

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Садыков Руслан Рустемович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ВНУТРИЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
Елена Ивановна Грачева

Казань – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ .....	9
1.1 Особенности анализа надежности систем электроснабжения .....	9
1.2 Основные направления повышения надежности систем электроснабжения .....	16
1.3 Исследование функциональной надежности систем электроснабжения .....	20
1.4 Общая структура процесса проектирования системы электроснабжения с учетом фактора надежности .....	26
Выводы .....	31
2 АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ .....	32
2.1 Классификация методов расчета надежности .....	32
2.2 Общие сведения о видах законов распределения случайных величин ..	35
2.3 Статистическая информация об отказах электрооборудования низковольтных цеховых сетей и выявление законов распределения их вероятностных характеристик .....	40
2.4 Расчет доверительных интервалов параметров потока отказов и определение интенсивности отказов электрооборудования .....	50
2.5 Характеристика работоспособности контактных систем низковольтных аппаратов .....	55
Выводы .....	64
3 КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ОБЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СИСТЕМ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ..	65
3.1 Постановка задачи .....	65

3.2	Тепловизионные обследования для анализа технического состояния и надежности функционирования контактных систем низковольтных коммутационных аппаратов . . . . .	67
3.3	Метод комплексной оценки эффективности функционирования контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов как элементов систем цехового электроснабжения . . . . .	81
3.4	Расчетный метод определения сопротивления контактов и температуры контактных площадок аппаратов . . . . .	106
	Выводы . . . . .	110
4	МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ . . . . .	111
4.1	Оценка вероятностей состояния системы электроснабжения . . . . .	111
4.2	Сравнительный анализ методов определения параметров надежности функционирования схем цеховых сетей . . . . .	120
4.3	Алгоритм расчета вероятности времени безотказной работы схем цеховых сетей с помощью коэффициентов отношения . . . . .	135
4.4	Оценка погрешности методики расчета с использованием коэффициентов отношения . . . . .	141
	Выводы . . . . .	145
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	146
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК . . . . .	148
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФУНКЦИИ ВЕРОЯНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ НИЗКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ . . . . .	164
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ НИЗКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ . . . . .	183
	ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ НЕДРЕНИЯ . . . . .	191

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В современных условиях становления рыночных отношений в России, с внедрением нового электрооборудования в системах внутризаводского электроснабжения, проблема исследования и анализа надежности функционирования технических устройств становится одной из самых главных. Известно, что во время пусконаладочных работ при вводе новых промышленных объектов выявляются и устраняются причины ненадежной работы оборудования и установок. Многие из этих причин объясняются недостатками проектно-конструкторских разработок, в которых не анализировались факторы надежности.

В настоящее время на предприятиях формируются системы управления производственными активами (СУПА). Современные тенденции развития промышленного комплекса показывают, что в соответствии с Концепцией СУПА основные этапы принятия решения о воздействии на актив должны включать в себя: 1) сбор, обработку и хранение исходных данных; 2) оценку технического состояния и вероятности отказа оборудования; 3) планирование работ по текущему обслуживанию и ремонту; 4) выполнение запланированных работ.

Как правило, для моделирования вероятностных характеристик надежности систем электроснабжения промышленных предприятий в качестве объекта исследования рассматриваются распределительные сети 6–10 кВ. Но, как показывает опыт эксплуатации, вероятностные характеристики надежности функционирования внутрицеховых систем низкого напряжения, с учетом целого комплекса воздействующих факторов, часто не поддающихся количественной оценке, и множества элементов оборудования, имеют сложные зависимости и требуют детального исследования при моделировании на этапах проектирования и эксплуатации. Таким образом, разработка и реализация алгоритмов оценки надежности функционирования систем цехового электроснабжения с учетом основных параметров оборудования является актуальной задачей.

Объектом исследования являются системы внутрицехового электроснабжения промышленных предприятий.

Предметом исследования являются функциональные характеристики оборудования внутрицехового электроснабжения.

Цель работы. Разработка алгоритмов и методики оценки надежности цеховых сетей для повышения эффективности функционирования и проектирования систем электроснабжения.

Идея работы. Заключается в разработке методики и моделей для оценки и повышения эффективности эксплуатации систем внутрицехового электроснабжения, что позволяет улучшить функциональные характеристики цеховых сетей.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе требуется решение следующих задач:

- анализ вероятностных характеристик надежности низковольтных коммутационных аппаратов и кабельных линий цеховых сетей на основании статистических данных эксплуатации оборудования;

- определение допустимых кратностей превышения сопротивления контактных соединений низковольтных аппаратов по условиям технической эксплуатации на основании экспериментальных данных тепловизионного обследования;

- разработка алгоритма и метода комплексной оценки и повышения эффективности функционирования низковольтных аппаратов;

- разработка алгоритма и методики определения показателей надежности функционирования цеховых сетей относительно присоединений нагрузки и распределительных устройств низкого напряжения с помощью коэффициентов отношения.

Методы исследования. В работе использовались методы теории надежности и теории вероятностей, математической статистики, теории электрических аппаратов, методы моделирования в программной среде Matlab. Обработка статистической информации и расчеты выполнены на ПЭВМ с использованием стандартных и разработанных моделей и программ.

Научная новизна работы:

- на основании статистических эксплуатационных данных доказана гипотеза о возможности применения нормального закона распределения вероятно-

стных характеристик и определены параметры надежности низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в цеховых сетях и кабельных линиях низкого напряжения;

- в качестве критерия оценки технического состояния и надежности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов предложена величина коэффициента превышения сопротивлений контактных соединений аппаратов;

- по условиям технической эксплуатации и экспериментальным исследованиям тепловизионного контроля, в отличие от используемых ранее значений предельно допустимых температур нагрева контактов, установлены допустимые кратности превышения сопротивления контактных соединений по отношению к начальному значению сопротивлений новых аппаратов, позволяющие не допускать развития дефектов коммутационной аппаратуры и предотвращать аварийные ситуации;

- разработаны алгоритм и методика комплексной оценки и повышения эффективности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в цеховых сетях с определением функциональной зависимости между параметрами сопротивлений контактных соединений и вероятностью времени безотказной работы аппаратов;

- разработаны алгоритм и методика определения параметров надежности функционирования цеховых сетей относительно присоединений нагрузки и распределительных устройств низкого напряжения с помощью коэффициентов, определяемых отношением вероятности времени безотказной работы относительно первого присоединения потребителей.

#### Теоретическая и практическая значимость работы состоит:

- в разработке методики оценки и повышения эффективности функционирования систем внутрицехового электроснабжения, позволяющей уточнять компоновочные решения оборудования схем на этапе проектирования и эксплуатации;

- в обеспечении эффективного внедрения мероприятий по повышению уровня надежности схем цеховых сетей, оцениваемого по разработанному алгоритму, за счет применения усовершенствованного оборудования;

- в достижении повышения достоверности значений прогнозируемых характеристик надежности функционирования систем внутрицехового электроснабжения за счет применения алгоритмов с использованием коэффициентов отношения;

- в обеспечении эффективной эксплуатации низковольтной коммутационной аппаратуры за счет использования предлагаемого критерия допустимой кратности превышения сопротивления контактных соединений, позволяющего предотвращать развитие дефектов коммутационной аппаратуры и аварийные ситуации, а также уточнять сроки и повышать качество проведения планово-предупредительных ремонтов и текущих обследований оборудования.

Достоверность полученных результатов. Подтверждается математическим обоснованием разработанных моделей, хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований с погрешностью не более 11%, сопоставимостью полученных результатов с положениями общей теории надежности.

Реализация результатов работы. Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (КГЭУ). Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены на ПАО «Казаньоргсинтез», ОАО «Казанский медико-инструментальный завод» и в учебный процесс КГЭУ.

Новые научные положения, выносимые на защиту:

- результаты статистического исследования параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых на линиях цеховых сетей с выявлением нормального закона распределения;

- математическая модель критерия оценки технического состояния и надежности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов, в качестве которого предложена величина коэффициента превышения сопротивлений контактов аппарата;

- результаты тепловизионных обследований низковольтных аппаратов, позволяющие установить допустимые кратности превышения сопротивления контактных соединений по отношению к начальному значению сопротивлений новых аппаратов;

- алгоритм и методика комплексной оценки и повышения эффективности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов с определением параметров их надежности и величины сопротивлений контактных соединений;

- алгоритм и методика определения параметров надежности функционирования цеховых сетей относительно присоединений нагрузки и распределительных устройств низкого напряжения с использованием коэффициентов отношения вероятностей времени безотказной работы исследуемого числа присоединенных потребителей, к вероятности времени безотказной работы первого присоединения.

Апробация работы. Результаты и основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на VI Международной научно-практической конференции «Научные исследования: от теории к практике» (г. Чебоксары, 2015), XI Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения» (г. Казань, 2016), XIX Международной научно-практической конференции «Техника и технология: новые перспективы развития» (г. Москва, 2015), XLI Международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы технических наук» (г. Москва, 2015), IV Всероссийской научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования в XXI веке» (г. Новосибирск, 2016), LIII Международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (г. Новосибирск, 2015), а также обсуждались на аспирантско-магистерских семинарах кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 печатных работ, из них 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 статья в издании, входящем в систему цитирования СКОПУС; 1 авторское свидетельство программы для ЭВМ; 23 – тезисы докладов на конференциях и статьи в других изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Общий объем диссертации – 194 страницы, в том числе 164 страницы основного текста, 55 рисунков, 25 таблиц, списка литературы из 147 наименований.

# 1 ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

## 1.1 Особенности анализа надежности систем электроснабжения

Длительное время развитие электроэнергетики России проходило по экстенсивному пути, так как было направлено на обеспечение растущей потребности в электрической энергии промышленного, сельского и коммунально-бытового секторов страны [1, 2]. Требования большинства потребителей электроэнергии к поставщикам в отношении обеспечения надежности были однотипные и сводились к регламентации допустимой продолжительности отключения и последствий нарушения электроснабжения [3, 7, 8].

На этом этапе развития энергетики устойчивость и качество поставляемой энергии не рассматривались энергоснабжающими организациями, в силу их монопольного положения, как главные условия во взаимоотношениях с потребителями электрической энергии и все обуславливалось категориями электроприемников [47, 48, 104, 123].

На современном этапе развития страны, когда происходит значительный рост тарифов на электрическую энергию и имеет место структурная перестройка состава потребителей электрической энергии из-за использования новых высокопроизводительных устройств и современной технологии, гораздо более восприимчивых к снижению устойчивости и к нарушению характеристик качества электроэнергии, отношение заказчиков к этой проблеме существенно изменилось [2, 10, 19].

К указанным ответственным потребителям обычно относят компьютеры, электронные устройства управления, микропроцессорную технику и др. [4, 39, 42, 52, 124, 125].

Юридические и физические лица – потребители электрической энергии – не желают больше мириться с положением, когда электроснабжающие организации, являясь субъектами естественной монополии, не обеспечивают поставки

электроэнергии, качество которой соответствует установленным требованиям [43, 45, 72, 126-128].

Требования современных потребителей к электроэнергетической системе в части надежности электроснабжения сводятся не только к ограничению длительности перерывов электроснабжения, но и распространяются на аварийные провалы и выбросы показателей качества электрической энергии. Это приводит к изменению показателей и критериев для оценки надежности, а также необходимости использования кроме известной избыточности и дополнительных средств резервирования [103].

Снижение уровня надежности электроснабжения потребителей соответствует нарушению баланса мощности на валу электрических машин и поэтому режимы, представляющие опасность для потребителей, названы, динамическими [16, 100, 101, 129-131].

Аварии в подобных режимах электрической системы определяются не только фактом несбалансированности, но и инерционными свойствами электрических машин системы, а также быстродействием устройств релейной защиты, автоматики и коммутационных аппаратов [63, 84, 85, 111-113].

Внезапным отказом работоспособности систем электроснабжения (СЭС) для потребителей являются провалы показателей качества электрической энергии. Они приводят к отказу при выполнении двух неравенств [37]

$$U_{\text{ф}} < U_{\text{доп}}, t_{\text{ф}} > t_{\text{доп}}, \quad (1.1)$$

где  $U_{\text{ф}}$ ,  $U_{\text{доп}}$  – соответственно фактический и предельно допустимый уровень напряжения в рассматриваемом узле сети;  $t_{\text{ф}}$ ,  $t_{\text{доп}}$  – соответственно фактическая и предельно допустимая продолжительность воздействия пониженного напряжения на потребителя.

Среди показателей надежности СЭС подобным отказам потребителей наиболее соответствует параметр потока отказов, поскольку продолжитель-

ность аварийного состояния потребителей определяется особенностями их технологического процесса и не связана с временем восстановления поврежденного элемента системы.

Важным аспектом исследования такого свойства СЭС, как надежность, является установление количественных показателей, которыми можно измерить степень проявления этого свойства в зависимости от условий и особенностей, характерных для конкретной решаемой задачи. Умение количественно измерить надежность является одной из основных предпосылок создания системы эффективного управления надежностью электрообъекта и СЭС [21, 22, 132-135].

Следует отметить, что общепромышленные стандарты не отражают специфические особенности производства и передачи электрической энергии. К наиболее существенным особенностям определения надежности СЭС можно отнести две:

Первая. Для СЭС характерна малая вероятность полного отказа работоспособности. Отказы отдельных элементов приводят в подавляющем большинстве случаев лишь к частичным отказам работоспособности СЭС.

Вторая. Для СЭС характерна работа в режимах, определяемых потребителями энергии и существенно зависящих от сезона, дня недели и времени суток.

Учет указанных особенностей СЭС привел к тому, что наряду с понятием «отказ работоспособности» для характеристики надежности объекта используется понятие «отказ функционирования», которое характеризует переход СЭС от одного уровня функционирования к другому, более низкому [32, 33, 136-138].

Сказанное можно проиллюстрировать на рисунке 1.1, где сплошной линией изображен график требуемой мощности, а шриховой – располагаемой мощности СЭС.

В момент времени  $t_1$  возникает частичный отказ работоспособности СЭС, устранение которого длится в течение времени  $T_{\text{ч}}$ . В результате этого отказа СЭС может развить мощность не выше уровня  $N_{\text{ч}}$ . При достижении времени  $t_2$  требуемая мощность снижается с  $N_{\text{тр}}^1$  до  $N_{\text{тр}}^2$  при сохранении снижения рабо-

тоспособности СЭС. Из рисунка 1.1 видно, что  $\Delta N_{\text{ч}} = N_{\text{зо}}^1 - N_{\text{зо}}^2$ , а фактический недоотпуск мощности составит  $N_{\text{тр}}^2 - N_{\text{зо}}^2$ . При такой ситуации можно говорить об отказе функционирования СЭС. В момент времени  $t_3$  положение еще раз изменяется: частичный отказ работоспособности СЭС сохраняется, но недоотпуска энергии потребителям нет, так как, несмотря на сохранение частичного отказа работоспособности, требуемая мощность  $N_{\text{тр}}^3$  меньше располагаемой мощности СЭС  $N_{\text{зо}}^2$ , т.е. заданный график нагрузки полностью обеспечивается.

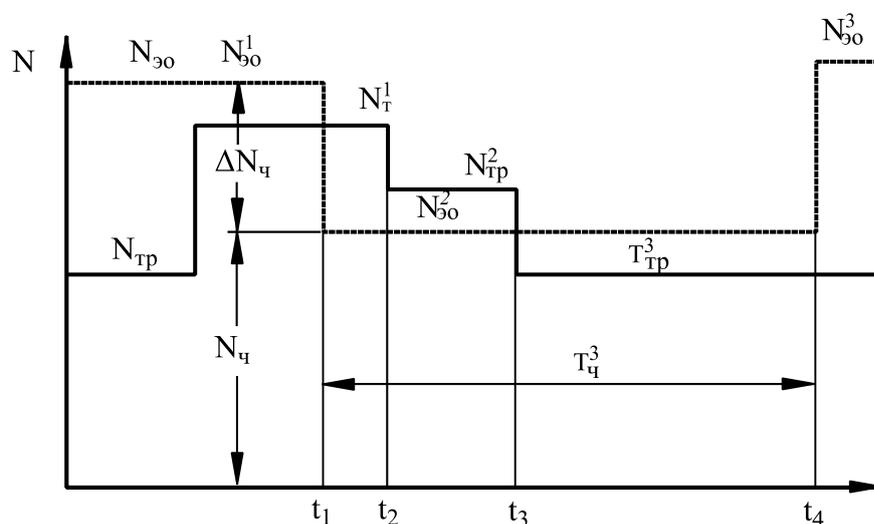


Рисунок 1.1 – Пример частичных отказов работоспособности и функционирования систем электроснабжения

При решении задач обеспечения надежности СЭС важная роль, принадлежит математическим методам, которые позволяют получить количественные оценки надежности СЭС, что является необходимой предпосылкой для ее оптимизации [23, 24, 139].

В наиболее общем виде методы расчета должны обеспечивать возможность определения надежности СЭС, отвечающих следующим характеристикам [77]:

- произвольная конфигурация технологической схемы и большое количество входящих в нее элементов;

- наличие в технологической схеме элементов, зависящих один от другого с точки зрения надежности их функционирования;

- наличие в технологической схеме элементов дискретного действия – выключателей, автоматов, клапанов, задвижек и т.д. и необходимость учета возможности возникновения зависящих отказов, обусловленных отказами в срабатывании ложным и излишним срабатыванием элементов дискретного действия при отказе других элементов;

- зависимость надежности СЭС от режима ее работы.

В практике применяются различные нормативные критерии надежности функционирования. Наиболее часто используемым критерием за рубежом является критерий LOLP (Loss of load probability), характеризующий вероятность потери нагрузки или вероятность появления дефицита мощности. Значение этого критерия обычно принимается равным одному дню в 10 лет. Этому критерию соответствует значение удельного ущерба от аварийных ограничений около  $3 \text{ \$ / кВт} \cdot \text{ч}$  [78].

Как показали исследования [78], развитие энергообъединений осуществляется с учетом выполнения критерия  $(n - 1)$ . Этот критерий означает, что отказ любого одного элемента в любой электрической системе не должен приводить к нарушению устойчивости системы и электроснабжения потребителей.

В качестве единицы отказа оборудования с учетом критерия  $(n - 1)$  принимается отказ:

- одной линии электропередачи;
- одного трансформатора;
- одной секции или системы сборных шин и т.п.

На рисунке 1.2 показаны режимные состояния СЭС [22]. В нормальном рабочем состоянии условие надежности  $(n - 1)$  выполняется, если все потребители снабжаются электроэнергией, а напряжение сети и частота находятся в допустимых пределах.

При снижении уровня надежности  $(n - 1)$  система переходит из нормального состояния в опасное состояние: аварийное снижение надежности. Крити-

ческое состояние наступает, если помимо снижения надежности ( $n - 1$ ) наступает перегрузка оборудования, а напряжение в сети выходит за допустимые пределы. Когда система в результате выхода процесса из-под контроля распадается на части, наступает экстремальное состояние. После противоаварийных мероприятий система вновь возвращается в нормальное состояние, пройдя стадию восстановления.

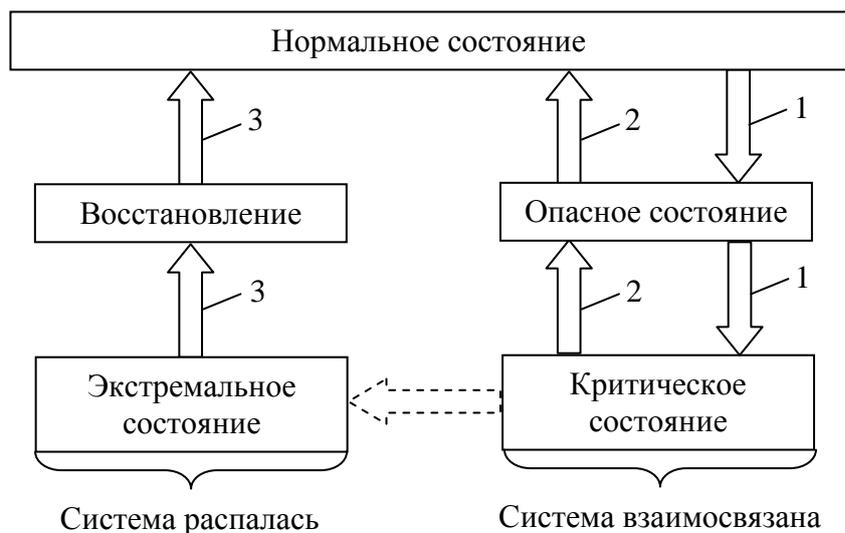


Рисунок 1.2 – Режимные состояния системы электроснабжения:

1 – неконтролируемый переход; 2 – контролируемый переход;

3 – мероприятия по восстановлению системы

В современных разветвленных электроэнергетических системах контроль за уровнем надежности ( $n - 1$ ) может осуществляться только с помощью расчетной модели с использованием непосредственных данных в темпе процесса (в режиме «on line»). Если подобный цикл моделирования приводит к отсутствию изменений показателей состояния, то в данный момент времени уровень надежности ( $n - 1$ ) соответствует заданному.

Если энергосистема находится в критическом или опасном состоянии, то диспетчер устраняет нарушение для возвращения системы в исходное положение. Для реализации подобных мероприятий в настоящее время используются алгоритмы оптимизации распределения потока нагрузки.

Контроль за критерием  $(n - 1)$  при непосредственном расчетном моделировании отказа в режиме «on line» можно осуществлять с помощью расчетной модели отказа, составленной на базе определяемых параметров. Расчетная модель подобного вида представлена на рисунке 1.3.

