{\alpha^2 + \mu} + \frac{y^2}{\beta^2 + \mu} + \frac{z^2}{\mu} = 1, \quad (2.2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – полуоси эллипса, представляющего проводящее контактное пятно;

$\mu$  – параметр, характеризующий длину области стягивания.

В соответствии с выражением (2.2) сопротивление стягивания одноточечного контакта равно

$$R_{стяг\ i} = \frac{\rho}{2\pi a} f(\gamma) \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\mu}}{a}, \quad (2.3)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление металла контактов;

$a$  – радиус круга площадью  $\pi a^2 = \pi \alpha \beta$ , т.е. радиус контактного пятна круглой формы;

$f(\gamma)$  – коэффициент формы, характеризующий уменьшение сопротивления стягивания при отклонении формы контактного пятна от круглой.

При  $\gamma = (\alpha / \beta = (\infty/a) \rightarrow 1$  и  $\mu \rightarrow \infty$ , что соответствует случаю, когда форма контактного пятна близка к круглой, а расстояние между контактными пятнами намного больше радиуса контактного пятна, уравнение (2.3) можно представить в виде

$$R_{стяг\ i} = \frac{\rho}{4a} \quad (2.4)$$

По данным работы удельное туннельное сопротивление можно определить

$$\sigma_{тун} = \frac{10^{-22} A^2 l^{AB}}{2(1+AB)} \text{ при } U \rightarrow 0 \quad (2.5)$$

где  $A = 7,23 - 10^5 (S - 7,2/\Phi)$ ;  $B = 1,265 - 10^{-6} \sqrt{\Phi - 10/\epsilon_\mu S}$ .

Здесь:

$S$  – толщина плёнки;

$\epsilon_\mu$  – диэлектрическая проницаемость материала плёнки;

$\Phi$  – работа выхода из металла.

Сопротивление плёнки определяется



$$R_{\text{пл}} = \frac{\sigma_{\text{тун}}}{A_{\text{эфф}}}, \quad (2.6)$$

где  $A_{\text{эфф}}$  – эффективная поверхность контактного пятна.

Савченко В.С. в работе «Уравнение переходного сопротивления электрических контактов» отмечает, что согласно расчётам по формулам (2.5) и (2.6) величина сопротивления плёнок достаточно велика. Однако, на практике при контактных усилиях (50–200 г) переходное сопротивление контактов с ярко выраженными плёнками на поверхностях не превышает десятых долей Ома. Последнее заставляет предполагать, что подавляющая часть электрического тока проходит через участки с металлическим контактом, т.е. указанные выше контактные усилия достаточны для локального разрушения плёнок. Это предположение подтверждается линейностью динамических вольтамперных характеристик контактов при данных условиях, которые измерялись по схеме, предложенной Радкевичем С.Д. в работе «Метод оценки механизма электропроводности тонких металлических плёнок и порошков», при коэффициенте усиления, равным 5000.

Часто на практике встречается упругое контактирование, на основании проведённых исследований уравнение переходного процесса для практических расчётов

$$R_{\text{пер}} = \frac{0,15\sqrt{\pi}prE^{\frac{1}{2}}h_m^6}{(\sqrt{2r-h_m}-\sqrt{h_m})(1-\mu^2)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{1}{N} \quad (2.7)$$

Здесь:

$E$  – модуль Юнга;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

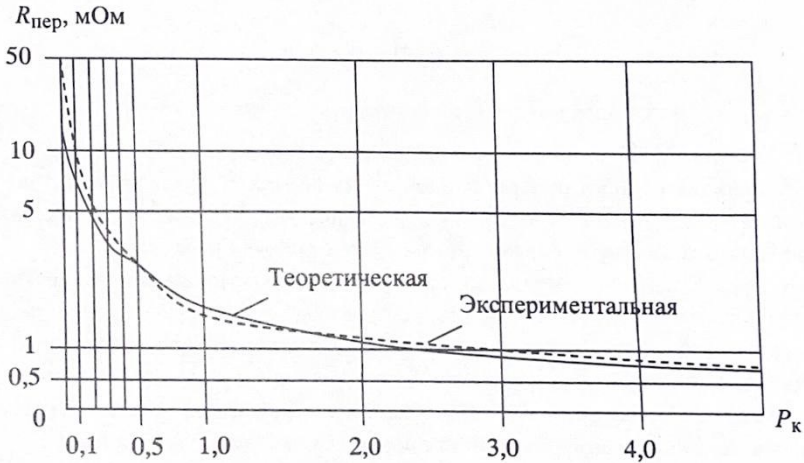
$h_m$  – максимальное значение высоты выступов;

$N$  – нагрузка, необходимая для обеспечения деформации выступа;

$r$  – радиус закругления микровыступов.

В соответствии с уравнением (2.7) для обеспечения малых значений переходного сопротивления необходимо иметь материал контактов с малым удельным сопротивлением и низкой твёрдостью, грубую чистоту обработки контактных поверхностей и большое контактное давление.

На рис. 2.1 приведены зависимости переходного сопротивления от контактного усилия, полученные на основании расчётов по формуле (2.7) и экспериментальным путём – методом амперметра-вольтметра.



**Рис. 2.1.** Зависимость переходного сопротивления от контактного усилия

Приведённое уравнение переходного сопротивления применимо при следующих условиях: плёнки на контактных поверхностях отсутствуют; характер контактирования – упругий и контактные поверхности имеют не слишком грубую чистоту обработки.

В разделе 1.5 рассмотрены материалы и конструкции контактов без учёта влияния переходных сопротивлений при различных составах сплавов. Однако, при подборе материалов контактных пар переключающих устройств в качестве исходных параметров, кроме прочности, твёрдости рекомендуется задаваться значениями удельного и переходного сопротивлений.

Переходное сопротивление является свойством, зависящим от характера физико-химического взаимодействия между исходными компонентами сплавов. В сплавах на медной основе минимальными контактными сопротивлениями обладают двухфазные сплавы эвтектической системы и упорядоченные фазы.

Необходимо отметить, что низковольтное аппаратостроение в последнее время начинает довольно интенсивно развиваться. Непрерывно совершенствуются и разрабатываются коммутационные аппараты, появляются новые направления, основанные на использовании нетрадиционных принципов действия. Становятся всё более разнообразными области применения низковольтных аппаратов и ужесточаются требования к ним. Вместе с тем, не все технические параметры аппаратов могут быть приведены в паспортных данных. В

частности, не всегда указывается сопротивление их силовой цепи, нет также требований и ГОСТ на сопротивления электрических аппаратов.

Поскольку в справочной литературе практически отсутствует информация о сопротивлениях большинства коммутационных аппаратов, а имеющиеся данные носят весьма приближенный характер, возникает необходимость исследования законов изменения сопротивлений их контактных соединений.

Энергия, потребляемая собственно аппаратом при его функционировании и рассеиваемая в нём, должна быть минимальной. Для осуществления расчёта значений сопротивлений контактных соединений приняты нижеследующие соотношения.

Покажем:

- установленное значение температуры контакта из условия равенства между выделенной в контакте и отводимой с его поверхности тепловой энергией

$$v = \frac{I^2 \cdot \rho_0 + v_{\text{окр}} \cdot R_T \cdot F \cdot S}{R_T \cdot F \cdot S - I^2 \cdot \rho_0 \cdot \alpha}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (2.8)$$

- эмпирическое значение контактного сопротивления при температуре на границе области стягивания

$$R_K = R_{R.O.} \left( 1 + \frac{2}{3} \alpha \cdot v \right), \text{ Ом}; \quad (2.9)$$

- перепад температуры контакта на границе области стягивания над температурой окружающей среды

$$\theta_K = \frac{I^2 \cdot R_K}{2 \sqrt{\lambda \cdot R_T \cdot F \cdot S}} + \frac{I^2 \cdot R}{R_T \cdot F}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (2.10)$$

- температура на границе зоны стягивания, т.е. температура тела контакта

$$v_m = \theta_K + v_{\text{окр}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (2.11)$$

- температура фактической площадки касания

$$v_a = v_m \sqrt{1 + tg^2 \frac{I}{4a} \sqrt{\frac{\lambda \cdot \rho_0}{a}}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (2.12)$$

- зависимость расчётного сопротивления контактного соединения от температуры фактической площадки касания

$$R = R_K \left[ 1 + \frac{2}{3} \alpha (v_a - v_m) \right], \text{ Ом}; \quad (2.13)$$

где  $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{ м}$  – удельное сопротивление контактов при  $^\circ\text{C}$ ;

$\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  – температурный коэффициент сопротивления;

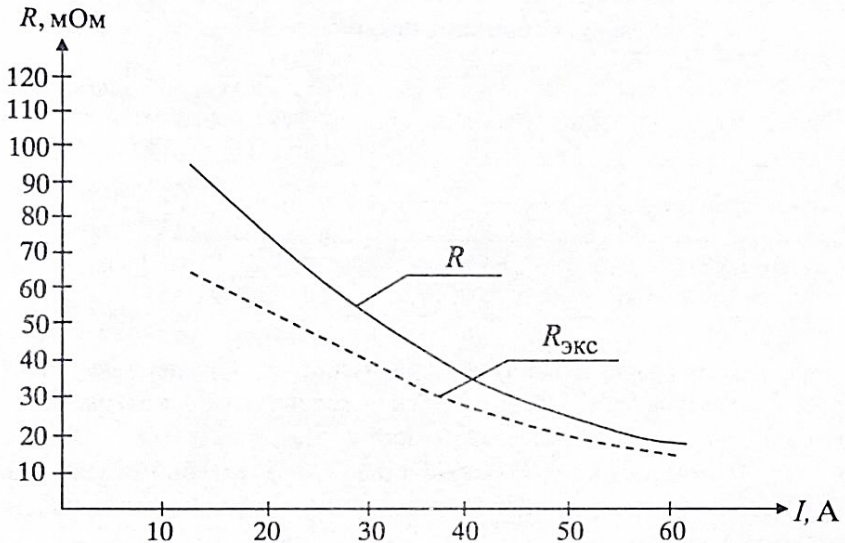
$I$  – ток через контакт, А;

$S$  – площадь контурной площадки касания,  $\text{ м}^2$ ;

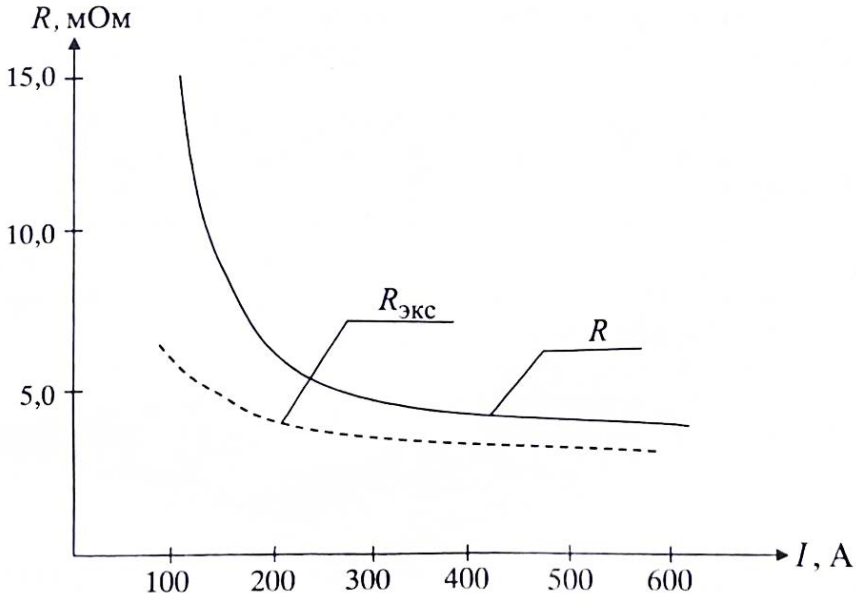
$a$  – радиус фактической площадки касания, м;

$F$  – охлаждающая поверхность единицы длины проводника,  $\text{м}^2$ ;  
 $\lambda = 390 \text{ Вт/ (м} \cdot \text{К)}$  – теплопроводность материала проводника;  
 $R = g_0 (1 + \alpha \cdot \nu) / S$  – сопротивление единицы длины проводника, Ом;  
 $R_{\text{R.O.}}$  – сопротивление контактного соединения аппарата, мОм;  
 $\nu$  – температура контакта в зоне стягивания,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $R_T$  – коэффициент теплоотдачи единицы длины.

Рисунки 2.2, 2.3 показывают расчётные и экспериментальные зависимости сопротивления контактного соединения от величины тока, протекающего через контакт коммутационного аппарата (табл. 2.1), полученные в работе «Расчет сопротивления стягивания контактных соединений» Грачевой Е.И. и Наумова О.В.



**Рис. 2.2.** Расчётные и экспериментальные зависимости сопротивления контактного соединения от величины тока (автоматический выключатель ВА57, контактор КТИ)



**Рис. 2.3.** Расчётные и экспериментальные зависимости сопротивления контактного соединения от величины тока (магнитный пускатель ПМЛ)

**Таблица 2.1.**

Аналитические выражения для определения сопротивлений коммутационных аппаратов

Аппараты	Номинальный ток $I_{\text{НОМ}}$ , А	Аналитическая зависимость сопротивления от номинального тока
Магнитные пускатели	$< 70$	$R=825 / I_{\text{НОМ}}$
	$\geq 70$	$R=760 / I_{\text{НОМ}}$
Автоматические выключатели и контакторы	$< 60$	$R=349 / I_{\text{НОМ}}$
	$\geq 70$	$R=307 / I_{\text{НОМ}}$

В результате сравнительного анализа расчётных и экспериментальных значений сопротивлений контактных соединений низковольтных аппаратов получены следующие зависимости:

– для автоматических выключателей характерно небольшое расхождение в экспериментальных и расчётных оценках сопротивления контактного соединения;

– для магнитных пускателей наибольшее совпадение экспериментальных и расчётных оценок сопротивлений контактных соединений наблюдается в диапазоне токов свыше 50 А;

– для контакторов наибольшее совпадение экспериментальных и расчётных сопротивлений контактных соединений характерно для токов свыше 500 А.

Сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов в режиме эксплуатации изменяются в десятки – сотни раз, поэтому можно считать пригодным для инженерных расчётов использование выражения (2.7), так как результаты, полученные с его помощью, сопоставимы с экспериментальными данными. Проведённые исследования позволяют учитывать техническое состояние коммутационной аппаратуры и уточнять величину энергии, выделяющуюся в аппарате в режиме эксплуатации электрической сети.

Зависимости величины температуры площадки касания, сопротивления стягивания контактных соединений в зависимости от радиуса фактической площади касания контактной поверхности и тока коммутационного аппарата позволяют более точно рассчитать величину сопротивления контактного соединения аппарата. Известно, что нормальная работа коммутационного устройства существенно зависит от сопротивления стягивания. Последнее определяет нагрев электродов, надёжность контактирования, срок службы и стоимость коммутационной аппаратуры.

Упругий контакт в процессе контактирования имеет место при повторном нагружении любых поверхностей силой, не превышающей первоначально приложенную, так как в этом случае за счёт упрочнения поверхностного слоя уменьшается глубина внедрения при первом нагружении поверхностей с высокой чистотой обработки, а также при скольжении приработанных поверхностей. Поэтому упругий контакт можно считать преобладающим.

Следует отметить, что при рассмотрении соотношения между площадями касания при скольжении и в покое необходимо учитывать, что в начале процесса трения происходит приработка поверхностей, меняющая их геометрию, тогда как для приработанных поверхностей геометрия сохраняется неизменной.

Поэтому при скольжении необходимо различать два этапа:

1) скольжение неприработанных поверхностей, когда в процессе трения меняется микрогеометрия;

2) скольжение приработанных поверхностей, когда микрогеометрия не изменяется.

В первом случае, площадь контакта изменяется до тех пор, пока не установится шероховатость, типичная для данных условий трения.

При этом изменение фактической площади касания объясняется не только изменением напряженного состояния, но и изменением температуры, характером разрушения микронеровностей.

Во втором случае микрогеометрия установилась, и изменение площади касания может происходить только при сдвиге на расстояние, равное диаметру пятна касания. После этого одиночный контакт разрушается, и процесс разрушения контактов повторяется.

Для выявления зависимости сопротивления стягивания и температуры от радиуса площадки касания были проведены исследования контактных поверхностей автоматических выключателей марок ВА04, ВА51, магнитных пускателей марок ПМЛ и КМИ с различными номинальными токами.

Одним из критериев характера контактирования является радиус площадки касания контактов. Определим установившееся значение температуры контакта, выделенной в контакте и отводимой с его поверхности тепловыми мощностями, по уравнению (2.8), контактное сопротивление при температуре на границе области стягивания по зависимости (2.9), перепад температуры контакта (на границе области стягивания) над температурой окружающей среды по формуле (2.10) и температуру фактической площадки касания по равенству (2.11). Тогда сопротивление стягивания контактного соединения будет определяться

$$R_c = \frac{\rho_0}{2a} (1 + \alpha v_m) \frac{\sqrt{\left(\frac{1+\alpha v_a}{1+\alpha v_m}\right)^2 - 1}}{\arctg \sqrt{\left(\frac{1+\alpha v_a}{1+\alpha v_m}\right)^2 - 1}}, \text{ Ом} \quad (2.12)$$

где  $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{ м}$  – удельное сопротивление контактов при  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha = 0,0043 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  – температурный коэффициент сопротивления;

$a_m$  – радиус фактической площади касания, м;

$v$  – температура контакта в зоне стягивания,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$v_a$  – температура фактической площадки касания,  $^{\circ}\text{C}$ .

Так как в вышеуказанные выражения входят величины  $a$  и  $S$ , измеряемые экспериментально, неизбежна погрешность в их определении.

В процессе эксплуатации контактные соединения низковольтных коммутационных аппаратов подвергаются механическим и химическим воздействиям, что ведёт к увеличению их переходного сопротивления и, как следствие, под действием тока нагрузки к перегреву и впоследствии – к разрушению. Скорость развития дефектов зависит от конструкции контактного соединения, его расположения и интенсивности внешних воздействий. Промежуток времени между возникновением дефекта и

аварийным выходом контактного соединения из строя составляет от нескольких месяцев до нескольких лет. Основной контроль за контакторами – это измерение переходного сопротивления постоянному току. Сопротивление контактов измеряют микрометром типа М–246. Методом амперметра–вольтметра сопротивление измеряется косвенно. Широко распространен метод одинарного моста (мост Уинстона) или двойного моста (моста Томсона).

Перед измерением переходного сопротивления контактов коммутационных аппаратов производится их включение и отключение не менее чем 5 раз. При этом поверхности контактов самоочищаются и их переходное сопротивление уменьшается. Сопротивление постоянному току контактной системы коммутационных аппаратов измеряется у всех фаз.

Ранее в энергетике для контроля контактных соединений и токоведущих частей использовались электротермометры, термосвечи, термоплёнки и термоуказатели. В настоящее время для этих целей применяются тепловизоры. С применением тепловизоров процесс оценки теплового состояния контактов и токоведущих частей значительно упростился. Появилась возможность не только измерять температуру отдельных точек, но и наблюдать тепловые режимы электроустановок, что дает возможность оценить их работу, а при обнаружении дефекта найти источник выделения тепла. Более подробно об этом описано в главе 4.

Количество тепла, выделяющееся на дефектном контакте, зависит от квадрата, протекающего через него тока, переходного сопротивления и времени. Тепловая энергия, выделяющееся при протекании тока через переходное сопротивление контакта, в виде теплового излучения передаётся окружающей среде, на сопряженные токоведущие части и изолирующие устройства. Температура контактных соединений зависит от многих факторов, в том числе от площади их поверхностей, коэффициентов теплопередачи сопряженных токоведущих частей, параметров окружающей среды (температуры). В ГОСТ в качестве основного критерия исправности контактных соединений коммутационных аппаратов принята предельная температура их нагрева (превышение температуры нагрева над температурой окружающей среды при номинальном токе  $I_{ном}$ ). Эти два критерия исправности аппарата равнозначны, так как нагрев контактных соединений происходит до указанных температур за счёт протекания тока нагрузки  $I_n = I_{ном}$  и выделения в сопротивлении аппарата  $R_a$  энергии, мощность источника которого  $P = I_{ном}^2 R_a$  пропорциональна сопротивлению токоведущей системы.



В качестве критерия оценки состояния контактов коммутационных аппаратов приемлемым, как указывалось, является превышение нагретой части контакта над температурой окружающей среды.

По значениям тока нагрузки и номинального тока аппарата  $I_{\text{ном}}$  вычисляется расчётное превышение температуры

$$t_{\text{рас}} = t_{\text{ном}} \left( \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (2.13)$$

где  $t_{\text{ном}}$  – нормируемое значение превышения температуры нагрев для контролируемого объекта.

Расчётное значение сопротивления контактов коммутационных аппаратов при нормальной температуре пересчёта вычисляем по выражению

$$R_{\text{норм}} = R_{\text{изм}} \frac{K+t_{\text{норм}}}{K+t_{\text{изм}}}, \quad (2.14)$$

где  $R_{\text{изм}}$  – измеренное значение сопротивления при температуре  $t_{\text{изм}}$ , мОм;

$K$  – коэффициент для меди, равный 235;

$t_{\text{норм}}$  – температура при нормальных условиях среды, равная 40 °С;

$t_{\text{изм}}$  – температура окружающей среды, при которой проводилось измерение сопротивления  $R_{\text{изм}}$  °С.

Электрическое сопротивление контактов определяется по выражению

$$R = R_{\text{ном}} + a \cdot t_{\text{норм}} \cdot K_3^2, \quad (2.15)$$

где  $a$  – температурный коэффициент, зависит от материала проводника;

$K_3$  – коэффициент загрузки, коммутационного аппарата;

$R_{\text{ном}}$  – номинальное сопротивление контактных соединений коммутационного аппарата.

Для магнитного пускателя марки ПМЛ исходными данными для расчётов приняты:  $R_{\text{ном}} = 275$  мОм;  $t_{\text{ном}} = 40$  °С.

В ходе расчётов определяем сопротивление контактов  $R_{\text{изм}}$  при температуре окружающей среды  $t_{\text{изм}} = 5$  °С по выражению (2.14)

$$R_{\text{изм}} = \frac{R_{\text{ном}}(K + t_{\text{изм}})}{(K + t_{\text{норм}})} = \frac{275(235 + 5)}{235 + 40} = 240 \text{ мОм};$$

Сопротивление контактов при других значениях температуры окружающей среды определяем аналогично.

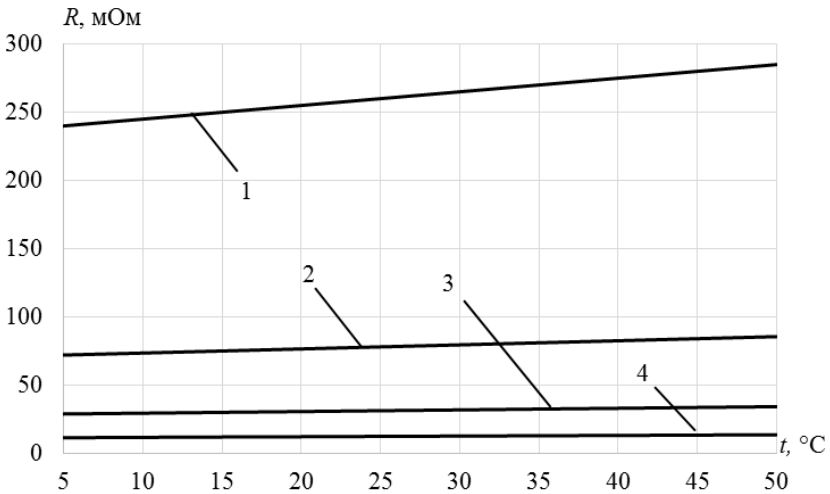
Для исследования зависимости сопротивлений от загрузки определяем сопротивление контактов при  $K_3 = 0,1$  по выражению (2.15)

$$R = R_{\text{ном}} + a \cdot t_{\text{норм}} \cdot K_3^2 = 275 + 0,0043 \cdot 40 \cdot 0,1^2 = 227 \text{ мОм}.$$

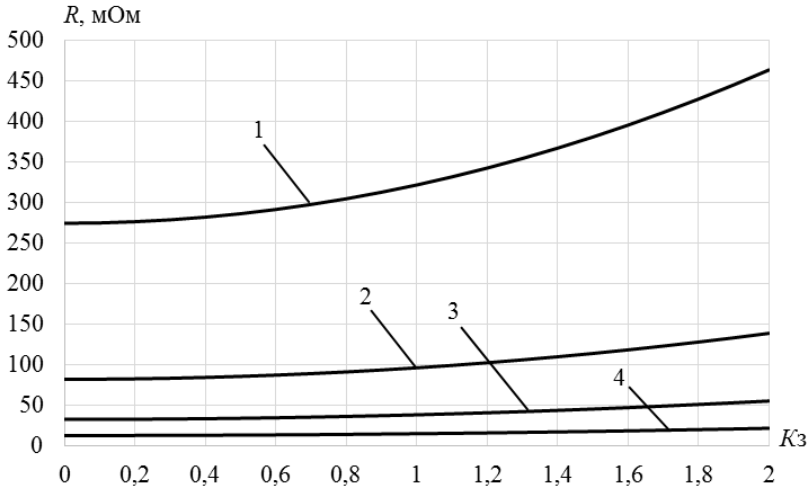
Сопротивление контактов магнитного пускателя при других значениях коэффициента загрузки определяется по аналогии.

Аналогично произведён расчёт для магнитных пускателей ПМЛ и КМИ, имеющих следующее номинальное сопротивление контактов: 82,5; 33; 13,1 мОм; а также для автоматических выключателей ВА57 и ВА51, имеющих номинальное сопротивление 34,9; 27,9; 17,5 мОм.

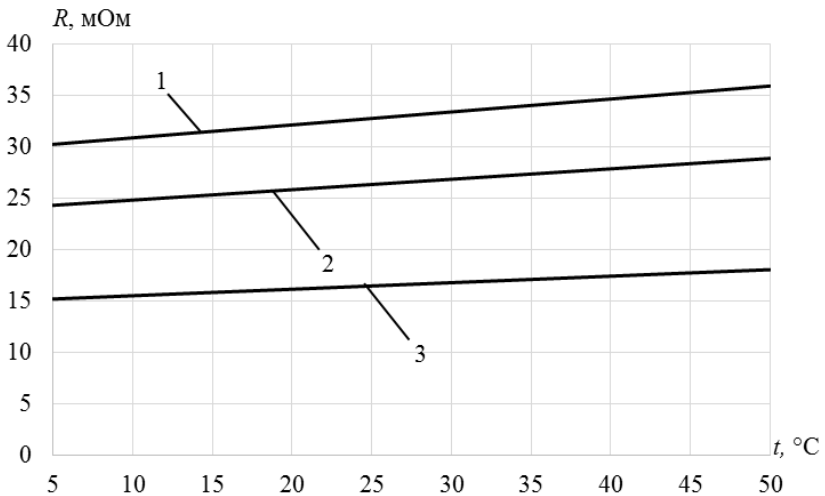
Графики зависимости сопротивления контактов коммутационных аппаратов от температуры окружающей среды и коэффициента загрузки представлены на рис. 2.4–2.7.