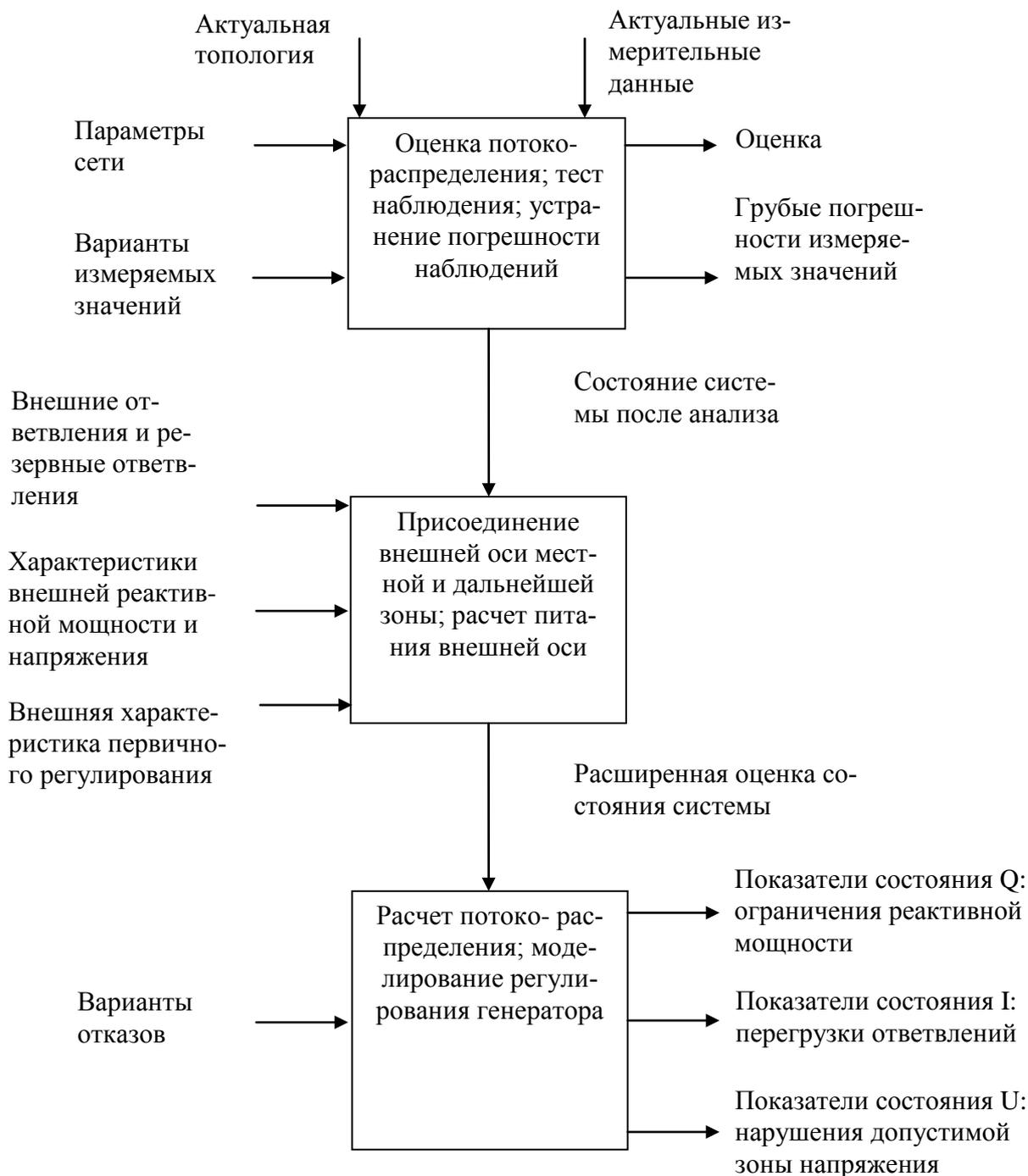


Рисунок 1.3 – Алгоритм моделирования последствий отказа

Программа моделирования отказа состоит из нескольких частей: распределения нагрузки, подключения резерва во внешней сети и собственно расчетной модели. Задача оценки потокораспределения в системе состоит в определении текущего состояния системы при наличии избыточного числа измерений, выполняемых с погрешностями, и в создании за счет этого базы данных для решения всех последующих задач управления.

В перспективе развитие СЭС предполагается осуществлять с учетом критерия  $(n - 2)$ . В настоящее время критерий  $(n - 2)$  реализован при эксплуатации СЭС АО «ТАНЕКО».

## 1.2 Основные направления повышения надежности систем электроснабжения

Особенности методов оценки и функциональной надежности электроэнергетических систем и их объектов рассмотрены в ряде работ [1, 6, 57, 73, 80, 107, 140-147]. В работах отмечается, что на практике различают три иерархических уровня, в рамках каждого из которых проводят оценку надежности сложных систем и их объектов: первый – системы генерации; второй – системы генерации и транспорта; третий – системы генерации, транспорта и распределения.

Третий иерархический уровень и распространяется на сложные электрические системы, по отношению к которым с конца прошлого столетия стали применяться понятия результирующей надежности.

Недостаточно высокий уровень эксплуатационной надежности ряда энергетических объектов и СЭС является следствием многих объективных и субъективных причин, среди которых главными следует назвать:

- несовершенство в ряде случаев проектных решений по системам электроснабжения;
- недостаточно развитая методическая, нормативная и информационная база, предназначенная для формирования принимаемых решений по обеспечению

нию надежности, а также отсутствие общих закономерностей возникновения и развития аварий в таких технически сложных системах, какими являются объекты электроснабжения;

- невысокое качество электрооборудования, в том числе средств защиты, контроля и управления;

- невысокий технический уровень эксплуатации.

Совершенствование проектных и эксплуатационных решений по созданию, управлению и дальнейшему развитию СЭС предполагает определение рационального уровня надежности электроснабжения потребителей на основе количественных критериев [115].

При достаточном уровне резервирования и противоаварийного управления ряда действующих систем на первый план там могут выходить частичные отказы функционирования, т.е. отказы, вызывающие определенные ограничения, а не перерывы электропотребления узлов нагрузки.

Способность системы не допускать ограничений электропотребления, несмотря на отказы ее элементов и ошибочные действия персонала, характеризует функциональную надежность системы.

В ряде случаев при анализе надежности рассматриваются два аспекта:

- адекватность (готовность системы обеспечить потребителя электроэнергией с учетом сложившейся ситуации);

- живучесть (готовность системы выдерживать внезапные воздействия).

В количественном отношении эти два аспекта должны оценивать [44] статическую и динамическую возможность отказа в показателях, имеющих вероятностный характер, т.е. в показателях, значение которых определяется событиями в будущем, следовательно, прогнозируемых в той или иной степени.

Однако практически вероятностный подход применяется только при оценке статической надежности. Анализ живучести, который все чаще необходим в задачах планирования режимов и эксплуатации электрических систем, как правило, выполняется без применения вероятностных методов. Вероятностный подход требует оценки большого количества возможных ситуаций, каж-

дая из которых требует детального моделирования системы. Именно в этом трудность применения вероятностного подхода [40, 44, 46, 80].

Основными направлениями повышения надежности являются [111, 113, 114]:

- целесообразно с учетом становления рыночных отношений пересмотреть критерий статической надежности в сторону его увеличения до экономически целесообразных значений, учитывающих наиболее точно ущерб потребителей;

- необходимо расширить исследования по восстановлению нормального режима функционирования СЭС после тяжелых аварий с массовым отключением потребителей в части разработки требований к оборудованию, методов исследования, идеологии и систем управления;

- необходимо пересмотреть существующую инструкцию по анализу аварийности энергосистем в направлении более адекватной оценки категоричности аварий и отказов;

- следует ввести в большем объеме вероятностные подходы в оценке показателей надежности СЭС. Необходимо ускорить разработку тарифа на электрическую энергию, учитывающего фактор надежности электроснабжения потребителей, и системы ответственности энергоснабжающих организаций в виде штрафов за нарушение последними гарантированного и заявленного потребителями уровня надежности электроснабжения;

- учитывая, что многие объекты электроэнергетики подвержены опасным природным воздействиям (землетрясения, ураганы, гололед и др.), необходимо совершенствование норм и требований к электротехническому оборудованию электростанций, подстанций и ЛЭП, работающих в этих условиях, в первую очередь – к оборудованию, работающему в сейсмических регионах;

- для повышения надежности электроснабжения потребителей с непрерывным технологическим циклом, перерыв электроснабжения которых может привести к тяжелым экологическим последствиям и опасен для жизни людей, необходима разработка требований к согласованному проектированию систем внешнего и внутреннего электроснабжения в целях обеспечения непрерывности

технологического процесса при расчетных возмущениях либо безаварийной остановки производства при более тяжелых авариях;

- необходима разработка нормативов и требований по защите СЭС от воздействия электроприемников с резкопеременным характером нагрузки;

- целесообразно большее сближение понятий, используемых в рамках термина «надежность» в России и в государствах ближнего зарубежья, в прошлом входящих в ЕЭС.

На рисунке 1.4 представлены основные задачи обеспечения надежности систем электроснабжения, решение которых особенно актуально в современных условиях.

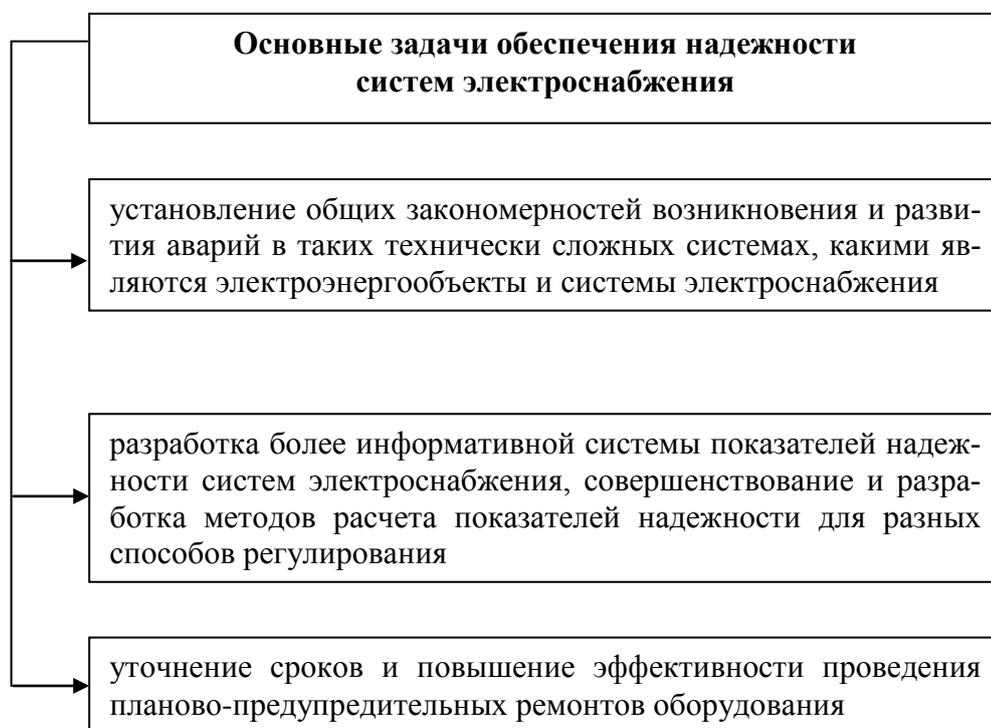


Рисунок 1.4 – Основные задачи обеспечения надежности систем электроснабжения

### 1.3 Исследование функциональной надежности систем электроснабжения

В соответствии с характером учитываемых факторов принято выделять три составляющие надежности СЭС промышленных предприятий – структурную, функциональную и технологическую. Оценка структурной надежности предполагает определение показателей надежности СЭС, исходя из изменения ее конфигурации вследствие отказов образующих ее элементов. Под элементами, как известно, понимаются единицы электрического оборудования и линии, различающиеся своим функциональным назначением, конструктивным исполнением и показателями надежности – выключатели, разъединители, воздушные и кабельные линии, трансформаторы, секции шин и т. п. Расчеты параметров режима при этом не производятся. Используются только качественные показатели изменений режима, влияние которых на работоспособность системы очевидно без проведения расчетов, поэтому при оценке структурной надежности анализируются только аварийные ситуации, связанные с полным перерывом электроснабжения потребителей электроэнергии, и вводится предположение о неограниченной пропускной способности элементов схемы. В то же время при расчете структурной надежности, как правило, учитываются функционирование и отказы релейной защиты и автоматики, а также противоаварийная деятельность дежурного персонала. В этой связи разделение структурной и функциональной надежности достаточно условно.

Под оценкой функциональной надежности обычно понимается анализ аварийных ситуаций в СЭС на основе количественных показателей аварийных и послеаварийных режимов [38, 67, 68].

Эффективность функционирования реальных СЭС в основном определяется по недоотпуску электроэнергии, который в свою очередь зависит от частоты, продолжительности нарушений электроснабжения и отключаемой мощности [72].

Функциональная надежность характеризует уровень выполнения функции сетей, выражающийся в степени обеспечения электроэнергией потребителей при отказах и неправильных действиях в СЭС. Критерием отказа в данном случае является ограничение электропотребления узлов нагрузки, оценка которого предполагает расчет послеаварийных режимов и учет процессов изменения нагрузки потребителей [41, 92].

Разделение надежности на структурную и функциональную обусловлено также, прежде всего, удобством анализа, поскольку для их оценки необходимо использовать различные методы. В то же время промежуточные результаты расчетов структурной надежности, отражающие особенности отказов в СЭС, деятельность персонала, работу защит и автоматики, могут быть использованы с целью построения единой расчетной схемы, определения вероятностных характеристик и отбора расчетных состояний для оценки функциональной надежности и живучести СЭС. Еще более тесно связаны вычисления показателей живучести и функциональной надежности. Живучесть отражает способность системы не допускать каскадного развития первичных возмущений. Такие возмущения могут быть как относительно слабыми (например, отказ элемента СЭС, несущего значительную нагрузку), так и весьма сильными, связанными с экстремальными внешними воздействиями, обусловленными стихийными бедствиями и тому подобными явлениями [106, 109, 116, 117].

При анализе функциональной надежности рекомендуется учитывать действие защиты и автоматики, реагирующих на ненормальные режимы работы, в частности, при возникновении перегрузок в системе. Наибольшее распространение для этих целей получила автоматика, действующая на отключение части нагрузки или избытка генерирующей мощности. Она может срабатывать при превышении нагрузкой допустимого значения в течение времени, большего уставки срабатывания, при снижении напряжения по величине и длительности больше допустимого и т.д. [13, 14, 36].

Отключение производится либо специальной защитой от перегрузки, реагирующей на величину и длительность последней, либо, при отсутствии такой

специальной защиты, в результате срабатывания других защит, реагирующих на повреждения элементов, возникающие из-за недопустимой перегрузки. Последний случай условно можно также рассматривать как срабатывание защиты от перегрузки с длительной выдержкой времени.

Вероятность срабатывания этих устройств защиты и автоматики определяется при условии безотказности этих устройств

$$P_{\text{ср}} = P(I_{\text{п.н}} > I_{\text{доп}})P(\tau_{\text{п.н}} > t_{\text{ср}}), \quad (1.2)$$

где  $P(I_{\text{п.н}} > I_{\text{доп}})$  – вероятность превышения током нагрузки допустимого значения;  $P(\tau_{\text{п.н}} > t_{\text{ср}})$  – вероятность того, что длительность превышения будет больше времени срабатывания.

Эти величины определяются на основе вероятностных характеристик процессов изменения электрических нагрузок элементов системы [47, 92], получаемых с помощью принятой модели электрических нагрузок, и метода расчета нагрузок ветвей сети по аналогичным характеристикам узлов.

Технологическая надежность определяется совокупностью участков производства, одновременно лишенных электроснабжения, возможностями их технологического резервирования, последствиями аварийного прекращения и способом восстановления технологического процесса [50, 53, 54, 59].

Целостное представление о надежности СЭС может быть получено лишь при комплексном учете ее структурной, функциональной и технологической надежности [25, 34, 55, 56, 96].

Известен удобный для практического применения метод оценки надежности электроснабжения потребителей, основанный на использовании понятия функции реакции сети и потребителя, учитывающий влияние режима. Он состоит из этапов: 1) определение функции реакции сети и функции реакции потребителя, 2) оценка показателей надежности и оценки ожидаемого ущерба [74, 75, 76].

При определении функции реакции сети моделируются состояния отказа элементов схемы, оцениваются вероятность и частота их возникновения. Рассчитываются вызванные ими токи КЗ и соответствующие им отклонения напряжения в узлах нагрузки; фиксируется время локализации аварии. По результатам, полученным после рассмотрения всех возможных ситуаций, для каждого электроприемника и для каждой анализируемой аварий строятся графические зависимости  $U = f(t)$  или  $V = f(t)$  (рисунок 1.5), которые называются функциями реакции сети. Здесь  $V$  – отклонение напряжения на зажимах электроприемника,  $t$  – время, с.

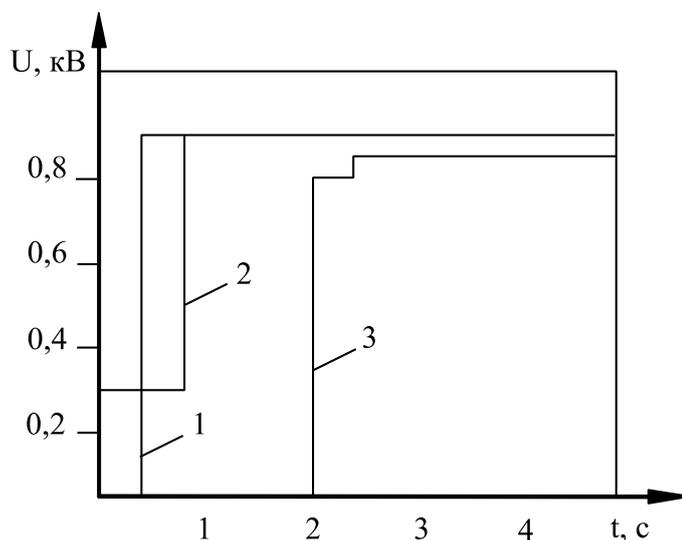


Рисунок 1.5 – Примеры функций реакции сети: 1 – КЗ на линии, защищенной предохранителем; 2 – КЗ на отходящей линии, снабженной выключателем; 3 – КЗ на питающей линии, резервируемой АВР

На основании модельных экспериментов и расчетов выявляется область надежного функционирования каждого электроприемника, установки, узла нагрузки, называемая функцией реакции потребителя  $f_n$ . Она представляет собой нижнюю правую границу области значений  $(V, t)$ , при которых функционирование данного потребителя устойчиво. Следовательно, если в некотором режиме наблюдается отклонение напряжения  $V_A$  длительностью  $t_A$  и точка с коор-

динатами ( $V_A, t_A$ ) лежит выше и левее  $f_n$  (рисунок 1.6), то работа потребителя А в этом режиме надежна, если ниже и правее  $f_n$  – ненадежна.

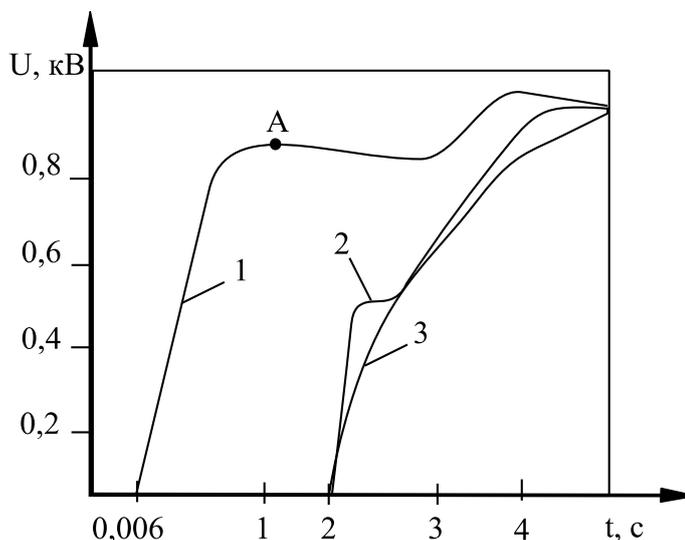


Рисунок 1.6 – Примеры функций реакции потребителя: 1 – обычные контакторы; 2 – контакторы, оборудованные замедлителями; 3 – силовой привод асинхронного двигателя без защиты минимального напряжения

Различные электроприемники по-разному реагируют на отклонения напряжения и частоты. Наиболее чувствительными в этом отношении являются осветительные приборы, особенно газоразрядные лампы, оборудование, работающее на электронных схемах, мощные синхронные двигатели, асинхронные двигатели и т.п. [15, 60, 81, 93].

Для выявления вопроса о влиянии режима напряжения и частоты на надежность работы потребителей необходимо сопоставить функции реакции сети с функцией реакции каждого потребителя. Если все аварийные ситуации описываются точками ( $V_A, t_A$ ), принадлежащими зоне устойчивой работы данного потребителя, то отклонения напряжения практически не ухудшают надежности установки.

В противном случае выполняются следующие расчеты:

1) по показателям надежности каждой аварии  $j$ , вызывающей отключение потребителя А вследствие недопустимого режима напряжения с частотой  $\bar{\omega}_j$  (1/год) и вероятностью  $q_j$ , оценивается средняя частота  $\bar{\omega}_A$  и средняя длительность  $T_A$  погашения установки за расчетный период (обычно равный году)

$$\bar{\omega}_A = \sum_{j=1}^k \bar{\omega}_j ; \quad (1.3)$$

$$T_A = \sum_{j=1}^k \bar{\omega}_j \theta_A(t_j)_j, \quad (1.4)$$

где  $k$  – число аварий, соответствующих зоне неустойчивости работы потребителя А;  $\theta_j(t_j)_j$  – среднее время восстановления нормального функционирования установки после перерыва электроснабжения на  $t_j$

$$t_j = \frac{q_j}{\bar{\omega}_j} \cdot 8760 ; \quad (1.5)$$

2) оценивается ожидаемый ежегодный недоотпуск электроэнергии

$$W_A = P_A \sum_{j=1}^k \bar{\omega}_j \tau_{Aj}, \quad (1.6)$$

где  $P_A$  – средняя мощность электроустановки;  $\tau_{Aj}$  – время недоотпуска электроэнергии, поскольку восстановление схемы питания потребителя может продолжаться дольше, чем восстановление нарушенного технологического процесса, и наоборот.

## 1.4 Общая структура процесса проектирования системы электроснабжения с учетом фактора надежности

Цеховые электрические сети низкого напряжения на предприятиях служат для распределения электрической энергии к электроприемникам при напряжении до 1 кВ. Они делятся на внешние и внутренние [113]. В системах электроснабжения промышленных предприятий сети напряжением до 1 кВ предназначены для распределения электроэнергии внутри цехов предприятий (питающие сети) и для непосредственного питания большинства электроприемников (распределительные сети), расположенных за пределами цеха на территории предприятия и преобразующих электроэнергию в другие виды энергии [113]. Цеховые электрические сети напряжением до 1 кВ являются составной частью СЭС промышленного предприятия.

Упрощенная классификация сетей напряжения до 1 кВ по конструктивным признакам приведена на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 – Классификация цеховых сетей по конструктивным признакам

Поскольку качество электроэнергии не может рассматриваться как совокупность постоянных составляющих, СЭС должна проектироваться так, чтобы каждый отдельно рассматриваемый ее критерий отвечал минимально необходимому требованию [64, 65, 102].