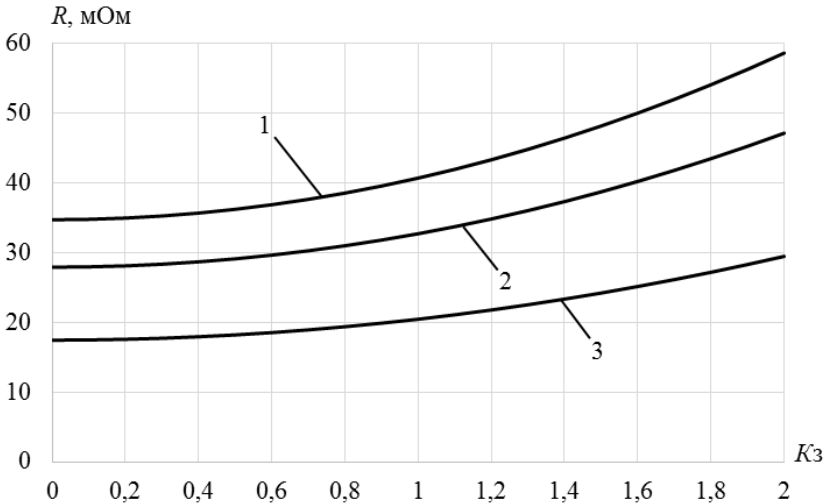
**Рис. 2.4.** Зависимость сопротивления контактного соединения магнитных пускателей от температуры окружающей среды: 1 – ПМЛ ( $R_{\text{ном}} = 275$  мОм); 2 – ПМЛ ( $R_{\text{ном}} = 82,5$  мОм); 3 – КМИ ( $R_{\text{ном}} = 33$  мОм); 4 – КМИ ( $R_{\text{ном}} = 13,1$  мОм)



**Рис. 2.5.** Зависимость сопротивления контактного соединения магнитных пускателей от загрузки: 1 – ПМЛ ( $R_{\text{ном}} = 275$  мОм); 2 – ПМЛ ( $R_{\text{ном}} = 82,5$  мОм); 3 – КМИ ( $R_{\text{ном}} = 33$  мОм); 4 – КМИ ( $R_{\text{ном}} = 13,1$  мОм)



**Рис. 2.6.** Зависимость сопротивления контактного соединения автоматических выключателей от температуры окружающей среды: 1 – ВА57 ( $R_{\text{ном}} = 34,7$  мОм); 2 – ВА57 ( $R_{\text{ном}} = 27,9$  мОм); 3 – ВА51 ( $R_{\text{ном}} = 17,45$  мОм)



**Рис. 2.7.** Зависимость сопротивления контактного соединения автоматических выключателей от коэффициента загрузки: 1 – ВА57 ( $R_{ном} = 34,7$  МОм); 2 – ВА57 ( $R_{ном} = 27,9$  мм); 3 – ВА51 ( $R_{ном} = 17,45$  МОм)

Таким образом, графики на рис. 2.4, 2.6 показывают незначительное увеличение сопротивления контактов магнитных пускателей и автоматических выключателей при изменении температуры окружающей среды от 10 до 40 °С. Зависимости, приведённые на рис. 2.5, 2.7, иллюстрируют увеличение сопротивления контактов магнитных пускателей и автоматических выключателей при изменении коэффициента загрузки аппарата от 0,1 до 2,0.

## 2.2. Прогнозирование изменения сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов методом регрессионного анализа

Предсказанию развития случайного процесса, отражающего функционирование какой-либо сложной системы, должна предшествовать статистическая обработка результатов эксперимента с целью построения поля корреляции. Используя затем поле корреляции, можно найти эмпирическую регрессию, т.е. установить количественную связь между характеристиками процесса.

Следующим этапом является аппроксимация предельной эмпирической кривой регрессии.

Простейшей формой аппроксимации этой кривой будет линейная регрессия

$$y = \alpha + \beta x. \quad (2.16)$$

Изменение величины  $y$  связано с некоторым изменением параметра  $x$ , но не зависит от того, какое количество «параметра  $x$  уже накопилось».

Используя принцип наименьших квадратов, легко составить нормальное уравнение линейной регрессии

$$\begin{cases} \sum y_i - \sum(\alpha + \beta x_i) = 0; \\ \sum y_i x_i - \sum(\alpha + \beta x_i)x_i = 0. \end{cases} \quad (2.17)$$

После преобразований приводим систему к виду

$$\begin{cases} m\alpha + \beta \sum x_i = \sum y_i; \\ \alpha \sum x_i + \beta \sum x_i^2 = \sum y_i x_i. \end{cases} \quad (2.18)$$

Здесь  $\beta$  – коэффициент регрессии; его легко найти с помощью определителей

$$\beta = \frac{m \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}. \quad (2.19)$$

Число  $\alpha$  – свободный член регрессии, его легко выразить из первого уравнения через найденное значение  $\beta$ :

$$\alpha = \frac{\sum y_i - \beta \sum x_i}{m}. \quad (2.20)$$

Полученные формулы полностью определяют линейную регрессию по заданной выборке.

Равенство (2.17) для свободного члена регрессии можно переписать в виде

$$\alpha = \frac{1}{m} \sum y_i - \beta \frac{1}{m} \sum x_i = \bar{y} - \beta \bar{x}, \quad (2.21)$$

откуда  $\bar{y} = \alpha + \beta \bar{x}$ .

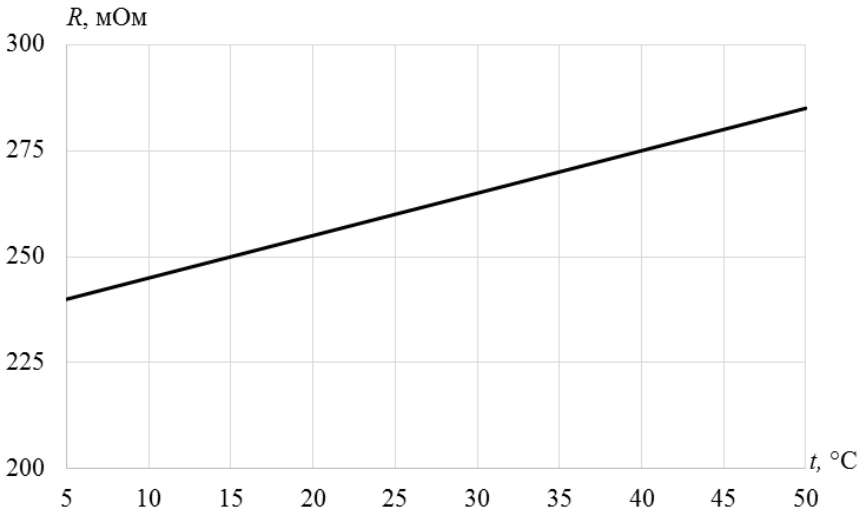
Получим, что средняя точка  $(\bar{x}, \bar{y})$  совместного распределения изучаемых величин всегда лежит на линии регрессии.

Отсюда вытекает, что для определения линии регрессии достаточно знать лишь её угловой коэффициент  $\beta$ .

Тот факт, что исследуемая зависимость предполагается линейной, позволяет использовать для оценки силы связи выборочной коэффициент реляции  $r$

$$r = \beta \sqrt{\frac{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{m \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (2.22)$$

Из уравнения хорошо видна роль коэффициента корреляции: чем меньше  $r$ , тем ближе линия регрессии к горизонтальному положению. Исходной для расчёта является зависимость сопротивлений контактных соединений магнитного пускателя ПМЛ с  $I_{\text{ном}} = 16$  А от температуры окружающей среды (рис. 2.8, табл. 2.2).



**Рис. 2.8.** Зависимость сопротивления контактных соединений магнитного пускателя ПМЛ от температуры окружающей среды

**Таблица 2.2.**

Зависимость сопротивления контактных соединений магнитного пускателя ПМЛ от температуры окружающей среды

t, °C	5	10	15	20	25	30	35	40	45
R, мОм	240	245	250	255	260	265	270	275	280

Расчет проводим в следующем порядке:

- Принимаем, что  $x_i = t_i$  °C,  $y_i = R_i$ , мОм.
- Составляем табл. 2.3 для упрощения расчёта.

Таблица 2.3.

## Результаты промежуточных расчетов

№	X	Y	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X · Y	X + Y	(X + Y) <sup>2</sup>
1	5	240	25	57600	1200	245	60025
2	10	245	100	60025	2450	255	650025
3	15	250	225	62500	3750	265	70225
4	20	255	400	65025	5100	275	75625
5	25	260	625	67600	6500	285	81225
6	30	625	900	70225	7950	295	87025
7	35	270	1225	72900	9450	305	93025
8	40	275	1600	75625	11000	315	99225
9	45	280	2025	78400	12600	325	105625
сумма	225	2340	7125	609900	60000	2565	737025

- По выражению (2.19) определяем коэффициент регрессии  $\beta$

$$\beta = \frac{m \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{9 \cdot 60000 - 225 \cdot 2340}{9 \cdot 7125 - 225^2} = 1,$$

тогда коэффициент  $\alpha$  определяется по выражению (2.20)

$$\alpha = \frac{\sum y_i - \beta \sum x_i}{m} = \frac{2340 - 1 \cdot 225}{9} = 235.$$

- По выражению (2.22) получаем коэффициент корреляции  $r$

$$r = \beta \sqrt{\frac{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{m \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} = 1 \sqrt{\frac{9 \cdot 7125 - 225^2}{9 \cdot 609900 - 2340^2}} = 0,99.$$

Коэффициент корреляции очень близок к 1 (0,99). А это значит, что зависимость между  $x$  и  $y$  является практически линейной, и окончательным уравнением нужно признать равенство  $y = 235 + x$ .

Полученное выражение согласуется с аналитической зависимостью сопротивления контактных соединений магнитного пускателя от температуры окружающей среды (рис. 2.4 и 2.8).

### 2.3. Аналитическое прогнозирование изменения сопротивления контактов коммутационных аппаратов в процессе эксплуатации

Считаем, что работоспособность коммутационного аппарата (объекта диагностирования) определяется сопротивлением его контактов  $R_k$ . Рассматриваем функцию  $R_k(T)$ , значение которой изменяется непрерывно в интервале времени  $T_1 = [t_0, t_n]$ . В результате этого имеются значения этой функции  $R_0, \dots, R_1 \dots R_i \dots R_n$  на интервале  $T_1$ .

Необходимо по известным значениям  $R_i$  определить значение функции  $R(t)$ :  $R_{n+1}, \dots, R_{n+l}, R_i, \dots, R_{n+m}$  в будущие моменты времени узнать, через какое время значения  $R_{n+1}, \dots, R_{n+l} \in T_2$  достигнут допустимого уровня  $R_{\text{доп}}$ .

Описать характер изменения параметра  $R_k$  в этом интервале можно с помощью выражения

$$R_k = R_{\text{ном}} - kT, \quad (2.23)$$

где

$$k = \frac{(R_{\text{ном}} - R_{\text{доп}})}{T}, \quad (2.24)$$

где  $R_{\text{ном}}$  – номинальное сопротивление контактов, мОм;

$T$  – время эксплуатации, лет;

$R_{\text{доп}} = 5R_{\text{ном}}$  – допустимое сопротивление контакта.

Исходными данными для расчёта являются:

- магнитный пускатель марки ПМЛ;
- $R_{\text{ном}} = 275$  мОм;
- $R_{\text{доп}} = 1375$  мОм;
- $T = 30$  лет.

Расчёт проводим в следующем порядке:

По выражениям (2.23, 2.24) определяем характер изменения  $R_k(T)$

$$R_k = 275 + 36T, \quad (2.25)$$

где  $k = (R_{\text{ном}} - R_{\text{доп}})/T = (275 - 1375)/30 = -36$ .

Исследуем изменение сопротивления контактов в процессе эксплуатации, т.е.  $T = 1-30$  лет

$$R_k = 275 + 36 \cdot 1 = 311 \text{ мОм}$$

Аналогично расчёт проводим для различных значений времени эксплуатации. По накопленным статистическим данным определяем коэффициент регрессии по выражению

$$\alpha = \frac{T}{R_{\text{ном}} - R_{\text{доп}}} = \frac{1}{1375 - 275} = 0,001, \quad (2.26)$$

где  $T = 1$  год, время эксплуатации магнитного пускателя;

$\alpha$  – коэффициент, характеризующий наклон прямой.



Аналогично расчёт проводим при различных значениях времени эксплуатации. Результаты расчёта представлены в табл. 2.4.

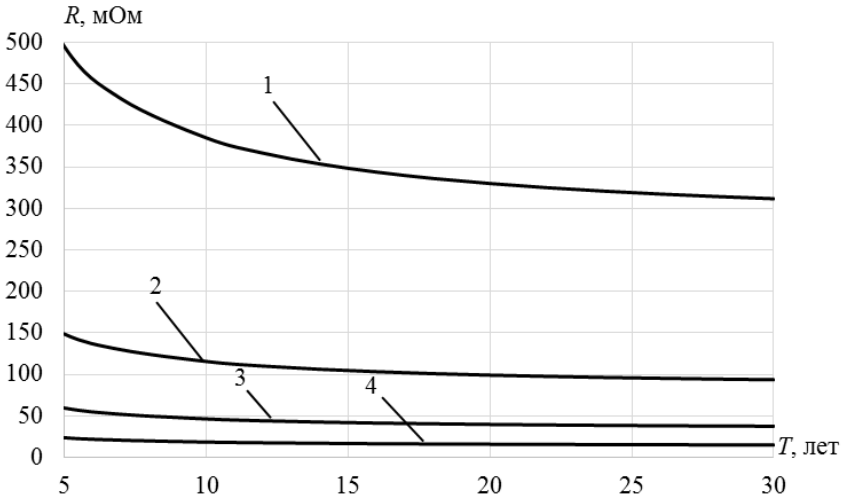
**Таблица 2.4.**

Результаты расчета коэффициента регрессии по годам

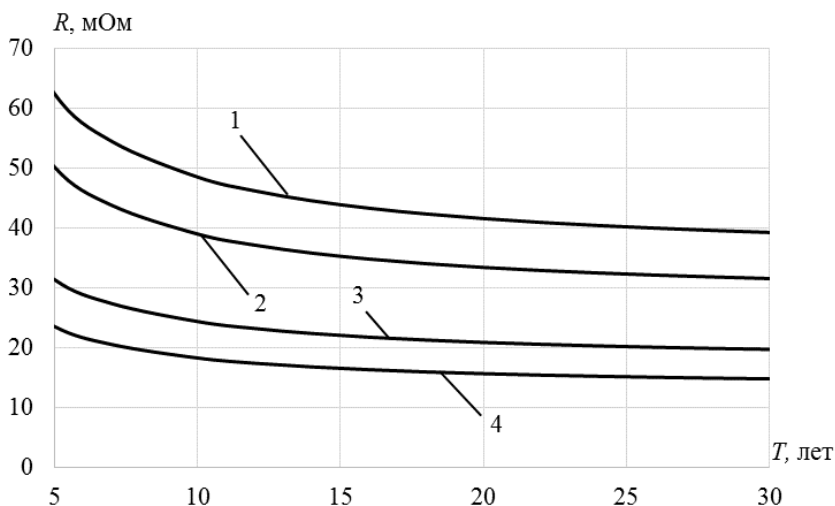
$T$ , лет	1	3	5	7	10	15	20	25	30
$\alpha$	0,001	0,003	0,005	0,006	0,009	0,014	0,018	0,023	0,027

Также проведены исследования сопротивлений других коммутационных аппаратов – магнитных пускателей марок ПМЛ, КМИ, автоматических выключателей марок ВА57, ВА51.

Графики зависимости сопротивления контактов некоторых коммутационных аппаратов от срока эксплуатации показаны на рис. 2.9 и 2.10.



**Рис. 2.9.** Изменение сопротивления контактов магнитных пускателей в процессе эксплуатации: 1 – ПМЛ ( $R_{\text{ном}} = 275$  мОм); 2 – ПМЛ ( $R_{\text{ном}} = 82,5$  мОм); 3 – КМИ ( $R_{\text{ном}} = 33$  мОм); 4 – КМИ ( $R_{\text{ном}} = 13,1$  мОм)



**Рис. 2.10.** Зависимость сопротивления контактов автоматических выключателей от срока эксплуатации: 1 – BA57 ( $R_{\text{ном}} = 34,9$  МОм); 2 – BA57 ( $R_{\text{ном}} = 27,9$  мм); 3 – BA51 ( $R_{\text{ном}} = 17,45$  МОм); 4 – BA51 ( $R_{\text{ном}} = 13,1$  МОм)

В процессе аналитического прогнозирования изменения сопротивления контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов при различных условиях эксплуатации получены математические модели, входные величины которых уточняются с помощью регрессионного анализа. Изменение сопротивления контактных соединений низковольтных аппаратов является одной из характеристик их технического состояния и позволяет оценить эффективность функционирования оборудования цеховых сетей.

Как указывалось в разделе 1.2, металлокерамические контакты получили достаточно широкое внедрение, хотя оно длительное время затруднялось из-за отсутствия надёжных рекомендаций по допустимому их перегреву и оптимальным величинам контактных нажатий.

ГОСТ 403–73 определяет нормы предельных температур нагрева только серебряных и медных контактов. Однако эти пределы не могут механически распространяться на металлокерамические контакты, так как свойства этих материалов совершенно иные.

В определённой степени в работе вышеперечисленные задачи применительно к металлокерамическим контактам из серебра, композиции систем металл–металл: Ag–Ni марки CH40 (40 % Ni, 60 % Ag), Ag–W марки CB50 (50% W, 50 % Ag) и композиции систем металл–окись металла:

Ag–CdO марки СОК15 (15 % Cd, 85 % Ag) и Ag–CuO (10 % CuO, 90 % Ag) при разных контактных нажатиях и различных условиях охлаждения, исследованы и определены. Исследованиями показано, что величины допустимых температур для серебряных и металлокерамических контактов СОК15 и др. могут быть повышены.

В частности, металлокерамические контакты из серебра при удельных нажатиях от 2 до 20 кг/мм<sup>2</sup> и при температурах перегрева на свежезачищенных контактах от 35 до 94 °С, вызванных током, имеют в процессе работы низкое и стабильное переходное сопротивление. Более высокий нагрев серебряных контактов не вызывает опасений со стороны переходного сопротивления. Допустимую величину нагрева серебряных контактов следует связывать с их твёрдостью и прочностными характеристиками при нагреве, с термическими возможностями изоляции, контактных пружин и других деталей аппарата, с динамическими и статическими нагрузками на контакты данной конструкции аппарата.

Конкретные рекомендации по ограничению допустимой температуры перегрева серебряных контактов вне связи в каждом случае с указанными выше факторами, на взгляд авторов, нецелесообразны.

Контакты марок СН40 и СВ50 при удельных нажатиях 5–20 кг/мм<sup>2</sup> и перегревах свежезачищенных контактов СН40 от 40 до 165 °С и контактов СВ50 от 40 до 125 °С работают надёжно.

Металлокерамические контакты СОК15 и СОМ10 при пропускании тока, создающего перегрев на свежезачищенных контактах от 50 до 110 °С, и нажатии от 2 до 20 кг/мм<sup>2</sup> работают безотказно.

В заключение данного раздела вкратце рассмотрим вопрос о предельных сопротивлениях контактов, загрязнённых различными плёнками. Вопрос рассмотрен в ряде работ применительно к серийным серебряным и платино-иридиевым реле.

Сопротивление чистых контактов мало, например, сопротивление области стягивания серебряных контактов колеблется от 0,7 до 1,2 мОм, а платино-иридиевых – от 17 до 30 мОм. Загрязнённые контакты, как правило, имеют очень большое и нестабильное сопротивление, величина которого колеблется в широких пределах и уменьшается примерно обратно пропорционально величине тока, проходящего через контакты, причём эта зависимость необратима. Отметим, что в случае платиново-иридиевых контактов через некоторое время после прохождения тока сопротивление восстанавливается частично или полностью до его значения при минимальном токе.

Сопротивление контактов из сплава Pt-Ir, покрытых плёнками, относительно велико, оно находится большей частью в пределах примерно от 0,5 до 2÷6 Ом при токе 0,1 А.

Кроме того, платиново-иридиевые контакты склонны к иглообразованию, они изнашиваются неравномерно и не допускают значительных перегрузок. Вследствие большого сопротивления наибольший ток через контакты из сплава Pt-Ir не должен превышать 7÷10 А (серебряные контакты допускают более 80 А). Потому для контактов новых типов реле вместо сплава платины с иридием применяется большей частью сплав Ag-Mg-Ni (0,3 % Mg, 0,2 % Ni), который обеспечивает меньшее сопротивление контактов и не имеет тенденции к иглообразованию.

Сопротивление серебряных контактов, загрязнённых сульфидными плёнками, находится в пределах от 0,4 до 0,9÷15 Ом (при токе 0,1 А).

Наибольшей величины сопротивление контактов из любых материалов достигает при загрязнении контактов частицами пиролитического углерода, предельное падение напряжения на котором может доходить до 5,2 В.

Загрязнение поверхности любых контактов углеродом происходит при фриттинге и обугливания изолирующих плёнок в случае, когда мощность недостаточна для сгорания плёнки или расплавления металла контактов в контактной точке, а также при достаточно частой коммутации контактами тока менее 0,1 А в атмосфере, содержащей органические пары.

При коммутации очень малых токов, а также при воздействии вибрационных перегрузок на контактах из сплава Pt-Ir образуются фрикционные полимерные плёнки, а на серебряных контактах, как указывалось, образуются сульфидные плёнки. Поэтому контакты, предназначенные для коммутации очень малых токов и напряжений (10 мкА и 50 мВ), должны быть изготовлены из сплавов золота с малым содержанием примесей и во избежание загрязнения углеродом этими контактами не следует коммутировать токи более 0,01 мА. Технически чистое золото не рекомендуется применять, так как оно размягчается при температуре 100 °С, отличается малой твёрдостью, небольшой износоустойчивостью и имеет склонность к холодным приваркам («залипанию» контактов).

Для значительного уменьшения количества выделяемых органических паров изоляция обмотки и проводов должны изготавливаться из специальных материалов, и реле должны обесгаживаться в вакуумном термостате.

Для поглощения небольшого количества органических паров, остающихся после обесгаживания, ряд фирм в США помещает в корпусе реле небольшую пластину активированного поглотителя (осушителя) из пористого стекла.

Более высокую надёжность при коммутации малых токов имеют магнитоуправляемые контакты и реле с двойной герметизацией, у которых контактная система герметически изолирована от обмотки и не содержит органических материалов.

Сборка, регулировка и герметизация высоконадёжных реле в США производятся в герметичных боксах в атмосфере чистого и сухого азота.

Более полно вопросы надёжности работы электрических контактов рассмотрены в главе 3.

При регулировке и испытании новых реле, предназначенных для коммутации очень малых токов и напряжений, не следует размыкать контактами реле даже небольшие токи (0,01–0,1 А), во избежание возможности отложения частиц углерода на рабочей поверхности контактов, вследствие разложения органических плёнок и паров в искровых разрядах. Поэтому для контроля цепей золотых и позолоченных контактов реле в условиях их изготовления и испытаний необходимо вместо сигнальных лампочек пользоваться микроамперметром и ограничить токи в цепи контактов примерно до 10 мкА при напряжении не более 50 мВ. Предварительные измерения сопротивления серебряных, платиновых или других контактов для выявления их загрязнения, очевидно, следует также производить при минимальном токе, например, с помощью омметра при токе порядка 1 мА. Сопротивление загрязнённых контактов, коммутирующих очень малые переменные токи и напряжения можно значительно уменьшить, если использовать обтекание контактов постоянным током небольшой величины (0,3 мА). Наиболее эффективным средством для повышения надёжности работы контактов реле является дублирование или применение сдвоенных контактов. В последнем случае вероятность одновременного загрязнения рабочей площадки обоих контактов значительно меньше (примерно в 20–80 раз). Некоторые фирмы в США рекомендуют для уменьшения износа алфатизировать (азотировать) поверхности полюсов и якоря особо надёжных реле, а также изготавливать толкатели якоря из рубина вместо стекла и покрывать твёрдым золотом трущиеся поверхности контактных пружин и осей.

## 3. НАДЁЖНОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

### 3.1. Общие представления о надёжности изделий

В общем понимании надёжность – это свойство изделия (в нашем случае – надёжность работы контактной пары) сохранять значения установленных параметров функционирования в определённых пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Известно, что надёжность – это комплексное свойство, которое в зависимости от назначения изделия и условий его эксплуатации может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость в отдельности или определённое сочетание этих свойств или изделия в целом и его частей в том числе.

Основное понятие, используемое в теории надёжности - понятие отказа, т.е. утраты работоспособности, наступающей либо внезапно, либо постепенно.

Работоспособность – такое состояние изделия, при котором оно соответствует всем требованиям, предъявляемым к его основным параметрам.

К числу основных параметров изделия, как правило, относятся:

- быстродействие;
- нагрузочная характеристика;
- устойчивость;
- точность выполнения производственных операций и т.д.

Вместе с другими показателями (например, масса, габариты, удобство в обслуживании и др.) они составляют комплекс показателей качества изделия.

Показатели качества могут изменяться с течением времени. Изменение их, превышающее допустимые значения, приводит к возникновению отказового состояния (частичного или полного отказа изделия).

Показатели надёжности нельзя противопоставлять другим показателям качества: без учёта надёжности все другие показатели качества изделия теряют свой смысл, точно так же и показатели надёжности становятся полноценными показателями качества лишь в сочетании с другими характеристиками изделия.

Долгое время надёжность не измерялась количественно, что значительно затрудняло её объективную оценку.

Развитие теории надёжности, как известно, сопровождалось совершенствованием вероятностных методов исследования, таких как:

- определение законов распределения наработки до отказа;
- разработка методов расчёта и испытаний изделий с учётом случайного характера отказов и т.п.

Вместе с тем возникли новые направления исследований, а именно:

- поиск принципиально новых способов повышения надёжности;
- прогнозирование отказов и прогнозирование надёжности;
- анализ физико-химических процессов, оказывающих влияние на надёжность;
- установление количественных связей между характеристиками этих процессов и показателями надёжности;
- совершенствование методов расчёта надёжности изделий, обладающих всё более сложной структурой, с учётом всё большего числа действующих факторов (достоверность исходных данных, контроль и профилактика, условия работы и обслуживания и т.д.).

Испытания на надёжность совершенствовались, главным образом, в направлении проведения ускоренных и неразрушающих испытаний.

Наряду с совершенствованием натуральных испытаний широкое распространение получили математическое моделирование и сочетание натуральных испытаний с моделированием.

В настоящее время принято надёжность изделий определять набором показателей. Для оценки надёжности изделий, которые могут находиться в двух возможных состояниях - работоспособном и отказовом, применяются следующие показатели:

- 1) среднее время работы до возникновения отказа  $T_{cp}$  – наработка до первого отказа;
- 2) среднее время работы, приходящееся на один отказ  $T$  – наработка на отказ;
- 3) интенсивность отказов  $\lambda(t)$ ;
- 4) параметр потока отказов  $\omega(t)$ ;
- 5) среднее время восстановления работоспособного состояния  $\tau_v$ ;
- 6) вероятность безотказной работы за время  $t$   $[P(t)]$ ;
- 7) коэффициент готовности  $K_r$ .

Закон распределения наработки до отказа, как известно, определяет количественные показатели надёжности невосстанавливаемых изделий. Закон распределения записывается либо в дифференциальной форме плотности вероятности  $f(t)$ , либо в интегральной форме  $F(t)$ . Существуют следующие соотношения между показателями надёжности и законом распределения

$$P(t) = 1 - F(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) \quad (3.1)$$

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt; \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (3.2)$$

Для восстанавливаемых изделий вероятность появления  $n$  отказов за время  $t$  в случае простейшего потока отказов определяется законом Пуассона

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (3.3)$$

Из чего следует, что вероятность отсутствия отказов за время  $t$

$$P(t) = \exp(-\lambda t) \quad (3.4)$$

Равенство (3.4) есть экспоненциальный закон надёжности.

Технические системы, состоящие из конструктивно независимых узлов, обладающие способностью перестраивать свою структуру для сохранения работоспособности при отказе отдельных частей, в теории надёжности принято называть сложными техническими системами. Число работоспособных состояний таких систем - два и более. Показателем надёжности сложной системы может быть суммарная вероятность работоспособности системы - сумма вероятностей всех работоспособных состояний системы.

Сказанное также касается состояния надёжности контактных пар электрических выключателей. Выше, во введении к данной работе отмечалось, что надёжность, определяемая как вероятность выполнения функций замыкания и размыкания цепи, равна произведению вероятностей выполнения каждой из этих функций, т.е.

$$P = P_1 \cdot P_2 = [1 - q] \cdot P_2, \text{ так как } P_1 = [1 - q' \Sigma] \quad (3.5)$$

Вместе с тем известно, что часто рассматривают понятие надёжности выполнения контактами их функции более широко, присоединяя к функции надежного включения и выключения нагрузки, для которых заданы значения токов для перевода из нерабочего состояния в рабочее (ток срабатывания) при замкнутых контактах и для перевода из рабочего состояния в нерабочее (ток отпускания) при разомкнутых контактах.

### 3.2. Способы повышения срока службы контактных пар

При напряжении 220 В, переменном токе 100 А и активно-индуктивной нагрузке, а также при условии, что длительность существования дуги не превышает 500 мкс, а коммутационная износостойкость гибридного аппарата достигает 50 млн. циклов включений-отключений- это значительно превышает механический ресурс базового электромеханического аппарата.



Модель гибридного аппарата постоянного тока проверена на базе поляризованных реле и транзисторов типа СИТ. Определена оптимальная длительность времени существования дуги на контактах с точки зрения минимальной эрозии контактов. Для гибридного аппарата на базе реле РПС 58 это время составляет 111 мкс, для реле РПС 36 – 20 мкс и для реле РПС 45 – 6 мкс.

Кроме того, как показали испытания, контакты на основе серебра более подвержены мостиковой стадии износа, что и являлось причиной роста высоты выступов на катоде.

При проведении оценки срока службы гибридного аппарата постоянного тока на номинальный ток 100 А, напряжение 110 В с учётом всего цикла коммутации (включение-отключение) исследовался контакт мостикового типа на серебряной основе с контактной накладкой радиусом  $R = 0,3$  см и толщиной  $h_{\text{кн}} = 0,2$  см.

При длительности существования дуги на контактах  $t_d = 100$  мкс срок службы составил  $N = 0,361$  млн. циклов включений-отключений (ВО); при  $t_d = 300$  мкс -  $N = 0,403$  млн. циклов ВО; при  $t_d = 500$  мкс -  $N = 0,429$  млн. циклов ВО. Известно, что одним из основных факторов, влияющих на срок работы контактной системы выключателей, является удельный расход контактного материала, который определяется выражением

$$q = (m_H - m_K) / (NI_p) \quad (3.6)$$

где  $m_H$  – исходная масса контактов;

$m_K$  – конечная масса контактов;

$N$  – число коммутационных операций;

$I_p$  – рабочий ток при коммутации.

Тогда среднее значение удельного расхода контактного материала на одну контактную пару в мостиковой контактной системе

$$q_{\text{к.п.}} = \sum q / (2n) \quad (3.7)$$

где  $n$  – число полюсов аппарата. В рассматриваемой конструкции многоамперного выключателя постоянного тока  $n = 1$ .

Удельный расход контактного материала зависит от удельного начального контактного нажатия, приходящегося на одну контактную пару

$$f_H = F_H / (pl_p) \quad (3.8)$$

где  $F$  – начальное контактное нажатие на контактный мостик;

$p$  – число контактных переходов тока в мостиковой контактной системе.

На основании большого числа экспериментов, определена зависимость

$$q_{\text{к.п.}} / S = a_1 + a_2 f_H + a_3 f_H^2 \quad (3.9)$$

где  $S$  – площадь контактируемой поверхности контактов;  
 $a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты, полученные экспериментальным путём.

Оптимальное начальное контактное нажатие определяется выражением

$$d(q_{к.п.}/S)/df_H = a_2 + 2a_3f_H = 0 \quad (3.10)$$

Из выражения (3.10) следует

$$F_H = 0,01pl_p \quad (3.11)$$

Таким образом, оптимальное начальное контактное нажатие зависит от значения коммутируемого рабочего тока. Если  $F_H < 0,01pl_p$ , при этом возможен отброс контактов электродинамическими системами, что приводит к электрическому износу поверхностей контактов, вызванному разрядными процессами на них. Если  $F_H > 0,01pl_p$ , то повышается вероятность сваривания контактов.

Влияние контактного нажатия на переходное сопротивление и плотность тока в области контактного сужения происходит на всей первой стадии размыкания контактов. Переход от первой ко второй стадии размыкания наступает, когда контактное нажатие становится равным нулю. С этого момента контактное нажатие не влияет на происходящие процессы, но косвенно влияет на время расхождения контактов и скорость их размыкания.

Возникновение жидкого металлического мостика во второй стадии размыкания, несмотря на кратковременность его существования, может оказаться причиной выхода из строя контактной системы.

Длина жидкометаллического мостика в момент разрыва не зависит в рассматриваемом случае от скорости размыкания контактов и от контактного нажатия.

Объёмный расход материала контактов при размыкании можно определить как

$$m = \rho V = \rho \pi R_0^2 l \quad (3.12)$$

где  $m = m_n - m_k$  – масса расхода материала контакта;

$\rho$  – плотность расплавленной массы жидкометаллического мостика;

$V$  – объём мостика;

$R_0$  – радиус мостика;

$l$  – длина мостика.

Длина жидкометаллического мостика рассчитывается

$$l = \alpha_1 \sqrt{t_p} + \alpha_2 \sqrt{t_p} + wt_p \quad (3.13)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты, зависящие от материала контактов;

$w$  – скорость расхождения контактов;

$t_p$  – время существования мостика до его разрыва.

Радиус жидкометаллического мостика

$$d(P_T + P_{\Pi})/dr = 0 \quad (3.14)$$

где  $r$  – текущий радиус жидкометаллического мостика по поперечному сечению;

$P_T = \pi r k \theta_n e^2 / m_a$  – термическая сила воздействия на мостик; здесь  $k$  – постоянная Больцмана;

$\theta$  – температура плавления материала контактов;

$m_a$  – масса атома контактного материала;

$P_{\Pi} = B^2 / (2\mu)$  – сила «пинч-эффекта»;

$B = \mu I r / (2\pi R_0^2)$  – магнитная индукция;

$\mu$  – магнитная проницаемость.

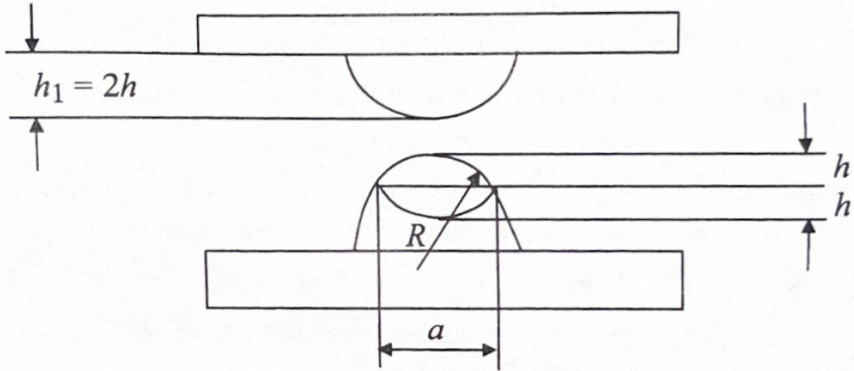
Интегрируя выражение (3.12) и решая уравнение относительно  $R_0$ , получаем

$$R_0 = \sqrt[4]{\mu I_p^2 m_a / (8\pi^3 \rho k Q_{\Pi})} \quad (3.15)$$

Таким образом, определив с помощью выражений (3.13) и (3.15) длину и радиус жидкометаллического мостика, а с помощью уравнения (3.12) – объёмный расход материала контактов при их размыкании, можем найти удельный расход контактного материала по выражению (3.6).

Методика применяется для определения коммутационной износостойкости, надёжности мостиковой дугогасительной контактной системы с прямым токопроводом многоамперных выключателей. Т.е., получены расчётные и экспериментальные зависимости удельного расхода контактного материала  $q$  от удельного контактного нажатия  $f_n$ , которые имеют удовлетворительные совпадения. При этом относительная погрешность расчёта и опыта находятся в пределах, вполне допустимых при определении расходной массы контактного материала при коммутации выключателя.

Предположим, что имеется контакт типа плоскость - полусфера (рис. 3.1) и, вследствие, эрозии наблюдается перенос материала контакта с полусферы на плоскость. При этом на плоской контактной поверхности образуется бугор сферической формы, а на полусферической контактной поверхности - кратер также сферической формы.



**Рис. 3.1.** Контактная поверхность

Объём изношенной части полусферической поверхности при  $V$  циклах работы, равный  $V=GN$  (здесь  $G$  - количество металла, перенесённого с катода на анод,  $N$  - число циклов замыкания контактов), может быть приближённо определён как объём шарового сегмента с радиусом основания  $a$ , равным радиусу кратера, т.е.

$$V = 2V_{\text{сегм}} = \frac{2}{3}\pi h(3a^2 + h^2) = \frac{2}{3}\pi h^2(3R - h) = 2\pi h^2 \left(\frac{h}{R}\right)^2 \left(1 - \frac{1}{3}\frac{h}{R}\right) \quad (3.16)$$

где  $h$  – высота сегмента.

Считая, что бугор (приближённо) также сферической формы, можно найти радиус этой сферы по выражению определения величины поверхности шарового сегмента  $S = \pi(2a^2 + h^2) = \pi(a^2 + 2Rh)$

$$R_x = \frac{a^2 + h^2}{2h_1} = \frac{2Rh + 3h^2}{4h} = \frac{R + 1,5h}{2} \quad (3.17)$$

При сближении контактов соприкосновение произойдёт между поверхностями бугра и кратера. При этом максимальное давление на площадке, образованной при смятии материала в месте соприкосновения, будет (приближённо) равно

$$\rho_{\text{к.макс}} = 0,62 \cdot \sqrt[3]{\frac{E^2}{4} \left(\frac{R-1,5h}{R+1,5h}\right)^2 \frac{P_k}{R^2}} \quad (3.18)$$

а величина радиуса площадки в месте соприкосновения

$$r_c = \sqrt[3]{\frac{0,68P_k}{E} \frac{2(R+1,5h)R}{(R-1,5h)}} \quad (3.19)$$

Распределение давления по площадке происходит по нормальному закону и, следовательно

$$r_x = r_c \sqrt{1 - \left(\frac{p_{kx}}{P_{\text{к.макс}}}\right)^2} \quad (3.20)$$

где  $P_{к.макс}$  – максимальное контактное давление в центре площадки соприкосновения ( $r_x = 0$ ).

Если величина давления, которая необходима для разрушения токопроводящей плёнки на поверхности, образованной за счёт окислов или других химических соединений на поверхности контакта, равна  $p_0$ , то рабочая площадь будет определяться как

$$S_p = \pi r_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{p_0}{P_{к.макс}} \right)^2 \right] \quad (3.21)$$

где  $r_0$  – радиус рабочей части площади соприкосновения.

По мере роста объёма перенесенного металла  $V$  будет расти высота изношенной части контакта, а, следовательно, будут уменьшаться  $P_{к.макс}$  и  $S_p$ . Это приведёт к уменьшению контактного усилия

$$P_k \approx \frac{2}{3} P_{к.макс} S_p = P_K \left[ 1 - \left( \frac{p_0}{P_{к.макс}} \right) \right] \quad (3.22)$$

и, следовательно, вероятность отказа в работе контактов увеличится.

Для увеличения надёжности работы контактов их часто, как указывалось выше, делают парными, так как совпадение отказов двух контактов одновременно является маловероятным. Так, если вероятность отказов одного контакта при  $P$  равна  $q = n/N = 10^{-5}$ , то при двух одинаковых контактах, работающих параллельно, и при том же  $P_K$  для каждого контакта суммарная вероятность отказов

$$q\Sigma = \left( \frac{n}{N} \right)_{\Sigma} = q_1 q_2 = \left( \frac{n}{N} \right) \cdot \left( \frac{n}{N} \right) = \left( \frac{n}{N} \right)^2 = 10^{-10} \quad (3.23)$$

Для увеличения срока службы контактов используют применение искрогасящих устройств, состоящих из контуров, содержащих сопротивления (линейные и нелинейные) и ёмкостей, включаемых параллельно нагрузке или контактам. Выбор параметров сопротивления и ёмкостей, производится из условия, что перенапряжение, возникающее на контактах при выключении цепи, должно быть меньше напряжения зажигания искрового или дугового разряда.

Схемы гашения, применяемые на практике, показаны на рис. 3.2. Их назначение состоит в том, чтобы уменьшить напряжение на расходящихся контактах  $u_x$ .

Рассмотрим некоторые случаи работы искрогасящих устройств, приведённых на рис. 3.2.

На рис 3.2, *a* приведена схема выключения цепи нагрузки при наличии искрогасящего контура  $r$ .

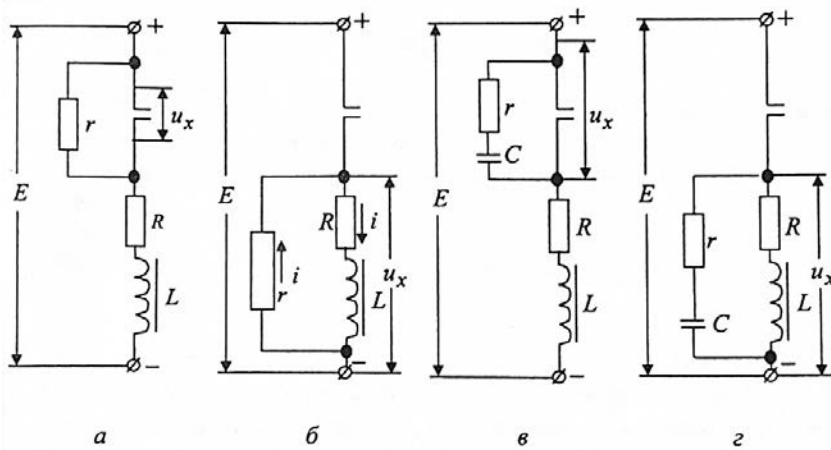


Рис. 3.2. Схемы гашения искрового заряда

Напряжение  $u_x$  на контакте для моментов времени  $t > 0$ , следующих за моментом размыкания цепи, определится по решению следующей системы уравнений

$$E = R i + L \frac{di}{dt} + r i; \quad u_x = r i \quad (3.24)$$

где  $u_x$  – напряжение на контактах;

$E$  – ЭДС источника питания.

При начальных условиях:  $i = E / R = I$  при  $t = 0$  для  $u_x$  справедлива следующая зависимость

$$u_x = r i = r \left[ \frac{E}{R+r} + \frac{E}{R} \cdot \frac{r}{R+r} e^{-\frac{r+R}{L}t} \right] = I \frac{rR}{r+R} \left[ 1 + \frac{r}{R} e^{-\frac{r+R}{L}t} \right] \quad (3.25)$$

Для того, чтобы  $u_x$  не было велико, необходимо подбирать  $r$  не слишком большим [обычно  $r = (5-8)R$ ]. С другой стороны, если  $r$  мало, то остаточный ток  $i_0 = E / R + r$  будет значителен и может вызвать негативные последствия в цепи нагрузки. Поэтому в последнее время в качестве  $r$  применяют нелинейные сопротивления из вилита, карборунда и тому подобных материалов, у которых связь между напряжением и током выражается зависимостью

$$u_x = a i^\alpha \quad (3.26)$$

где  $\alpha = 0,2-0,35$ .

В этом случае величина нелинейного сопротивления не остаётся постоянной, а изменяется с изменением падения напряжения на нём, т.е.

$$r_x = \frac{u_x}{i} = a i^{\alpha-1} = a \left( \frac{u_x}{a} \right)^{\frac{\alpha-1}{\alpha}} = b u_x^\beta \quad (3.27)$$

где  $\beta = -(4 \div 1,5)$ .

При малых напряжениях на контакте  $u_x \approx E$ , сопротивление  $r_x$  велико; при размыкании цепи, когда  $r_x$  начинает возрастать, величина  $r_x$  падает, не позволяя достигнуть и больших значений.

При включении по схемам рис. 3.2, б, в напряжение на контактах определяется по следующей системе уравнений

$$0 = Ri + L \frac{di}{dt} + ri \text{ и } u_x = E + ri \quad (3.28)$$

Из условия, что ток в цепи в первый момент размыкания контактов не может измениться скачком, решение таких уравнений определяется как

$$u_x = E + rIe^{-\frac{r+R}{L}t} = IR \left[ 1 + \frac{r}{R} e^{-\frac{r+R}{L}t} \right] \quad (3.29)$$

т.е. их в схеме, приведённой на рис. 3.2, а, меньше в  $r/(R+r)$  раз.

Выключение цепи при наличии искрогасящего контура  $rC$ , приведённого на рис. 3.2, в, изменяет напряжение в контуре, которое может определяться по системе уравнений

$$E = Ri + L \frac{di}{dt} + ir + \int \frac{i}{C} dt \text{ и } u_x = ir + \int \frac{i}{C} dt \quad (3.30)$$

После ряда преобразований решение приведённой системы уравнений можно представить

$$u_x = E + \frac{Ir}{\omega} \left[ \frac{1}{rC} - \frac{1}{\frac{L}{R}} \right] e^{-\alpha t} \sin(\omega t - \varphi) \quad (3.31)$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2; \alpha = \frac{R+r}{2L}; \omega_0^2 = \frac{1}{LC}; I = \frac{E}{R}$$

$$\text{где } \omega = \frac{R+r}{r} \text{ и } \varphi = \text{arctg} \frac{\omega \frac{R+r}{r}}{\frac{1}{rC} - \frac{1}{2Lr}}$$

### 3.3. Оценка надёжности коммутационной аппаратуры на основе цензурированной статистической информации

Выше отмечалось, что одним из достоверных способов определения качества тех или иных изделий является проведение выборочных испытаний различных видов, в том числе и, например, аппаратов на коммутационную износостойкость. При испытании аппаратов возникают ситуации, когда определённая часть испытываемых объектов не отказала за период наблюдения. В таких случаях, как известно, рекомендуется проводить статистический анализ на основании так называемых цензурированных выборок.

Для таких выборок необходимо применять специфические методы оценки показателей надёжности и проверки статистических гипотез, которые, как правило, сложнее традиционных методов математической статистики. Особое значение анализ цензурированных выборок

приобретает при оценке надёжности сложных и дорогостоящих технических устройств, а также изделий с дорогостоящими методами испытаний: именно к последним относятся коммутационные аппараты по причине продолжительности и энергозатратности испытаний на износ.

Исследуем трёхполюсные пускатели серии ПМЛ на номинальный ток контактов главной цепи 16 А.

Образцы пускателей испытывались в категории применения АС-4 при номинальном рабочем токе 4 А и номинальном рабочем напряжении 660 В, 50 Гц. Частота коммутаций составляет 600 циклов в час, ПВ = 2,78 %, номинальный ресурс 200 тыс. циклов коммутаций. Здесь значение ПВ - относительная продолжительность включения в процентах.

Пускатели циклически коммутировали испытательную цепь с параметрами:  $U_{\text{вкл}} = U_{\text{откл}} = 660 \text{ В}$ ,  $I_{\text{вкл}} = I_{\text{откл}} = 24 \text{ А}$ ,  $\cos\phi = 0,65$ .

В ходе испытаний пускателей износ контактов контролировался по изменению провала  $\omega$ , являющегося определяющим параметром надёжности работы контактов. Это связано с конструктивными особенностями пускателей и доступностью выполнения замеров провала по известным методикам.

Провал контактов измерялся периодически – через количество коммутационных циклов, составляющих 15-20 % номинальной наработки пускателей.

При выборе плана испытаний принималось, что пускатели являются неремонтируемыми изделиями. Испытания показали, что в данной партии отказы наступили за пределами гарантируемого нормативно-технической документацией числа циклов коммутаций вследствие постепенного старения контактов (по схеме накапливающихся изменений).

Износ контактов, в конечном счёте, привёл в двух случаях к их свариванию, в одном - к полному износу.

Периодическая остановка испытаний для выполнения замеров провала имеет характер априорного цензурирования. Следовательно, результаты наблюдений можно рассматривать как цензурируемую выборку, полученную при многократном цензурировании слева.

Анализ результатов испытаний на коммутационную износостойкость проводился в соответствии с методикой Агапова-Рыбалко.

Из наработок испытуемых аппаратов формируется вариационный ряд  $t(j)$ , который размещается в первом ряду матрицы  $T(i, j)$ ,  $i = 1, 2; j = 1, \dots, n$  (табл. 3.1)



Таблица 3.1.

## Вариационный ряд испытываемых аппаратов

Вариационный ряд	260	260	260	380	380	380	560	560	560	600
Индикаторный режим	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1

Второй ряд табл. 3.1 заполняется индикаторным массивом чисел, состоящим из нулей и единиц. Здесь единица ставится при отказе объекта, нуль - в противном случае.

В основе метода расчёта параметров закона распределения по случайно цензурированным выборкам лежит вычисление выборочного значения накопленной интенсивности отказов по формуле

$$\Lambda(t_j) = \sum_{i=0}^j \frac{a_i}{N - \sum_{m=0}^{i-1} (a_m + b_m)} \quad (3.32)$$

где  $a_m, b_m$  – элементы вспомогательных массивов  $A(N), B(M)$ , образованных из исходного индикаторного массива в матрице (табл. 3.1),  $A(N) = 1001001001; B(N) = 0110110110, m = 1 \dots N; N$  – размерность матрицы наработок (количество замеров).

Результаты вычислений по формуле (3.32) выборочного значения накопленной интенсивности отказов и соответствующая наработка приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2.

## Результаты расчета интенсивности отказов

$j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_j$	260	260	260	380	380	380	560	560	560	600
$\Lambda(t_j)$	0	0	0,1	0,1	0,1	0,242	0,409	0,409	0,409	0,742

Далее вычисляется выборочный коэффициент корреляции массивов  $t_j$ ; и  $\Lambda(t_j)$

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^N \psi_j g_j - \frac{1}{N-K_0} \sum_{j=c}^N \psi_j \sum_{j=c}^N g_j}{\sqrt{\left[ \sum_{j=c}^N \psi_j^2 - \frac{1}{N-K_0} \left( \sum_{j=c}^N \psi_j \right)^2 \right] \left[ \sum_{j=c}^N g_j^2 - \frac{1}{N-K_0} \left( \sum_{j=c}^N g_j \right)^2 \right]}} \quad (3.33)$$

где  $c = k_0 + 1$ ;

$K_0$  – число цензурирующих наработок в первом столбце матрицы  $T$  ( $i, j$ ) слева от первой наработки объекта на отказ, иначе  $K_0$  – число нулей в индикаторном массиве  $A(N)$  слева от первой единицы; вспомогательные функции  $\psi_j, g_j$  вычисляются для различных законов распределения случайных величин как показано в табл. 3.3.

Таблица 3.3.

## Законы распределения случайных величин

Закон распределения	Функции	
	$\Psi_j$	$g_j$
Экспоненциальный	$ t_j $	$\rho(t_j)$
Вейбулла	$\ln( t_j )$	$\ln(\hat{\rho})$
Нормальный	$U_{q_j}(F_N)$	$t_j$
Логнормальный	$U_{q_j}(F_N)$	$\ln( t_j )$

Применение:  $U_{q_j}(F_N)$  – квантиль стандартного нормального распределения уровня  $q_j = 1 - \exp[-\hat{\rho}(t_j)]$ .

Выборочный коэффициент корреляции определяется по уравнению (3.33) для каждого из указанных в табл. 3.4 законов распределения.

Таблица 3.4.

## Результат расчета выборочного коэффициента корреляции

Закон распределения	Коэффициент корреляции
	$\rho$
Экспоненциальный	0,873828
Вейбулла	0,88195
Нормальный	0,910597
Логнормальный	0,878403

Максимальное значение  $\rho$  соответствует наиболее вероятному распределению наработок до отказа анализируемого объекта. Результаты вычислений для матрицы (табл. 3.1) показаны в табл. 3.4.

Найдем приближённые оценки параметров распределения:

- для экспоненциального закона распределения:

$$\hat{\lambda} = \frac{d}{\sum_{j=1}^N |t_j|} \quad (3.34)$$

где  $d$  – количество элементов в массиве  $t(j)$ , соответствующих наработкам до отказа, или иначе  $d$  – это число единиц в индикаторном массиве, который находится во втором ряду матрицы  $T(i, j)$ ;

- для распределения закона Вейбулла параметр формы:

$$\hat{\beta} = \frac{(N-K_0) \sum_{j=c}^N \psi_j g_j - \sum_{j=c}^N \psi_j \sum_{j=c}^N g_j}{(N-K_0) \sum_{j=c}^N \psi_j^2 - \left( \sum_{j=c}^N \psi_j \right)^2} \quad (3.35)$$

параметр масштаба

$$\hat{a} = \exp \left[ \frac{1}{N-1} \left( \sum_{j=c}^N g_j - \beta \sum_{j=c}^N \psi_j \right) \right] \quad (3.36)$$

Переменные величины в уравнениях (3.35), (3.36) те же, что и в уравнениях (3.33), (3.34);

- для нормального закона распределения параметр сдвига

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N-1} \left( \sum_{j=c}^N g_j - \hat{\sigma} \sum_{j=c}^N \psi_j \right) \quad (3.37)$$

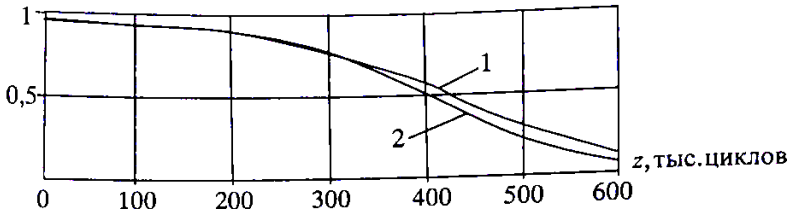
параметр масштаба

$$\hat{\sigma} = \frac{(N-K_0) \sum_{j=c}^N \psi_j g_j - \sum_{j=c}^N \psi_j \sum_{j=c}^N g_j}{(N-K_0) \sum_{j=c}^N \psi_j^2 - \left( \sum_{j=c}^N \psi_j \right)^2} \quad (3.38)$$

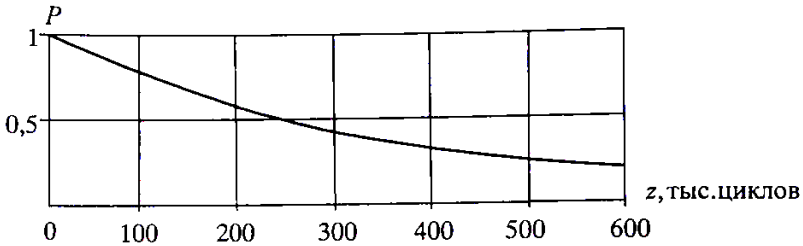
Параметры логарифмически нормального закона вычисляются по (3.37), (3.38), но значения переменной предварительно логарифмируются, как показано в табл. 3.2. Параметры, рассчитанные по уравнениям (3.35) (3.38), можно уточнить. Для этого обычно используются зависимости, полученные на основе метода максимального правдоподобия.

Поскольку выход из строя трёхполюсного пускателя наступает три отказа любого из его полюсов, обычно принимают, что каждый пускатель исследуемой серии является устройством, составленным из трёх последовательно соединённых элементов. Поэтому функция надёжности пускателя в целом определяется по формуле  $p = p^3(z)$ .

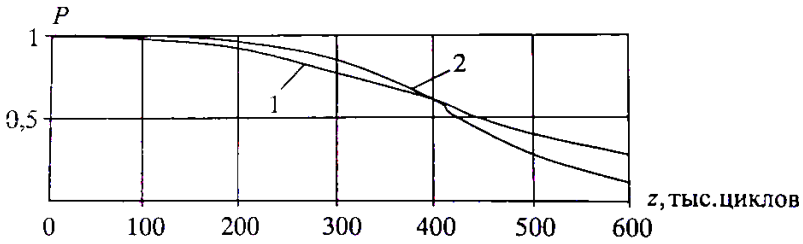
Графики вероятностей безотказной работы представлены на рис. 3.3.