В первую очередь это касается 5-ти основных характеристик: постоянство напряжения, постоянство частоты, симметрия трехфазного тока, содержание высших гармоник, надежность. Несмотря на наличие большого числа ограничений, вышеназванные характеристики в определенной степени являются дополнительными условиями проектирования, учитываемыми при снижении затрат, а общая структура процесса проектирования, должна складываться из двух способов: а – надежность как дополнительное условие и б – надежность как цель оптимизации (рисунок 1.8).

Сравнение шагов процесса проектирования (рисунок 1.8), показывает общие черты и различия двух способов оценки – количественный, полученный путем сравнения статистических данных состояний системы с допустимыми значениями, и качественной оценки состояний системы с прогнозированием аварийных ситуаций.

Относительно самостоятельное, точное и количественное выделение некоторого участка сети, на котором производится контрольная проверка (шаг 1) при рассмотрении критерия надежности в качестве дополнительного условия (рисунок 1.8, а), должно дополняться определением качественных и количественных критериев надежности (шаг 2). Качественные и количественные критерии можно определить, исходя из возможных ситуаций и их последствий, и затем установить допустимое снижение требований и число отказов в СЭС.

Варианты, полученные в результате прогнозирования ситуаций (шаг 3), должны подвергаться анализу при всех возможных режимах в системе, вызванных как плановыми, так и предполагаемыми ситуациями [69, 94, 99].

При моделировании случайных ситуаций на станциях, в сетях и у потребителей можно выделить шаг 4, который характеризуется тем, что прогнозирование состояний системы может осуществляться или в виде варианта, полученного в качестве критического, или в виде варианта, полученного с помощью ал-

горитмов теории вероятности. Эти алгоритмы, как известно, дают общую картину всех состояний, т.е. всевозможные ситуации и их комбинации за рассматриваемый промежуток времени.



Рисунок 1.8 – Общая структура процесса проектирования:

а – надежность как дополнительное условие

Решениям, принятым на основе субъективной оценки, противопоставляется формально объективная математическая модель. Основу обоих вариантов составляют данные о виде, объеме, частоте, продолжительности, причинах и последствиях всех предполагаемых ситуаций.

Функциональный анализ (шаг 5) выявленных состояний системы, содержащий достоверные способы расчета, отражает рассматриваемые ситуации за данный отрезок времени. Таким образом, получают общую картину возможных режимов работы.

Исходя из этого можно вывести прогнозируемые параметры надежности, которые при проверке дополнительных условий (шаг 7) не только могут привести к положительному или отрицательному результату, но и определить степень выполнения заданного критерия надежности.

Различия в реализации дополнительных условий по шагам, а также в реализации качественной оценки надежности на практике незначительны. Упорядочение вариантов (шаг 8), включающее в себя дополнительные условия, в большинстве случаев не зависит от вида оценки надежности и определяется, в первую очередь, затратами на создание и эксплуатацию устройств. И только критерии надежности, полученные соответствующими методами, различаются как качественно, так и количественно. При этом соответствующие состояния определяются по детерминированным и прогнозируемым расчетным параметрам.

К принципиально отличающемуся от первого варианта решения (рисунок 1.8, б) приводит оптимизация затрат с непосредственным учетом надежности. Здесь вместо определения критериев надежности при тех же шагах планирования необходима оценка затрат на обеспечение надежности.

Двустороннее рассмотрение критериев надежности, а именно: расчет параметров надежности (шаг 5); оценка затрат на надежность (шаг 6) – определяют проблематику этого направления.

Моделирование затрат на сооружение, эксплуатацию и ликвидацию отказов элементов позволит выявить оптимальный вариант только при прогнозировании одинаковой надежности и одинаковом значении всех составляющих общей суммы затрат, а для удобства расчетов общая система должна по возможности разделяться на отдельные подсистемы: пространственные, функциональные и временные.



Рисунок 1.8 – Общая структура процесса проектирования:

б – надежность как цель оптимизации

## Выводы

1. Выявлены особенности оценки надежности и определены характеристики структуры и функционирования, которые рекомендуется учитывать при анализе надежности СЭС.

2. Исследованы критерии надежности функционирования СЭС и показано, что в современных системах контроль за уровнем надежности ( $n - 1$ ) может осуществляться только с помощью расчетной модели с использованием непосредственных данных в темпе процесса (в режиме «on line»).

3. Проанализированы основные причины недостаточно высокого уровня эксплуатационной надежности ряда энергетических объектов и СЭС и определены задачи обеспечения их надежности.

4. Определены основные направления повышения надежности СЭС.

5. Проведен анализ функциональной надежности СЭС, в результате которого показано, что целенаправленный отбор и количественная оценка вкладов в ненадежность СЭС отказов элементов системы, ее состояний и режимов, а также эффективности различных противоаварийных мероприятий позволяют выявить слабые звенья СЭС и наметить конкретные пути по ее совершенствованию в процессе человеко-машинного синтеза СЭС, а также выбрать рациональную стратегию эксплуатации.

6. Предложена классификация схем низковольтных цеховых сетей.

7. Предложена структура процесса проектирования СЭС с учетом фактора надежности, которая содержит два основных аспекта: надежность как дополнительное условие и надежность как цель оптимизации. При этом критерий надежности в качестве дополнительного условия должен дополняться определением качественных и количественных критериев надежности. К принципиально отличающемуся от первого способа решения приводит оптимизация затрат с непосредственным учетом надежности. Здесь вместо определения критериев надежности при тех же шагах планирования необходима оценка затрат на обеспечение надежности.

## 2 АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ

### 2.1 Классификация методов расчета надежности

Уточнение методов оценки и моделей надежности может существенно повысить эффективность проектирования и функционирования СЭС.

Для предупреждения аварий считается необходимым создание сложного комплекса взаимосвязанных программ, позволяющих проводить всесторонние исследования устойчивости и надежности функционирования энергообъединений и СЭС, что требует разработки и усовершенствования математических моделей и методов расчета параметров надежности.

Основное внимание в настоящее время сосредоточено на решении структурных задач, а методы, применяемые для расчета надежности функционирования энергообъектов и СЭС, можно разделить на две группы – аналитические и статистические [27, 35, 61, 62].

Из аналитических методов значительное распространение для расчета структурной надежности получили логико-вероятностные методы и методы, базирующиеся на теории марковских процессов. Простейшие логико-вероятностные методы весьма удобно применять при расчете последовательно-параллельных структур. Для анализа структурных схем, не являющихся последовательно-параллельными, используется подход, основанный на понятиях минимальных путей и минимальных сечений. Часто для получения множества минимальных путей и минимальных сечений используется метод деревьев отказов [6, 9, 61, 79].

В последнее время за рубежом для оценки структурной надежности (адекватности) были разработаны два вероятностных метода:

а) метод перебора состояний, который позволяет представить систему упрощенными математическими моделями, установленными на основе данных по

надежности ее элементов. Далее аналитически рассчитывают показатели ожидаемого риска, оцениваемого по комбинациям состояний моделей системы и приближенной модели нагрузки;

б) метод Монте-Карло, который позволяет моделировать различные отказы системы, воссоздавая для каждого из них все характеристики системы (нагрузку, метеоусловия, надежность элементов электроэнергетической системы) по случайной выборке, полученной из соответствующего вероятностного закона распределения.

Оба метода достаточно подробно описаны в литературе и нашли применение в США, Канаде, Франции, Италии, Англии, Бразилии. Метод Монте-Карло строится на двух версиях: по первой из них перебор событий осуществляется поочередно таким образом, чтобы все 8760 часов в году были бы оценены в хронологическом порядке [9, 58].

По второй версии поочередной перебор событий не делается, т.е. все 8760 событий рассматриваются как одно годовое и выбираются не в хронологическом порядке, а по случайному закону. Каждая версия разработана применительно к конкретной задаче.

Так, например, в решении используется первая версия, если в задаче события каждого текущего часа зависят от событий предыдущего [120, 121].

Оба метода – и перебор состояний, и Монте-Карло, – применяемые для оценки надежности больших систем, требуют мощных вычислительных средств, а метод перебора состояний, кроме того, связан с необходимостью учета вероятности, как самих событий, так и их классификации по тяжести. В методе Монте-Карло с этой целью применяют методы сокращения вариаций, когда события выбираются по степеням значимости и по типу, а также другие дополнительные методы, основанные на регрессионном анализе [54, 95].

Метод, базирующийся на теории однородного марковского процесса, моделирует функционирование энергообъекта как случайный процесс его перехода из одного состояния в другое, обусловленный отказами и восстановлениями работоспособности составляющих объект элементов.

Метод, обусловленный отказами и восстановлениями работоспособности, не накладывает ограничений на вид рассматриваемых схем, не требует независимости элементов по их надежности, а также позволяет получить однозначные показатели надежности. Наиболее эффективно использование этого метода для энергетических объектов, законы распределения времени работы и ремонта которых экспоненциальные, например, в системах релейной защиты и автоматики.



Рисунок 2.1 – Классификация методов анализа и моделирования надежности

Для определения надежности сложных энергетических объектов и СЭС нашел также применение метод статистических испытаний [97]. При применении метода статистических испытаний на ЭВМ (компьютере) моделируются процессы работы элементов объекта, а затем рассматриваются возможные состояния, в которых может оказаться рассматриваемый объект.

После проведения определенного количества испытаний делаются оценки требуемых показателей надежности объекта. Для этого метода отсутствуют ограничения на вид рассчитываемых схем, на законы распределения времени работы и ремонта элементов, на зависимость отказов элементов. Основным недостатком метода состоит в том, что его реализация связана с проведением большого количества испытаний и, как следствие этого, с большими затратами времени.

Недостаточно обеспечены методическими основами работы по решению задач расчета и исследования надежности функционирования цеховых сетей СЭС.

На рисунке 2.1 представлена классификация наиболее распространенных методов анализа и моделирования параметров надежности.

## 2.2 Общие сведения о видах законов распределения случайных величин

Необходимость повышения достоверности исходной информации – одна из постоянных задач, с которой приходится сталкиваться в практике исследований и обеспечения надежности в энергетике. Речь идет об информации, которая используется для решения задач исследования и обеспечения надежности СЭС. Это данные о показателях надежности оборудования; о показателях надежности снабжения объектов внешними ресурсами, обеспечивающими возможность ее функционирования; об удельных ущербах от снижения надежности электрообъектов; о фактически достигнутых значениях показателей надежности отпуска электроэнергии потребителям; о случаях и процессах, воздействующих на объекты [97,108].

На рисунке 2.2 показано соотношение способов достижения надежности и причин ухудшения технического состояния оборудования.

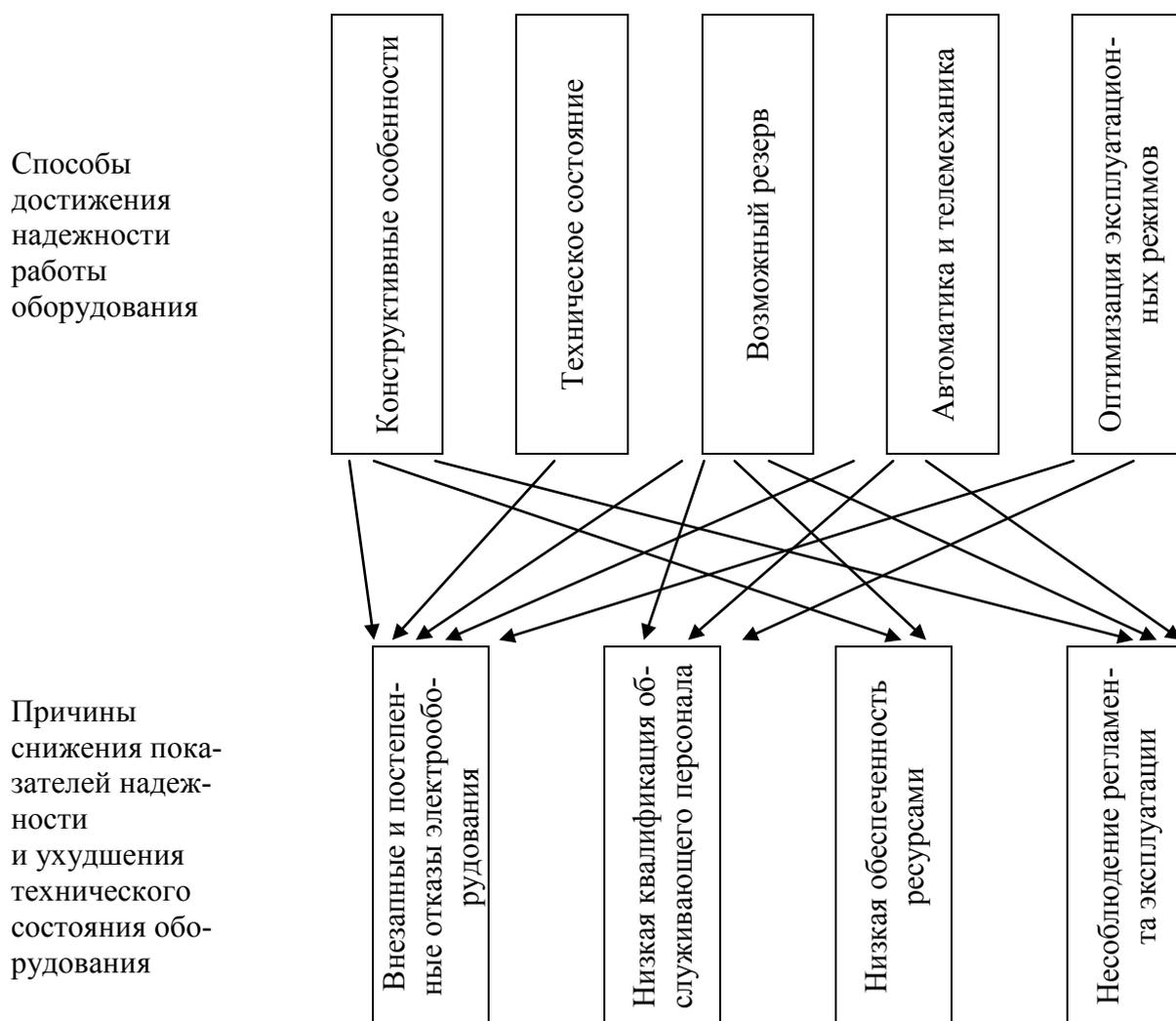


Рисунок 2.2 – Соотношение способов достижения надежности и причин ухудшения технического состояния оборудования

При исследовании характеристик надежности электрооборудования требуется выявить достоверный закон распределения вероятностных параметров.

На рисунке 2.3 приведены основные зависимости количественных характеристик надежности от времени [66].

Для нормального закона распределения случайной величины времени  $t$  до отказа изделия – функция распределения (вероятность того, что за время  $t$  возникает отказ) – определяется выражением [12, 62]

$$Q(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-(t-T)^2/2\sigma^2} dt. \quad (2.1)$$

Плотность вероятности отказа для  $t$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(t-T)^2/2\sigma^2}, \quad (2.2)$$

где  $\sigma$  и  $T$  – параметры закона распределения ( $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение времени  $t$  относительно  $T$ ;  $T$  – среднее значение  $t$ ).

Для удобства вычислений формула (2.1) приводится к виду

$$Q(t) = 0,5 + \Phi(u), \quad (2.3)$$

где  $\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-u^2/2} du$  – функция Лапласа (числовые значения  $\Phi(u)$  даны в [17],  $u = (t - T)/\sigma$  – нормированное отклонение  $t$  относительно  $T$ ).

Теоретическая функция вероятности безотказной работы определяется по выражению

$$P(t) = \frac{F\left(\frac{T_1 - t}{\sigma}\right)}{F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)}. \quad (2.4)$$

Частота отказов (плотность распределения)

$$a(t) = \frac{e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)}. \quad (2.5)$$

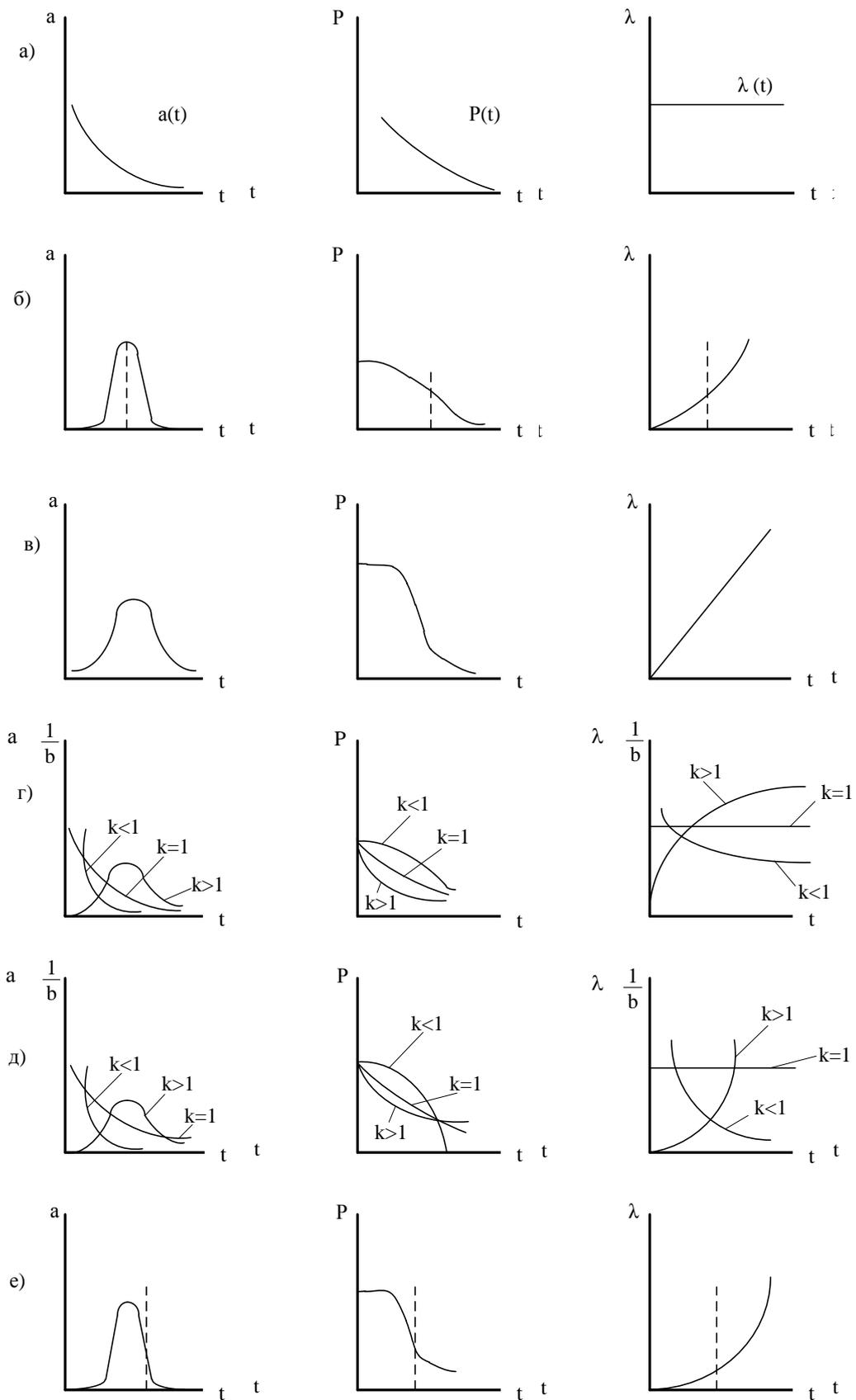


Рисунок 2.3 – Основные зависимости количественных характеристик надежности от времени: а – экспоненциальный закон; б – нормальный закон; в – закон Релея; г – гамма-распределение; д – закон Вейбула; е – логарифмически-нормальный закон

Интенсивность отказов (плотность распределения)

$$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma F\left(\frac{T_1-t}{\sigma}\right)}. \quad (2.6)$$

Средняя наработка до первого отказа

$$T_{\text{ср}} = T_1 + \frac{\frac{T_1^2}{\sigma e}}{\sqrt{2\pi} F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)}. \quad (2.7)$$

Нормальному закону распределения подчиняется время появления износовых отказов.

Биномиальный закон распределения, закон Пуассона, экспоненциальный и нормальный законы принадлежат к наиболее распространенным в прикладной теории надежности. Экспоненциальный закон и нормальный образуют своеобразные крайние положения: первый (экспоненциальный) имеет резко выраженный асимметричный характер  $f(t)$  и постоянное значение  $\lambda$ ; второй (нормальный) – строго симметричный характер  $f(t)$  и монотонное возрастание  $\lambda(t)$ . Инженерная практика встречается со значительно большим числом случаев, чем перечисленные два крайних случая [17].

Как правило, по результатам испытаний электрооборудования анализируются причины снижения надежности, основными из которых являются несоблюдение регламента эксплуатационных режимов, несвоевременным вводом в работу нового электрооборудования, завышением реального потребления продукции функционирующей электросистемой по сравнению с расчетными данными. Динамика снижения надежности может быть скорректирована выбором рациональных конструктивных схем; модернизацией электрооборудования, а

также управляющих схем; включением резервирующих элементов; автоматизацией регулирования работы электрооборудования; оптимизацией эксплуатационных режимов.

### 2.3 Статистическая информация об отказах электрооборудования низковольтных цеховых сетей и выявление законов распределения их вероятностных характеристик

В качестве исходной информации об отказах низковольтного электрооборудования представлены статистические данные, полученные на ПАО «Казань-оргсинтез» по результатам эксплуатационных наблюдений в течение ряда лет (таблица 2.1).

Таблица 2.1

Статистические данные об отказах низковольтного оборудования

Наименование электрооборудования	Количество элементов n, шт.	Время наблюдения T, год	Среднее время наработки на отказ $T_{ср}$ , год	Среднеквадратическое отклонение времени наработки на отказ $\sigma$ , год
Автоматический выключатель ВА-51	283	15	13	2,5
Магнитный пускатель ПМЕ-211	178	8	6	1,7
Контактор КТ	180	8	6	1,7
Предохранитель ПН2-100	281	16	15	2,6
Пакетный выключатель ПВ-3	206	23	20	2,9
Рубильник Р	163	23	20	2,9
Кабельная линия АВВГ-0,4 кВ (на 100 м)	72	35	30	3,4
Кабельная линия ВВГ-0,4 кВ (на 100 м)	70	35	33	3,5

В качестве допущений в результате проведенных исследований приняты сходные режимы коммутаций (АС3, АС4) низковольтного оборудования.