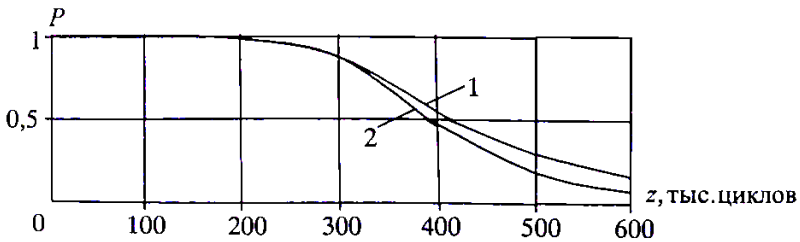
а



б



в



г

**Рис. 3.3.** Вероятность безотказной работы до уточнения (1) и после уточнения (2) параметров распределений: а) нормального; б) экспоненциального; в) Вейбулла; г) логнормального законов

Полученное максимальное значение  $P = 0,910597$  для нормального закона позволяет сделать вывод, что наиболее подходящим является распределение безотказной работы, соответствующее этому закону.

Заметим неадекватность экспоненциального закона (рис. 3.3, б), для которого вероятность отказа близка к 0,5 для времени, когда практически ещё ни одного отказа не наблюдается.

Это естественно объясняется принципиально не постоянным значением интенсивности отказов (табл. 3.2). Таким образом, использование методики позволяет получить адекватную модель надёжности (безотказной работы) пускателей по случайно цензурированным выборкам.

#### **3.4. Прогнозирование надёжности функционирования контактов низковольтных коммутационных аппаратов**

Усложнение структуры и функций внутрицеховых электрических сетей, характерное для настоящего времени, предполагает более высокую степень их совершенства. Однако сложность электрических сетей увеличивает число взаимосвязанных элементов, следовательно, и вероятность нарушений в выполнении их функций.

Случайные, непредвиденные причины могут привести к нарушению функционирования, как отдельных элементов электрической сети, так и части её, что вызывает прекращение подачи электроэнергии потребителям, либо недопустимое снижение её качества у части или у всех потребителей. Такими причинами могут быть: несовершенство эксплуатации, ошибки при проектировании и сооружении объектов и т.п.

Прогнозирование эффективности функционирования электрических систем внутривзаводского электроснабжения основывается не только на знании технологии и экономических характеристик потребителей, но и на показателях надёжности различных подсистем электрической системы, в частности подсистем распределения электроэнергии. Для них характерны: многочленность элементов; сложность структур; наличие элементов, как непрерывного действия (линии), так и дискретно-непрерывного действия (коммутационная и защитная аппаратура).

В действующих электрических сетях 0,4 кВ резервирующие элементы выбираются и осуществляются таким образом, что при отказе одного элемента в другом не возникает недопустимых режимов, и он полностью обеспечивает выполнение функций при отказе первого. Отказ системы относительно узлов нагрузки может наступить только при отказе двух взаиморезервирующих элементов. Указанные обстоятельства,

характерные именно для цеховых сетей, обуславливают необходимость условного подразделения надёжности электрических систем на структурную и функциональную. Электрическая система внутризаводского электроснабжения, в частности её подсистема распределения электрической энергии – цеховая сеть, состоит из высоконадёжных элементов, когда время безотказной работы во много раз больше времени восстановления элементов, и отказ более двух независимых элементов - событие маловероятное.

Как известно, по особенностям структуры электрической сети можно судить об особенностях выполнения её функций, поэтому она является одним из основных факторов, обуславливающих надёжность современных систем. Исследование структуры электрической сети предполагает выделение в системе отдельных элементов, самостоятельных в смысле надёжности, т.е. на второй план отходят функциональные зависимости между параметрами режимов элементов. Этот подход к надёжности предполагает применение так называемых «элементных методов» расчёта и анализа надёжности, которые широко распространены не только в энергетике, но и в других областях техники.

Применение элементных методов расчёта надёжности на современном этапе оправдано не только реальными особенностями функционирования, но и задачами, которые могут быть решены при реальных возможностях получения информации об отказах оборудования и режимах его работы.

При расчётах такими методами количественно не анализируются функциональные зависимости между параметрами режимов отдельных элементов электрических сетей, что является их несомненным недостатком. Однако простота расчётов и возможность получения количественных оценок надёжности позволяют считать применение элементных методов расчёта оправданными.

Оценка функционирования производится на этапе проектирования, реконструкции или при эксплуатации. Поэтому необходимы методы оценки надёжности, позволяющие использовать минимум исходных данных и в то же время обеспечивающие достаточно достоверные результаты.

В последнее время количественные оценки надёжности цеховых сетей начинают использоваться и при эксплуатации для управления уровнем надёжности. При этом возникают специфические задачи оценки вероятностных характеристик систем внутрицехового электроснабжения. Решение их предусматривает наличие информации о фактическом

состоянии элементов, более определённых сведений о режимах работы оборудования.

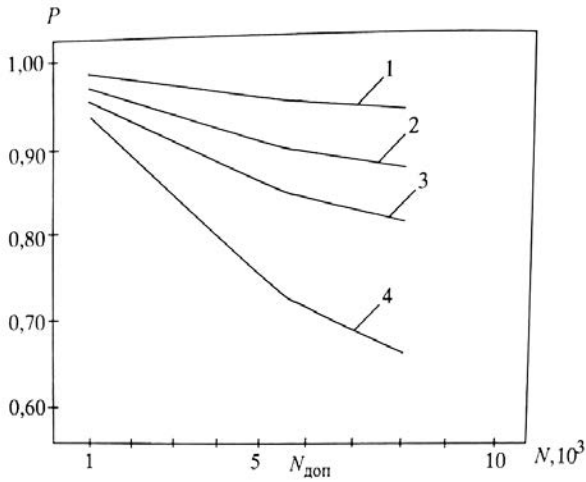
В цеховых сетях с большим количеством взаимосвязанных элементов автоматической коммутационной аппаратуры значительное влияние на надёжность системы оказывает не только структура схемы электрической сети, но и надёжность функционирования автоматики и коммутационных аппаратов.

В общем случае техническое состояние электрического контактного соединения является функцией тока, площади контактного соединения, момента затяжки, а также зависит от наличия коррозии, нагара и т.д. По превышению температуры контактного соединения над температурой окружающей среды возможно косвенно оценить техническое состояние контактного соединения с учётом влияющих на него факторов.

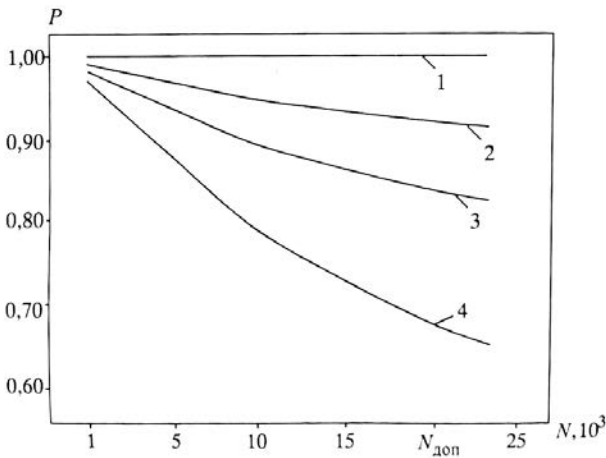
На основании статистических данных эксплуатации ряда промышленных предприятий г. Казани: ОАО «Сантехприбор», ОАО «Хитон», АО «Казанский завод медицинской аппаратуры», АО «ЖБИ-3» определены виды законов распределения и получены основные характеристики функционирования различных видов электрооборудования цеховых сетей (табл. 3.5). Оценим достоверность найденного параметра потока отказов, т.е. определим доверительные границы, в которых находится действительная величина параметра потока отказов для данного типа элементов.

Доверительные границы могут быть определены лишь с некоторой вероятностью, называемой доверительной вероятностью или коэффициентом доверия. Выбор величины доверительной вероятности в большей степени зависит от цели исследования. Опыт показывает, что доверительная вероятность 0,95 или 0,9 вполне достаточна для практических целей.

В результате исследований коммутационной способности и режимов работы низковольтных коммутационных аппаратов, получены зависимости влияния числа циклов включения-отключения на надёжность работы контактов автоматов различных серий (рис. 3.4, 3.5). На рисунках показано явное изменение вероятностей безотказной работы контактов автоматов от числа циклов включения-отключения. Например, для аппаратов ВА51 разница между значениями вероятностей безотказной работы при 1000 и 8000 операций достигает изменения на один порядок в первом знаке после запятой при коэффициенте загрузки 1,3.



**Рис. 3.4.** Влияние числа циклов операций включения-отключения на надёжность работы контактов автомата серии ВА: 1 –  $k_3 = 0,3$ ; 2 –  $k_3 = 0,9$ ; 3 –  $k_3 = 10$ ; 4 –  $k_3 = 1,3$



**Рис. 3.5.** Влияние числа циклов операций включения-отключения на надёжность работ контактов автомата серии АЕ: 1 –  $k_3 = 0,3$ ; 2 –  $k_3 = 0,9$ ; 3 –  $k_3 = 10$ ; 4 –  $k_3 = 1,3$

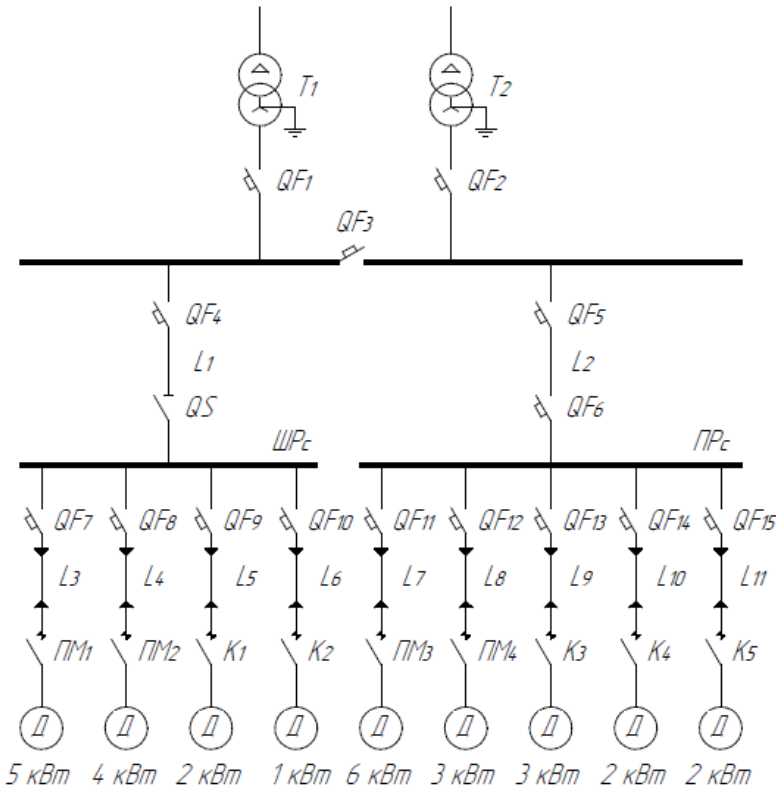


Таблица 3.5.

## Показатели надёжности работы электрооборудования

№ п/п	Наименование (вид) электро- оборудования	Кол-во элементов <i>n</i> , шт.	Кол-во отказавших элементов <i>m</i> , шт.	Время наблюдения <i>T</i> , год.	Средняя наработка на отказ $T_{cp}$ , год.	Среднеквадратическое отклонение наработки на отказ $\sigma$ , год.	Средний параметр потока отказов $\lambda$ , 1/год	Границы доверительного интервала, $w_H/w_B$ , %	
								Доверительная вероятность	
								$\alpha=0,9$	$\alpha=0,95$
1	Автоматический выключатель ВА-51	283	217	20	13	2,5	0,038	-7,9 +10,5	-10,5 +10,5
2	Магнитный пускатель ПМЛ	178	135	10	6	1,7	0,076	-10,5 +10,5	-13,1 +14,4
3	Контактор КТИ	180	123	11	6	1,7	0,068	-11,7 +13,2	-16,1 +17,6
4	Предохранитель ПН2-100	281	190	20	15	2,6	0,034	-8,8 +8,8	-11,7 +11,7
5	Пакетный выключатель ПВ-3	206	111	22	20	2,9	0,027	-11,1 +11,1	-14,8 +14,8
6	Рубильник РЕ19	163	144	22	20	2,9	0,040	-10,0 +10,0	-15,0 +12,5
7	Кабельная линия АВВГ – 0,4 кВ	72	65	32	30	3,4	0,028	-14,3 +17,7	-17,8 +21,3

Определим вероятность безотказной работы схемы цеховых сетей, представленных на рис. 3.6.



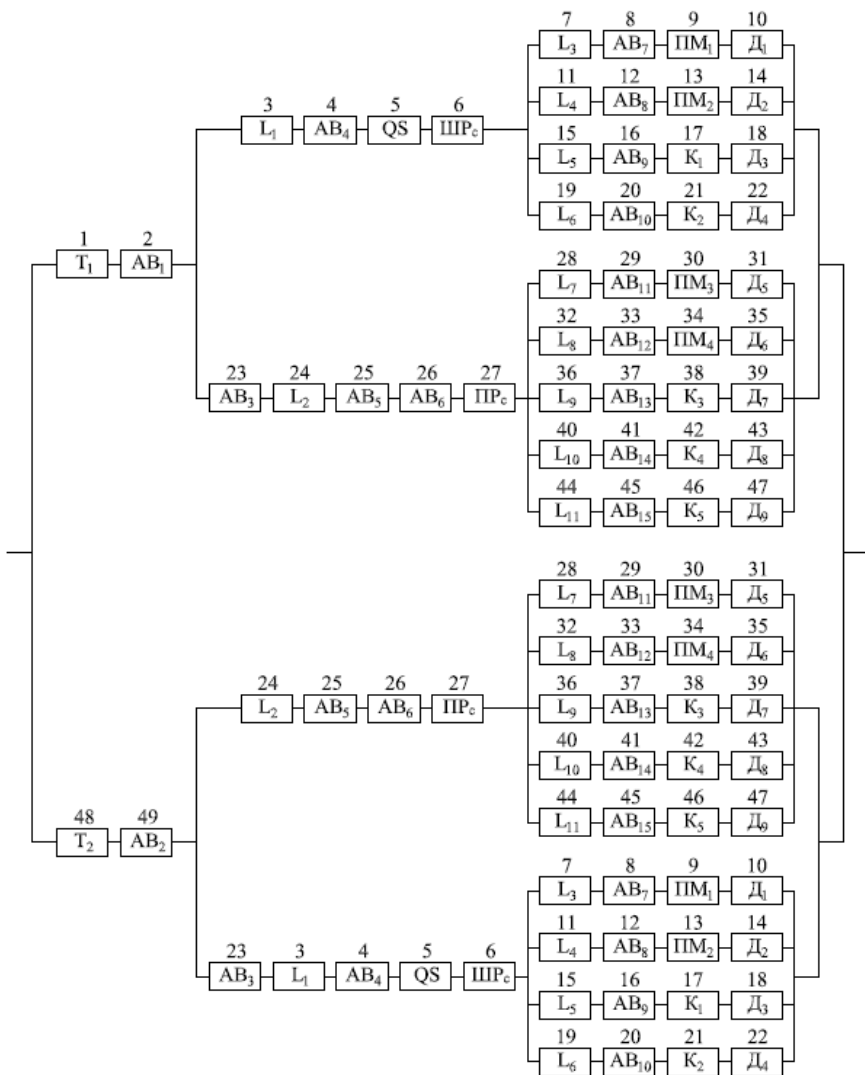
**Рис. 3.6.** Электрическая расчётная схема цеховой сети

Установлено, что эмпирические функции распределения аппроксимируются экспоненциальным законом.

Рассмотрим допущение, позволяющее реальную схему системы электроснабжения при оценке её надёжности заменить на эквивалентную: определение входа и выхода системы, т.е. точек, относительно которых определяется надёжность электроснабжения; все источники питания соединяются в одну точку, и эта точка принимается за абсолютно надёжную.

В электрических схемах электроснабжения с двумя источниками питания логическая схема не может быть сведена к последовательно-параллельным соединениям из-за наличия секционных выключателей. Логическая схема эффективности функционирования электрической расчётной схемы представлена на рис. 3.7. После преобразования последовательных цепей получаем схему, которая включает в себя «мостик» - секционный выключатель на шинах низкого напряжения. Определение показателей надёжности для такой схемы возможно при использовании следующих методов: метода перебора возможных состояний схемы с анализом параметров режимов в каждом состоянии; метода использования формулы полной вероятности и основанного на нём метода разложения на множители.

Для определения вероятностей надёжной работы или отказа целесообразно использовать формулу полной вероятности. Для определения вероятности надёжной работы она интерпретируется следующим образом. Вероятность события работы системы относительно узла вычисляют как сумму произведений вероятностей несовместимых гипотез на вероятность события работы оставшейся части схемы при этой гипотезе. Иными словами, эффективность работы схемы равна сумме произведения вероятности безотказной работы  $i$ -го элемента схемы на вероятность безотказной работы оставшейся схемы и произведения вероятности отказа того же  $i$ -го элемента схемы на вероятность безотказной работы оставшейся схемы. Относительно любого элемента схемы «мостик» можно рассматривать как две несовместимые гипотезы: работа элемента с вероятностью  $p$  и отказ его с вероятностью  $q$ . В качестве такого элемента в схеме выбираем секционный выключатель.



**Рис. 3.7.** Логическая схема расчета эффективности электрической расчётной схемы цеховой сети

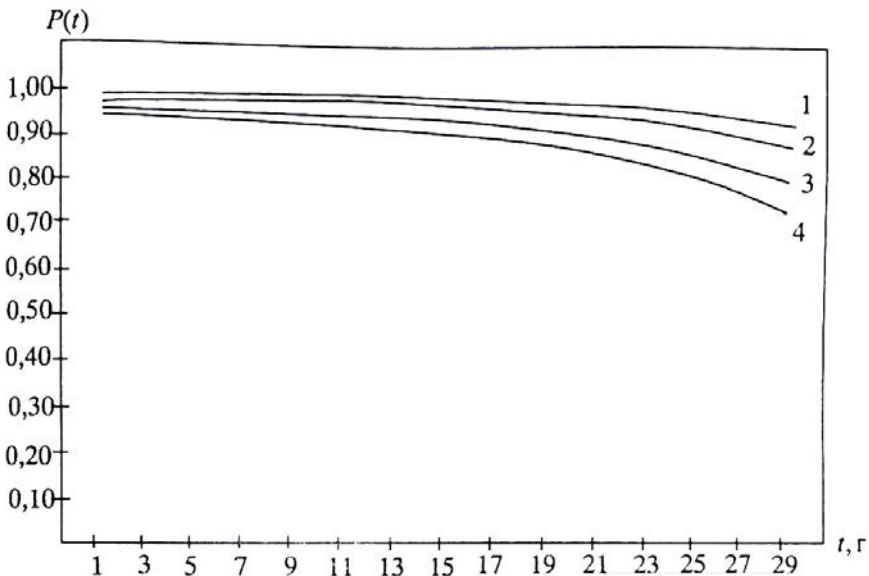
Тогда, применяя формулу полной вероятности, не трудно свести её к сумме двух схем: последовательно-параллельной и параллельно-последовательной. Вычисляем вероятность безотказной работы схемы (рис. 3.8)

$$p_c = p_s[(1 - q_1q_2)(1 - q_3q_4)] + q_5[1 - (1 - p_1p_2)(1 - p_3p_4)] \quad (3.39)$$

$$p_c = 0,9999893$$

В этом выражении  $(1 - q_1q_2)(1 - q_3q_4)$  - вероятность безотказной работы схемы при первой гипотезе - безотказной работы секционного выключателя;  $[1 - (1 - p_1p_2)(1 - p_3p_4)]$  - вероятность безотказной работы схемы при второй гипотезе отказа секционного выключателя;  $p_5$  - вероятность первой гипотезы;  $q_5$  - вероятность второй гипотезы.

Критерием эквивалентности является равенство математических ожиданий и дисперсий показателей надёжности. Оценим вероятность безотказной работы схемы с помощью экспоненциального закона распределения отказов  $P(t) = e^{-\lambda t}$ . За расчётный период примем срок эксплуатации 30 лет.



**Рис. 3.8.** Вероятность безотказной работы схемы: 1 – без учёта коммутационных аппаратов при  $K_3 = 0,3$ . С учётом коммутационных аппаратов: 2 – при  $K_3 = 0,3$  и количестве операций ВО 2 цикла /сутки; 3 – при  $K_3 = 0,9$  и количестве операций ВО 12 циклов/сутки; 4 – при  $K_3 = 1,3$  и количестве операций ВО 20 циклов/сутки

Как показано на рис. 3.8, отношение вероятностей безотказной работы схемы без учёта контактных соединений и с учётом контактных соединений с течением времени увеличивается, что показывает существенное влияние контактных соединений коммутационных аппаратов на эффективность функционирования цеховых сетей. Цеховые сети промышленных предприятий - наиболее разветвлённые и протяжённые большим количеством последовательных соединений, поэтому при оценке характеристик надёжности требуется учёт эксплуатационных характеристик коммутационных аппаратов и контактных соединений.

В двух других работах автором монографии рассмотрено влияние различных видов низковольтных коммутационных аппаратов на надёжность функционирования сетей цеха пластмасс ОАО «Хитон» и предложен метод прогнозирования надёжности контактов низковольтных аппаратов в цепях переменного тока по постепенным отказам, основанный на изменении обобщенного параметра - сопротивления контактов с использованием верных случайных функций.

Сопротивление контактов можно рассматривать также как случайную функцию количества коммутационных циклов  $r(z)$

$$r(z) = r_0 + \int_0^z v dz \quad (3.40)$$

где  $r_0$  – начальное значение сопротивления контактов;  $v$  - скорость изменения сопротивления контактов (угловой коэффициент).

Начальное (расчётное) значение сопротивления контактов рассчитывается по эмпирическим формулам:

- для магнитных пускателей

$$r_0 = 825/I_{\text{ном}} \quad (3.41)$$

- для автоматических выключателей и контакторов

$$r_0 = 825/I_{\text{ном}} \quad (3.42)$$

где  $I_{\text{ном}}$  – номинальный ток коммутационного аппарата.

На основе этих сведений проведены расчёты, позволяющие определить вероятность безотказной работы в зависимости от количества коммутационных циклов.

С достаточной для инженерных расчётов точностью экспериментальные кривые могут быть интерполированы квадратичной зависимостью с помощью полинома Лагранжа. При этом  $r(z)$  следует рассматривать как случайную функцию трёх случайных аргументов: начальной ординаты  $r_0$ , углового коэффициента  $v$  и скорости возрастания углового коэффициента  $a$ .

В соответствии с изложенным выражение (3.40) примет вид

$$r(z) = r_0 + vz + az^2 \quad (3.43)$$

Эмпирические функции распределения аппроксимируются нормальным законом. Полученный вывод позволяет использовать метод малой выборки Стьюдента для вычисления среднего значения начального сопротивления контактов всей генеральной совокупности аппаратов с требуемой доверительной вероятностью.

При этом представляется возможным рассматривать функцию  $r(z)$  как веерную случайную, все реализации которой являются параболлами, исходящими из одной точки, называемой полюсом. Ордината полюса принимается равной среднему значению начального сопротивления контактов

$$r_{0, \text{cp}} = \bar{r} - k\sigma_{\text{м.в.}} \quad (3.44)$$

где  $\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n}$  – выборочная средняя величина;

$\sigma_{\text{м.в.}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n r_i(r_i - r_{\text{cp}})^2}}{n-1}$  – среднее квадратичное отклонение малой выборки.

Коэффициент  $k$  зависит от количества испытанных образцов и и доверительной вероятности  $\beta$ , с которой гарантируется получение  $r_{0, \text{cp}}$ . Для определения  $v_{\text{cp}}$  и  $a_{\text{cp}}$  может быть использован тот же метод, что и для определения  $r_{0, \text{cp}}$ .

Характеристика случайной функции примет вид

$$r_{\text{cp}}(z) = r_{0, \text{cp}} + V_{\text{cp}}z + a_{\text{cp}}z^2 \quad (3.45)$$

Вероятность безотказной работы контактов находится из выражения

$$P(z) = 1 - F(z) \quad (3.46)$$

где  $F(z) = \int_0^z f(z)dz$  – вероятность надёжной работы контакта;

$f(z)$  – плотность вероятности безотказно выполненных коммутаций.

Решение может быть получено из нижеследующих соображений.

Вероятность исправной работы контактов определяется выражением

$$R(z) = \int_{r_{0, \text{cp}}}^{r_{\text{кр}}} f(r)dr \quad (3.47)$$

Так как текущие значения  $r(z)$ , как указано выше, распределяются по нормальному закону, то

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left[-\frac{(r-r_{\text{cp}})^2}{2\sigma_r^2}\right] \quad (3.48)$$

где  $r_{\text{cp}}$  – среднее значение сопротивления контакта;

$\sigma_r$  – среднеквадратическое отклонение сопротивления.

Учитывая (3.45), выражение (3.48) примет вид

$$f(z) = (2az + v) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left[-\frac{(r - (a_{\text{cp}}z^2 + V_{\text{cp}}z + r_{0, \text{cp}}))^2}{2\sigma_r^2}\right] \quad (3.49)$$

Таким образом, далее получим

$$R(r) = \int_{r_{0,cp}}^{r_{kp}} (2az + v) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_r}} \exp \left[ -\frac{(r - (a_{cp}z^2 + V_{cp}z + r_{0,cp}))^2}{2\sigma_r^2} \right] dz \quad (3.50)$$

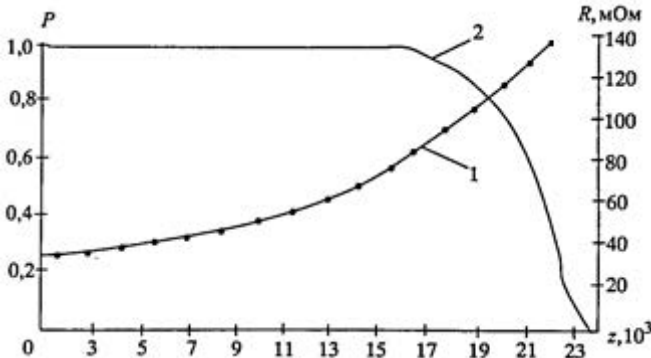
а плотность вероятности

$$f(r) = (2az + v) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_r}} \left( \exp \left[ -\frac{(r_{kp} - (a_{cp}z^2 + V_{cp}z + r_{0,cp}))^2}{2\sigma_r^2} \right] - \exp \left[ -\frac{(r_{0,cp} - (a_{cp}z^2 + V_{cp}z + r_{0,cp}))^2}{2\sigma_r^2} \right] \right) \quad (3.51)$$

Вероятность безотказной работы контактов определяется по формуле

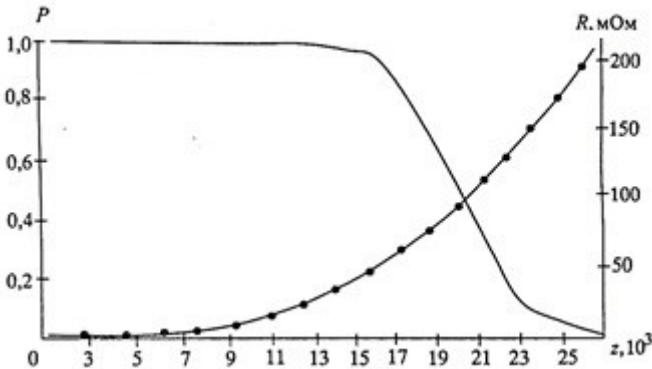
$$P(z) = 1 - \int_0^z f(z) dz = \int_0^z (2az + v) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_r}} \left( \exp \left[ -\frac{(r_{kp} - (a_{cp}z^2 + V_{cp}z + r_{0,cp}))^2}{2\sigma_r^2} \right] - \exp \left[ -\frac{(r_{0,cp} - (a_{cp}z^2 + V_{cp}z + r_{0,cp}))^2}{2\sigma_r^2} \right] \right) dz \quad (3.52)$$

Полученный интеграл рассчитывается с помощью электронного приложения «MATLAB». С помощью этой же программы построены зависимости вероятности работы аппаратов от количества коммутационных циклов (рис. 3.9, 3.10).