Исследуем вид законов распределения вероятностных характеристик низковольтного оборудования [5, 86, 87, 90, 91].

Автоматические выключатели. Предположим, что распределение времени наработки на отказ автоматических выключателей серии ВА-51 подчиняется нормальному закону распределения; проверим эту гипотезу.

По эксплуатационной информации средняя наработка времени на отказ  $T_{cp}$  равна

$$\bar{T}_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{n_0}, \quad (2.8)$$

где  $t_i$  – время работы оборудования между ( $i - 1$ -ым) и  $i$ -м отказами,  $n_0$  – число отказов.

Известно, что время средней наработки системы на отказ определяется временами отказа каждого элемента. В данном случае справедливо выражение

$$\bar{T}_{cp} \approx \frac{\sum_{i=1}^m n_i t_{cpi}}{n_0}, \quad (2.9)$$

В выражении (2.9)  $t_{cp}$  и  $m$  находятся по следующим формулам

$$t_{cp} = \frac{t_{i-1} + t_i}{2}, \quad m = \frac{t_k}{\Delta t}, \quad (2.10)$$

где используются временные отрезки рассматриваемого интервала:  $t_{i-1}$ ,  $t_i$  – времена начала и конца  $i$ -го интервала;  $t_k$  – время отказа всех элементов;  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$  – исследуемый временной интервал.

По статистическим данным таблицы 2.2 по формуле (2.9) среднее время безотказной работы автоматического выключателя серии ВА-51  $\bar{T}_{cp} = 13$  лет.

Таблица 2.2

Результаты расчета значений статистической функции распределения вероятности времени безотказной работы (отказов) автоматического выключателя ВА-51

Год наблюдения, t	Количество элементов			Эмпирическая функция распределения вероятности	
	отказавших за год, n	сумма отказавших, n(t)	исправных, I	безотказной работы, $P^*(t) = (N_0 - n(t))/N_0$	отказа, $Q^*(t) = 1 - P^*(t)$
1	0	0	283	1,000	0,000
2	0	0	283	1,000	0,000
3	0	0	283	1,000	0,000
4	1	1	282	0,996	0,004
5	1	2	282	0,993	0,007
6	0	2	282	0,993	0,007
7	1	3	281	0,989	0,011
8	3	6	278	0,979	0,021
9	5	11	273	0,961	0,039
10	14	25	259	0,912	0,088
11	23	48	236	0,830	0,170
12	40	88	196	0,689	0,311
13	49	137	147	0,516	0,484
14	42	179	105	0,367	0,633
15	38	217	67	0,233	0,767

Среднеквадратическое отклонение времени безотказной работы по статистическим данным определяется по выражению

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \sqrt{(t_i - T_{cp})^2} / t. \quad (2.11)$$

Исключив первые пять лет наблюдений, по (2.11) имеем

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \sqrt{(t_i - T_{cp})^2} / t = 2,5.$$

По уравнению (2.4) определим значение теоретической функции вероятности времени безотказной работы

$$P(t) = \frac{F\left(\frac{T_{cp} - t}{\sigma}\right)}{F\left(\frac{T_{cp}}{\sigma}\right)} = \frac{F\left(\frac{13 - t}{2,5}\right)}{F\left(\frac{13}{2,5}\right)} = \frac{F\left(\frac{13 - t}{2,5}\right)}{F(5,2)}.$$

Вычислим

$$P(t = 1 \text{ год}) = \frac{F\left(\frac{13 - 1}{2,5}\right)}{F(5,2)} = \frac{F(4,8)}{F(5,2)} = \frac{1,000}{1,000} = 1,000$$

$$P(t = 2 \text{ год}) = \frac{F\left(\frac{13 - 2}{2,5}\right)}{F(5,2)} = \frac{F(4,4)}{F(5,2)} = \frac{1,000}{1,000} = 1,000$$

.....

$$P(t = 14 \text{ год}) = \frac{F\left(\frac{13 - 14}{2,5}\right)}{F(5,2)} = \frac{F(-0,4)}{F(5,2)} = \frac{0,344}{1,000} = 0,344$$

$$P(t = 15 \text{ год}) = \frac{F\left(\frac{13-15}{2,5}\right)}{F(5,2)} = \frac{F(-0,8)}{F(5,2)} = \frac{0,212}{1,000} = 0,212$$

Результаты вычислений представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Значение функции распределения вероятности времени безотказной работы и отказов автоматического выключателя ВА-51

Год наблюдения	$(T_{cp} - t)/\sigma$	$F((T_{cp} - t)/\sigma)$	$T_{cp}/\sigma$	$F(T_{cp}/\sigma)$	Теоретическая функция распределения вероятности	
					безотказной работы, $P(t) = F((T_{cp} - t)/\sigma) / F(T_{cp}/\sigma)$	отказа, $Q(t) = 1 - P(t)$
1	4,8	1,000	5,200	1,000	1,000	0,000
2	4,4	1,000	5,200	1,000	1,000	0,000
3	4,0	1,000	5,200	1,000	1,000	0,000
4	3,6	0,999	5,200	1,000	0,999	0,001
5	3,2	0,999	5,200	1,000	0,999	0,001
6	2,8	0,997	5,200	1,000	0,997	0,003
7	2,4	0,992	5,200	1,000	0,992	0,008
8	2,0	0,977	5,200	1,000	0,977	0,023
9	1,6	0,945	5,200	1,000	0,945	0,055
10	1,2	0,885	5,200	1,000	0,885	0,115
11	0,8	0,788	5,200	1,000	0,788	0,212
12	0,4	0,655	5,200	1,000	0,655	0,345
13	0,0	0,500	5,200	1,000	0,500	0,500
14	-0,4	0,344	5,200	1,000	0,344	0,656
15	-0,8	0,212	5,200	1,000	0,212	0,788

Определим минимальный объем выработки аппаратов для исследования закона распределения вероятности времени безотказной работы на примере автоматического выключателя ВА-51. минимальный объем выборки, достаточный для определения математического ожидания  $m_x$  вероятности времени безотказной работы с заданной точностью  $\Delta$ , %, и достоверностью  $f$ , определяется по выражению

$$V = \left( \frac{\tau \gamma_x \cdot 100}{\Delta} \right)^2,$$

где  $\tau$  – параметр, зависящий от желаемого значения  $f$  (при  $f = 0,95$ ,  $\tau = 2$ );  $\gamma_x$  – коэффициент вариации величины  $x$ , определяемый по выражению

$$\gamma_x = \frac{\sigma_x}{m_x},$$

$\sigma_x$  – среднеквадратическое отклонение величины  $x$ .

Проверим достоверность результатов исследования вероятности времени безотказной работы по минимальному объему выборки, чтобы с вероятностью 0,95 погрешность не превышала 5 %.

В этом случае математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение вероятности времени безотказной работы будут принимать значения (таблица 2.2)  $M(\Delta P) = 0,831$ ;  $\sigma(\Delta P) = 0,13$  откуда  $\gamma(\Delta P) = 0,16$ .

Определим объем выборки необходимый для обеспечения погрешности 5 %

$$V = \left( \frac{2 \cdot 0,16 \cdot 100}{5} \right)^2 = 41.$$

Следовательно, минимальный объем выборки, необходимый для показателей достоверности  $f = 0,95$  составляет 41 автоматический выключатель, исследованное же количество единиц оборудования составило 283.

Проверка гипотез. Проверка гипотез о законе распределения случайных величин производится методами математической статистики с помощью, так называемых, критериев согласия [17].

Сходимость опытного распределения с теоретическими осуществляется с помощью критериев Колмогорова,  $\chi^2$  и  $\omega^2$  (рисунок 2.4).

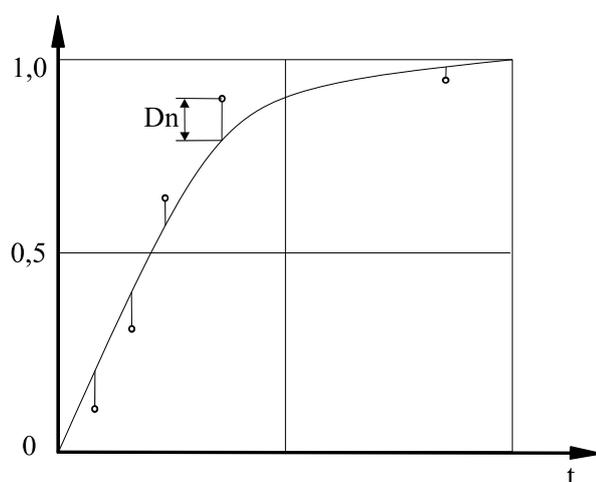


Рисунок 2.4 – Проверка согласия опытного и теоретического распределения вероятностей

Погрешность измерения случайной величины не должна превышать 10 % предполагаемого среднеквадратического отклонения.

При использовании критерия Колмогорова важно располагать данными теоретических и экспериментальных функций для определенного  $n$ . Определяется максимальное расхождение между теоретическими и экспериментальными величинами

$$D_n = \max |\bar{F}(t) - F(t)|, \quad (2.12)$$

где  $\bar{F}(t)$  и  $F(t)$  – экспериментальная и теоретическая величина интегральной функции распределения.

Получив в результате сравнения функций  $\bar{F}(t)$  и  $F(t)$  значение  $D_n$  и вычислив

$$y_n = D_n \sqrt{n} \quad (2.13)$$

по табличным данным оценивается вероятность вычисления подобной величины  $y$ .

Таблица 2.4

Значения функции  $p(y)$

$y$	$P(y)$	$y$	$P(y)$	$y$	$P(y)$
0,0	1,000	0,7	0,711	1,4	0,040
0,1	1,000	0,8	0,544	1,5	0,022
0,2	1,000	0,9	0,398	1,6	0,012
0,3	1,000	1,0	0,270	1,7	0,006
0,4	0,997	1,1	0,178	1,8	0,003
0,5	0,964	1,2	0,112	1,9	0,002
0,6	0,864	1,3	0,068	2,0	0,001

Критерием  $\chi^2$  пользуются при большом объеме наблюдений и, в силу его универсальности, – при проверке многопараметрических распределений.

Критерий  $\omega^2$ , при котором расхождение между эмпирической и статистической функциями распределения измеряется максимумом абсолютного значения разности этих функций, а сам критерий вычисляется как сумма взвешенных квадратов разностей, используется при малом числе наблюдений в области верхних и нижних значений случайной величины.

Проверим гипотезу о нормальном законе распределения времени наработки на отказ автоматического выключателя серии ВА-51.

По (2.12) определим максимальное расхождение между теоретическими и опытными данными (таблица 2.3)

$$D_n = \max|Q^*(1 \text{ год}) - Q(1 \text{ год})| = \max|0,000 - 0,000| = 0,000$$

$$D_n = \max|Q^*(2 \text{ год}) - Q(2 \text{ год})| = \max|0,000 - 0,000| = 0,000$$

.....

$$D_n = \max|Q^*(14 \text{ год}) - Q(14 \text{ год})| = \max|0,633 - 0,656| = 0,023$$

$$D_n = \max|Q^*(15 \text{ год}) - Q(15 \text{ год})| = \max|0,767 - 0,788| = 0,021$$

По уравнению (2.13) определим значение случайной величины  $y_n$ :

$$y_n = D_n \sqrt{n} = 0,000 \sqrt{217} = 0,000$$

.....

$$y_n = D_n \sqrt{n} = 0,023 \sqrt{217} = 0,346$$

$$y_n = D_n \sqrt{n} = 0,021 \sqrt{217} = 0,313$$

По найденным значениям случайной величины  $y_n$  определим значение функции  $p(y)$ , используя линейную интерполяцию. Результаты вычислений представим в таблице 2.5.

Результаты расчета (таблица 2.5) показывают, что величина вероятности 0,827 значительная, что подтверждает случайность отклонения, а предположе-

ние о нормальном законе распределения – истинным. На рисунке 2.5 графически приведены полученные результаты вычислений.

Таблица 2.5

Результаты проверки гипотезы по критерию Колмогорова  
для автоматического выключателя серии ВА-51

Год наблюдения, t	Теоретическая вероятность отказа, $Q(t)$	Статистическая вероятность отказа, $Q^*(t)$	Расхождение $D_n =  Q^*(t) - Q(t) $	Случайная величина $Y_n = D_n \sqrt{n}$	Значение функции $p(y_n)$
1	0,000	0,000	0,000	0,000	
2	0,000	0,000	0,000	0,000	
3	0,000	0,000	0,000	0,001	
4	0,001	0,004	0,003	0,037	
5	0,001	0,007	0,006	0,089	
6	0,003	0,007	0,004	0,060	
7	0,008	0,011	0,003	0,038	
8	0,023	0,021	0,002	0,026	
9	0,055	0,039	0,016	0,238	
10	0,115	0,088	0,027	0,393	
11	0,212	0,170	0,042	0,624	0,827
12	0,345	0,311	0,034	0,502	
13	0,500	0,484	0,016	0,234	
14	0,656	0,633	0,023	0,346	
15	0,788	0,767	0,021	0,313	

Таким образом, вероятность  $P(t)$  автоматического выключателя  $\geq 0,85$  сохраняется в течение 11 лет, при режиме коммутаций АС-3, что соответствует паспортным данным, с 11 до 13 года  $P(t)$  снижается с 0,85 до 0,5 и через 15 лет эксплуатации составляет 0,2.

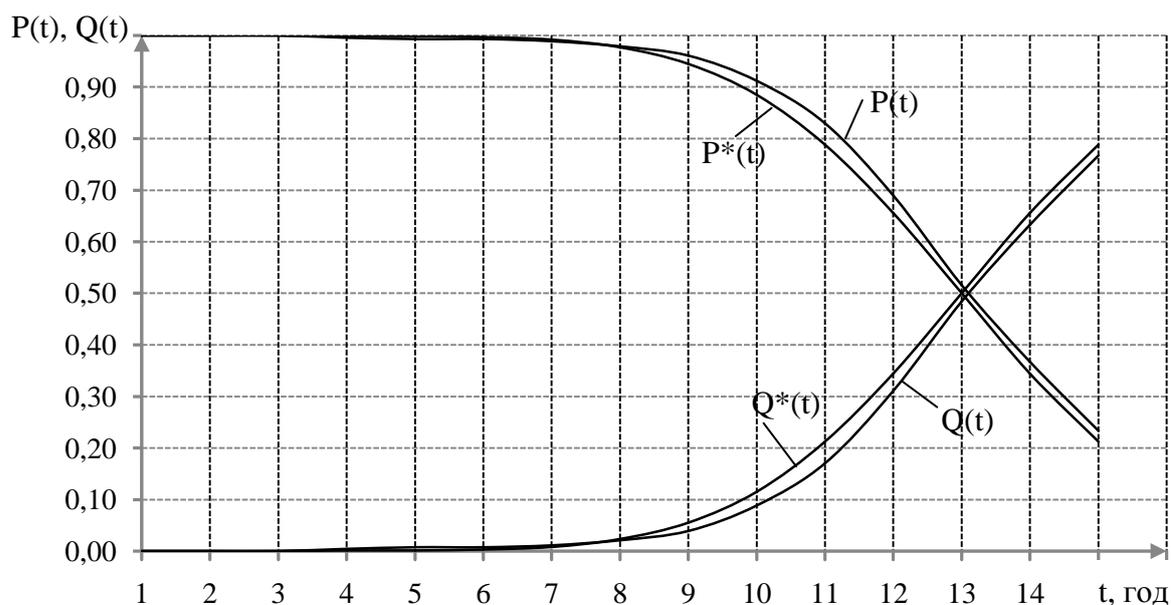


Рисунок 2.5 – Теоретическая  $P(t)$ ,  $Q(t)$  и статистическая  $P^*(t)$ ,  $Q^*(t)$  вероятности времени безотказной работы (отказа) автоматического выключателя серии ВА-51

В приложении А приведены результаты расчетов по определению вероятностных характеристик низковольтного электрооборудования согласно приведенному алгоритму для автоматического выключателя серии ВА-51.

#### 2.4 Расчет доверительных интервалов параметров потока отказов и определение интенсивности отказов электрооборудования

Если для  $n$  единиц оборудования за исследуемый отрезок времени  $T$  произошло  $m$  отказов, параметр потока отказов  $\omega$  вычисляется [53]

$$\omega = \frac{m}{nT}. \quad (2.14)$$

Проведем оценку достоверности вычисленного параметра потока отказов, т.е. найдем доверительные интервалы действительного значения параметра потока отказов.

Для доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$

– автоматический выключатель ВА-51

$$\omega = \frac{217}{283 \cdot 15} = 0,051$$

$$\text{нижняя граница доверительного интервала} - \omega_{\text{H}} = \frac{\omega}{r_1} = \frac{0,051}{1,12} = 0,046;$$

$$\text{верхняя граница доверительного интервала} - \omega_{\text{B}} = \frac{\omega}{r_2} = \frac{0,051}{0,89} = 0,057,$$

где  $r_1$  и  $r_2$  коэффициенты для соответствующей доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$ . (В случае необходимости используем интерполяцию).

$$\omega_{\text{H}} = 0,046 \quad - 9,8 \%, \quad \omega_{\text{B}} = 0,056 \quad + 9,8 \%.$$

Результаты расчетов для доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  и  $\alpha = 0,9$  для различных видов низковольтных коммутационных аппаратов и кабельных линий представлены в таблице 2.6.

Для нормального закона распределения временного параметра до отказа интенсивность отказов вычисляется по выражению [66]

$$\lambda = \frac{e^{-\frac{(t-T_{\text{cp}})^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma F\left(\frac{T_{\text{cp}} - t}{\sigma}\right)}, \quad (2.15)$$

Таблица 2.6

## Значения параметров надежности электрооборудования

Наименование электрооборудования	Количество элементов n, шт.	Время наблюдения T, год	Средняя наработка на отказ T <sub>ср</sub> , год	Среднеквадратическое отклонение наработки на отказ σ, год	Средний параметр потока отказов ω, 1/год	Границы доверительного интервала ω <sub>н</sub> /ω <sub>в</sub> , %	
						Доверительная вероятность	α = 0,95
Автоматический выключатель ВА-51	283	15	13	2,5	0,051	-9,8	-9,8
						+9,8	+9,8
Магнитный пускатель ПМЕ-211	178	8	6	1,7	0,098	-9,6	-11,5
						+10,6	+12,5
Контактор КТ	180	8	6	1,7	0,095	-10,2	-11,2
						+10,4	+11,4
Предохранитель ПН2-100	281	16	15	2,6	0,042	-9,5	-10,6
						+9,5	+10,8
Пакетный выключатель ПВ-3	206	23	20	2,9	0,027	-10,1	-11,4
						+10,4	+12,6
Рубильник Р	163	23	20	2,9	0,038	-10,5	-11,1
						+10,5	+11,7
Кабельная линия АВВГ-0,4 кВ (на 100 м)	72	35	30	3,4	0,026	-10,1	-11,5
						+10,3	+11,8
Кабельная линия ВВГ-0,4 кВ (на 100 м)	70	35	33	3,5	0,018	-10,5	-11,9
						+10,7	+12,1

Изменение интенсивности отказов  
автоматического выключателя ВА-51 во времени

Год наблюдения t, год	Значение (T <sub>ср</sub> - t)/σ	Значение функции F((T <sub>ср</sub> - t)/σ)	Интенсивность отказов, 1/год	Год наблюдения t, год	Значение (T <sub>ср</sub> - t)/σ	Значение функции F((T <sub>ср</sub> - t)/σ)	Интенсивность отказов, 1/год
1	4,8	1,000	$1,61 \cdot 10^{-6}$	9	1,6	0,945	$4,70 \cdot 10^{-2}$
2	4,4	1,000	$1,00 \cdot 10^{-5}$	10	1,2	0,885	$8,77 \cdot 10^{-2}$
3	4,0	1,000	$5,35 \cdot 10^{-5}$	11	0,8	0,788	0,147
4	3,6	0,999	$2,45 \cdot 10^{-4}$	12	0,4	0,655	0,225
5	3,2	0,999	$9,55 \cdot 10^{-4}$	13	0,0	0,500	0,319
6	2,8	0,997	$3,18 \cdot 10^{-3}$	14	-0,4	0,344	0,428
7	2,4	0,992	$9,03 \cdot 10^{-3}$	15	-0,8	0,212	0,547
8	2,0	0,977	$2,21 \cdot 10^{-2}$	16	-1,2	0,115	0,675

Вычислим значения интенсивности отказов для исследуемого электрооборудования.

Автоматический выключатель серии ВА-51:

$$\lambda(t=1 \text{ год}) = \frac{e^{-\frac{(1-13)^2}{2 \cdot 2,5^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot 2,5 \cdot F\left(\frac{13-1}{2,5}\right)} = \frac{e^{11,52}}{6,27 \cdot F(4,8)} = 1,58 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{год}};$$

.....

$$\lambda(t = 13 \text{ год}) = \frac{e^{-\frac{(13-13)^2}{2 \cdot 2,5^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot 2,5 \cdot F\left(\frac{13-13}{2,5}\right)} = \frac{e^0}{6,27 \cdot F(0)} = 0,319 \frac{1}{\text{год}}.$$

Результаты расчетов представлены в таблице 2.7. График изменения интенсивности отказов во времени показан на рисунке 2.6.