**Рис. 3.9.** Зависимости вероятности безотказной работы автоматического выключателя ВА51 и сопротивления  $r$  от количества коммутационных циклов  $z \cdot 10^3$ : 1 (-•-) сопротивление; 2 (—) вероятность безотказной работы





**Рис. 3.10.** Зависимости вероятности безотказной работы магнитного пускателя ПМЛ и сопротивления  $r$  от количества коммутационных циклов  $z \cdot 10^3$ : 1 (-•-) сопротивление; 2 (—) вероятность безотказной работы

Начальные значения сопротивления магнитных пускателей автоматических выключателей соответственно составляют следующие ряды:

- магнитные пускатели ПМЛ:  
37,125; 37,95; 38,778; 39,6; 40,425; 41,25; 49,5; 57,75; 66; 74,25 мОм;
- автоматические выключатели ВА51:  
42,75; 43,7; 45,2; 46,55; 47,5; 57; 66,5; 76; 85,5 мОм.

Согласно формулам (3.40), (3.45) выборочная средняя величина сопротивления и среднее отклонение малой выборки магнитных пускателей равны  $r_0 = 48,26$  и  $\sigma_{м.в.} = 4,43$ , для автоматических выключателей -  $r_0 = 55,58$  и  $\sigma_{м.в.} = 5,1$ . С доверительной вероятностью  $\alpha = 0,95$  среднее значение начального сопротивления  $r_{0, ср.мп} = 45,38$  мОм и  $r_{0, ср.ав} = 52,26$  мОм (коэффициент  $k = 0,65$ ). Аналогично рассчитываются параметры  $v_{ср}$  и  $\sigma_{ср}$ .

Разработанный метод является общим и позволяет прогнозировать надёжность аппаратов с достаточной точностью.

### 3.5. Проверка коммутационных аппаратов на коммутационную способность

Надёжность работы коммутационной системы в определённой степени определяется коммутационной способностью аппаратов и проверяется расчётом переходного восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя при отключении коротких замыканий в сетях.

На коммутационную способность проверяются все коммутационные аппараты. Наиболее сложна процедура проверки на коммутационную способность высоковольтных выключателей, которая предусматривает соблюдение условий

$$I_{\text{откл.ном}} \geq I_{\text{пт}} \quad (3.53)$$

$$i_{\text{а ном}} = \sqrt{2} \frac{\beta_{\text{норм}}}{100} I_{\text{откл.ном}} \geq I_{\text{ат}} \quad (3.54)$$

где  $I_{\text{откл.ном}}$  – номинальный ТОК отключения выключателя (действующее значение периодической составляющей тока);

$I_{\text{пт}}$  – действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания в цепи В момент  $\tau$  начала расхождения дугогасительных контактов выключателя;

$i_{\text{а,норм}}$  – нормированное значение аperiodической составляющей тока отключения;

$\beta_{\text{норм}}$  – нормированное процентное содержание аperiodической составляющей в токе отключения (определяется по рис. 3.11);

$i_{\text{ат}}$  – расчётное значение аperiodической составляющей тока КЗ цепи в момент  $\tau$ .

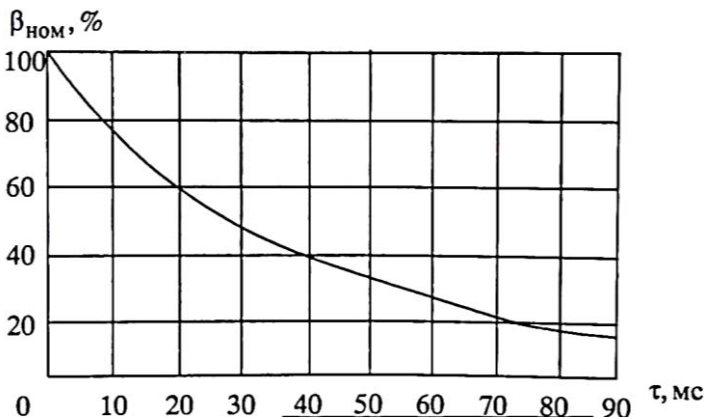


Рис. 3.11. Кривая для определения нормированного процентного содержания аperiodической составляющей в отключаемом токе

Если условие (3.53) выполняется, а условие (3.54) не выполняется, то проверку выключателей на коммутационную способность допускается проводить по выражению

$$\sqrt{2} \left( 1 + \frac{\beta_{\text{норм}}}{100} \right) I_{\text{откл.ном}} \geq \sqrt{2} I_{\text{пт}} + i_{\text{ат}} \quad (3.55)$$

Затем проверяются следующие условия:

$$I_{\text{вкл.норм}} \geq I_{\text{по}} \quad (3.56)$$

$$i_{\text{вкл.норм}} \geq i_{\text{уд}} \quad (3.57)$$

$$U_{\text{в.норм}} \geq U_{\text{в}} \quad (3.58)$$

Где  $I_{\text{вкл.норм}}$  – нормированное действующее значение периодической составляющей тока включения выключателя;

$I_{\text{по}}$  – начальное значение периодической составляющей тока КЗ;

$i_{\text{вкл.норм}}$  – нормированное мгновенное значение тока включения выключателя;

$i_{\text{уд}}$  – ударное значение тока КЗ;

$U_{\text{в.норм}}$  – нормированное значение собственного восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя при отключении КЗ в цепи;

$U_{\text{в}}$  – собственное восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя при отключении расчётного КЗ в цепи.

Выключатель, удовлетворяющий по своим параметрам (3.53) (3.58), может быть принят к установке в данной цепи.

Расчёт переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) на контактах выключателя при отключении КЗ сводится, как известно, к определению закона изменения во времени этого напряжения - скорости восстанавливающегося напряжения и максимального значения этого напряжения. Скорость восстанавливающегося напряжения и максимальное значение восстанавливающегося напряжения зависят от ряда факторов, в том числе от места установки выключателя и от расположения точки КЗ. Наиболее характерным является КЗ: в начале воздушной линии, т.е. непосредственно за выключателем.

### **3.6. Совершенствование защитных характеристик автоматических выключателей низкого напряжения**

В настоящее время защита электроустановок на напряжение 0,4 кВ строится в основном на автоматических выключателях, оснащённых тепловыми и электромагнитными расцепителями, срабатывающими без выдержки времени в зоне токов КЗ, или электронными расцепителями, имеющими регулируемую выдержку. В отличие от первых электронные расцепители обладают высокой точностью и термостабильностью параметров срабатывания и позволяют их регулировать в широком диапазоне.

Для повышения чувствительности к однофазным замыканиям или замыканиям на землю в электронные расцепители встраивают защиты, реагирующие соответственно на ток нулевой последовательности или на дифференциальный ток.

Однако, как показывает опыт, перечисленные выше критерии в ряде случаев недостаточны для 100%-ной гарантии защиты ряда ответственных потребителей. И объясняется это тем, что отдельные недостатки защиты заложены в самом принципе «ступенчато-временной» селективности.

Чем ближе к источнику расположен выключатель, тем больше ожидаемый ток КЗ, но и больше принудительная выдержка времени, т.е. сильнее термическое действие тока КЗ на элементы цепи. Значительно больше будет и энергия электрической дуги при «дуговом» КЗ. Более совершенной была бы защитная характеристика, когда при переходе на более высокую ступень защиты время срабатывания уменьшалось или, по крайней мере, не увеличивалось.

Другим недостатком является сравнительно невысокая надёжность защиты, особенно в наиболее «тяжёлом» режиме - в зоне токов КЗ. Надёжность защиты любого участка электрической сети определяется вероятностью безотказной работы выключателя, защищающего этот участок.

Гарантированные заводами-изготовителями значения (0,95-0,97) вероятности безотказной работы отечественных выключателей при выполнении защитных функции уже не отвечают современным требованиям. Например, отказ защиты электроустановки собственных нужд АЭС может вызвать серьёзные технологические последствия, а для городских сетей отказ защиты приводит к повреждениям кабельных линий, проложенных в земле и, как следствие, к большим затратам на устранение аварий. Поэтому важным направлением повышения надёжности является переход к защите не одним, а системой из двух аппаратов. Такое

требование к защите ответственных потребителей, именуемое «дальним» резервированием, появилось сравнительно недавно и заключается в том, что при отказе любого выключателя резервную защиту участка цепи за ним должен осуществлять вышестоящий аппарат.

Повышенная чувствительность защиты к токам КЗ может быть обеспечена также путём отстройки от пусковых токов двигателей. Для этого необходимо в пределах одного периода идентифицировать вид тока возмущения, т.е. установить является этот ток пусковым или током удалённого КЗ. А к алгоритмам срабатывания существующей токовой уставки, которая выбирается с учётом возможности пуска двигателей, добавить вторую уставку, меньшую по значению и согласованную с ожидаемым током удалённого КЗ. Естественно, меньшая уставка должна блокироваться при пусках и, наоборот, активизироваться при КЗ.

Селективная работа выключателей, как известно, обеспечивается не только соответствующим выбором задержек на отключение, но и разными значениями интеграла Джоуля пропускаемого тока. «Интегральный» способ селективной защиты известен и используется в защите на предохранителях. Вместе с тем селективная защита на предохранителях не может быть достаточно быстродействующей по следующим причинам:

- в предохранителях защитные характеристики зоны токов перегрузки и зоны токов КЗ взаимосвязаны, поэтому добиться минимальной «раздвижки» защитных характеристик в зоне токов КЗ чаще всего не удаётся;

- значения интегралов плавления и отключения нестабильны из-за конструктивных и технологических разбросов параметров предохранителей;

- существенное влияние на интеграл плавления вышестоящего предохранителя оказывают токи «предыстории» (ток КЗ в фидерах, защищаемых нижестоящим предохранителем, может быть соизмерим с током перегрузки в соседних фидерах).

Указанные недостатки при реализации «интегральной» селективности на базе выключателей с электронными расцепителями могут быть устранены. Но для обеспечения быстродействия «интегральной защиты» и исключения неопределённости необходимо быстро отстроиться от аperiodической составляющей тока КЗ, поскольку токовые уставки задаются действующим значением периодической составляющей. Действующее значение периодической составляющей тока в переходном процессе обычно определяют «медленным» методом интегрирования мгновенного значения за время не менее трёх периодов (60 мс). Исходя из этого, выражение для действующего значения

периодической составляющей тока возмущения  $\Delta I_\Phi$  при трёхфазном КЗ имеет вид

$$\Delta I_\Phi = \frac{\sqrt{s(t)}}{3 \left[ 1 - 2e^{-\frac{t}{\tau}} \cos \omega t + e^{-\frac{2t}{\tau}} \right]} \quad (3.59)$$

где  $s(t)$  – функция суммы квадратов мгновенных значений фазных токов системы;

$\tau$  – электромагнитная постоянная времени цепи.

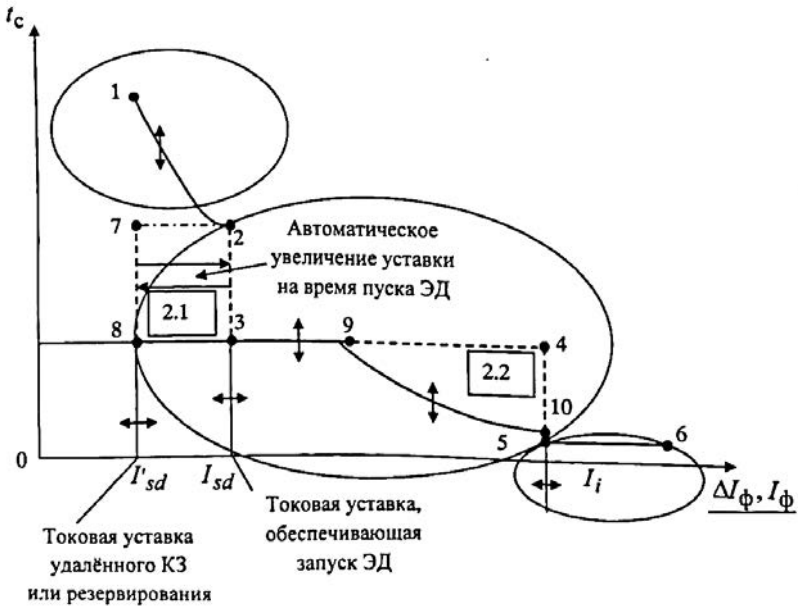
Расчётные значения параметров срабатывания и отключения всех выключателей «интегральной» защиты приведены в табл. 3.6.

**Таблица 3.6.**

Результаты расчётов значений параметров срабатывания

Номер ступени	IV	III	II	I
Тип выключателя	BA04	BA51	BA57	AK50Б
Предельный ток КЗ в месте установки выключателя, кА	10	10	20	30
Интеграл Джоуля срабатывания $10^3 \text{ A}^2 \text{ c}$	-	1600	4000	14000
Интеграл Джоуля отключения $10^3 \text{ A}^2 \text{ c}$	800	2000	7000	-
Время срабатывания при отключении предельного для цепи тока КЗ, мс	7	24	10	20

«Дальнее» резервирование обеспечивается путём использования новой времятоковой характеристики, приведённой на рис. 3.12.



**Рис. 3.12.** Времятоковая характеристика защиты на основе предлагаемых технических решений: 1.  $L$  – защита в зоне токов перегрузки; 2.  $S$  – защита от междуфазных КЗ: 2.1.  $S_1$  – защита «дальнего» резервирования или удалённого КЗ; 2.2.  $S_2$  – быстродействующая интегральная защита; 3.  $I$  – мгновенное отключение («отсечка»)

Сравнение данной времятоковой характеристики с характеристикой существующих выключателей показывает, что они имеют значительные отличия. По оси абсцисс новая характеристика имеет два параметра – фазный ток  $I_\phi$  и ток возмущения цепи  $\Delta I_\phi$ . В зоне перегрузки выключатель реагирует на реальный фазный ток, а в зоне КЗ – на его приращение – ток возмущения цепи. Помимо обычной токовой уставки  $I_{sd}$ , выбираемой по условиям пуска двигателя, введена вторая уставка  $I'_{sd}$ , меньшая по значению и блокируемая на время пуска.

Если для существующих выключателей переход от зоны перегрузки к зоне КЗ происходит всегда по одной линии 2-3, то для предлагаемых выключателей указанный переход, в зависимости от причины возмущения, может происходить или по линии 2-3 (уставка  $I_{sd}$ ), или по линии 2-7-8 с уставкой  $I'_{sd}$ . Срабатывание защиты может происходить, в момент определяемый как обычной временной уставкой  $I_{sd}$ , так и «интегральной»

установкой, поэтому время срабатывания при больших токах КЗ существенно снижается. Это и позволяет сделать защиту более чувствительной и быстродействующей.

Количественная оценка повышения качества защиты для рассмотренного случая выглядит следующим образом:

- время срабатывания защиты при отключении предельных токов КЗ уменьшено в 20 раз;
- термическое действие тока КЗ на элементы электроустановки уменьшено в 15 раз;
- энергия, выделяющаяся в электрической дуге при дуговом КЗ, уменьшена в 15 раз;
- вероятность отказа защиты при отключении токов КЗ уменьшена в 20 раз.



## 4. ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО ДАННЫМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ

### 4.1. Основные теплофизические процессы в замкнутых электроконтактных системах

В последнее время тепловизионная техника всё чаще стала использоваться для диагностики состояния электрического оборудования. Особенно эффективной по данным тепловизионного контроля оказалась оценка параметров надёжности электроконтактных соединений.

Таким образом, рассматриваемый раздел фактически является естественным продолжением предыдущего исследования.

Известно, что количество тепла, выделяющегося в проводнике при прохождении через него электрического тока, в общем виде:  $Q$  пропорционально сопротивлению  $R$  проводника, квадрату силы тока  $I$  в цепи и времени прохождения тока  $t$

$$Q = aI^2Rt \quad (4.1)$$

Здесь  $a$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбранных единиц измерения: если  $I$  измеряется в амперах,  $R$  – в Ом,  $t$  – в сек, то  $a = 0,239$ ;  $Q$  выражено в калориях, при  $a = 1$  – в Дж.

Показанный закон Джоуля-Ленца был сформулирован в 1841 г. английским физиком Д.Ж Джоулем и независимо от него в 1842 г. русским учёным Э.Х. Ленцем.

Нагрев электрического контакта коммутационного аппарата при прохождении через него тока есть результат действия ряда теплофизических процессов. Важнейшим является наличие внутренних источников тепла, происхождение которых связано с джоулевым тепловыделением в области стягивания. Удельная мощность  $q$  этих источников определяется по выражению

$$q = j^2 \rho = \frac{I_p^2}{S^2} \rho \quad (4.2)$$

где  $j$  – плотность электрического тока, А/мм<sup>2</sup>;

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·мм;

$I_p$  – рабочий ток, А;

$S$  – сечение, через которое протекает ток, мм<sup>2</sup>.

Определим по выражению (4.2) величину  $q$  для магнитного пускателя ПМЛ и автоматического выключателя ВА51 (табл. 4.1).

Таблица 4.1.

Тепловая энергия, обусловленная джоулевым тепловыделением

Аппарат	$I_n, A$	$I_p, A$	$S, mm^2$	$\rho_{OM}, mm$	$q, Дж/мм^2$
ПМЛ	63	63	100	1,7	0,674
ВА51	20	20	40	1,7	0,425

Наряду с джоулевым источником тепла на нагрев замкнутых контактов влияют тепловые эффекты Томсона, Пельтье, Колера, обусловленные связью между электрическими и тепловыми явлениями в контактах.

Одно из термоэлектрических явлений - эффект Томсона. Он был открыт в 1856 г. У. Томсоном (лордом Кельвином) и состоит в том, что если вдоль проводника, по которому проходит электрический ток, существует перепад температур, то в дополнение к теплоте, выделяемой в соответствии с законом Джоуля-Ленца в объеме проводника выделяется или поглощается (в зависимости от направления тока) дополнительное количество теплоты  $Q$ , пропорциональное силе тока  $I$ , времени  $t$ , перепаду температур  $(T_2 - T_1)$

$$Q = \sigma(T_2 - T_1)It \quad (4.3)$$

где  $\sigma$  – коэффициент Томсона, зависящий от природы материала.

В рассматриваемом нами случае эффект Томсона возникает в случае неравномерно нагретого проводника и заключается в передаче тепла от более нагретых частей к менее нагретым, которое осуществляется носителями тока. Удельная мощность внутренних источников тепла коммутационных аппаратов определяется по выражению

$$q_T = \frac{\sigma_T \Delta\theta I}{Sl} \quad (4.4)$$

где  $\Delta\theta$  – разность температур на катоде и аноде, К;

$\sigma_T$  – коэффициент Томсона, мкВ/град;

$S$  – площадь контакта, мм<sup>2</sup>;

$l$  – длина контакта, мм;

$I$  – рабочий ток, А.

Величина коэффициента Томсона  $\sigma_T$ , в нашем случае также зависит от температуры и для большинства материалов эта зависимость линейная.

Определим по выражению (4.4) величину  $q_T$  для магнитных пускателей и автоматических выключателей (табл. 4.2).

Таблица 4.2.

Тепловая энергия, выделяющаяся в контактах магнитного пускателя и автоматического выключателя, обусловленная эффектом Томсона

Аппарат	$I_n, A$	$I_p, A$	$S, \text{мм}^2$	$\sigma_T$	$l, \text{мм}$	$q, \text{Дж/мм}^2$
ПМЛ	63	63	100	2,3	6	0,0241
ВА51	20	20	40	2,3	4	0,0287

Кроме эффекта Томсона определённую роль в процессе нагрева контактов коммутационных аппаратов может играть эффект Пельтье. Эффект Пельтье — это выделение или поглощение тепла при прохождении электрического тока через контакт (спай) двух различных проводников.

Выделение тепла сменяется поглощением при изменении направления тока. Эффект открыт французским физиком Ж. Пельтье в 1843 г. Количество выделенного или поглощённого тепла  $Q$  в общем виде пропорционально величине тока  $I$ , проходящего через спай

$$Q = \Pi I \quad (4.5)$$

Здесь  $\Pi$  – коэффициент Пельтье:  $\Pi = -T\Delta\alpha$ ,

где  $T$  – абсолютная температура в К,

$\alpha$  – разность термоэлектрических коэффициентов проводников.

Теоретические представления позволяют выразить коэффициент Пельтье через микроскопические характеристики электронов проводимости. Эффект Пельтье особенно велик у полупроводников, что используются для создания охлаждающих обогревающих полупроводниковых приборов. Мощность тепловых источников Пельтье определяется по выражению

$$q_{\Pi} = U_{\Pi} I \quad (4.6)$$

Где  $I$  – протекающий ток;

$U_{\Pi} = K_s \theta$  – коэффициент Пельтье,

где  $K_s$  – коэффициент термо-ЭДС;

$\theta$  – температура нагрева проводника.

Решение уравнения теплового баланса можно получить в следующем виде

$$\theta = \theta_{\text{ном}} \left( \frac{I}{I_{\text{ном}}} \right)^2 \quad (4.7)$$

где  $\theta_{\text{ном}}$  – температура перегрева, соответствующая номинальной нагрузке  $I_{\text{ном}}$ .

Определим по выражению (4.6) величину  $q_{\Pi}$  для магнитного пускателя и автоматического выключателя (табл. 4.3). Предположим, для расчёта, что контакты медномолибденовые.

Таблица 4.3.

Тепловая энергия, обусловленная эффектом Пельтье

Аппарат	$I_n, A$	$I_p, A$	$\theta, K$	$U_n, мкВ$	$K_s, мкВ/К$	$Q_n, Дж/мм^2$
ПМЛ	63	63	500	2200	4,4	0,138
ВА51	20	20	200	2200	4,4	0,044

Эффект Колера – полуэмпирическое правило, утверждающее, что отрицательное изменение сопротивления  $\rho$  металла в магнитном поле  $H$ , зависящее от многих факторов (температуры, примесей и т.п.), может быть выражено в виде зависимости от величины

$$H_{\text{эф}} = H \frac{\rho_{300}}{\rho} \quad (4.8)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника в отсутствии поля;

$\rho_{300}$  – сопротивление при температуре (300 К).

Правило Колера позволяет данные о зависимости сопротивления  $\rho$  от поля  $H$  для разных образцов одного металла изобразить в виде кривой. Это выражение было установлено впервые немецким физиком М. Колером в 1938 г.

Так как  $H_{\text{эф}} \sim 1/T_n$  (здесь  $l$  – длина свободного пробега;  $T_n$  – средний радиус орбиты электрона в магнитном поле), то правило Колера указывает на то, что главная причина изменения сопротивления в магнитном поле – вращение электронов вокруг магнитных силовых линий.

Отклонения от правила Колера, наблюдающиеся главным образом, на монокристаллических образцах металлов, нашли объяснение в современной теории гальваномагнитных явлений. В нашем случае правило Колера наблюдается тогда, когда на контактной поверхности имеются тонкие плёнки, т.е. контакт носит квазиметаллический характер.

При этом на плёнке между катодом и анодом возникает туннельная разность потенциалов, создающая на поверхности катода напряжённость поля, достаточную для обеспечения автоэлектронной эмиссии. Электроны проводимости, проникающие через плёнку посредством туннельного эффекта без изменения своего энергетического уровня, увеличивают свою кинетическую энергию при достижении анода с меньшим отрицательным потенциалом, чем катод.

Теплота, возникающая при отдаче электронами избытка своей кинетической энергии, создает анодной стороне контакта поверхностный источник с удельной мощностью  $P_f$ :

$$P_f = \frac{IU_f}{\pi f^2} \quad (4.9)$$

где  $f$  – радиус контактной площадки; из экспериментальных данных следует, что для медных контактов (при  $I_{\text{ном}} < 75$  А) он лежит в пределах  $f = 0,2-0,3$  мм;

$I$  – рабочий ток, А;

$U_f$  – коэффициент Колера.

Используя соотношение  $U_f = \frac{I \sigma_f}{\pi f^2}$  получим

$$P_f = \frac{I^2 \sigma_f}{\pi^2 f^4} \quad (4.10)$$

Здесь  $\sigma_f$  – туннельное поверхностное удельное сопротивление плёнки, зависящее от толщины  $\sigma_f = \rho_f d$ ,

где  $\rho_f$  – линейное удельное электрическое сопротивление плёнки;

$d$  – толщина плёнки.

Определим по выражению (4.10) величину  $P_f$  для магнитного пускателя и автоматического выключателя (табл. 4.4).

**Таблица 4.4.**

Тепловая энергия, обусловленная эффектом Колера

Аппарат	$I_n$ , А	$I_p$ , А	$f$ , мм	$\frac{\rho_f}{\text{Ом} \cdot \text{мм}}$	$P_f$ , Дж/мм <sup>2</sup>
ПМЛ	63	63	0,3	2200	0,631
ВА51	20	20	0,28	2200	0,264

Таким образом, из вышеприведённых расчётов видно, что наибольшее влияние на нагрев электрических контактов оказывает эффект Колера или туннельный эффект, особенно в случае сильно загрязнённых контактов. Эффект Пельтье имеет место только в случае контактов, образованных двумя разными материалами. Эффект Томсона играет определённую роль в тепловых процессах мостиковой эрозии, действие этого эффекта на температурное поле области стягивания замкнутых контактов в обычных условиях пренебрежимо мало.

## 4.2. Индивидуальные средства тепловизионного контроля

В настоящее время в энергетике РФ имеет место переход от системы плано-предупредительных ремонтов к ремонтам части основного оборудования по действительному техническому состоянию электрооборудования и к универсальным средствам диагностирования электрооборудования - современным тепловизионным приборам (ТВП). С помощью термографических средств можно идентифицировать такие дефекты, как локальный нагрев элементов конструкции, ухудшение состояния контактных соединений, и тем самым увеличить ресурс электрооборудования за счёт выявления дефектов на ранней стадии их развития.

При помощи инфракрасной термографии (тепловизионного контроля) выявляются следующие неисправности в системе контактных соединений:

а) в баковых, масляных и воздушных выключателях:

- ухудшение состояния основной изоляции, изоляции вводов, шунтирующих конденсаторов;

- перегрев контактных соединений аппаратных зажимов, контактов дугогасительных устройств;

б) в разъединителях, отделителях, шинных мостах и их изоляции:

- нарушения разъёмных контактных соединений, аппаратных зажимов, гибких связей;

- трещины в штыревых и опорно-стержневых изоляторах;

- дефекты подвесной изоляции;

в) в вентильных разрядниках, ограничителях перенапряжений:

- обрыв шунтирующих сопротивлений, нарушение герметизации элементов;

- неправильная комплектация и неравномерность распределения напряжения по элементам;

г) в кабельных линиях:

- нарушение контактных соединений и оценка пожаробезопасности пучков кабелей;

- ухудшение изоляции концевых муфт и кабельных заделок и т.д.

Ниже рассмотрены краткий обзор состояния и области применения тепловизионных приборов с краткой характеристикой небольшой части современных серийных средств диагностического контроля.

В современных тепловизионных приборах широко используются разнообразные фотонные (квантовые), а в последнее время и тепловые

приёмники излучения, являющиеся по существу основными компонентами этих приборов.

В первом поколении ТВП, появившихся несколько десятилетий назад как инфракрасные системы переднего обзора (*FLIR*), использовались линейчатые фотоприёмные устройства (ФПТУ), требующие весьма глубокого охлаждения. Поскольку число элементов ФПУ таких ТВП было сравнительно невелико (от одного до нескольких десятков), в ТВП использовалось сканирование поля зрения как по строке, так и по кадру, причём каждому элементу ФПУ соответствовал отдельный усилитель. Тепловизионное изображение при этом обычно формировалось с помощью светодиодной линейки непосредственно в глазу оператора через окулярную оптику.

ТВП второго поколения отличаются от ТВП первого поколения использованием существенно более длинных приёмных линеек, что позволяет ограничиться сканированием поля зрения прибора лишь в одном направлении - по строке, обеспечивая требуемое его значение по кадру за счёт достаточно большого числа чувствительных элементов.

Преимущество использования многорядного субматричного фотоприёмника, состоящего из нескольких таких линеек, достигается в режиме временной задержки и накопления, который, в свою очередь, может быть реализован при наличии высоколинейного сканера. Использование субматричных фотоприёмников в данном режиме, как известно, обеспечивает повышение температурной чувствительности прибора, однородности соответствующего тепловизионного изображения, а также временной стабильности и надёжности каналов ТВП благодаря многократному резервированию.

В приборах третьего поколения, эволюция которых в результате успехов в области микроэлектроники и развития полупроводниковой технологии уже достигла в промышленно развитых странах стадии серийного производства, оптико-механическая система сканирования отсутствует, поскольку число чувствительных элементов используемого матричного фотоприёмника (МФП) настолько велико, что он перекрывает все поле зрения ТВП.

Замена оптико-механического сканирования электронным устраняет искажение изображения, упрощает аппаратуру, снижает стоимость (в 1,3 раза, благодаря отсутствию блока оптико-механического сканирования), массу и габариты (в 1,5-1,8 раза), потребляемую мощность, повышает надёжность и виброудароустойчивость.

Внедрение в оптико-электронное приборостроение МФП считается в настоящее время одним из наиболее перспективных направлений как при

создании сложных систем с высокими техническими характеристиками, так и при разработке малогабаритных, недорогих ТВП с неохлаждаемыми тепловыми матрицами, пригодных для решения широкого круга задач в промышленности, военном деле, медицине, на транспорте и в быту.

При этом следует отметить, что именно с появлением матричного фотоприёмника была реализована единственная оставшаяся возможность радикального снижения (улучшения) порога чувствительности аппаратуры, ибо все другие возможности для этого уже были исчерпаны.

ТВП третьего поколения принято разделять на следующие три группы:

- К первой группе относятся высококачественные ТВП, работающие в двух и более спектральных поддиапазонах, имеющие МФП с очень высокой квантовой эффективностью и системой считывания, которая сохраняет и обрабатывает практически все фотоэлектроны.

Это охлаждаемые МФП с высокой частотой кадров (до 480 Гц) и приемлемой стоимостью для рабочих температур 80-180 К. Для этих ТВП достижимы следующие основные параметры:

- спектральные рабочие диапазоны 3-5 мкм;
- формат элементов МФП 1000×1000, 2000×2000;
- размер элемента до 18×18 мкм;
- разность температур, эквивалентная шуму до 0,01 К (8-12 мкм) на КРТ и до 0,05 К (3-5 мкм);
- частота кадров до 480 Гц;
- пространственная неоднородность элементов МФП до 0,5 РТЭШ (разность температур эквивалентная шуму).

- Вторую группу составляют ТВП с неохлаждаемыми тепловыми МФП, имеющие характеристики, соответствующие средним характеристикам двух первых поколений с охлаждаемыми приёмниками изучения. Они не нуждаются в сложных системах охлаждения и имеют гораздо меньшую стоимость, массу и энергопотребление. Параметры ТВП этой группы:

- размеры элемента 25×25 мкм;
- формат элементов 1000×1000;
- РТЭШ до 0,01 К при относительном отверстии 1:1 и 0,06 К при 1:2,5.

- Третья группа включает в себя предельно дешёвые тепловые микродатчики (микро-ТВП), которые могут открыть новые рынки ТВП благодаря их низкой стоимости, малым размерам, массе и мощности.



Это позволяет создать ряд новых ТВП, например, одноразового применения, для высокоточного оружия и т.п. ТВП этой группы обладают следующими параметрами:

- размер элемента  $(25-50) \times (25-50)$  мкм;
- формат элементов  $160 \times 120$ ,  $320 \times 240$ ;
- РТЭШ до 0,05 К при относительном отверстии 1:1.8;
- масса до 0,03 кг.

Общими тенденциями развития ТВП второго и третьего поколений являются:

- снижение стоимости ТВП за счёт повышения рабочей температуры ФПУ или вообще отказа от системы охлаждения;
- уменьшение количества электронных блоков до 1 - 2;
- расширение области применения на основе концепции двойных технологий;
- обеспечение работы в автоматическом и автономном режимах;
- создание схем считывания сигнала с ФПУ с произвольным направлением.

При это следует иметь в виду, что в настоящее время благодаря более высокой технологической освоенности ТВП на основе ФПУ, работающих в спектральном диапазоне 3-5 мкм обладают лучшими техническими характеристиками, чем ТВП для диапазона 8-12 мкм, но при этом обеспечивают значительно меньшую помехоустойчивость имеют более низкую эффективность при вскрытии объектов на низкотемпературных фонах.

Ниже приводятся краткие характеристики ряда индивидуальных средств тепловизионного контроля.

**1. Инфракрасные тепловизионные камеры *ThermaCAM* типа *B20*, типа *E25*, типа *E45*, типа *E65*** - всего 4-х видов. Такие тепловизионные камеры представляют собой компактные, лёгкие в использовании, надёжные устройства. Предназначены для повседневных проверок электрических и механических объектов, позволяют своевременно обнаруживать проблемные места, связанные с перегрузками и перегревом оборудования, повреждением изоляции, плохими контактами и т.п. Все камеры этих типов имеют диапазон измеряемых температур  $-20 - +250$  °С; погрешность измерения  $+2$  °С или 12% от показания; высокую температурную чувствительность (0,08-0,2 °С при 30 °С). Габаритные размеры:  $265 \times 80 \times 105$  мм.

**2. Мощные инфракрасные системы *ThermaCAM P60*** предназначены для профессиональных термографистов, работающих на крупных предприятиях и в энергосистемах, где имеются диагностические

лаборатории. Эти системы осуществляют прецизионное бесконтактное измерение температуры в широком интервале  $-40 - +2000$  °С; имеют автофокусировку, встроенную цифровую видеокамеру, эргономичную портативную конструкцию, разрешающую способность по температуре  $0,08$  °С, встроенный видеоискатель, ЖК-дисплей, программное обеспечение, встроенный лазерный целеуказатель, высокую скорость передачи изображения, беспроводную связь с компьютером и т.д.

Камера Thermo CAM P60 предназначена для работы в жёстких внешних условиях, она ударо- и вибропрочна, является пылебрызгонепроницаемой, удовлетворяет требованиям IP54 (возможность использования во всех погодных условиях).

**3. Комплектные инфракрасные системы ThermoCAM tuna E2** являются самыми маленькими полнофункциональными камерами в мире. Предназначены для повседневного обследования электрических и механических объектов, инспекции трубопроводов и изоляции. Диапазон измерения температур  $-20 - +900$  °С; температурная чувствительность  $0,12$  °С. Система мгновенно отображает проблемные места с перегрузками и перегревом оборудования, повреждением изоляции, плохими контактами и т.п.

**4. FLIR ThermoCAM SC3000** – это высокопроизводительная система для получения инфракрасного изображения и проведения измерений температуры с целью детального анализа температурных полей.

В системе используется самый современный QWIP фотодетектор. Это позволяет получать качественные снимки и проводить измерения температуры с высокой точностью и чувствительностью до  $0,02$  °С. Благодаря высокой стабильности и однородности изображения SC 3000 идеально подходит для реализации задач, где предъявляются повышенные требования к температурной чувствительности.

**5. Портативные компьютерные термографы IRTIS-200**, базовая модель которых представляет собой ИК-приёмник, охлаждаемый жидким азотом. Камера имеет высокую чувствительность в широком диапазоне температур и позволяет стабилизировать параметры ИК-приёмника независимо от температуры окружающей среды, обеспечивает высокую точность измерения абсолютных температур. Получаемые термограммы передаются в компьютер для дальнейшей их обработки. Технические характеристики термографов IRTIS-200 представлены в табл. 4.5.

**Таблица 4.5.**Технические характеристики термографов *IRTIS-200*

Чувствительность, °С	0,05 при +30 °С
Разрешение кадра, пикселей	256x256
Поле зрения камеры, град	25°x20°
Диапазон измеряемых температур, °С	-20 - +200
Точность измерения, °С	±2 (±2% от показания)
Диапазон рабочих температур, °С	-10 - +40

Отличительными качествами термографа, кроме высокой чувствительности и высокой разрешающей способности, что обеспечивает получение чётких термограмм, также являются: хорошее программное обеспечение, высокая надёжность камеры, возможность оценки термограмм на экране переносного компьютера в реальном времени.

Опыт эксплуатации термографов *IRTIS-200* подтвердил стабильность параметров при изменении внешних условий, а своевременно выявленные дефекты электрооборудования и предотвращение аварии полностью окупил стоимость термографа за минимальный срок эксплуатации.

**6. Портативные компьютерные отечественные термографы *IRTIS-2000С*** представляют собой прецизионный оптикомеханический сканирующий инфракрасный прибор для визуализации и измерения тепловых полей, успешно конкурируют с зарубежными аналогами. Технические характеристики термографа *IRTIS-2000С* представлены в табл. 4.6.

**Таблица 4.6.**Технические характеристики термографа *IRTIS-2000С*

Диапазон измерения температур, °С	-20 - +200 (по заказу +1300)
Температурное разрешение на уровне, °С	0,05 при +30 °С
Точность измерения температуры, °С	1
Спектральный диапазон, мкм	3-5
Поле зрения, град	25°x20°
Пространственное разрешение, мрад	2
Размер кадра, пикселей	256x256
Диапазон рабочих температур, °С	-20 - +40
Габариты камер, мм	200x40x100
Вес, кг	1,8

*IRTIS-2000C* может быть использован для:

- контроля состояния функционирования электро- и теплотехнического оборудования;
- исследования тепловых потерь в зданиях и сооружениях;
- экономического мониторинга окружающей среды;
- диагностики оборудования топливно-энергетического нефтегазодобывающего комплексов, систем транспортирования электроэнергии, нефти, газа и их хранения.

7. *Тепловизоры TH9100, TH6100, TH5104, Thermo View Ti30* представляют собой современные компактные, лёгкие многофункциональные устройства с неохлаждаемой матрицей, дающие возможность получать и сохранять информацию о температурных полях удалённых объектов. Кроме того, они позволяют быстро и легко обнаруживать дефекты и неисправности оборудования электрических подстанций, электродвигателей, котлов, трубопроводов, теплообменников, проводить диагностику состояния зданий и сооружений. Технические характеристики тепловизоров TH9100 и TH5104 представлены в табл. 4.7.

Появление лёгких малогабаритных термографических инфракрасных камер, выполненных на неохлаждаемых микроболометрических матрицах с микропроцессорной обработкой инфракрасных изображений позволило обнаруживать дефекты контактных соединений на ранней стадии развития и контролировать состояние практически всего электрооборудования, что значительно снизило его аварийность.

**Таблица 4.7.**

Технические характеристики тепловизора *TH9100* и *TH5104*

Параметры	<i>TH9100</i>	<i>TH5104</i>
Диапазон измеряемых температур, °С	-40 - +50	-10 - +800
Разрешение, °С	0,06	0,1
Погрешность, °С	±2(±2%)	±1(±1%)
Поле зрения объекта, град	25°x19°	17°x12,8°
Чувствительный элемент, пикселей	Микроболометрическая матрица	
	320x240	255x223
Скорость сканирования, Гц	50/60	20
Объём памяти	До 2 Гб ( <i>Flash</i> )	64 термограммы
Коэффициент излучения	Регулируемый	
Вес с аккумулятором, кг	0,7	1,0

Инфракрасная камера TH7102 фирм «NEC» «AGEMA» (Япония, США), являющаяся основным элементом тепловизионной системы, поддерживает интерфейс в стандартах PAL/NTSC, IEEE 1394 (скоростной цифровой порт). Технические характеристики тепловизионной камеры приведены в табл. 4.8.

**Таблица 4.8.**

Технические характеристики тепловизионной камеры TH7102

Диапазон измеряемых температур, °С	-40 - +500
Чувствительность (при +30 °С),	0,08
Погрешность измерения, %	±2
Спектральный диапазон, мкм	8-14
Частота кадров, Гц, максимальная	60
при передаче по каналу IEEE 1394	30
Поле зрения, град (минимальное фокусное расстояние, м)	29x22(0,5)
Динамический диапазон, бит	14

Допустимые температуры нагрева и превышения над температурой окружающей среды контактных соединений и контактов нормируются.

Оценка состояния энергетических объектов, в частности по их инфракрасному излучению достаточно универсальна и объективна благодаря термоэлектрическому подобию физических процессов и тесной взаимосвязи качества функционирования и технического состояния коммутационных аппаратов с сопутствующими тепловыделениями (потерями).

**8. Инфракрасные термометры (пирометры)** предназначены для контроля и диагностики электрических систем и оборудования. Они отличаются точностью, быстродействием и надёжностью (измерение температуры менее за секунду с точностью 1-4 % на расстоянии 0,5-55 м, в зависимости от модели).

Термометры лучших фирм (*Raytek*, ООО «ТЕХНО-АС», *Fluke*, *Flir Systems* и др.) позволяют обнаруживать точки перегрева оборудования, предупреждать искрение и повреждение изоляции, предотвращать пожары, определять источники потерь энергии, защищать электродвигатели, контролировать состояние трансформаторов. Многие приборы кроме отображения текущего значения температуры на дисплее вычисляют максимальную и минимальную среднюю температуры и их разницу, умеют сигнализацию, в памяти сохраняется до 100 и более точек измерения.

### **4.3. Оценка параметров надёжности и прогнозирования долговечности контактных соединений по данным тепловизионной диагностики**

Профессор А.Б. Власов с сотрудниками в серии работ «Прогнозирование долговечности контактных соединений по данным тепловизионной диагностики», «Определение гамма-процентных показателей надёжности контактных соединений на основе тепловизионной диагностики», «Использование тепловизоров для контроля состава электрооборудования в Колэнерго», «Результаты многолетнего использования тепловизора для контроля состояния электрооборудования в Колэнерго», «Обработка и анализ тепловизионного контроля», «Опыт тепловизионного контроля электрооборудования Колэнерго» рассмотрели актуальные вопросы, связанные с развитием тепловизионной диагностики как метода, который определяется действующими нормативными документами. В частности, был проведен анализ данных тепловизионного контроля контактных соединений электрического оборудования ОАО «Колэнерго». Были получены значения параметров надёжности контактных соединений различных подстанций акционерного общества.

Известно, что согласно требованиям ГОСТ 20911-89 техническое диагностирование предназначено для решения двух важнейших задач, первая из которых связана с установлением технического диагноза, а вторая направлена на достижение главной цели - прогнозирование технического состояния контроля.

В задачу диагноза обычно включают: поиск места неисправности; определение причин отказа; контроль технического состояния и т.п. Технический диагноз в этом случае является конечным результатом контроля состояния - проверки соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации определение уровня технического состояния на момент проверки.

Целью прогноза, как правило, является определение с заданной вероятностью интервала времени (ресурса), в течение которого сохранится работоспособное состояние объекта.

Если рассматривать тепловизионный контроль как профилактическую меру поддержания работоспособности оборудования путём осмотра, применяя к нему требования ГОСТ 23483-79, то от диагностического мероприятия данного вида не следует требовать решения всех диагностических задач кроме первой (технический диагноз). Но имеется возможность и предпосылки для разработки метода

тепловизионной диагностики, разрешающего все задачи технического диагностирования в полной мере.

Как указывалось, выше, в действующем ГОСТ 10434-82 нормированы три класса контактных соединений, приведены требования к их электрическому сопротивлению, а также показаны критерии предельных состояний - тепловые режимы в предельном состоянии. Более того, данный стандарт исходит из того, что любое превышение температуры контактных соединений проводника должно квалифицироваться как один из видов отказа и оценка надёжности должна осуществляться на основе статистического анализа и результатов определения гамма-процентных показателей.

На основе анализа многолетних данных (2012-2023 гг.) тепловизионного контроля контактных соединений электротехнического оборудования подстанций ОАО «Колэнерго» разработана методика оценки таких параметров надёжности, как интенсивность отказов, вероятность безотказной работы и прогнозирование долговечности соединений.

Общее количество контактных соединений на распределительных устройствах с напряжением 110-330 кВ составляет несколько десятков тысяч единиц, причём на отдельных объектах от 200 до 1000 единиц.

Представляя всю совокупность дефектов, наблюдаемых в течение года, как 100 %, можно оценить процент дефектов, для которых необходимы все виды ремонта, в том числе неплановые (сумма аварийных и внеплановых). Экспериментальные данные распределения дефектов по аварийности приведены в табл. 4.9 (2012-2023 гг.) и на рис. 4.1. Полученные данные показывают, что за контролируемый период происходит монотонный рост наблюдаемых дефектов. При этом на фоне уменьшения процента дефектов, которые должны быть устранены при очередном плановом ремонте, возрастает процент тех нарушений, которые требуют внепланового или аварийного ремонта.

Таблица 4.9.

Распределение дефектов по аварийности в системе ОА «Колэнерго»

Год	Кол-во (%)	Плановые	Внеплановые	Аварийные	Неплановые
		Кол-во (%)	Кол-во (%)	Кол-во (%)	Кол-во (%)
2012	82(100)	80(97,56)	2(2,44)	0(0,00)	2(2,44)
2013	81(100)	55(76,39)	6(7,41)	1(1,23)	7(8,64)
2014	72(100)	74(91,36)	15(20,83)	2(2,78)	17(23,61)
2015	51(100)	45(88,24)	4(7,84)	2(3,92)	6(11,76)
2016	64(100)	47(73,44)	16(25,00)	1(1,56)	17(26,58)
2017	83(100)	70(84,34)	10(12,05)	3(3,61)	13(15,66)
2018	34(100)	19(55,88)	13(38,24)	2(5,88)	15(44,12)
2019	62(100)	31(50,00)	26(41,94)	5(8,06)	31(50,00)
2020	126(100)	66(52,38)	41(32,54)	19(15,08)	60(47,62)
2021	35(100)	12(34,29)	14(40,00)	9(25,71)	23(65,71)
2022	76(100)	37(48,68)	33(43,42)	6(7,89)	39(51,32)
2023	102(100)	63(61,76)	32(31,37)	7(6,86)	39(38,24)
Всего	868	599	212	57	269

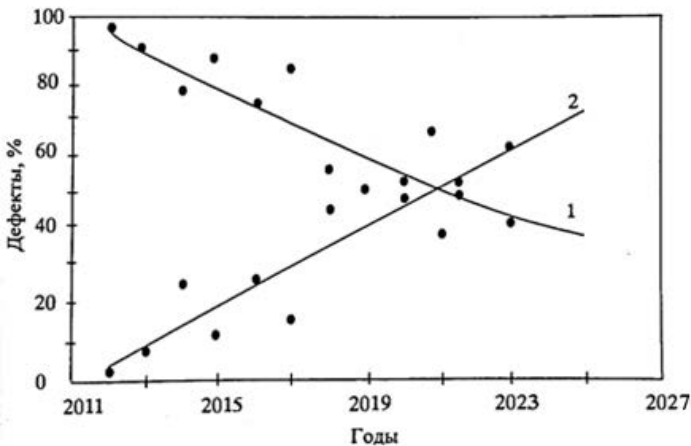


Рис. 4.1. Распределение плановых и неплановых дефектов в сетях 110-330 кВ: 1 – плановый ремонт; 2 – неплановый ремонт

Статистический анализ данных тепловизионного контроля в различные годы по распределительным устройствам отдельных предприятий «Колэнерго», в частности отдельные этапы анализа на примере оборудования ГЭС-16 (табл. 4.10).



Таблица 4.10.

Распределение дефектов на подстанции ГЭС-16 по годам

год	Дата осмотра	$\Delta t$ , мес.	Дефекты			Поток отказов $\lambda$ , 1/год	$P(t)$ за год
			$N_O$	$N_H$	$N_{CT}$		
2013	31.10.13	0,00	5	5	0	0,0106	0,9895
2014	24.10.14	11,8	7	4	3	0,0179	0,9822
2015	22.05.15	6,97	8	4	4	0,0054	0,9947
2016	13.05.16	11,67	4	2	2	0,0000	1,0000
2017	19.05.17	12,20	1	0	1	0,0166	0,9836
2018	22.08.18	15,10	11	8	3	0,0129	0,9872
2019	12.11.19	26,67	11	11	0	0,0145	0,9856
2020	26.05.20	6,47	7	3	4	0,0145	0,9856
2021	27.10.21	17,03	5	2	3	0,0037	0,9963
2022	24.10.22	11,90	3	3	0	0,0079	0,9922
2023	07.06.23	7,43	3	2	1	0,0084	0,9916
		Итого	65	44	21		

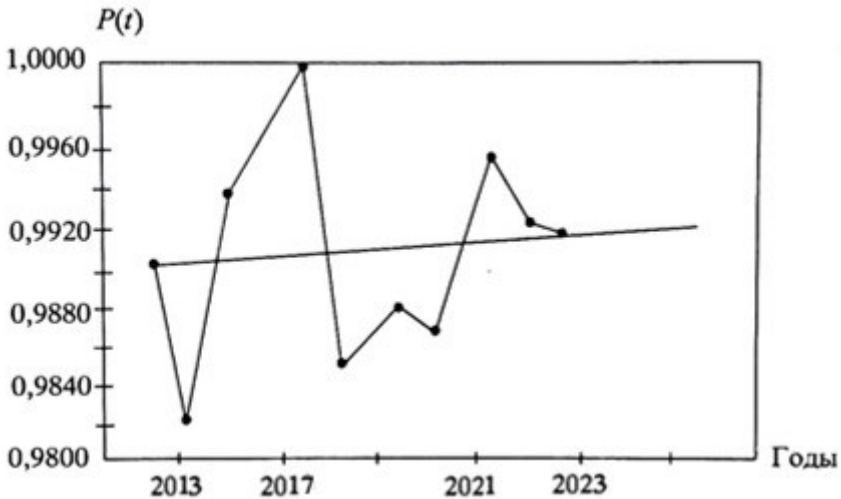
На электротехническом оборудовании распределительного устройства станции насчитывается  $N = 384$  контакта линий напряжением 150 кВ. В течение 2013-2023 гг. наблюдалось всего  $N_o = 65$  дефектов, оцениваемых по различным категориям ремонта. Из них  $N_{CT} = 21$  дефект являлся повторным, т.е. по различным причинам не устранялся с предыдущего осмотра. Таким образом, в статистическом анализе участвуют 44 дефекта, обозначенные как  $N_H$  – «новые». Принимая факт образования любого дефекта как потенциальный отказ, можно подсчитать поток отказов по соотношению

$$\lambda(t) = N_H(\Delta t)/(N_o \Delta t) \quad (4.11)$$

где  $N_H(\Delta t)$  – число отказов за промежуток времени  $\Delta t$  (год) между испытаниями аналогично.

Предполагая, что статистика отказов описывается экспоненциальным законом распределения, рассчитывали значение вероятности безотказной работы  $P(t)$  по выражению (3.4) в течение календарного года (12 мес.).

На рис. 4.2 приведена зависимость вероятности безотказной работы контактов распределительной подстанции ГЭС-16.



**Рис. 4.2.** Вероятность безотказной работы ГЭС-16 (все контакты)

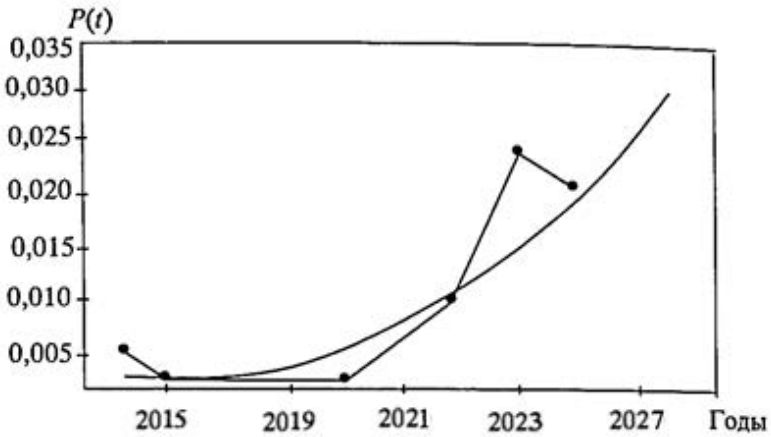
Экспериментальные данные имеют определённый разброс. В первом приближении зависимость  $P(t)$  монотонно возрастает. Среднее значение вероятности безотказной работы всех контактов на данной станции примерно равно 0,9900. В отличие от предыдущего случая, показатели надёжности имеют тенденцию к ухудшению: значение  $P(t)$  уменьшается ниже уровня 0,9750.

На рис. 4.3 приведены зависимости потока отказов и вероятности безотказной работы контактов на высоковольтном оборудовании ГЭС-12.

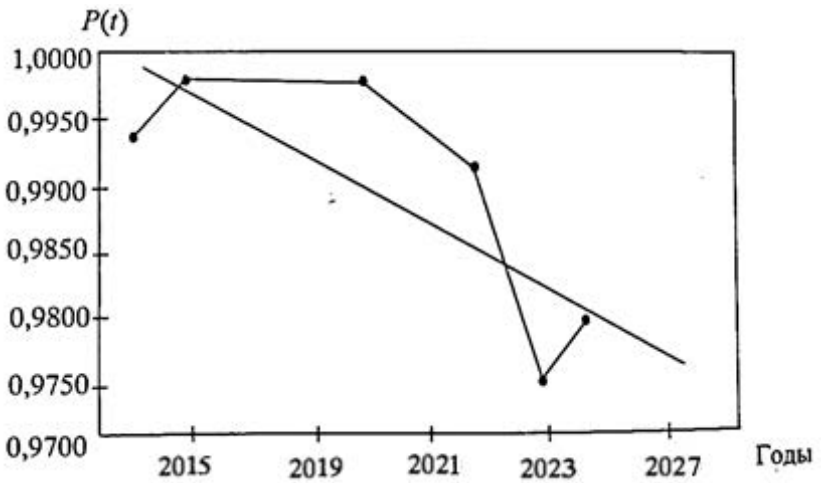
Видно, что подобный статистический анализ позволяет как оценить особенности эксплуатации электрического оборудования и качество технического обслуживания оборудования различных подстанций, так и прогнозировать поведение совокупности контактных соединений высоковольтного оборудования. На основании экспериментальных данных по всей совокупности контактных соединений «Колэнерго» было оценено среднее значение вероятности безотказной работы  $P_{cp}(T)$  за все годы исследования:

$$P_{cp}(T) = \frac{\sum P_i(T)}{N} \quad (4.12)$$

где  $P_i(T)$  – вероятность, относящаяся к отдельному объекту;  
 $N$  – количество исследованных объектов.