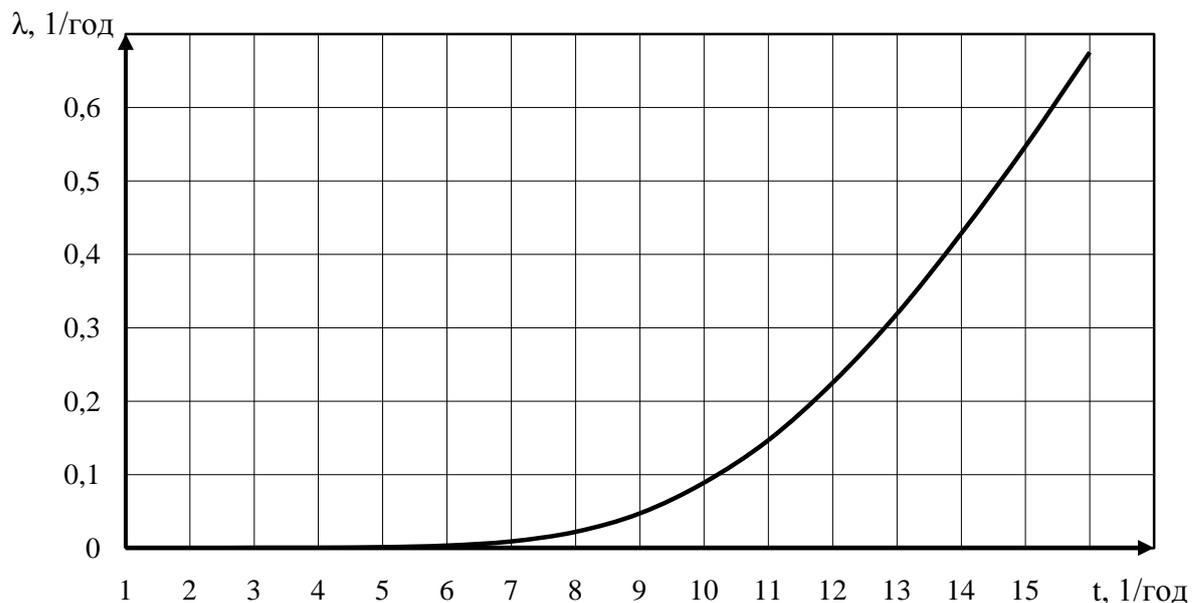


Рисунок 2.6 – График изменения интенсивности отказов автоматического выключателя ВА-51 во времени

Результаты аналогичных расчетов по другим видам низковольтного электрооборудования представлены в Приложении Б в таблицах Б1-Б6, зависимости интенсивностей отказов представлены на рисунках Б1-Б6.

## 2.5 Характеристика работоспособности контактных систем низковольтных аппаратов

Работоспособность контактно-дугогасительных систем коммутационных аппаратов низкого напряжения может оцениваться с учетом следующих факторов [5]:

– переходного сопротивления контактов  $R_K$  и падения напряжения  $u_K$  при протекании длительных токов;

– показателей вибрации контактов: максимальной амплитуды вибрации  $X_{\max}$  и времени вибрации  $t_B$ ;

– времени гашения дуги  $t_d$  и энергии дуги  $W_d$  за один цикл коммутации;

– показателей сваривания контактов: тока сваривания  $I_{св}$  и силы сваривания  $P_{св}$ ;

– восстанавливающейся электрической прочности межконтактного промежутка  $u_{вп}(t)$ , которая совместно с восстанавливающимся напряжением определяет условия гашения дуги;

– градиента напряжения дуги  $E_d$ , который определяет электрическое сопротивление столба дуги

$$R_d = E_d l_d / I_d, \quad (2.16)$$

где  $l_d$  – длина дуги;  $I_d$  – ток дуги;

– коммутационной износостойкости контактов  $N_K$ , определяемой удельной (на одну коммутацию) массой износа  $m_{и}$  и предназначенной на износ массой контакта  $M$ :

$$N_K = M / m_{и}; \quad (2.17)$$

– коммутационной способности (отключать заданные токи  $I_0$  при минимальном времени гашения дуги в заданных условиях отключаемой цепи, определяемых возвращающимся напряжением и собственной частотой цепи  $f_0$ ).

Все перечисленные факторы функционально взаимосвязаны с тепловыми, электрическими и физико-техническими параметрами контактных материалов, контактных и дугогасительных систем. Анализ функциональных взаимосвязей указанных факторов и параметров, их систематизация дают возможность обосновать правомерность принятия основных критериев, определяющих показатели работоспособности контактных систем коммутационных аппаратов низкого напряжения [5, 33].

Для проведения теоретического анализа могут быть использованы функциональные зависимости для указанных параметров. Переходное сопротивление контактов [105]:

$$R_k = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi \sigma_{см}}{P_k}}, \quad (2.18)$$

откуда падение напряжения  $u_k$  при протекании тока  $i$ :

$$u_k = R_k i = \frac{\rho i}{2} \sqrt{\frac{\pi \sigma_{см}}{P_k}}, \quad (2.19)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление контактного материала;  $\sigma_{см}$  – удельное сопротивление смятию;  $P_k$  – сила контактного нажатия;  $i$  – ток через контакты.

Взаимосвязь  $u_k$  с температурой нагрева контактного пятна  $T_{кп}$  обусловлена уравнением [105]:

$$u_k = \sqrt{8\kappa(T_{кп} - T_k)}, \quad (2.20)$$

где  $\kappa$  – коэффициент теплопроводности;  $T_k$  – температура контактной детали.

Удельная (на одну операцию) масса износа контактов [105]:

$$m_{и} = k_{в} \frac{I_0}{j_{оэ}} \sqrt{\frac{\gamma \kappa t_{д}}{c}} \left\{ x_1 + x_2 \frac{U_{оэ} j_{оэ}}{T_{пл}} \sqrt{\frac{t_{д}}{\gamma \kappa}} \right\} \left( 1 - x_3 \frac{T_{пл}}{U_{оэ} j_{оэ}} \sqrt{\frac{\gamma \kappa}{t_{д}}} \right), \quad (2.21)$$

где  $k_{в}$  – коэффициент выброса расплавленного материала контактов;  $U_{оэ}$  и  $j_{оэ}$  – околоэлектродные падения напряжения и плотность тока;  $\gamma$  – плотность материала контактов;  $t_{д}$  – время гашения дуги на первом рвущем полюсе аппарата;  $T_{пл}$  – температура плавления контактов;  $c$  – удельная теплоемкость материала контактов;  $x_1, x_2, x_3$  – числовые коэффициенты подобных членов.

Исследование надежности силовых цепей аппаратов. Коммутирующие контакты являются одними из самых распространенных элементов электрических сетей. Считается, что они являются наиболее ненадежными элементами [5], определяющими в значительной мере ненадежность сетей. Это справедливо, если режимы и условия работы контакта выбраны неправильно.

При правильном выборе режимов и условий работы контактов надежность их работы примерно одного порядка с надежностью работы других элементов электрических сетей.

Рассматривая надежность работы коммутирующих контактов, следует иметь в виду, что она зависит от режимов работы цепей контактов и параметров, характеризующих рабочее состояние нагрузки [5].

Надежность работы контакта должна оцениваться по надежности выполнения им своих функций в течение всех четырех его этапов работы: разомкнутого, замкнутого, замыкания и размыкания [5].

Надежность разомкнутого состояния цепи. В качестве характеристик нагрузки ( $R_H$ ) выбраны средние значения токов срабатывания  $\bar{I}_{ср}$  и токов отпущения  $\bar{I}_{отп}$  и их средние квадратичные значения  $\Delta$  и  $\Delta'$ . Коэффициенты изменчивости для токов срабатывания и отпущения, т.е. отношения  $\Delta/\bar{I}_{ср}$  и  $\Delta'/\bar{I}_{отп}$ , для каждого типа аппарата представляют постоянную величину [105].

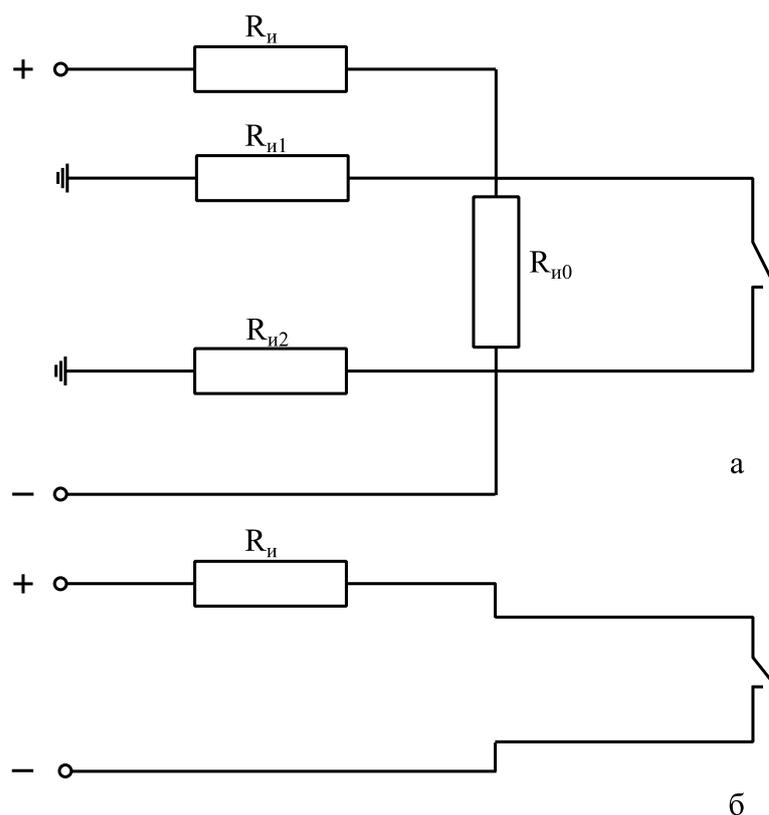


Рисунок 2.7 – Схема цепи с контактом: а – в разомкнутом состоянии, б – в замкнутом состоянии

Параллельно разомкнутому контакту, на напряжение  $E$ , включены сопротивления изоляции, т.е. сопротивления токов утечки между контактами  $R_{и0}$  и сопротивления изоляции между каждым из контактов и землей  $R_{и1}$  и  $R_{и2}$ . Обычно  $R_{и1} \approx R_{и2} \approx R_{и}$ . Таким образом, при разомкнутых контактах в цепи протекает ток

$$I'_x = \frac{E}{R_{и} + \frac{R_{и0} \cdot 2R_{и}}{R_{и0} + R_{и}}} . \quad (2.22)$$

Значение тока  $I'_x$ , называемое током покоя [5], должно быть значительно меньше значения тока отпускания, для того чтобы нагрузка была приведена во внерабочее состояние.

Вероятность отказа в отпускании  $q_1$  определяется согласно нормальному закону распределения [5]:

$$q_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta'}} \int_{-\infty}^{I'_x} e^{-\frac{(I'_x - \bar{I}_{отп})^2}{2\Delta'^2}} dI_x . \quad (2.23)$$

Следовательно, надежность перехода нагрузки во внерабочее состояние при разомкнутых контактах будет [5]:

$$p_1 = 1 - q_1 = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta'}} \int_{-\infty}^{I'_x} e^{-\frac{(I'_x - \bar{I}_{отп})^2}{2\Delta'^2}} dI_x . \quad (2.24)$$

Надежность замыкания контактов. Если вероятность незамыкания элементарного контакта на поверхности двух соприкасающихся контактных тел равна  $q_0$ , то вероятность незамыкания их определяться как [5, 105]

$$q_2 = q_0^m , \quad (2.25)$$

где  $m$  – число элементарных контактов на площади соприкосновения контактных тел  $S$ .

Так как  $M = sm$  и  $m = kp$ , где  $M$  – количество элементарных контактов;  $k$  – коэффициент, зависящий от состояния поверхности и материала контакта;  $p$  – среднее значение удельного контактного давления, то (2.25) записывается [5]

$$q_2 = q_0^M = q_0^{sm} = q_0^{skp} = q_0^{kP_k}, \quad (2.26)$$

где  $P_k$  – контактное усилие.

Вероятность замыкания на контактах равна [5]:

$$p_2 = 1 - q_2 = 1 - q_0^{kP_k} = 1 - e^{-\ln q_0 k P_k}. \quad (2.27)$$

Надежность размыкания контактов. Надежность размыкания контактов определяется отсутствием прочного сваривания их. Для того чтобы разомкнуть контакты при наступлении их сваривания, необходимо наличие определенного размыкающего усилия  $P_{св}$ . Между величиной этого усилия и током  $I_{св}$ , проходящим через контакты при их сваривании, существует зависимость, эмпирическое выражение которой имеет вид [105]

$$P_{св} = c_{k0} I_{св}^2, \quad (2.28)$$

где  $c_{k0}$  – коэффициент, зависящий от материала контактов.

Эти же соотношения могут быть получены из рассмотрения приближенной модели процесса сваривания. Считая, что за начальный промежуток времени  $\Delta t$ , прошедший после начала соприкосновения, выделяется тепло, которое вызывает плавление металла в месте соприкосновения контактов [105]

$$cV_0(\theta_{пл}^0 - \theta_0^0) + LV = I^2 R_k \Delta t, \quad (2.29)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость;  $L$  – скрытая теплота плавления;  $V_0$  – объем расплавленного металла;  $\theta_{\text{пл}}^0$  и  $\theta_0^0$  – температуры плавления и контакта до соприкосновения;  $V$  – объем расплавленной части контакта;  $R_k$  – сопротивление контакта:

$$R_k = \frac{\rho}{2r}, \quad (2.30)$$

где  $r$  – радиус площади соприкосновения.

Надежность замкнутого состояния цепи. Для того чтобы было надежно осуществлено замкнутое состояние цепи нагрузки, необходимо иметь ток в цепи [5]

$$I_x \gg I_{\text{сраб}}, \quad (2.31)$$

где  $I_{\text{сраб}}$  – ток срабатывания нагрузки, А;

$$I_x = \frac{E}{R_{\text{и}} + R_k}, \quad (2.32)$$

Надежность контакта при замкнутом состоянии цепи определяется как [105]

$$p_4 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta} \int_{-\infty}^{I_x} e^{-\frac{(I_x - \bar{I}_{\text{ср}})^2}{2\Delta^2}} dI_x. \quad (2.33)$$

Выбор условий работы, обеспечивающих высокую коммутационную износостойкость контактов, является одним из определяющих факторов, характе-

ризирующих возможность повышения надежности и долговечности электрических аппаратов. Существует связь между величинами токов эквивалентного, соответствующего длительному режиму работы аппарата, и током отключения при работе аппарата в заданном повторно-кратковременном режиме. В основе такого сопоставления лежит равенство энергий, выделяющихся в контактах в указанных режимах [105].

Исследования по определению эффективности функционирования контактных систем контакторов относятся к воздушным контакторам с контактами из кадмиевой меди, конструкция которых предусматривает пережат и проскальзывание, а также магнитное гашение. Износ контактов в контакторах в основном обусловлен тем, что при размыкании контактов между ними образуется мостик жидкого металла, который под действием электродинамических сил, создаваемых дугогасительным устройством, перемещается по поверхности контактов и разрывается, образуя электрическую дугу. Под воздействием дуги и дугогасительного устройства материал контактов частично выдувается, частично сгорает и частично переносится с одного контакта на другой. Таким образом, в каждой коммутационной операции происходит убыль материала контактов, являющаяся мерой их износа.

Изнашиваются контакты в основном из-за выгорания и разбрызгивания материала при гашении электрической дуги, механические факторы играют второстепенную роль. Повторное включение допустимо после остывания контактов. Интенсивность исчезновения контактного материала зависит от силы отключаемого тока, применяемого материала, способа гашения дуги [105]. При включении, некоторое время контакты вибрируют, что тоже может привести к износу. Наиболее тяжёлые условия у тех контактов, которые свариваются во время протекания аварийных токов. Наблюдается самопроизвольное размыкание контактов под воздействием электродинамических сил, при этом возникает мощная электрическая дуга. Близкие условия у контакторов, запускающих мощные электрические двигатели, пусковые токи могут отличаться от номинальных на порядок.

Важными факторами, за которыми нужно следить во время эксплуатации являются: начальное и конечное контактное нажатие; провал контактов (расстояние между точкой сцепления и положением, которое занимает подвижный контакт при отсутствии неподвижного); состояние контактных поверхностей; наличие проскальзывания или переката, если они гарантируются кинематической схемой.

Критерием оценки технического состояния контактов может служить уменьшение их массы или провала [5]. С точки зрения обеспечения надежности, долговечности и правильного функционирования контакторов интерес представляет не убыль массы материала контактов, а уменьшение провала или зазора, контролирующего его. Этим объясняется ограничение ГОСТ 11206-77 допустимого уменьшения провала контактов, а не массы.

## Выводы

1. На основании обзора литературных источников предложена классификация методов анализа и моделирования параметров надежности систем электроснабжения.

2. Проанализированы факторы, определяющие характеристики работоспособности низковольтных аппаратов.

3. Для повышения достоверности исходной информации при оценке надежности цеховых сетей проведены исследования и обработка статистических эксплуатационных данных за продолжительные сроки наблюдений об отказах низковольтного электрооборудования систем промышленного электроснабжения на предприятиях ПАО «Казаньоргсинтез» и ОАО «Казанский медико-инструментальный завод» автоматических выключателей, магнитных пускателей, контакторов, предохранителей, пакетных выключателей, рубильников, кабельных линий с алюминиевыми и медными жилами.

4. По результатам проведенных исследований доказана гипотеза о возможности применения нормального закона распределения вероятностных характеристик надежности электрооборудования цеховых сетей.

5. На основании статистических эксплуатационных данных рассчитаны доверительные интервалы параметра потока отказов и определены зависимости изменения во времени интенсивности отказов, вероятности времени безотказной работы низковольтных коммутационных аппаратов и кабельных линий цеховых сетей.

6. Исследованы характеристики работоспособности контактных систем низковольтных аппаратов.

### 3 КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ОБЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СИСТЕМ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

#### 3.1 Постановка задачи

Для распределительных электрических сетей промышленных и сетевых предприятий, как в России, так и Западной Европе, тема анализа эффективности функционирования электрических сетей стала актуальной еще в конце прошлого века.

За последние годы рынок, на котором работают промышленные и электросетевые предприятия, претерпел кардинальные изменения. Если еще в начале 90-х годов предприятия находились в ведении муниципалитетов и об эффективном управлении никто не задумывался, то в настоящее время продолжается активный процесс приватизации промышленных и электросетевых предприятий. Теперь внимание менеджмента электросетевого бизнеса направлено на грамотное управление средствами, т.е. фокус внимания нацелен на максимизацию прибыли и оптимизацию затрат. При этом, для обеспечения качества ЭЭ власти различных стран устанавливают нормы и правила ведения электросетевого бизнеса.

Таким образом, основным вопросом управления промышленными и электросетевыми компаниями является обеспечение качества энергии и надежности сети. Многие компании направляют усилия на оптимизацию оперативно-диспетчерского управления и сокращение расходов на всем сроке службы всех компонентов сети. Анализ постоянных затрат вследствие износа сетей является важной составляющей этой деятельности.

При управлении активами распределительных сетей необходимо одновременно обрабатывать и анализировать множество различных данных. Это влияет и на задачи планирования электропотребления и развития сетей, кото-

рые становятся все более сложными. Кроме того, при рассмотрении задач по развитию сетей и обеспечению их надежности, необходимо учитывать экономические и экологические аспекты. Таким образом, необходимы современные методики и средства, помогающие управлению электрическими сетями. Одним из наиболее важных инструментов при планировании является анализ качества эксплуатации сети, который может также применяться для оценки эффективности управления активами. В связи с этим возникает задача комплексной оценки показателей эффективности функционирования низковольтных аппаратов как элементов цеховых сетей в процессе их работы.

Эффективность функционирования как системы электроснабжения в целом, так и отдельных ее элементов определяется в общем случае надежностью электроснабжения и качеством ЭЭ у электроприемников. Надежность системы электроснабжения определяется надежностью входящих в нее элементов, качеством ее эксплуатации. Надежность элементов, входящих в систему, характеризуется их безотказностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью и долговечностью.

Повседневный технический надзор за электрооборудованием осуществляется эксплуатационным персоналом, как на основании измерительных приборов, так и путем осмотра электрооборудования. Он должен быть связан с проведением мероприятий, направленных на экономию ЭЭ.

Совершенно очевидно, что создавать высококачественные технические агрегаты не имеет смысла, если не предусмотреть соответствующее качество их энергоснабжения, в частности электроснабжения. Если исходить из концепции о иерархической структуре качества объекта, то систему электроснабжения следует считать одним из базовых элементов в любом производственном комплексе, а это означает, что требования к ее качеству должны быть высокими. При этом следует иметь в виду, что повышение качества всегда связано с дополнительными затратами на каждый данный момент времени, и не техника, а экономика ставит предел целесообразному повышению качества. Необходимо совместное решение оптимизации проблем повышения качества электроснабжения и режимов электропотребления. Под оптимизацией режимов электропо-

требления отдельных электроустановок следует понимать достижение минимума затрат на этих установках за счет проведения организационно-технических мероприятий, изменяющих электропотребление электроустановки. Эта оптимизация может осуществляться путем совершенствования технологических процессов производства и замены малоэкономичных автоматических устройств устройствами более экономичными.

Замена неэкономичного устаревшего устройства или оптимизация режима электропотребления с учетом изменения нагрузок решается только на стадии эксплуатации. Поэтому при оптимизации режима системы электроснабжения и ее надежности оба этих вопроса должны рассматриваться комплексно, т.е. совместно.

В процессе эксплуатации параметры системы должны корректироваться в соответствии с требованиями непрерывно изменяющихся нагрузок. Для проведения такой корректировки необходимо осуществлять постоянный контроль за режимом электропотребления и работой системы электроснабжения.

Производя замеры и анализируя статистический материал, делается вывод о всех ненормальных явлениях, наблюдаемых при функционировании системы электроснабжения. Таким образом, именно комплексный контроль за качеством электроснабжения можно считать основой решения задачи по обеспечению оптимальной надежности и оптимального режима электропотребления. Кроме того, с этой задачей связаны такие вопросы, как проведение планово-предупредительных ремонтов, обеспечение резервных запасных элементов, организация рациональной эксплуатации системы электроснабжения.

### 3.2 Тепловизионные обследования для анализа технического состояния и надежности функционирования контактных систем низковольтных коммутационных аппаратов

3.2.1 Основные средства тепловизионного контроля. В настоящее время в энергетике РФ имеет место переход от системы планово-предупредительных ре-

монтов к ремонтам части основного оборудования по действительному техническому состоянию электрооборудования и к универсальным средствам диагностирования – современным тепловизионным приборам. С помощью термографических средств можно идентифицировать такие дефекты, как локальный нагрев элементов конструкции, ухудшение состояния контактных соединений, и тем самым увеличить ресурс электрооборудования за счет выявления дефектов на ранней стадии их развития.

Тепловизоры фирмы Raytek (ТН9100, ТН6100, ТН5140, Thermo View Ti30) представляют собой современные компактные, легкие многофункциональные устройства с неохлаждаемой матрицей, дающие возможность получать и сохранять информацию о температурных полях удаленных объектов. Кроме того, они позволяют быстро и легко обнаруживать дефекты и неисправности оборудования электрических подстанций, электродвигателей, электроконтактных соединений. Технические характеристики тепловизоров ТН9100 и ТН5104 представлены в таблице 3.1 [49, 98].

Таблица 3.1

Технические характеристики тепловизоров ТН9100 и ТН5104

Параметры	ТН9100	ТН5104
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° × 19°	17° × 12,8°
Чувствительный элемент, пикселей	Микроболометрическая матрица	
	320 × 240	255 × 223
Скорость сканирования, Гц	50/60	20
Объем памяти	До 2 Гб (Flash)	64 термограммы
Коэффициент излучения	Регулируемый	
Вес с аккумулятором, кг	0,7	1,0

3.2.2 Анализ технического состояния и надежности функционирования контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов. Техническое состояние контактных соединений анализируется по нормированным значениям температуры нагрева, величине избыточной температуры, динамике варьирования температуры во времени, а также методом замеров фактических температур в одной фазе или между фазами для сопоставления с температурой на исправных участках электрооборудования [20, 89].

При тепловизионном контроле анализируется состояние недогруженных контактных групп. Вычисление превышения замеров фактической температуры по отношению к нормированному для величины токов  $(0,6 - 1) I_{НОМ}$  осуществляется в соответствии

$$\frac{\Delta t_{НОМ}}{\Delta t_{раб}} = \left( \frac{I_{НОМ}}{I_{раб}} \right)^2 \quad (3.1)$$

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 имеет вид [70, 71]

$$\frac{\Delta t_{0,5}}{\Delta t_{раб}} = \left( \frac{0,5 I_{НОМ}}{I_{раб}} \right)^2, \quad (3.2)$$

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

Согласно ГОСТ 12393-2013 техническое состояние контактных соединений аппаратов, а также систем служащих для соединения проводов, кабелей, шин электрооборудования вычисляется при помощи двух параметров

- характеристики оценки дефекта по перегреву  $K_d$  контактного соединения,

- избыточной температуры  $t$  аналогичных контактных соединений других фаз при  $0,5I_{\text{ном}}$ .

Коэффициент дефектности  $K_d$  соответствует отношению удельного теплового потока Джоуля, выделившегося в контактном соединении к удельному тепловому потоку, вне контактных соединений. Удельный тепловой поток с поверхности в соответствии с теплоотдачей в воздух и теплового излучения, вычисляется по выражению

$$c = \beta(t - t_{\text{окр}}), \quad (3.3)$$

где  $\beta$  – показатель теплоотдачи с поверхности;  $t$  – температура площади поверхности;  $t_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды.

Тогда коэффициент дефектности

$$K_d = \frac{\Delta t_{\text{кс}}}{\Delta t_{\text{пр}}}, \quad (3.4)$$

где  $\Delta t_{\text{кс}}$  и  $\Delta t_{\text{пр}}$  превышение температуры контактного соединения коммутационного аппарата и соединяемого провода вне арматуры (на расстоянии не менее 1 м от зажима) над температурой окружающего воздуха при протекании по ним одного и того же тока.

При учете соотношения для количества теплоты коэффициент дефектности определяется

$$K_d = \frac{I^2 r}{I^2 r_{\text{пр}}} = \frac{r}{r_{\text{пр}}}, \quad (3.5)$$

где  $I$  – сила тока;  $r$  и  $r_{\text{пр}}$  – сопротивление контактного соединения коммутационного аппарата и провода.

Известно, что эксплуатационное состояние электрического контакта зависит от тока, площади контактной системы, силы затяжки (для болтовых соединений) а также определяется коррозией, нагаром и т.д. При определении соотношения повышенных температур тепловизором и пользуясь выражениями (3.4) и (3.5), косвенно оценивается техническое состояние контактной системы.

В электроэнергетике по нормам испытаний оборудования [83] анализируется состояние контактных соединений: при  $K_d < 1,2$  – слабое развитие дефектности, требуется постоянный контроль;  $1,2 \leq K_d \leq 1,5$  – развивающийся дефект, необходимо устранять неисправность при ближайшем выводе электрооборудования из эксплуатации;  $K_d > 1,5$  – аварийный дефект, необходимо срочное устранение.

Избыточная температура – это превышение измеренной температуры исследуемого соединения по отношению к температуре замеров фактических соединений других фаз, которые находятся в равных условиях.

Сопротивление контактных соединений электрических аппаратов вычисляется по выражению [86, 89]

$$R_{к.с} = \frac{2\sqrt{\lambda f k_T S}}{I^2} \cdot \left( \theta_k - \frac{I^2 \rho (1 + \alpha \vartheta_k)}{k_T f S} \right), \quad (3.6)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность материала проводника, для меди  $\lambda = 390$  Вт/(м · К);  $f$  – поверхность охлаждения, м<sup>2</sup> ( $f = 2(c + d) \cdot 1 \cdot 10^{-3}$  при прямоугольной поверхности;  $f = 2\pi r \cdot 1 \cdot 10^{-3}$  при круглой поверхности);  $k_T$  – коэффициент теплоотдачи, для меди  $k_T = 16$  Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $S$  – контурная площадь касания контактных соединений (таблица 3.2), м<sup>2</sup> ( $S = c \cdot d$  для прямоугольной поверхности;  $S = \pi r^2$  для круглой поверхности);  $I$  – ток через контакты, А ( $I = K_3 \cdot I_n$ , где  $K_3$  – коэффициент загрузки) (таблица 3.6);  $\vartheta_k$  – температура контактных площадок

( $\vartheta_k = \Delta t + t_H$ ;  $\Delta t$  – избыточная температура, превышение измеренной температуры исследуемого соединения над температурой  $t_H$  (таблица 3.3),  $t_H$  – температура контактного соединения аппарата на заведомо исправных участках электрооборудования (таблица 3.4));  $\theta_k$  – допустимый перепад температуры контакта над температурой окружающей среды,  $\theta_k = 45$  °С;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, для меди  $\rho = 1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, для меди  $\alpha = 0,0043$ .

Таблица 3.2

Величина размера контактных площадок силовых цепей  
контактов автоматических выключателей

№ п/п	Тип автоматического выключателя	Номинальный ток, А	Размер контактной площадки, мм <sup>2</sup>
1	АП50Б ТУ 17-523.138-79	1,5 ÷ 6,3	13,5
		12 ÷ 25	18,5
		40 ÷ 63	20,5
2	АЕ20 ТУ 18-524.064-84	12 ÷ 16	21,0
		25 ÷ 63	31,0
		80 ÷ 120	41,0
3	ВА-47 ТУ 18-80, ИКЖ.651314.23	1,0 ÷ 25	31,0
		30,5 ÷ 63	31,0
4	ВА-51 ТУ 18-90, ИКЖ.651253.023	1,5 ÷ 20	31,0
		30 ÷ 63	31,0
5	ВА-57 ТУ 18-94, ИКЖ.652122.012	1,6 ÷ 20	31,0

Температура контактной системы коммутационного аппарата на заведомо исправных участках электрооборудования [70, 71]

$$t_{kc} = \frac{I^2(t_{доп} - t_{окр})}{I_{доп}^2} + t_{окр}, \quad (3.7)$$

где  $t_{\text{доп}}$  – допустимая температура нагревания частей аппаратов при температуре окружающей среды  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (величины допустимых превышений температуры для аппаратов, работающих при температуре окружающей среды, не равной принятой расчетной ( $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), изменяются так, чтобы допустимая температура элементов аппаратов, вычисляемая суммированием превышения и расчетной температуры окружающей среды, оставалась постоянной [70]);  $t_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды.

Таблица 3.3

Значение температуры контактных соединений аппаратов  
на заведомо исправных участках электрооборудования

№ п/п	Секция, панель	Тип низковольтного электрического аппарата	Рабочий ток аппарата, $I_p$ , А			Температура кон- тактной системы, $^{\circ}\text{C}$		
			Ноябрь 2014	Март 2015	Март 2016	Ноябрь 2014	Март 2015	Март 2016
1	Секция 9НО Панель 8	Рубильник, ВР32-31	46	48	41	34	35	32
2	Секция 1НО Панель 5	Пакетный выключатель, ВП2-40		34	30		28	27
3	Терм. цех Панель 10	Магнитный пускатель, ПМЛ-12		27	28		25	25
4	Секция 19НАБ Панель 6	Автоматический выключатель, ВА-57	41	39	39,5	32	30	27
5	Секция 8НМ Панель 7	Автоматический выключатель, ВА-51		23	23		24	24
6	Секция 6НМ Панель 99	Контактор, КТ 6090		53	49		38	36

Таблица 3.4

## Данные тепловизионного обследования

№ п/п	Секция, панель	Дефектное соединение	Вид дефекта	Ноябрь 2014		Март 2015		Март 2016		Ток аппарата I <sub>p</sub> , А			Сопротивление контакта I <sub>кc</sub> , МОм		
				Избыт. фак. температура, °С	Избыт. расч. температура, °С	Избыт. фак. температура, °С	Избыт. расч. температура, °С	Избыт. фак. температура, °С	Избыт. расч. температура, °С	Ноябрь 2014	Март 2015	Март 2016	Ноябрь 2014	Март 2015	Март 2016
1	Секция 9НО Панель 8	Рубильник, ВР32-31	нагревание БКС (фаза А)	64	98	36	38	35	51	46	48	41	1,6	1,2	1,1
2	Секция 1НО Панель 5	Пакетный выключатель, ВП2-40				36	38	35	51		34	30		0,6	0,71
3	Терм. цех Панель 10	Магнитный пускатель, ПМЛ-12				36	38	35	51		27	28		17,3	17,1
4	Секция 19НАБ Панель 6	Автоматический выключатель, ВА-57		69	102	36	38	35	51	41	39	39,5	6,9	7,0	6,3
5	Секция 8НМ Панель 7	Автоматический выключатель, ВА-51	нагревание БКС			36	38	35	51		23	23		8,6	6,8
6	Секция 6НМ Панель 99	Контактор, КТ 6090				36	38	35	51		53	49		8,1	6,2

После подстановки значений в (3.7) температура контактной системы автоматического выключателя на заведомо исправных участках электрооборудования в марте 2014 г. (таблица 3.3, п. 4) будет равна  $t_{\text{КС}} = 30 \text{ }^\circ\text{C} = 303 \text{ К}$ .

Тогда сопротивление контактной системы автоматического выключателя по (3.6) составит  $r_{\text{КС}} = 0,007 \text{ Ом}$ .

Результаты вычислений сопротивлений контактных соединений аппаратов приведены в таблице 3.4.

Теоретические данные соответствуют результатам экспериментальных исследований, показавшим, что сопротивление контактных соединений коммутационных аппаратов, измеренное микрометром Ф 4104-М1, не отличается от вычисленного более чем на 14 % [92, 93, 95, 122, 145].

На рисунках 3.1-3.5 приведены зависимости сопротивлений контактных систем дефектных электрических аппаратов от температуры контактной системы, определяемой в процессе тепловизионного обследования и при различных среднеквадратических коэффициентах загрузки оборудования.

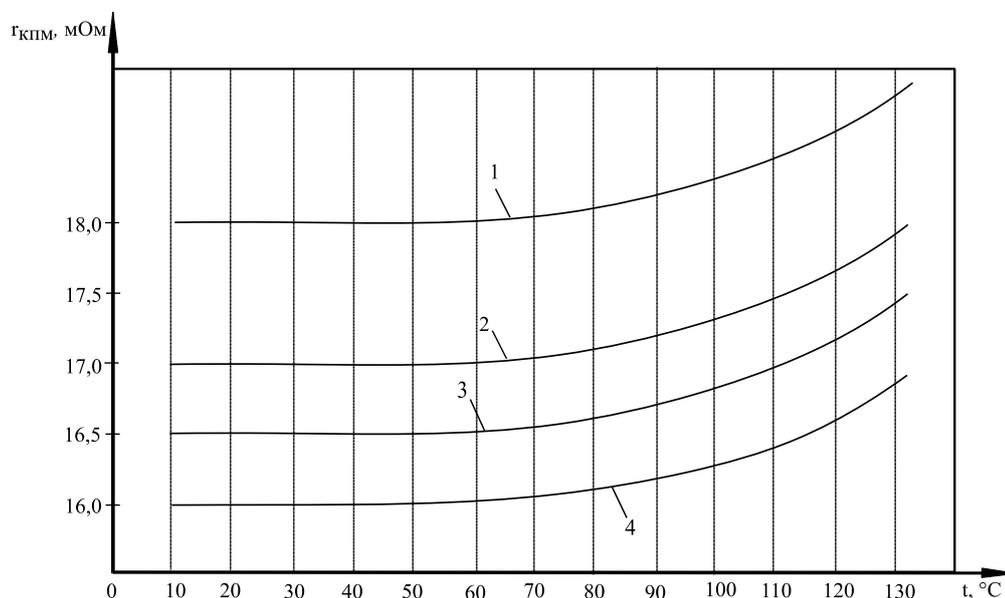


Рисунок 3.1 – Графики зависимости сопротивлений контактных соединений дефектных магнитных пускателей ПМЛ 12 от температуры контактной системы, по данным тепловизионного обследования:

$$1 - K_3 = 0,7; 2 - K_3 = 0,5; 3 - K_3 = 0,3; 4 - K_3 = 0,4$$

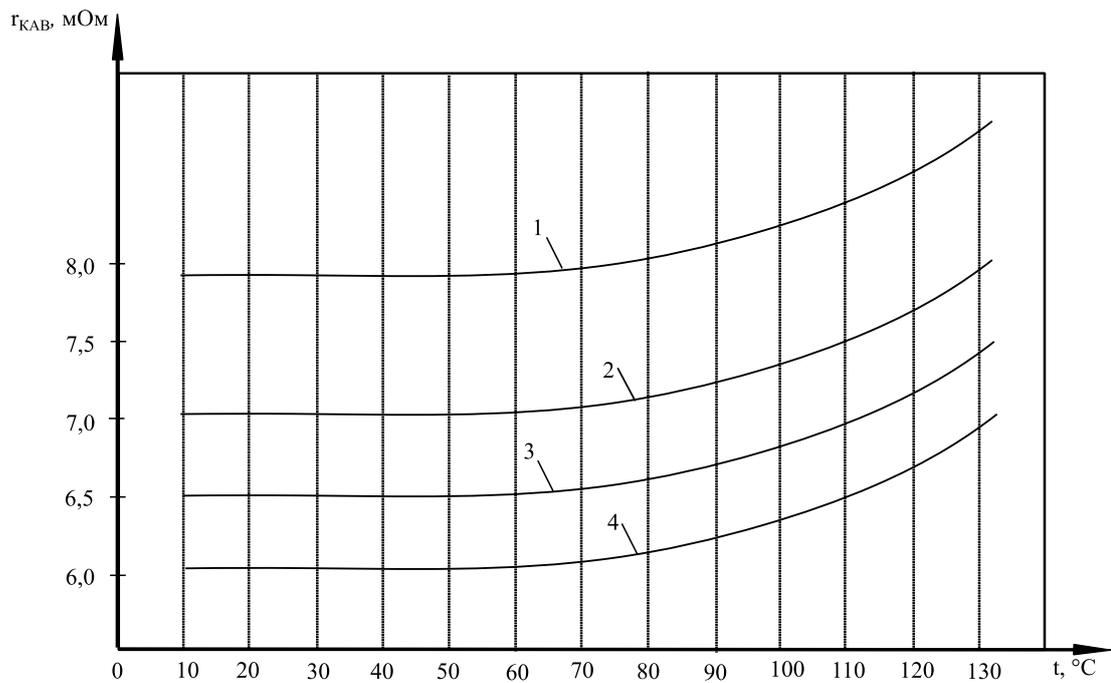


Рисунок 3.2 – Графики зависимости сопротивлений контактных соединений дефектных автоматических выключателей ВА-51 от температуры контактной системы, по данным тепловизионного обследования:  
 1 –  $K_3 = 0,6$ ; 2 –  $K_3 = 0,8$ ; 3 –  $K_3 = 0,7$ ; 4 –  $K_3 = 0,5$

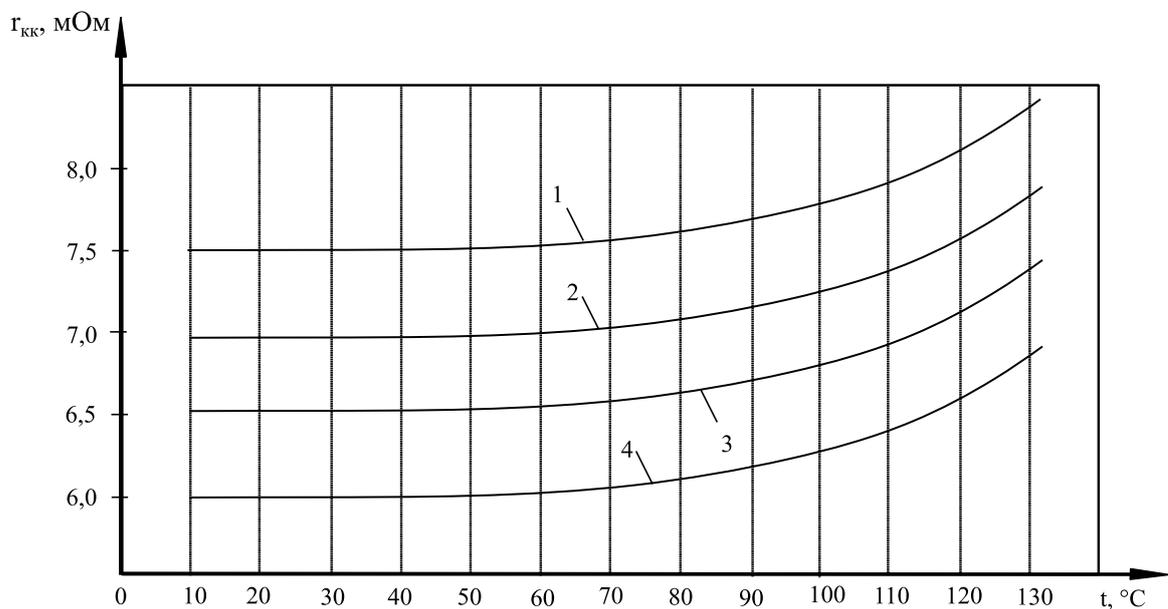


Рисунок 3.3 – Графики зависимости сопротивлений контактных соединений дефектных контакторов КТ 6013 от температуры контактной системы, по данным тепловизионного обследования:  
 1 –  $K_3 = 0,7$ ; 2 –  $K_3 = 0,6$ ; 3 –  $K_3 = 0,4$ ; 4 –  $K_3 = 0,5$

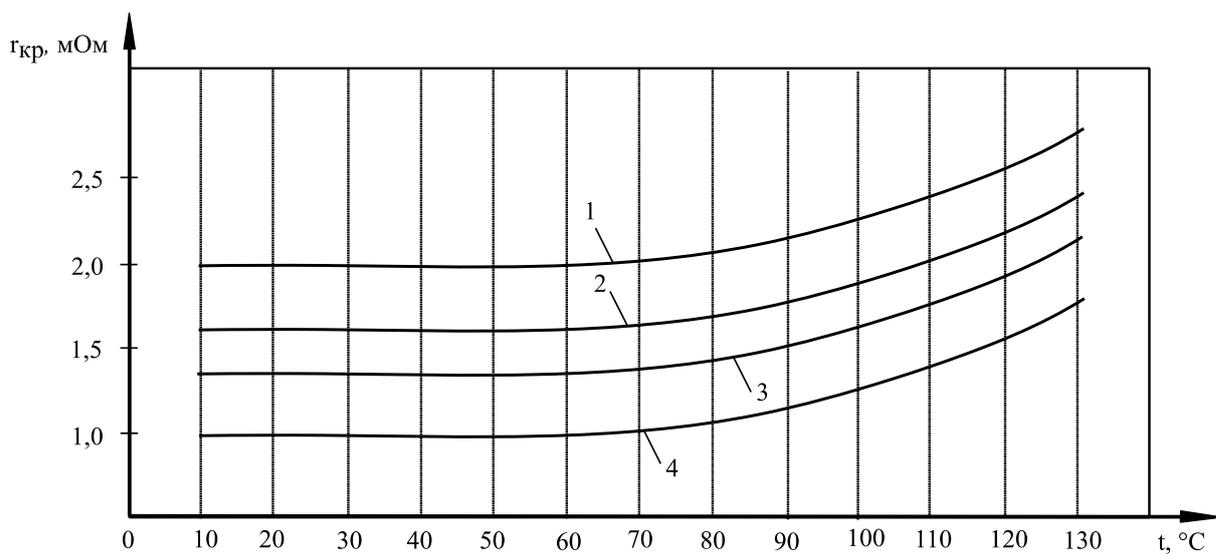


Рисунок 3.4 – Графики зависимости сопротивлений контактных соединений дефектных рубильников ВР 32-31 от температуры контактной системы, по данным тепловизионного обследования:

1 –  $K_3 = 0,4$ ; 2 –  $K_3 = 0,6$ ; 3 –  $K_3 = 0,7$ ; 4 –  $K_3 = 0,3$

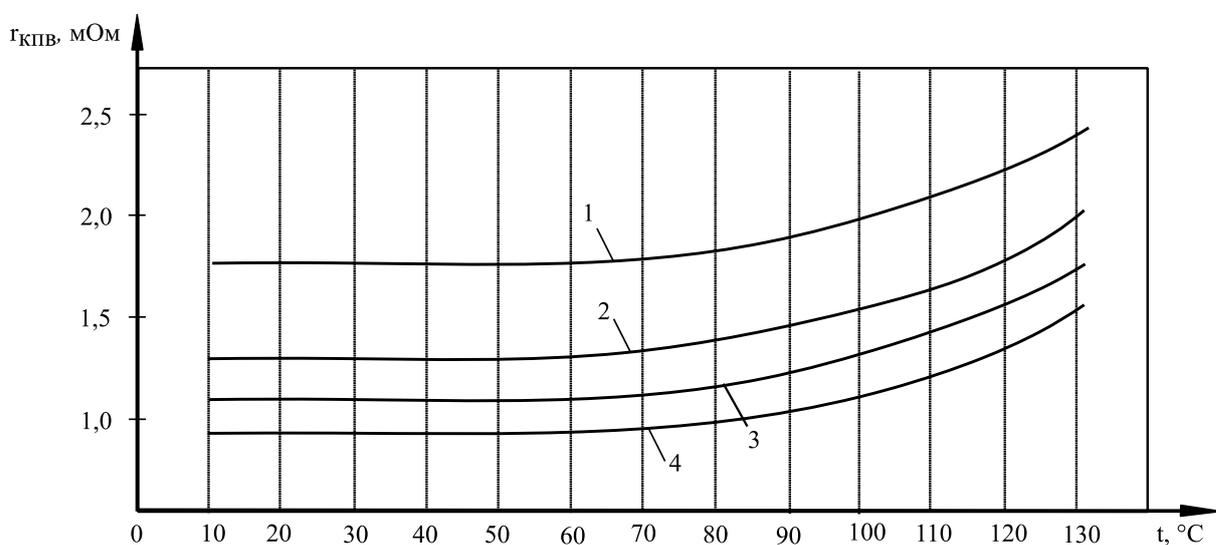


Рисунок 3.5 – Графики зависимости сопротивлений контактных соединений дефектных пакетных выключателей ВП 2-40 от температуры контактной системы, по данным тепловизионного обследования:

1 –  $K_3 = 0,7$ ; 2 –  $K_3 = 0,8$ ; 3 –  $K_3 = 0,4$ ; 4 –  $K_3 = 0,4$

В результате экспериментальных исследований установлено, что температуры нагрева контактов коммутационных аппаратов при равных условиях эксплуатации в момент измерения (рабочий ток и коэффициент загрузки) не равны между собой. Следствием неравенства температур является неравенство сопротивлений контактных соединений. Причина этого – в имеющихся пленках на контактах аппаратов [82, 112].