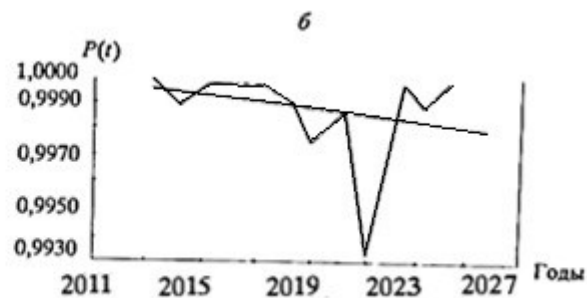
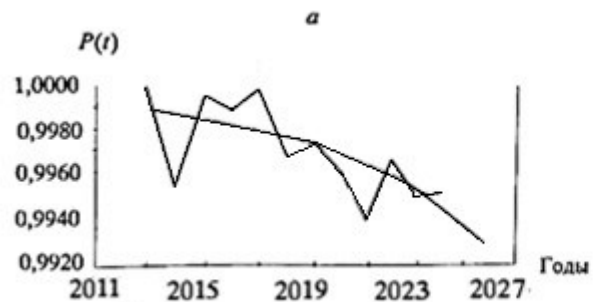
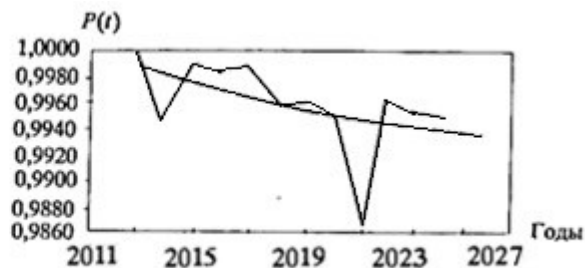
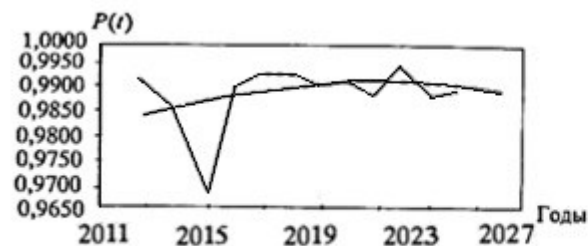
а



б

**Рис 4.3.** Поток отказов контактных соединений (а) и вероятность безотказной работы (всех контактов) (б) ГЭС-12

На рис. 4.4 представлены средние значения вероятности безотказной боты (за год) по 10-ти объектам ОАО «Колэнерго» для дефектов с различными категориями ремонта.



**Рис. 4.4.** Среднее значение вероятности безотказной работы: а) все контакты; б) unplanned defects; в) unplanned defects; г) emergency defects

Среднее значение вероятности  $P$  дефектов всего высоковольтного оборудования «Колэнерго» лежит в диапазоне  $0,99000 \pm 0050$ , что соответствует значению потока отказов  $2 - 0,01$ . Относительное количество дефектов, которые необходимо устранить при внеплановом ремонте (не более чем через 3-6 мес.), постоянно возрастает. Для подобных контактов среднее значение вероятности безотказной работы уменьшается. В 2022 гг. среднее значение  $P = 0,995$  ( $\lambda = 0,005$ ). Наконец для аварийных дефектов, которые подлежат немедленному ремонту,  $P = 0,999$  ( $\lambda = 0,001$ ).

Из проведённого анализа подтверждается, что имеется тенденция, к уменьшению вероятности безотказной работы контактов, которые подлежат внеплановому или аварийному ремонту. Таким образом, статистическая обработка данных тепловизионного контроля позволяет устранить субъективный подход при разработке того или иного экспертного решения и рассчитать оптимальные сроки очередного ремонта или планового тепловизионного обследования. Методы тепловизионного обследования, особенности обработки данных тепловизионного контроля контактных соединений для решения задач диагноза и прогноза, разработанные группой исследователей во главе с профессором А.Б. Власовым, подробно описаны в выше цитируемых работах. Описанная авторами методика позволяет рассчитать показатели эксплуатационной надёжности соединений и их изменение во времени, а также сравнить данные по различным предприятиям.

В процессе старения дефекта, связанного с превышением температуры контактного соединения, последний, проходя различные стадии своего развития, становится критическим, достигает предельного состояния, при котором дальнейшая эксплуатация соединения требует согласно ГОСТ 10434-82 аварийного ремонта. ГОСТ 10434-82 подробно определяет различные классы электрических контактных соединений, определяет требования по их электрическому сопротивлению, а также критерии предельных состояний – тепловые режимы в предельном состоянии: при протекании номинального тока наибольшая допустимая температура контактного соединения не должна превышать оговоренных в нормативном документе значений.

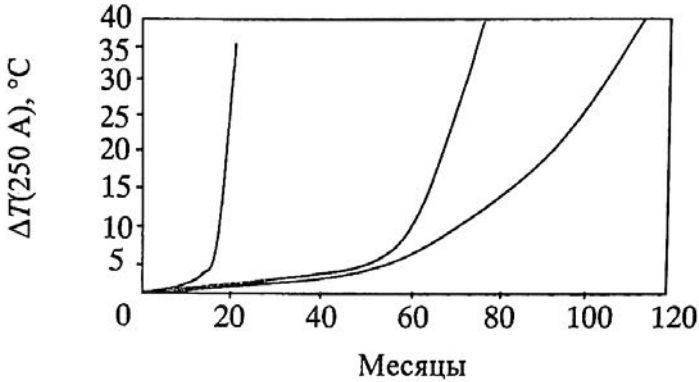
Для экспертной оценки технического состояния контактных соединений необходимо произвести перерасчет данных с учётом многочисленных параметров и условий тепловизионной съёмки, например, для проверки превысит ли температура соединения предельную, задаваемую ГОСТ 10434-82, в данный период времени при максимальных или предполагаемых токах нагрузки. В то же время перерасчёт превышения температуры на заданное значение тока не может дать ответа

на вопрос: как долго будет происходить процесс старения дефекта от момента его образования и обнаружения до перехода в неработоспособное состояние. То есть ни факт обнаружения дефекта с помощью тепловизионного метода, ни оценка (прогноз) температуры контактного соединения, ещё не решают в полной мере задач тепловизионной диагностики и, в частности, не позволяют ответить на ряд вопросов: с какой скоростью происходит старение дефекта, в чём причина образования дефектов соединений на реальных объектах, через какое время будет достигнуто предельное состояние, какова вероятность появления дефектов соединений в настоящее время и в будущем.

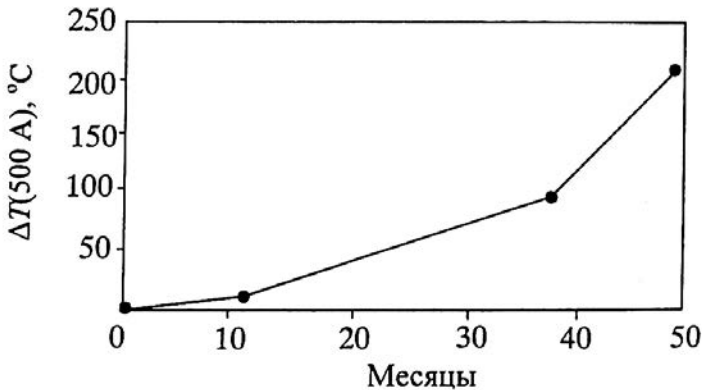
Для решения вопроса о скорости развития образовавшихся дефектов контактных соединений необходимо учесть динамику развития процесса их старения со временем на реальном оборудовании. Это позволит дать научно-обоснованные экспертные оценки и рекомендации о сроках ремонта, плановых и, если необходимо, внеочередных тепловизионных обследований.

Данная задача решалась на примере высоковольтных аппаратных зажимов, дефекты которых являются самыми распространёнными. К примеру, для анализа процесса старения контактных соединений были выбраны типичные представители ВЧ-заградителей, которые имели дефекты соединений в период 2013-2023 гг. на предприятиях «Колэнерго». Данные тепловизионных обследований получены при различных значениях температуры окружающей среды, тока нагрузки и других факторов, для их сравнения производился перерасчёт превышения температуры с помощью формул, рекомендуемых нормативными документами, а также по разработанной автором программе приведения данных тепловизионного контроля к единому критерию.

На рис. 4.5 приведены примеры изменения превышения температуры на аппаратных зажимах отдельных ВЧ-заградителей. Идентичное изменение температуры характерно для контактов на другом оборудовании (рис. 4.6), в том числе контактов, выполненных опрессовкой, а также болтовых соединениях. Характеристика имеет два выраженных участка: в течение первых месяцев (5-10 мес.) его температура изменяется незначительно, резкий рост температуры начинается через 12-15 мес. после образования дефекта. Замечено, что на прессованных контактах наблюдается тенденция к ускоренному росту температуры, но интенсивный рост превышения температуры также начинается не менее чем через 10-11 мес.



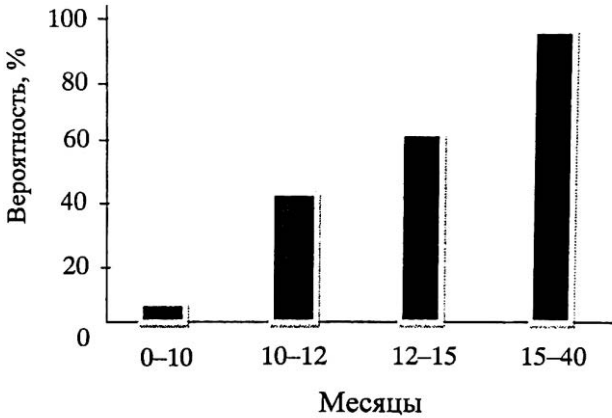
**Рис. 4.5.** Изменение превышения температуры на различных КС



**Рис. 4.6.** Изменение превышения температуры на аппаратном зажиме разъединителя линии

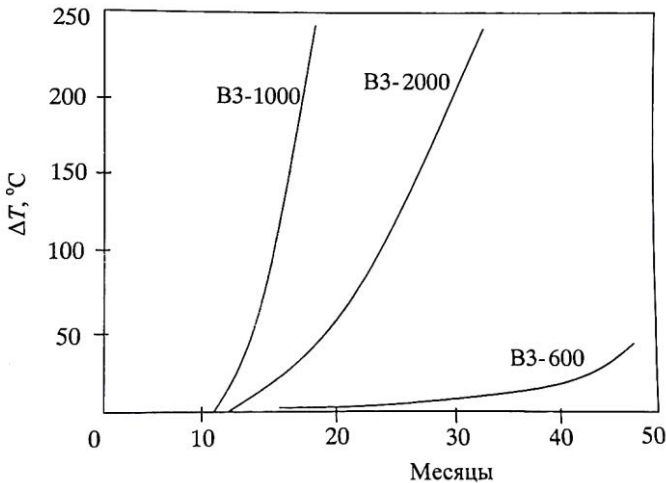
Анализ значений превышения температуры контактных соединений, регистрируемого на 15-ти заградителях ВЗ-1000 (рис. 4.7). Вероятность регистрации дефекта в период до 10 мес. составляет 6 %, в период до 12 мес. – 47 %, до 15 мес. – 66 %, наконец в период до 3 лет все нарушенные контакты могут быть обнаружены.

Учитывая идентичность аппаратных зажимов на оборудовании одного класса, авторами разработана методика статистического анализа данных тепловизионного контроля на одинаковых объектах.



**Рис. 4.7.** Вероятность обнаружения нарушенного контакта со временем

На рис. 4.8 приведены обобщенные данные, характеризующие максимальную скорость старения контактных соединений аппаратных зажимов ВЧ-заградителей различного типа. Видно, что характеристики идентичны: максимальный рост превышения температуры не ранее чем через 10 мес. после окончания грозового сезона.



**Рис. 4.8.** Обобщённые зависимости максимальной скорости старения аппаратных зажимов на ВЧ-заградителях



Процесс старения дефектных контактных соединений характеризуется рядом особенностей, которые невозможно описать без понимания физической природы старения рассматриваемых объектов диагностики. Электрическое сопротивление  $R_{к.с.}$  соединений определяется многочисленными факторами. Характер воздействия каждого фактора достаточно изучен, поэтому обычно выделяются наиболее существенные факторы, которые определяют скорость старения дефектного контактного соединения.

Несмотря на многообразие действующих факторов, работоспособность большинства контактных соединений остаётся неизменной на протяжении многих лет, а образование дефекта на конкретном контакте соединения является вероятностным процессом и может быть связано с перегревом соединений, изменением его микроструктуры, контактного нажатия и т.п., и, вследствие этого, инициированием начала роста оксидных плёнок непосредственно в области электрического контакта между контактирующими поверхностями.

Считается, что именно с этого момента старение дефекта осуществляется в соответствии с закономерностями развития оксидных плёнок со временем.

Контактная граница имеет однородные характеристики по всей поверхности контакта, оксидная плёнка и диффундирующий слой между элементами контакта имеет кольцевую форму, плёнка растёт вследствие диффузии в радиальном направлении. Контактное сопротивление со временем изменяется и в рамках диффузионной модели обусловлено проникновением плёнки окислов в зону контакта за счёт диффузии атома оксида в кристаллической решетке металла. Согласно модели, через время после развития дефекта переходное сопротивление будет определяться соотношениями

$$\frac{R_{\text{пер}}(t)}{R_{\text{пер}}(0)} = \frac{a_0}{[a_0 - x(t)]}; x(t) = (2Dt)^{\frac{1}{2}} \quad (4.13)$$

$$D(t) = D_0 \exp\left[-\frac{U}{kT}\right] \quad (4.14)$$

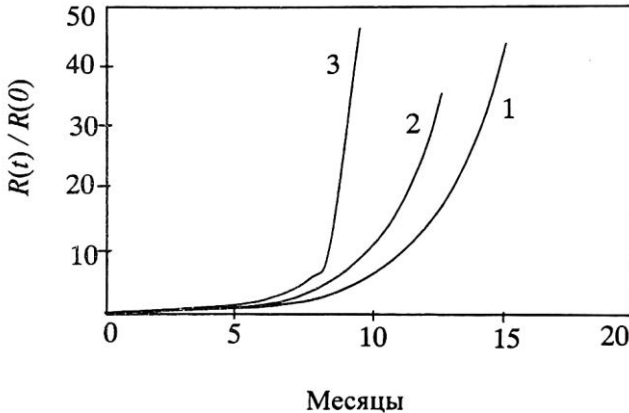
$$\frac{R_{\text{пер}}(t)}{R_{\text{пер}}(0)} = 1 / \left\{ \left( \frac{(2Dt)^{\frac{1}{2}}}{a_0} \right) \exp\left(-\frac{U}{kT}\right) \right\} \quad (4.15)$$

где  $R_{\text{пер}}(t)$ ,  $R_{\text{пер}}(0)$  – сопротивления в момент времени  $t$  и  $t = 0$ ;  
 $a_0$  – радиус металлического пятна касания в момент времени  $t = 0$ ;  
 $x(t)$  – глубина диффузионного проникновения плёнки оксида в зону пятна касания через время  $t$ .

$D(t)$  – коэффициент диффузии, зависящий от энергии активации процесса  $U$  и абсолютной температуры  $T$ ;

$D_0$  – постоянная,  
 $k$  – газовая постоянная.

На рис. 4.9 приведены результаты расчёта по выражению (4.1) при физических параметрах, характерных для контактов из алюминиевых сплавов и меди, при этом расчёт произведён при значениях:  $k = 138,10^{-23}$  Дж·К;  $U = 0,5 \cdot 10^{-9}$  Дж;  $D_0 = 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с.



**Рис. 4.9.** Расчётные значения  $R(t) / R(0)$  (без учёта нагрева контакта): 1 –  $T_1 = 297$  К,  $a_0 = 10^{-6}$ м; 2 –  $T_2 = 298$  К,  $a_0 = 10^{-6}$ м; 3 –  $T_3 = 299$  К,  $a_0 = 0,92 \cdot 10^{-6}$ м

Рис. 4.9 показывает, что по теории подтверждается резкое изменение переходного сопротивления через 10-15 мес. после начала развития процесса окисления, которое инициировано, видимо, атмосферными перенапряжениями. На основе данной модели произведён учёт влияния температуры контакта на коэффициент диффузии  $D(T)$ , а также влияние переходного сопротивления на превышение температуры контакта.

Температура стационарного нагрева контактного соединения по отношению к шине описывается соотношением, выведенным с учётом общих принципов термодинамики

$$\begin{aligned} T_{к.с} &= T_0 + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = \\ &= T_0 + \frac{I^2 \rho_{ш}}{k_{к.ш} \cdot S_{ш} F_{ш}} + I^2 R_{к} / 2(k_{т} \lambda S_{к} F_{ш})^{\frac{1}{2}} + I^2 R_{к}^2 / 8 \lambda \rho_{к} \end{aligned} \quad (4.16)$$

где  $T_0$  – температура среды;

$\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $\Delta T_3$  – превышение температуры шины, зоны контакта и площади касания;

$I$  – ток;

$\rho_{ш}, \rho_{к}$  – удельные электрические сопротивления шины и контакт-деталей;

$k_{т,ш}, k_{т}$  – коэффициенты токоотдачи шины и деталей;

$F_{ш}$  – площадь поперечного сечения шины;

$S_{ш}, S_{к}$  – боковые поверхности единицы длины шины и контактных соединений;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности контакт - деталей;

$R_{к}$  – электрическое сопротивление соединений.

С учётом соотношения (4.16) получаем, что превышение температуры контактного соединения над температурой окружающей среды и шиной

$$\begin{aligned} \Delta T_{к.с} &= T_{к.с} - (T_0 - T_1) = \Delta T_2 + \Delta T_3 = \\ &= I^2 R_{к} / 2 (k_{т} \lambda S_{к} F_{ш})^{\frac{1}{2}} + I^2 R_{к}^2 / 8 \lambda \rho_{к} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Расчёты показывают, что  $\Delta T_2 \gg \Delta T_3$ , поэтому для произвольной температуры  $T$  и момента времени  $t$  можно записать

$$\Delta T_{к.с}(t, T) = I^2 R_{к}(t, T) / 2 (k_{т} \lambda S_{к} F_{ш})^{\frac{1}{2}} = I^2 R_{к}(t, T) f(\lambda, S_{к}, F_{ш}) \quad (4.18)$$

В начальный момент времени при  $t = 0$  и  $T = T_0$

$$\Delta T_{к.с}(0, T_0) = I^2 R_{к}(0, T_0) f(\lambda, S_{к}, F_{ш}) \quad (4.19)$$

В произвольный момент времени  $t$  при температуре контакта  $T$

$$\frac{\Delta T_{к.с}(t, T)}{\Delta T_{к.с}(0, T_0)} = \frac{R_{к}(t, T)}{R_{к}(0, T_0)} \quad (4.20)$$

С учётом диффузионного механизма старения контактного соединения из соотношений (4.13-4.15) имеем

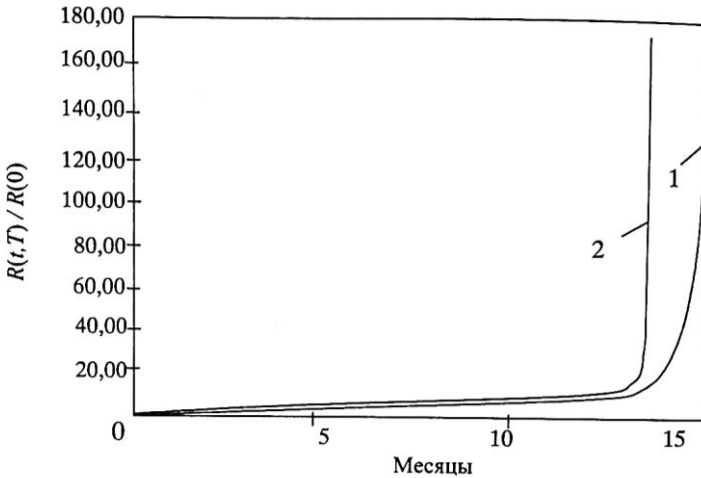
$$\Delta T_{к.с}(t, T) = \Delta T_{к.с}(0, T_0) / \{1 - |(2D(t, T)t)^{1/2} / a_0| \cdot \exp(-U/kT)\} \quad (4.21)$$

Трансцендентное уравнение (4.1) решается методом итераций. На рис. 4.10. приведены расчётные данные для зависимости  $R_{к}(t, T) / R_{к}(t, T_0)$ , полученные из соотношений (4.13-4.15) без учёта (кривая 1) и с учётом (кривая 2) влияния температуры на процесс диффузии по соотношению (4.19) при параметрах расчёта:  $a_0 = 10^{-6}$  м;  $T_0 = 20$  °С;  $D_0 = 10^{-4}$  м<sup>2</sup> / с;  $\Delta T_0 = 0,04$  °С. Из рис. 4.10 видно, что учёт нагрева контакта, в том числе протекающим током, приводит к уменьшению срока службы контактного соединения.

Сравнение полученных расчётных данных (рис. 4.10) с экспериментальными данными по превышению температуры контактных соединений на ВЧ-заградителях (рис. 4.5, 4.6, 4.10) показывает, что их старение адекватно описывается диффузионными процессами роста диэлектрических плёнок.

В нормативных документах по тепловизионной диагностике предлагаются различные эмпирические сроки плановых обследований, а также практические критерии оценки технического состояния, сроки и

категории ремонта того или иного соединения. Данные критерии, определённые на основе личного опыта экспертов, являются субъективными и не могут решить задачи, требуемые, например, ГОСТ 10432-82, где особо выделяются требования к надёжности: для оценки надёжности контактных соединений устанавливается, как указывалось, гамма-процентный ресурс, нижнее значение которого должно обеспечить работу устройств в соответствии с требованиями стандартов.



**Рис. 4.10.** Расчётные значения  $R(t, T) / R(0)$ , определённые в зависимости от времени старения (учёт нагрева)

Статистический анализ данных тепловизионной диагностики из цитируемых работ позволяет выявить эксплуатационные параметры надёжности контактных соединений и их гамма-процентные показатели. Эти сведения дают возможность выявить причины возникновения дефектов, предсказать вероятность возникновения дефектных соединений в будущем. Показано, что для критических (аварийных) дефектов, ответственных за достижение критического состояния (99,85 %) гамма-процентная наработка составляет 12 мес. Это означает, что в течение года критические дефекты образуются с вероятностью безотказной работы 0,985.

Если во всей энергосистеме насчитывается 10 000 контактных соединений, то, например, при  $\omega_{кр} = 0,0015 \text{ год}^{-1}$  через 1 год могут образоваться  $10,000 \times 0,0015 = 15$  дефектных контактов, которые необходимо устранить в немедленно отключенном оборудовании. Для

подстанции, насчитывающей, например, 400 контактных соединений в течение 3-х лет может образоваться не более 2-х аварийных контакта.

Наиболее вероятной причиной образования дефектов являются грозы, создающие перенапряжения в высоковольтных линиях вблизи энергетического объекта. Проведённые расчёты показывают, что вероятность попадания молнии непосредственно на оборудование подстанции относительно низкая (не более одного раза в 3-5 лет). Дефекты контактных соединений высоковольтного оборудования образуются в среднем с частотой 0,7-2,1 в год на одном энергетическом объекте (станции, подстанции) при среднем значении 1,3 дефекта в течение года, что является для большинства случаев реальной величиной.

#### **4.4. Оценка технического состояния контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов по данным тепловизионного контроля**

Выше на примерах исследования высоковольтной аппаратуры дана оценка параметров надёжности и прогнозирования долговечности контактов соединений. Ниже приводятся данные тепловизионного контроля на примерах низковольтной аппаратуры.

Тепловое состояние электрооборудования оценивается по нормированным температурам нагрева, избыточной температуре, динамике изменения температуры во времени, а также путём измерения текущих значений температуры в пределах одной фазы или между фазами для сравнения с температурой на заведомо исправных участках электроустановки.

Часто при тепловизионных обследованиях приходится оценивать состояние недогруженных контактов и контактных соединений. Перерасчёт превышения измеренного значения температуры относительно нормированного для токов  $(0,6 - 1) I_{ном}$  проводится согласно соотношению

$$\frac{\Delta T_{ном}}{\Delta T_{раб}} = \left( \frac{I_{ном}}{I_{раб}} \right)^2 \quad (4.22)$$

где  $\Delta T_{ном}$  и  $\Delta T_{раб}$  – превышения температуры при токах  $I_{ном}$ ,  $I_{раб}$ .

Для контактов и контактных соединений, работающих при токах нагрузки  $(0,3 - 0,6) I_{ном}$ , соотношение для перерасчёта имеет вид

$$\frac{\Delta T_{0,5}}{\Delta T_{раб}} = \left( \frac{0,5 I_{ном}}{I_{ном}} \right)^2 \quad (4.23)$$

где  $\Delta T_{0,5}$  – превышение температуры при токе  $0,5 I_{ном}$ .

В соответствии с ГОСТ 12393-2019 качество контактных соединений, предназначенных для электрического соединения проводов,

кабелей, ошиновки электроустановок, подвижных контактов и других токоведущих соединений, определяется с помощью двух диагностических показателей:

- коэффициента дефектности по перегреву  $K_d$  электрического контакта или ответвления, выполненного с помощью того или иного вида соединения;
- избыточной температуры  $T$  аналогичных контактных соединений других фаз при  $0,5I_{ном}$ .

Коэффициент дефектности  $K_d$  по своей физической сущности определяется отношением удельного теплового потока Джоуля, выделившегося в контактном соединении или ответвлении, к удельному тепловому потоку, выделяющемуся на проводе вне контактного соединения. Удельный тепловой поток с поверхности, вследствие теплоотдачи в окружающей среду и теплового излучения, определяется выражением

$$q = \alpha(T - T_0) \quad (4.24)$$

где  $\alpha$  – эффективный коэффициент теплоотдачи с поверхности;

$T$  – температура поверхности;

$T_0$  – температура окружающего воздуха.

Тогда коэффициент дефектности

$$K_d = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_{пр}} \quad (4.25)$$

где  $\Delta T_c$  и  $\Delta T_{пр}$  – превышение температуры контактного соединения коммутационного аппарата и соединяемого провода вне арматуры (на расстоянии не менее 1 м от зажима) над температурой окружающей среды при протекании по ним одного и того же тока.

С другой стороны, учитывая выражение для количества теплоты, можно коэффициент дефектности определить как

$$K_d = \frac{I^2 R_{к.с}}{I^2 R_{пр}} = \frac{R_{к.с}}{R_{пр}} \quad (4.26)$$

где  $I$  – сила тока;

$R_{к.с}$  и  $R_{пр}$  – электрическое сопротивление контактного соединения коммутационного аппарата и провода.

В общем случае техническое состояние электрического контактного соединения является функцией тока, площади контактного соединения, момента затяжки (для болтового соединения), а также зависит от наличия коррозии, нагара и т.д. Таким образом, определяя соотношение превышений температур с помощью тепловизора и используя выражения (4.25) и (4.26), можно косвенно оценить техническое состояние контактного соединения.

В энергетике, согласно нормам испытаний, принято оценивать состояние контактного соединения следующим образом: при  $K_d < 1,2$  – начальная степень неисправности, необходим постоянный контроль;  $1,2 \leq K_d \leq 1,5$  – развивающийся дефект, следует принимать меры по устранению неисправности при ближайшем выводе оборудования из работы;  $K_d > 1,5$  – аварийный дефект, требуется немедленное устранение или замена арматуры.

Под избыточной температурой понимается превышение измеренной температуры контролируемого узла над температурой аналогичных узлов других фаз, находящихся в одинаковых условиях.

Площадь контурной (фактической) площадки касания контактных соединений автоматических выключателей представлена в табл. 4.11. Избыточная температура, превышение измеренной температуры контролируемого узла над температурой аналогичных узлов других фаз, находящихся в одинаковых условиях, приведена в табл. 4.12. Температура контактного соединения коммутационного аппарата на заведомо исправных участках электроустановки приведена в табл. 4.13.

Таблица 4.11.