Тепловизионное обследование низковольтного оборудования выявило, что в дефектных электрических аппаратах из-за образования контактных пленок и неровностей площади контактирования наблюдается недопустимое увеличение температуры контактных соединений. В результате чего сопротивление контактов относительно начального увеличилось в среднем в 1,9–3 раза.

Коэффициент допустимой кратности превышения сопротивления контактов по условиям режимов технической эксплуатации вычисляется как

$$k_{п.с} = \frac{r}{r_0}, \quad (3.8)$$

где  $r_0$  – начальное сопротивление контактного соединения аппарата (таблица 3.5);  $r$  – фактическое сопротивление контактного соединения аппарата в условиях эксплуатации.

Полученные статистические данные ежегодного тепловизионного обследования контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов позволили обосновать допустимые кратности превышения сопротивления контактов аппаратов по условию достижения предельно допустимой температуры нагрева контактов:

- для автоматических выключателей в 2,7 раза;
- для контакторов в 2,8 раза;
- для магнитных пускателей в 3 раза;
- для рубильников в 2,1 раза;
- для пакетных выключателей в 1,9 раза.

Таким образом, показателем (критерием) оценки технического состояния низковольтных аппаратов установлена величина коэффициента превышения сопротивления контактов аппаратов.

Графики зависимостей сопротивлений контактных соединений аппаратов от температуры контактной системы приведены на рисунке 3.6. Сопротивления контактных соединений аппаратов при этом являются функцией температуры контактной площадки, и вычисляются при разных значениях среднеквадратических коэффициентов загрузки.

Таблица 3.5

Значение эмпирических зависимостей начальных сопротивлений контактных соединений низковольтных аппаратов от величины номинального тока

Тип аппарата	Величина номинального тока, $I_{НОМ}$ , А	Эмпирическая зависимость сопротивления от величины номинального тока
Магнитный пускатель	$< 75$	$r_0 = 820 / I_{НОМ}$
	$\geq 75$	$r_0 = 770 / I_{НОМ}$
Автоматический выключатель и контактор	$< 65$	$r_0 = 350 / I_{НОМ}$
	$\geq 65$	$r_0 = 310 / I_{НОМ}$
Предохранитель	$< 100$	$r_0 = 200 / I_{НОМ}$
	$\geq 100$	$r_0 = 120 / I_{НОМ}$
Рубильник и пакетный выключатель	Любое значение	$r_0 = 70 / I_{НОМ}$

Для определения сопротивления контактных соединений с помощью номограмм, представленных на рисунке 3.6, необходимо рассчитать значение температуры контактной системы, например для ПМЛ-12

$$t_{кc} = \frac{27^2((65 + 40) - 20)}{63^2} + 20 + 68 = 107 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

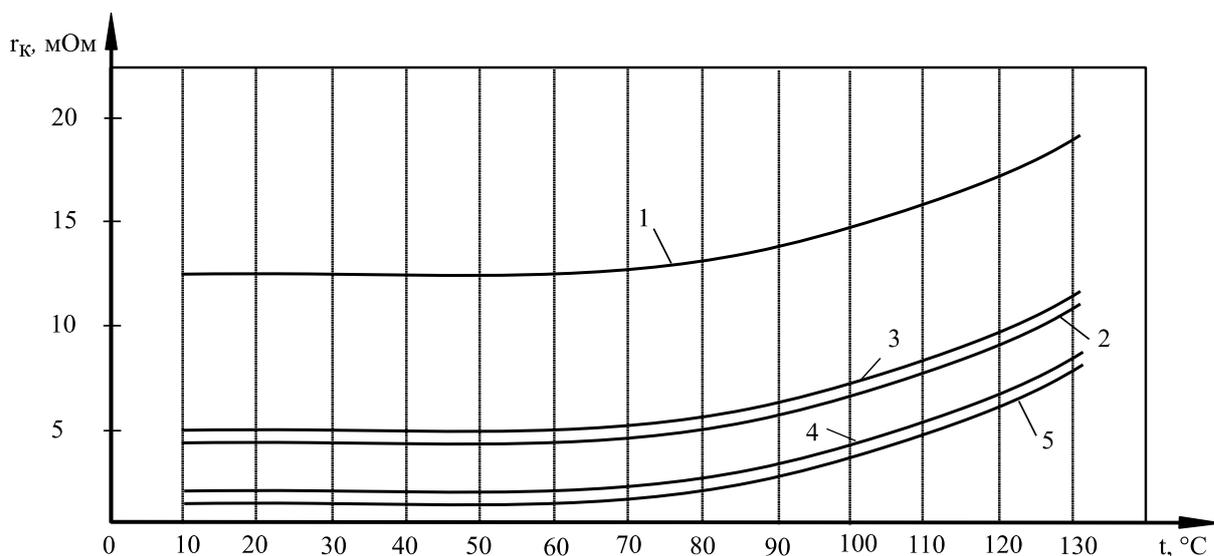


Рисунок 3.6 – Графики зависимости сопротивлений контактных соединений аппаратов от температуры контактных площадок при  $K_3 = 0,5$  (1 – магнитный пускатель ПМЛ 12,  $I_{НОМ} = 63$  А; 2 – автоматический выключатель ВА-57,  $I_{НОМ} = 63$  А; 3 – контактор КТ 6000,  $I_{НОМ} = 63$  А; 4 – рубильник ВР 32-31,  $I_{НОМ} = 63$  А; 5 – выключатель пакетный ВП 2-40,  $I_{НОМ} = 63$  А)

Затем по оси абсцисс на рисунке 3.6 отложить полученное значение 107 и провести вертикально линию до пересечения с графиком, соответствующим исследуемому аппарату. На оси ординат отложится искомое значение контактного сопротивления, равное 14 мОм. При этом сопротивление контактов аппарата при измерении микроомметром, равно 14,1 мОм, что позволяет применять показанные номограммы для практического использования.

Таким образом, представленные результаты проведенных тепловизионных обследований позволяют оценивать эксплуатационное состояние низковольтных коммутационных аппаратов по критерию допустимой кратности превышения сопротивления контактных соединений и предотвращать развитие дефектов коммутационной аппаратуры и аварийные ситуации, а также использовать предлагаемый критерий в качестве дополнительного регламента сроков проводимых обследований коммутационной аппаратуры.

### 3.3 Метод комплексной оценки эффективности функционирования контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов как элементов систем цехового электроснабжения

3.3.1 Разработка алгоритма метода оценки функциональных параметров низковольтных аппаратов. Общеизвестно, что в процессе эксплуатации оборудования систем цехового электроснабжения, одними из основных элементов которых служат коммутационные аппараты, в результате износа происходит переход с одного уровня работоспособности (функционирования) на другой, более низкий [5; 33].

Следует еще раз напомнить, что не все технические параметры серийных аппаратов приводятся в паспортных данных. В частности, не всегда указывается сопротивление их силовой цепи, сопротивления значительной части элементов электрических аппаратов [32; 33].

Скорость износа контактов, при коммутации определяет уровень надежности работы аппаратов [25; 26; 27; 28]. Основными факторами, которые непосредственно определяют скорость износа контактов и, следовательно, возможность возникновения отказа являются:

- величина тока и напряжения;
- характер нагрузки (с увеличением индуктивности коммутационной цепи износ контактов увеличивается);
- материал контактов, в том числе их размеры, форма, однородность структуры;
- время и амплитуда вибрации контактов в момент замыкания, жесткость контактных пружин и др. [29; 30; 31].

Все эти факторы функционально взаимосвязаны с тепловыми, электрическими и физико-техническими параметрами контактных материалов [118; 119], контактных и дугогасительных систем. Анализ функциональных взаимосвязей указанных факторов и параметров, их систематизация дают возможность обосновать правомерность принятия некоторых критериев, определяющих показатели работоспособности контактных систем электрических аппаратов [33].

В качестве таких критериев могут быть представлены характерные зависимости изменений провала, суммарной высоты и массы контактов, сопротивления контактов от количества циклов (рисунок 3.7) [5; 33].

Опыт работы и эксплуатационные данные свидетельствуют о необходимости поиска путей и новых подходов оценки эффективности работы низковольтных аппаратов.

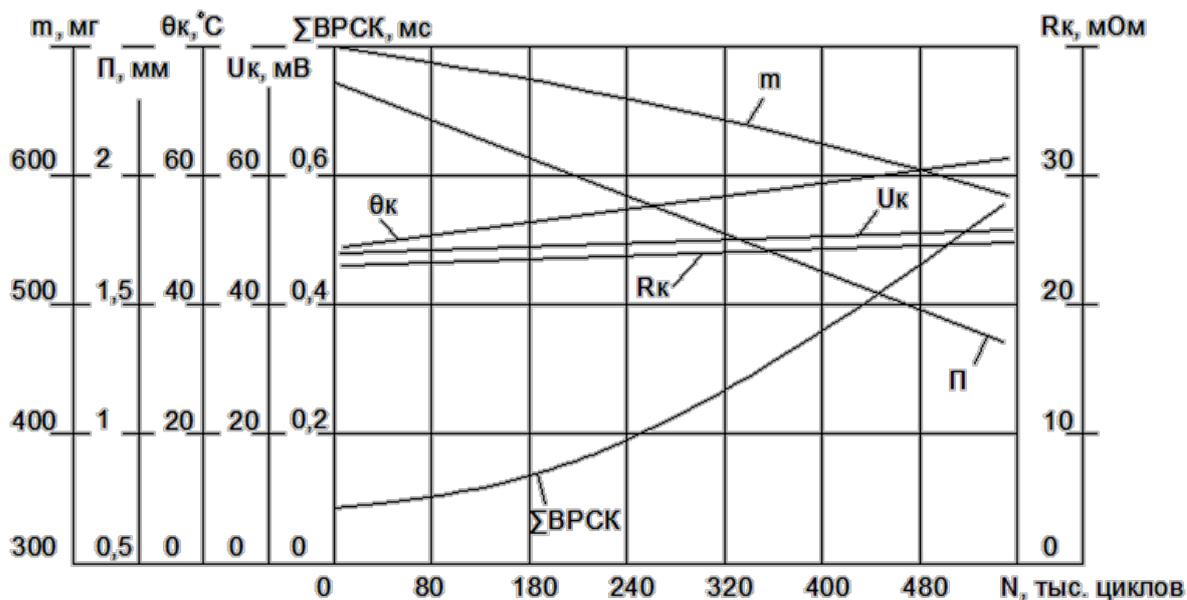
Определяющим параметром, характеризующим вероятность времени безотказной работы, можно принять величину сопротивления контактов  $r$ .

В качестве критерия оценки работоспособности и технического состояния низковольтных аппаратов предлагается использовать сопротивление контактных соединений. При этом определение количественных характеристик эффективности функционирования осуществляется методами теории вероятности и математической статистики [5; 11]. Совокупность полученных количественных показателей позволяет определять фактический уровень надежности контактирования, а также расширяет возможности прогнозирования оценок работоспособности при проектировании.

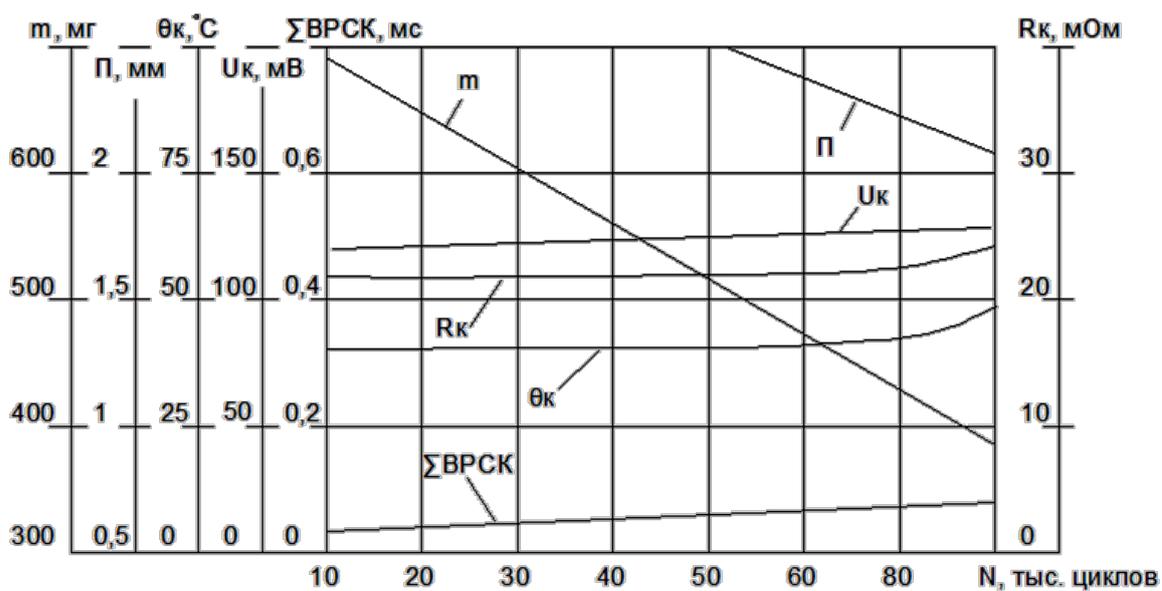
В частности была исследована работоспособность контактов таких коммутационных аппаратов цеховых сетей, как:

- магнитные пускатели;
- контакторы;
- автоматические выключатели.

Работоспособность контактов предложено оценивать зависимостью сопротивлений контактных соединений аппаратов от числа переключений. Известно, что во время эксплуатации контакты изнашиваются. В результате износа начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата  $r_0$  увеличивается и достигает критического значения  $r_{кр}$ , при котором происходит отказ коммутационного аппарата.



*a*



*б*

Рисунок 3.7 – Динамика изменения параметров пускателей в ходе наработки в режимах АС-3 (*a*) и АС-4 (*б*):  $m$  – изменение массы;  $\Pi$  – провал;  $\theta_k$  – температура перегрева контактов;  $U_k$  – падение напряжения на замкнутых контактах;  $\Sigma ВРСК$  – суммарное время разомкнутого состояния контактов;  $R_k$  – сопротивление токопроводящего контура (расчетные данные)

Под отказом контакта наиболее часто понимается превышение контактным сопротивлением некоторого порогового значения. Согласно [5; 33] в связи с тем, что в процессе исследований наблюдаются как полные отказы контактов, так и кратковременные на время только лишь одного переключения, за отказ контакта принято превышение сопротивлением контактов порогового значения. При этом для магнитных пускателей, автоматических выключателей и контакторов по результатам проведенных экспериментальных исследований для достижения критического значения сопротивления аппарата принимается в среднем трехкратное увеличение начального сопротивления

$$r_{кр} = k_{п.с} \cdot r_0, \quad (3.9)$$

где  $k_{п.с}$  – коэффициент, допустимой кратности превышения сопротивления контактов.

Начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата  $r_0$  вычисляется на основании выражений, представленных в таблице 3.5.

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

$$r(z) = r_0 + \int_0^z v dz, \quad (3.10)$$

где  $r_0$  – начальное значение сопротивления контактов коммутационного аппарата;  $v$  – скорость изменения сопротивления контактов.

Ниже представлен алгоритм методики оценки функциональных параметров низковольтных аппаратов. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что изменение сопротивления контактов аппарата от количества коммутационных циклов можно с достаточной точностью аппроксимировать искомой зависимостью способом наименьших квадратов.

В соответствии с изложенным, выражение (3.10) принимает вид

$$r(z) = r_0 + vz. \quad (3.11)$$

Параметры  $r_0$  и  $v$  с достаточной степенью достоверности можно считать некоррелированными (независимыми), так как  $r_0$  определяется качеством производственного процесса, а величина  $v$  для конкретной конструкции аппарата – совокупностью факторов эксплуатационного характера.

Установлено [90], что эмпирические функции сопротивлений контактов аппаратов аппроксимируются нормальным законом распределения. Функция  $r(z)$  в этом случае показана как функция веерная случайная. Начальная ордината принимается равной  $r_{0.сред}$ .

Таким образом, положение каждой реализации зависит от одной случайной величины – углового коэффициента  $v$

$$r_{0.сред} = \bar{r} + k \cdot \sigma_{м.в}, \quad (3.12)$$

где  $\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n}$  – выборочная средняя величина;  $\sigma_{м.в} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n-1}}$  – среднеквадратическое отклонение малой выборки.

Коэффициент  $k$  зависит от количества испытанных образцов  $n$  и доверительной вероятности  $\alpha$ , с которой гарантируется получение  $r_{0.сред}$ .

Значение коэффициента  $k$  приведено в таблице 3.6 [44].

Для конкретной коммутационной нагрузки скорость изменения сопротивления контактов зависит от большого количества факторов:

- а) сопротивление контактов зависит от характера нагрузки;
- б) сопротивление может изменяться при переходе от одной контактной пары к другой, а также самопроизвольно при измерениях сопротивления одной и той же контактной пары в весьма широком диапазоне;

в) кроме того, важно учитывать величину конечного и начального нажатий, вибрации, скорости движения, свойств материала, формы и размеров контактов, а также число манипуляций по переключению контактов и обмоток аппарата, изменение напряжения и тока.

Таблица 3.6

Зависимость коэффициента  $k$  от количества испытанных образцов  $n$  и доверительной вероятности  $\alpha$

$n$	4	5	6	7	10
$\alpha = 0,95$					
$k$	2,15	1,43	1,15	0,98	0,65
$\alpha = 0,9$					
$k$	1,5	1,08	0,86	0,76	0,59

Таким образом, скорость изменения сопротивления контактов является вероятностно-статистической величиной.

Распределения указанных параметров, как показывает их статистическое исследование [5; 33], описываются нормальными законами. Следовательно, и функция (скорость изменения сопротивления контактов) от аргументов, распределенных по нормальному закону, может быть принята также распределенной по аналогичному закону.

Поэтому для определения средней скорости изменения сопротивления всей генеральной совокупности аппаратов может быть использован изложенный метод.

Характеристика верной случайной функции имеет вид

$$r_{cp}(z) = r_{o.сред} + v_{сред}z. \quad (3.13)$$

Вероятность времени безотказной работы контактов низковольтных коммутационных аппаратов за определенное количество коммутационных циклов находится по выражению

$$P(z) = 1 - F(z), \quad (3.14)$$

где  $F(z) = \int_0^z f(z) dz$  – вероятность ненадежной работы контактов (интегральный закон распределения отказов);  $f(z)$  – плотность вероятности безотказно выполненных коммутаций (дифференциальный закон распределения отказов).

Вероятность исправной работы контактов аппарата определяется выражением

$$P(r) = \int_{r_0}^{r_{\text{крит}}} f(r) dr. \quad (3.15)$$

Нижний предел интегрирования  $r_0$  определяет среднее значение начального сопротивления контактов всей выборки значений, а верхний – среднее значение критического сопротивления  $r_{\text{крит}}$  всей выборки значений сопротивлений аппаратов.

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

$$P(r) = \int_{r_0}^{r_{\text{крит}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left[-\frac{(r - r_{\text{сред}})^2}{2\sigma_r^2}\right] dr, \quad (3.16)$$

где  $r_{\text{сред}}$  – среднее значение сопротивления контактов генеральной совокупности аппаратов;  $\sigma_r$  – среднеквадратическое отклонение сопротивления.

У некоррелированных веерных случайных функций среднеквадратические отклонения практически линейно зависят от времени (для коммутационных аппаратов можно считать от количества циклов), т.е.

$$\sigma_r(z) = \sigma_v z, \quad (3.17)$$

где  $\sigma_v$  – среднеквадратическое отклонение углового коэффициента  $v$ .

Для определения плотности вероятности безотказно выполненных коммутаций  $f(z)$  необходимо продифференцировать выражение (3.15) по количеству циклов. Вместо  $r$  и  $\sigma_r$  подставляются значения  $r(z)$  и  $\sigma_r(z)$  из соотношений (3.9) и (3.16). Значение  $dr/dz$  представляет собой среднюю скорость изменения сопротивления.

Из выражения (3.10)

$$dr = v dz$$

или

$$dr = \frac{r - r_{0.сред}}{z} dz. \quad (3.18)$$

Таким образом, после дифференцирования и преобразований получим

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v z^2}} \left\{ 3\sigma_{r0} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_{r0}}{\sigma_v z} + \frac{v_{сред}}{\sigma_v} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + (r_{крит} - r_{0.сред}) \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{v_{сред}}{\sigma_v} - \frac{r_{крит} - r_{0.сред}}{\sigma_v z} \right)^2 \right] \right\}. \quad (3.19)$$

Для практических расчетов можно упростить полученное выражение. Обозначим коэффициенты вариации скорости и начального сопротивления соответственно  $S$  и  $S_1$ , т.е.

$$S = \frac{\sigma_v}{v_{сред}}; \quad (3.20)$$

$$S_1 = \frac{\sigma_r}{r_{0.сред}}; \quad (3.21)$$

$$\theta_1 = \frac{3S_1 \cdot r_{0.сред}}{v_{сред}}; \quad (3.22)$$

$$\theta_2 = \frac{r_{кр} - r_{0.сред}}{v_{сред}}. \quad (3.23)$$

Таким образом,

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi z^2}} \left\{ \frac{\theta_1}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{\theta_1}{z}}{S} \right)^2 \right] + \frac{\theta_2}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - \frac{\theta_2}{z}}{S} \right)^2 \right] \right\}. \quad (3.24)$$

Вероятность времени безотказной работы контактов определяется по выражению

$$P(z) = 1 - \int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \left\{ \frac{\theta_1}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{\theta_1}{z}}{S} \right)^2 \right] + \frac{\theta_2}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - \frac{\theta_2}{z}}{S} \right)^2 \right] \right\} dz. \quad (3.25)$$

На сегодняшний момент развитие имитационных систем позволяет решать комплекс задач по моделированию сложных систем, в том числе и по оценке функциональных параметров низковольтных аппаратов. Применение систем моделирования позволяет снизить затраты на создание испытательного образца и оценить степень эффективности применения того или иного варианта схемы управления [32; 33].