Значения размеров контактных площадок для силовых контактов низковольтных коммутационных аппаратов

№ п/п	Наименование коммутационного аппарата	Номинальный ток, А	Размер контактной площадки, мм <sup>2</sup>
1	Автоматический выключатель ВА21	1,6 ÷ 6,3	линия длиной 6 мм
		10 ÷ 25	12,5
		40 ÷ 63	30,0
2	Автоматический выключатель ВА57	16	20,0
		20 ÷ 63	30,0
		80 ÷ 125	40,0
3	Автоматический выключатель ВА13	1,6 ÷ 25	30,0
		31,5 ÷ 63	32,0
4	Автоматический выключатель АК50КБ	1,0 ÷ 25	30,0
		31,5 ÷ 63	32,0
5	Автоматический выключатель А63	1,6 ÷ 25	30,0



Таблица 4.12.

Температура контактного соединения коммутационных аппаратов на заведомо исправных участках электроустановки

№ п/п	Секция, панель	Коммутационные аппараты	Ток аппарата $I_{\text{раб}}$ , А			Температура контактного соединителя, °С		
			Ноябрь 2020 г.	Март 2021 г.	Март 2022 г.	Ноябрь 2020 г.	Март 2021 г.	Март 2022 г.
1	Секция ШНА Панель 9	Рубильник	45,0	47,5	42,0	33,2	34,7	31,5
2	Секция ЗНМ Панель 3	Пакетный выключатель		33,3	31,0		27,2	26,2
3	Хим.цех Панель 15	Магнитный пускатель		26,8	27,4		24,7	24,9
4	Секция 18Н0 Панель 3	Автоматический выключатель	40,0	38,8	39,1	30,4	29,8	26,0
5	Секция ЗНО Панель 4	Автоматический выключатель		22,5	22,5		23,3	23,3
6	секция ЗНО панель 96	Контактор		52,1	48,6		37,6	35,4

**Таблица 4.13.**

Данные тепловизионного контроля

№ п/п	Дефектный узел	Ноябрь 2020 г.		Март 2021 г.		Март 2022 г.		Ток аппарата $I_{\text{раб}}$ , А			Сопrotивление контактного $R_{\text{к.с.}}$ , МОм		
		Избыт. факт. Температура, °С	Избыт. факт. Температура, °С	Избыт. факт. Температура, °С	Избыт. факт. Температура, °С	Избыт. факт. Температура, °С	Избыт. факт. Температура, °С	Ноябрь 2020 г.	Март 2021 г.	Март 2022 г.	Ноябрь 2020 г.	Март 2021 г.	Март 2022 г.
1	Рубильник	63,9	255,6	35,5	37,8	34,1	50,3	45,0	47,5	42,0	1,57	1,19	1,03
2	Пакетный выключатель			35,5	37,8	34,1	50,3		33,3	31,0		0,57	0,61
3	Магнитный пускатель			35,5	37,8	34,1	50,3		26,8	27,4		16,52	16,2
4	Автомат.-ий выключатель	68,1	106,4	35,5	37,8	34,1	50,3	40,0	38,8	39,1	6,79	6,84	6,22
5	Автомат.-ий выключатель			35,5	37,8	34,1	50,3		48,6	22,5		8,34	6,58
6	Контактор			35,5	37,8	34,1	50,3		52,1	48,6		7,23	5,36

Температура контактного соединения коммутационного аппарата на заведомо исправных участках электроустановки

$$T_n = \frac{I^2(T_{\text{доп}} - T_{\text{окр}})}{I_{\text{доп}}^2} + T_{\text{окр}} \quad (4.27)$$

где  $T_{\text{доп}}$  – допустимая температура нагрева частей аппаратов при температуре окружающего воздуха 40 °С (величины допустимых превышений температуры для аппаратов, работающих при температуре окружающего воздуха, отличающейся от принятой расчётной (40 °С), должны быть изменены так, чтобы допустимая температура частей аппаратов, определяемая как сумма превышения и расчётной температуры окружающего воздуха, сохранялась неизменной);

$T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды.

После подстановки значений температура контактного соединения автоматического выключателя заведомо исправных участках электроустановки (табл. 4.13, п. 4 – данные за март 2021 г.) составит

$$T_n = \frac{38,8^2((65+40)-20)}{100^2} + 20 = 32,79^\circ\text{C} = 305,94 \text{ K}$$

Тогда сопротивление контактного соединения коммутационного аппарата (табл. 4.12, п. 4 – данные за март 2021 г.)

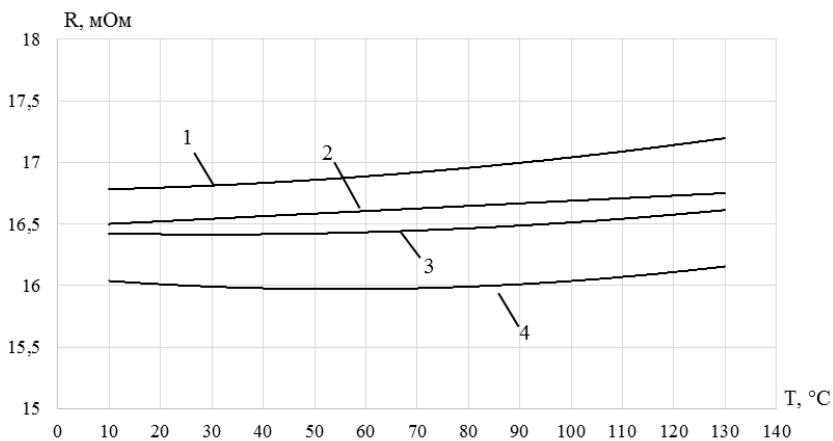
$$R_{\text{к.с}} = \left[ \frac{(305,9+68,5) \cdot 52 \cdot 10^{-6} \cdot 13 + (1+0,0043 \cdot (305,9+68,5)) \cdot \frac{38,8^2}{2,5}}{38,8^2 \sqrt{13 \cdot 30} \cdot 10^{-6}} \right] \times$$

$$\times 2\sqrt{390} \cdot 10^{-6} = 0,00684 \text{ Ом}$$

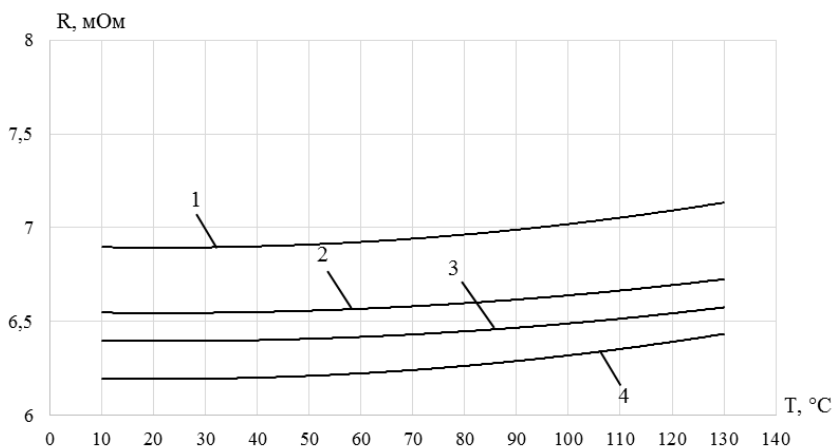
Результаты расчёта сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов представлены в табл. 4.12.

Теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, согласно которым сопротивление коммутационных аппаратов, измеренное микроомметром Ф4104-М1, не отличается от рассчитанного значения более чем на 15 %.

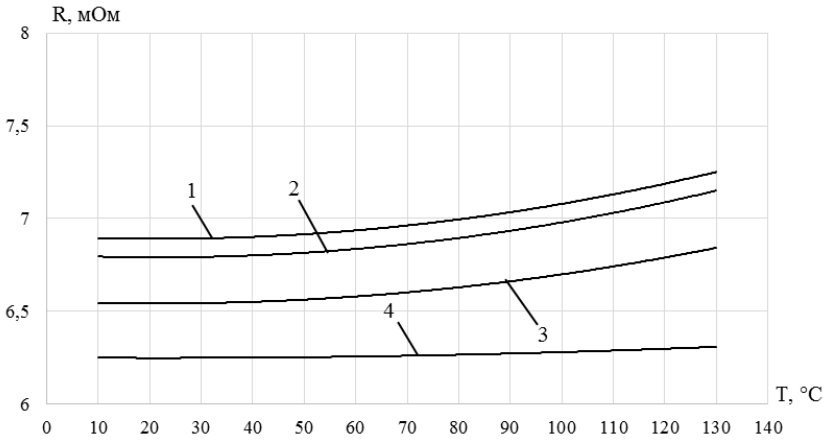
На рис. 4.11-4.15 представлены зависимости сопротивлений контактных соединений дефектных коммутационных аппаратов от температуры контактного соединения, определяемой в ходе тепловизионного контроля и при различных среднеквадратических коэффициентах загрузки цеховой сети.



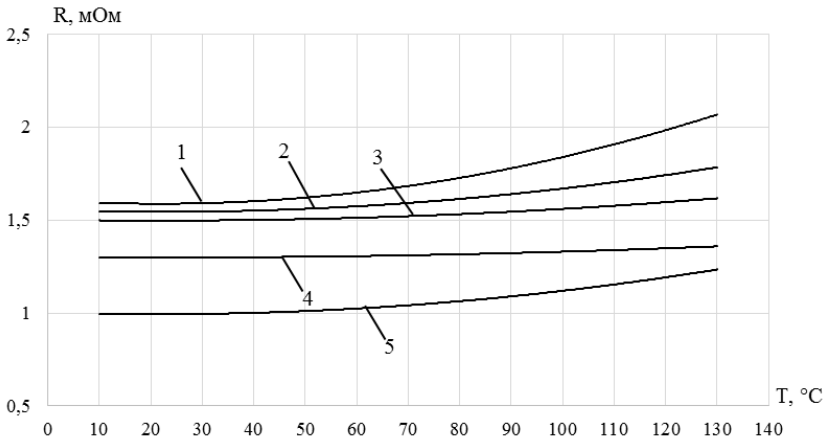
**Рис. 4.11.** Зависимость сопротивления контактного соединения дефектного магнитного пускателя ПМЛ от температуры контактного соединения, по результатам тепловизионного контроля: 1 –  $K_3 = 0,5$ ; 2 –  $K_3 = 0,4$ ; 3 –  $K_3 = 0,3$ ; 4 –  $K_3 = 0,2$



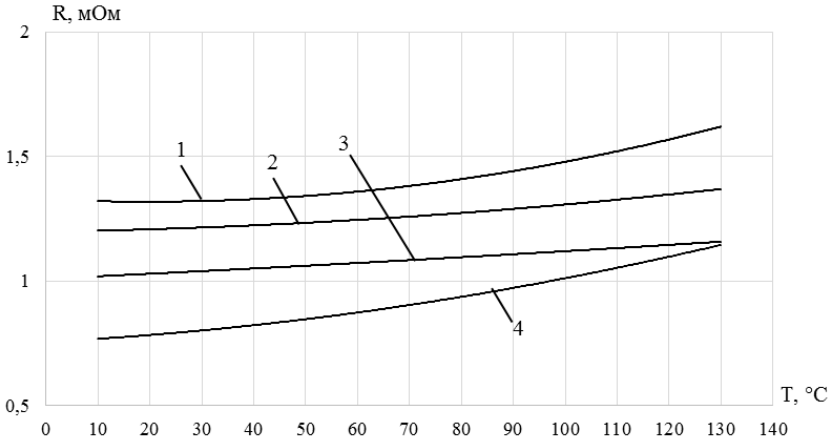
**Рис. 4.12.** Зависимость сопротивления контактного соединения дефектного автоматического выключателя ВА51 от температуры контактного соединения, по результатам тепловизионного контроля: 1 –  $K_3 = 0,4$ ; 2 –  $K_3 = 0,5$ ; 3 –  $K_3 = 0,5$ ; 4 –  $K_3 = 0,3$



**Рис. 4.13.** Зависимость сопротивления контактного соединения дефектного контактора КТИ от температуры контактного соединения, по результатам тепловизионного контроля: 1 –  $K_3 = 0,6$ ; 2 –  $K_3 = 0,5$ ; 3 –  $K_3 = 0,3$ ; 4 –  $K_3 = 0,4$



**Рис. 4.14.** Зависимость сопротивления контактного соединения дефектного рубильника РЕ19 от температуры контактного соединения, по результатам тепловизионного контроля: 1 –  $K_3 = 0,3$ ; 2 –  $K_3 = 0,5$ ; 3 –  $K_3 = 0,5$ ; 4 –  $K_3 = 0,2$ ; 5 –  $K_3 = 0,2$



**Рис. 4.15.** Зависимость сопротивления контактного соединения дефектного пакетного выключателя ПВ-3 от температуры контактного соединения, по результатам тепловизионного контроля: 1 –  $K_3 = 0,5$ ; 2 –  $K_3 = 0,6$ ; 3 –  $K_3 = 0,3$ ; 4 –  $K_3 = 0,3$

Избыточные фактические температуры коммутационных аппаратов при одинаковых условиях эксплуатации в момент измерения (рабочий ток и коэффициент загрузки) не равны между собой. Неравенство температур приводит к тому, что сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов имеют также разные значения. Причиной являются плёнки, образующиеся на контактных поверхностях аппаратов.

Тепловизионный контроль сетей низкого напряжения показал, что в дефектных узлах – коммутационных аппаратах – из-за наличия поверхностных плёнок и дефектов поверхности контактирования происходит недопустимое повышение температуры контактного соединения. В результате этого сопротивление аппаратов по отношению к начальному значению выросло в среднем в 1,7-2,2 раза, в том числе:

- для автоматических выключателей ( $I_{НОМ} = 100$  А) в 2,1 раза;
- для контакторов ( $I_{НОМ} = 100$  А) в 2,3 раза;
- для магнитных пускателей ( $I_{НОМ} = 100$  А) в 2,2 раза;
- для рубильников ( $I_{НОМ} = 100$  А) в 1,8 раза;
- для пакетных выключателей ( $I_{НОМ} = 100$  А) в 1,7 раза.

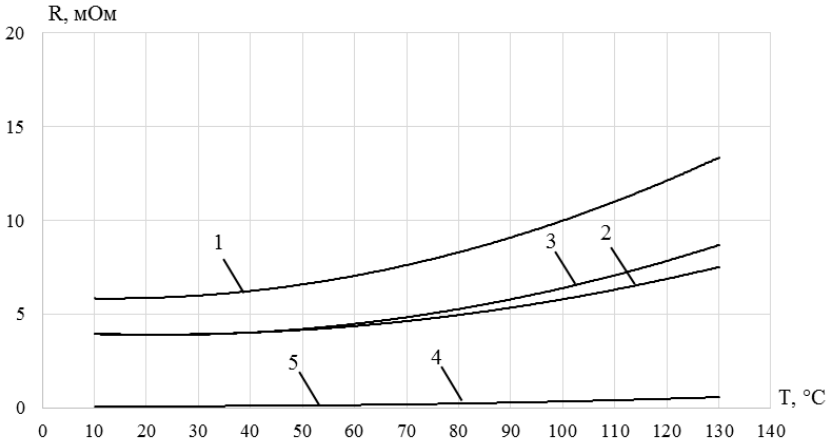
Коэффициент превышения сопротивления по условиям технической эксплуатации определяется по выражению

$$K_{п.с} = \frac{R_{к.с}}{R_{к.о}} \quad (4.28)$$

где  $R_{к.о}$  – начальное сопротивление контактного соединения коммутационного аппарата;

$R_{к.с}$  – фактическое сопротивление контактного соединения аппарата.

Зависимость сопротивления контактного соединения коммутационных аппаратов от температуры контактного соединения представлена на рис. 4.16.



**Рис. 4.16.** Зависимость сопротивления контактного соединения коммутационных аппаратов от температуры контактного соединения при  $K_3 = 0,3$ : 1 – магнитный пускатель ПМЛ,  $I_{ном} = 100$  А; 2 – автоматический выключатель ВА51,  $I_{ном} = 100$  А; 3 – контактор КТИ,  $I_{ном} = 100$  А; 4 – рубильник РЕ19,  $I_{ном} = 100$  А; 5 – выключатель пакетный ПВ-3;  $I_{ном} = 100$  А

Для расчёта сопротивления контактного соединения с помощью номограммы, представленной на рис. 4.16, необходимо вычислить величину температуры контактного соединения, например, для магнитного пускателя ПМЛ

$$T_n = \frac{26,8^2((65 + 40) - 20)}{100^2} + 20 + 67,1 = 94,64^\circ\text{C} = 367,79 \text{ К}$$

Затем по оси абсцисс на рис. 4.16 отложить вычисленное значение  $94,64^\circ\text{C}$  и провести вертикальную линию до пересечения с кривой, соответствующей заданному коммутационному аппарату. На оси ординат отложится искомая величина эквивалентного сопротивления, равная  $8,9$  мОм. В то время как контактное сопротивление, измеренное микрометром, составило  $8,1$  мОм, что доказывает возможность использования представленных номограмм.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Правила устройства электроустановок. 7-ое издание.
2. *Грачева, Е. И.* Развитие теории и методов оценки эффективности функционирования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий: автореф. дис. ... доктора технических наук: 05.09.03 / Е. И. Грачева [Место защиты: Чуваш. гос. ун-т им. И. Н. Ульянова] – 2014. – 40 с.
3. *Грачева, Е. И.* Развитие теории и методов оценки эффективности функционирования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий: дисс. ... доктора технических наук: 05.09.03 / Е. И. Грачева [Место защиты: Чуваш. гос. ун-т им. И. Н. Ульянова] – 2014. – 364 с.
4. *Конюхова Е.А., Киреева Э.А.* Надежность электроснабжения промышленных предприятий. Библиотечка электротехника. Выпуск 12(36). М.: НТФ "Энергопрогресс", "Энергетик", 2001. 93 с.
5. *Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Ибатуллин Э.Э., Петрова Р.М., Синукова Т.В.* Анализ основных показателей промышленного производства объектов средней мощности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №2 (58). С. 93-108.
6. *Грачева Е. И. [и др.]* Алгоритмы и модели потерь мощности в автоматических выключателях, устанавливаемых в цеховых сетях // Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 4. С. 345–353. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-4-345-353.
7. *Петрова Р.М, Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Valtchev S., Yousef Ibragim.* Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 1 (57). С. 93-105.
8. *Петрова Р. М. и др.* Методы оценки надежности схем внутрицехового электроснабжения. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 395–409. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>.
9. *Петрова Р. М., Грачева Е. И.* Алгоритмы оценки основных параметров надежности низковольтного оборудования схем цеховых сетей // Омский научный вестник. 2024. No 1 (189). С. 93–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-93-102.
10. *E. Gracheva, R. M. Petrova, S. Valtchev and T. Sinyukova, "Study of Probability Characteristics of the Reliability of Electrical Equipment in Internal Power Supply Systems," 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkiye, 2023, pp. 460-465, doi:*



10.1109/GPECOM58364.2023.10175821.

11. *E. I. Gracheva, R. M. Petrova, T. Sinyukova, S. Valtchev, R. Miceli and M. Caruso*, "Reliability and Overload Capacity of Power Transformers," 2023 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Terrasini, Italy, 2023, pp. 684-689, doi: 10.1109/ICCEP57914.2023.10247425.

12. *R. M. Petrova and E. Gracheva*, "Reliability Parameters of Low-Voltage Switchgear and Cable Lines of Workshop-Floor Network Schemes," 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2023, pp. 1049-1055, doi: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349643.

13. *R. M. Petrova and E. Gracheva*, "Comparison Of Methods Of Calculation Of The Electrical System Of In-Plant Power Supply," 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2023, pp. 1056-1061, doi: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349401.

14. *Петров А. Р., Грачева Е. И.* Моделирование потерь мощности в контактных системах низковольтных коммутационных аппаратов // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 126–133. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-126-133.

15. *Петров А. Р., Грачева Е. И.* Комплексный подход к исследованию функциональных параметров низковольтных коммутационных аппаратов // Электрические станции. 2023. № 11, С. 29-36. doi: <http://dx.doi.org/10.34831/10.34831/EP.2023.1108.11.004>.

16. *Петров А. Р., Грачева Е. И., S. Valtchev* Исследование технических параметров магнитных пускателей и рубильников, устанавливаемых в цеховых сетях. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 384–394. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-384-394>.

17. *A. R. Petrov, E. I. Gracheva, S. Valtchev and T. Sinyukova*, "Modeling of Power Losses in Contact Systems of Low Voltage Switching Devices," 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkiye, 2023, pp. 455-459, doi: 10.1109/GPECOM58364.2023.10175729.

18. *A. R. Petrov, E. Ivanovna Gracheva, T. Sinyukova, S. Valtchev, R. Miceli and A. U. Rahman*, "Simulation of the Functional Characteristics of Low-Voltage Switching Devices, Based on the Example of Automatic Circuit Breakers," 2023 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Terrasini, Italy, 2023, pp. 690-695, doi: 10.1109/ICCEP57914.2023.10247405.

19. *S. Valtchev, A. R. Petrov and E. I. Gracheva*, "Algorithms and Models for Evaluation of Technical Characteristics of Low-voltage Electrical Apparata," 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling,

Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2023, pp. 1087-1091, doi: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349584.

20. S. Valtchev, A. R. Petrov and E. I. Gracheva, "Main Technical Characteristics of Low-voltage Electrical Devices," 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2023, pp. 1092-1095, doi: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349417.

21. *Грачева Е. И. и др.* Определение законов изменения сопротивления контактных групп электрических аппаратов низкого напряжения // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 4. С. 350–360. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-4-350-360>.

22. *Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Табачникова Т.В., Шумихина О.А., Гибадуллин Р.Р.* Исследование качества функционирования электрических аппаратов низкого напряжения в составе электротехнических комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-3-15.

23. *Грачева Е.И., Наумов О.В.* Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей. Монография. М.: РУСАЙНС, 2017. 168 с.

24. *Егоров Е. Г., Егоров Г. Е., Луия Н. Ю.* Особенности измерения восстанавливающейся электрической прочности в низковольтных контакторах переменного тока // Вестник Чувацкого университета. 2019. № 3. С. 78–86.

25. *Егоров Е. Г., Иванова С. П., Луия Н. Ю., Афанасьев А. В. [и др.]* Исследование отключающей способности автоматических выключателей в режиме короткого замыкания // Электротехника. 2018. № 8. С. 12–15.

26. *Буторин В. А., Царев И. Б., Банин Р. В., Шарпилов А. Ю.* Время первой проверки состояния контактов магнитного пускателя // Вестник Курганской ГСХА. 2019. №2 (30). С. 58–60.

27. *Gracheva E., Gorlov A., Alimova A.* Features of Structure of Electric Supply Systems of Industrial Enterprises // International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2020. P. 910-913.

28. *Deac C. N., Adam M., Andrusca M., Dragomir A.* Aspects regarding contact resistance measurement // 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 2019. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759784>.

29. *Derevyankin P. G., Frolov V. Ya., Gorchakov S. L.* Analysis of erosion processes of electrical contacts manufactured by plasma spraying technology //

IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 622–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039012>.

30. *Gheorghija C. M., Adam M., Andrusca M., Munteanu A. [et al.]* About contact resistance of the electrical equipment // International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, Romania, 2017. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974439>.

31. *Gonzalez D., Hopfeld M., Berger F., Schaaf P.* Investigation on contact resistance behavior of switching contacts using a newly developed model switch // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2018. Vol. 8, N 6. P. 939–949. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2791839>.

32. *Hadziefendic N., Kostic N., Trifunovic J., Kostic M.* Detection of poor contacts in low-voltage electrical installations // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2019. Vol. 9, N 1. P. 129–137. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2882626>.

33. *Kim K., Joo H. W., Bae C. Y., Choi J. [et al.]* 3D simulation of air arc in the molded case circuit breaker // 5th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST). Kitakyushu, Japan, 2019. P. 239–242. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2019.8928799>.

34. *Lyuminarskaja E. S., Lyuminarsky I. E.* Theoretical study of electrical contact dustiness impact on transition resistance // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Moscow, Russia, 2018. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728710>.

35. *Ruempler C., Zacharias A., Stammberger H.* Low-voltage circuit breaker arc simulation including contact arm motion // The 27th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2014). Dresden, Germany, 2014. P. 1–5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6857183>.

36. *Shin D., Golosnoy I. O., Bull T. G., McBride J. W.* Experimental study on the influence of vent aperture size and distribution on arc motion and interruption in low-voltage switching devices // 4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST). Xi'an, China, 2017. P. 213–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2017.8188830>.

37. *Shin D., McBride J. W., Golosnoy I. O.* Arc modeling to predict arc extinction in low-voltage switching devices // IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Albuquerque, NM, USA, 2018. P. 222–228. DOI: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2018.8611712>.

38. *Ye Z., Liu S., Zhao S.* Design and implementation of the simulation system of low-voltage distribution network based on real-scene simulation // IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication

and Information (ICETCI). Changchun, China, 2023. P. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETCI57876.2023.10177008>.

39. *Wei C.* Power Grid Facility Thermal Fault Diagnosis via Object Detection with Synthetic Infrared Imagery // 2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEEECT), Macau, Macao, 2021, pp. 217-221, DOI: 10.1109/CEEECT53198.2021.9672631.

40. *Zhu-Mao L., Qing L., Tao J., Yong-Xin L., Yu H., Yang B.* Research on Thermal Fault Detection Technology of Power Equipment based on Infrared Image Analysis // 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, 2018, pp. 2567-2571, DOI: 10.1109/IAEAC.2018.8577908.

41. *Pareek S., Sharma R., Maheshwari R.* Application of artificial neural networks to monitor thermal condition of electrical equipment // 2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Rupnagar, India, 2017, pp. 183-187, DOI: 10.1109/CATCON.2017.8280208.

42. *Dragomir A., Adam M., Antohi S.-M., Atanasoaei M., Pantiru A.* Monitoring and Diagnosis of Electrical Equipment by Infrared Thermography // 2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2022, pp. 516-520, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959756.

43. *Bhagat A. K., Chauhan A.* Thermal Image-Based Fault Analysis of Induction Motors using a Novel Machine Learning Model // 2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART), Moradabad, India, 2022, pp. 1429-1433, DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10046714.

44. *Andrei P., Cazacu E., Stanculescu M., Andrei H., Caciula I., Drosu O.* Thermal Behavior of Electrical Contact for Different AC Loads // 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, 2023, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187457.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ.....	5
1.1. Электрические аппараты. Классификация электрических аппаратов	5
1.2. Электрические аппараты низкого напряжения .....	6
1.3. Электрические аппараты высокого напряжения.....	7
1.4. Типы электрических контактов и процессы, протекающие на границе раздела .....	9
1.5. Материалы и конструкции контактов .....	14
2. ПЕРЕХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ .....	23
2.1. Контактное сопротивление и определяющие его факторы.....	23
2.2. Прогнозирование изменения сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов методом регрессионного анализа .....	36
2.3. Аналитическое прогнозирование изменения сопротивления контактов коммутационных аппаратов в процессе эксплуатации .....	40
3. НАДЁЖНОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ .....	46
3.1. Общие представления о надёжности изделий.....	46
3.2. Способы повышения срока службы контактных пар .....	48
3.3. Оценка надёжности коммутационной аппаратуры на основе цензурированной статистической информации.....	55
3.4. Прогнозирование надёжности функционирования контактов низковольтных коммутационных аппаратов.....	61
3.5. Проверка коммутационных аппаратов на коммутационную способность .....	74
3.6. Совершенствование защитных характеристик автоматических выключателей низкого напряжения .....	76
4. ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО ДАННЫМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ....	81
4.1. Основные теплофизические процессы в замкнутых электроконтактных системах.....	81
4.2. Индивидуальные средства тепловизионного контроля.....	86
4.3. Оценка параметров надёжности и прогнозирования долговечности контактных соединений по данным тепловизионной диагностики .....	94
4.4. Оценка технического состояния контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов по данным тепловизионного контроля.....	109
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	120

---

Издательство «Отечество»  
420032 г.Казань, ул. Шоссейная, 22А

Подписано в печать 05.02.2024. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать ризографическая.  
Усл. печ. л. 8. Тираж 500. Заказ № 0403/1.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)  
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92  
e-mail: westfalika@inbox.ru

---