Некоторые изготовители коммутационного оборудования применяют хорошо зарекомендовавшие себя программы и одновременно стремятся обеспечивать обмен исходными данными и результатами расчетов между моделями разных систем. Для этого используют интерфейсы, позволяющие реализовать обмен данными между моделями механических и регуляционных процессов уже на первой стадии разработки. Это дает возможность своевременно получать как можно более точную информацию о поведении коммутационной системы и непосредственно сопоставлять его с поведением физической системы.

Для моделирования и оценки функциональных параметров коммутационных систем низковольтных электрических аппаратов использовались блоки программы Matlab из библиотеки Simulink.

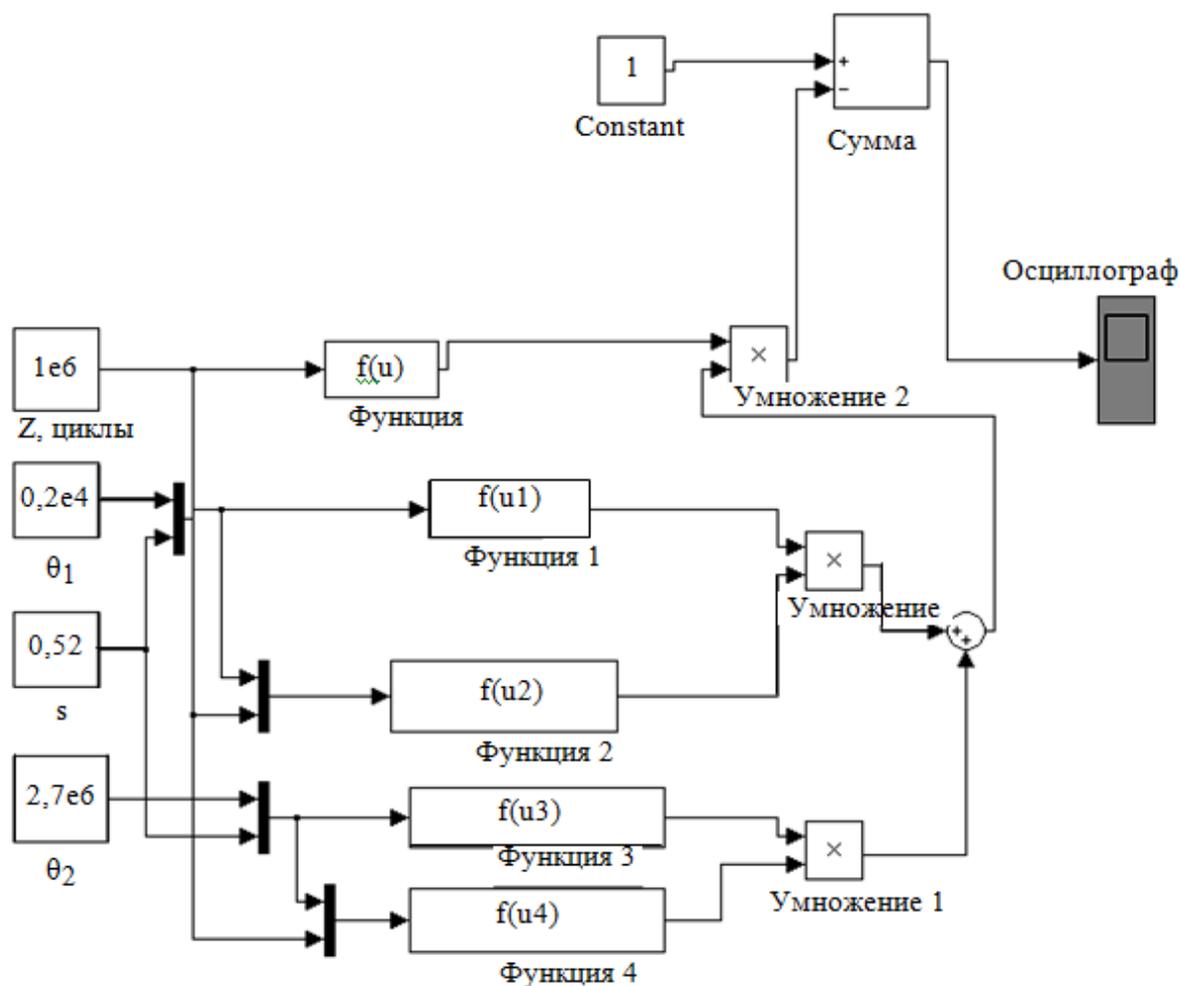


Рисунок 3.8 – Модель для расчета вероятности времени безотказной работы низковольтных аппаратов

На рисунке 3.8 представлена модель для расчета вероятности времени безотказной работы низковольтных аппаратов. В нее входят параметры из выражения (3.25). Для задания необходимых значений используются блоки Constant, для совершения вычислительных операций блоки Fcn, Product (умножение) и Sum (сумма). Рассчитанные данные выводятся на осциллограф.

На рисунке 3.9 представлена модель для расчета сопротивления контактных соединений низковольтных аппаратов. В нее входят параметры из выражения (3.11). Для задания необходимых значений используются аналогичные блоки, что и в модели для расчета вероятности времени безотказной работы аппаратов.

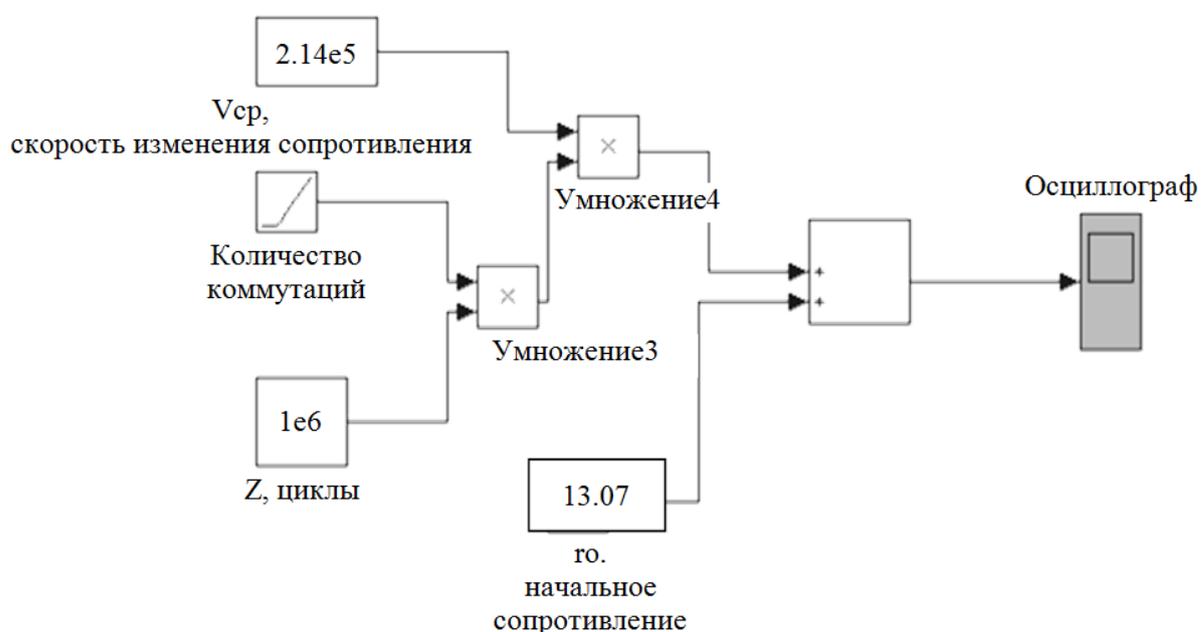


Рисунок 3.9 – Модель для расчета сопротивления контактов

Практическое применение данного метода прогнозирования надежности контактов показано для магнитных пускателей, контакторов, автоматических выключателей на разные номинальные токи [32; 33].

3.3.2 Реализация алгоритма оценки характеристик эффективности функционирования низковольтных аппаратов. Магнитные пускатели. Выборка начальных сопротивлений контактов магнитных пускателей составлена на основе магнитных пускателей серии ПМЛ [32; 33].

Алгоритм расчета представлен для магнитного пускателя серии ПМЛ,  $I_{НОМ} = 63$  А. В таблице 3.7 указаны начальные значения сопротивления контактов пускателей и критические значения контактного сопротивления, определенные по выражению (3.9) и данным таблицы 3.5.

Таблица 3.7

Данные для расчета надежности магнитных пускателей ПМЛ

№	Тип магнитного пускателя	Номинальный ток $I_H$ , А	Начальное сопротивление $r_0$ , мОм	Критическое значение сопротивления $r_{кр}$ , мОм	Скорость изменения сопротивления $v$ , мОм/цикл
1	ПМЛ	63	13,1	39,3	$1,14 \cdot 10^{-5}$
2			13,2	39,6	$2,14 \cdot 10^{-5}$
3			13,1	39,3	$1,14 \cdot 10^{-5}$
4			13,1	39,3	$1,14 \cdot 10^{-5}$
5			13,1	39,3	$1,14 \cdot 10^{-5}$
6			13,7	41,1	$7,14 \cdot 10^{-5}$
7			13,4	40,2	$4,14 \cdot 10^{-5}$
8			13,1	39,3	$1,14 \cdot 10^{-5}$
9			13,1	39,3	$1,14 \cdot 10^{-5}$
10			13,1	39,6	$1,14 \cdot 10^{-5}$

Выборочная средняя величина начального сопротивления магнитного пускателя определяется по выражению

$$\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} = 13,2 \text{ мОм.}$$

Среднее квадратическое отклонение выборки сопротивлений магнитного пускателя

$$\sigma_{\text{м.в}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n-1}} = 0,2.$$

Ордината полюса принимается равной  $r_{\text{о.ср}}$  по выражению (3.12)

$$r_{\text{о.ср}} = \bar{r} + k \cdot \sigma_{\text{м.в}} = 13,2 + 0,65 \cdot 0,2 = 14,3 \text{ мОм.}$$

Среднее критическое сопротивление  $r_{\text{кр}}$

$$\bar{r}_{\text{кр}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{i\text{кр}}}{n} = 39,6 \text{ мОм.}$$

Скорость изменения сопротивления контактов магнитного пускателя определяем по выражению (3.18)

$$v = \frac{r - r_{\text{о.ср}}}{z} = 1,14 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/цикл.}$$

Выборочная средняя величина скорости изменения сопротивления магнитного пускателя определяется по равенству

$$v_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} = 2,14 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/цикл.}$$

Среднее квадратическое отклонение скорости изменения сопротивлений магнитного пускателя

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_{cp})^2}{n-1}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом/цикл.}$$

Вычисляем коэффициенты вариации скорости и начального сопротивления соответственно  $S$  и  $S_1$ , т.е.

$$S = \frac{\sigma_v}{v_{cp}} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{2,14 \cdot 10^{-5}} = 0,93;$$

$$S_1 = \frac{\sigma_{M.B.}}{r_{o.cp}} = \frac{0,2}{13,07} = 0,015;$$

$$\theta_1 = \frac{3S_1 \cdot r_{o.cp}}{v_{cp}} = \frac{3 \cdot 0,015 \cdot 13,07}{2,14 \cdot 10^{-5}} = 2,8 \cdot 10^4;$$

$$\theta_2 = \frac{r_{кр} - r_{o.cp}}{v_{cp}} = \frac{39,6 - 13,07}{2,14 \cdot 10^{-5}} = 1,24 \cdot 10^6.$$

Вероятность времени безотказной работы пускателей находим из уравнения

$$P(z_1) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\pi^2}} \left\{ \frac{\theta_1}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{\theta_1}{z}}{S} \right)^2 \right] + \frac{\theta_2}{S} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - \frac{\theta_2}{z}}{S} \right)^2 \right] \right\} =$$

$$\begin{aligned}
&= 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}(1^5)^2} \left\{ \frac{2,8 \cdot 10^4}{0,93} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{2,8 \cdot 10^4}{10^5}}{0,93} \right)^2 \right] + \right. \\
&\left. + \frac{1,24 \cdot 10^6}{0,93} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - \frac{1,24 \cdot 10^6}{10^5}}{0,93} \right)^2 \right] \right\} = 0,96.
\end{aligned}$$

Расчет данных для построения зависимости вероятности времени безотказной работы магнитных пускателей серии ПМЛ (с номинальными токами  $I_H = 40 \text{ A}$  и  $80 \text{ A}$ ) от количества коммутационных циклов проводится аналогично.

В таблице 3.8 представлены данные для построения зависимости вероятности времени безотказной работы контактов магнитных пускателей серии ПМЛ ( $I_H = 40 \text{ A}$  и  $80 \text{ A}$ ) от количества коммутационных циклов. Зависимость определяется по выражению (3.25) и представлена на рисунке 3.10 (кривые 4 и 6).

По данным таблицы 3.8 построена приблизительная зависимость среднего сопротивления и вероятности времени безотказной работы контактов магнитных пускателей от количества коммутационных циклов – рисунок 3.10 (кривые 1, 2, 3). Графики показывают, что сопротивление контактов в начальный период эксплуатации меняется медленно, а затем по мере износа увеличивается практически до критического значения [33]. На графиках (рисунок 3.10) по оси абсцисс отложено число включений и отключений (циклов) магнитных пускателей за время эксплуатации, по оси ординат отложены значения вероятности времени безотказной работы и значения сопротивления контактов магнитных пускателей во время эксплуатации.

Зависимость вероятности времени безотказной работы  
контактов магнитных пускателей от количества коммутационных циклов

Тип магнитного пускателя	S	S <sub>1</sub>	$\theta_1, 10^6$	$\theta_2, 10^6$	$z \cdot 10^6$ , циклов	P(z)
ПМЛ $I_H = 40 \text{ A}$	0,81	0,01	0,027	1,68	1	0,98
					2	0,92
					3	0,85
					4	0,78
					5	0,73
					6	0,58
					7	0,42
					8	0,40
					9	0,37
					10	0,35
ПМЛ $I_H = 63 \text{ A}$	0,93	0,01	0,028	1,24	1	0,98
					2	0,93
					3	0,87
					4	0,79
					5	0,74
					6	0,59
					7	0,43
					8	0,42
					9	0,40
					10	0,38
ПМЛ $I_H = 80 \text{ A}$	0,52	0,006	0,002	2,7	1	0,99
					2	0,95
					3	0,91
					4	0,85
					5	0,77
					6	0,63
					7	0,46
					8	0,44
					9	0,42
					10	0,40

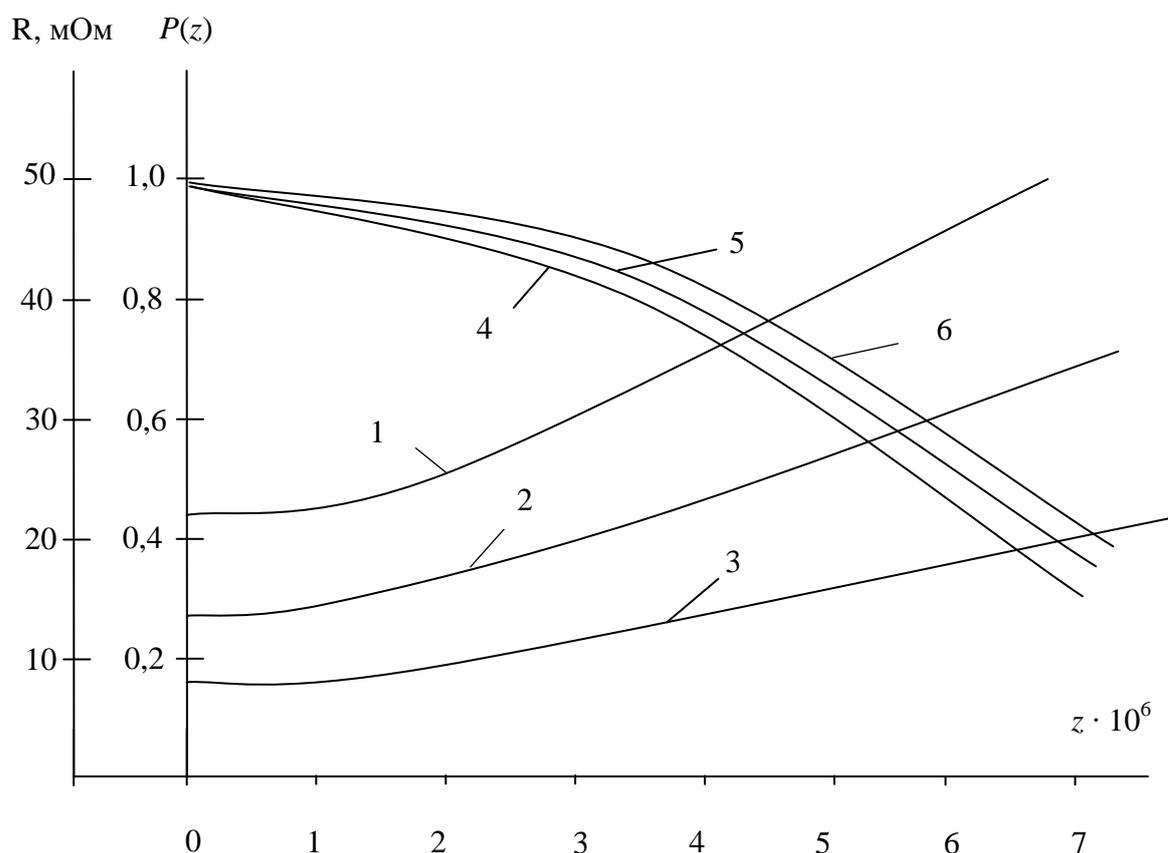


Рисунок 3.10 – Зависимость сопротивления контактов магнитных пускателей от количества коммутационных циклов: 1 – ПМЛ ( $I_H = 40$  А), 2 – ПМЛ ( $I_H = 63$  А), 3 – ПМЛ ( $I_H = 80$  А); зависимость вероятности времени безотказной работы контактов магнитных пускателей от количества коммутационных циклов: 4 – ПМЛ ( $I_H = 40$  А), 5 – ПМЛ ( $I_H = 63$  А), 6 – ПМЛ ( $I_H = 80$  А)

Контакторы. Выборка начальных сопротивлений контактов контакторов составлена для контакторов серий КП1 и КТПВ600. Алгоритм расчета аналогичен, как и для магнитных пускателей.

Данные для построения зависимости вероятности времени безотказной работы контакторов от количества коммутационных циклов рассчитываются аналогично, как и для магнитных пускателей. Графики, показывающие данную зависимость и приблизительную зависимость среднего сопротивления контактов контакторов от количества коммутационных циклов представлены на рисунке 3.11.

На графике (рисунок 3.11) по оси абсцисс отложено число включений и отключений (циклов) контакторов за время эксплуатации.

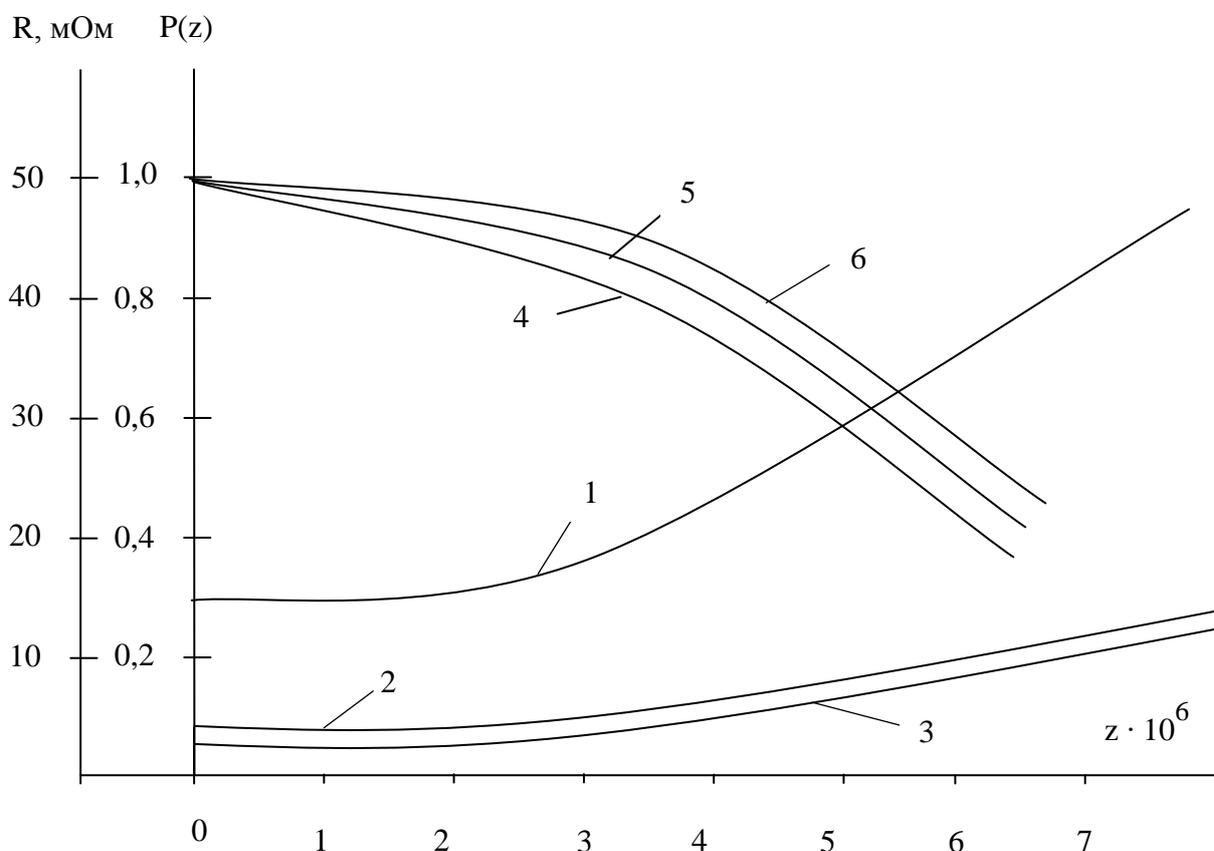


Рисунок 3.11 – Зависимость сопротивления контакторов от количества коммутационных циклов: 1 – КП1 ( $I_H = 20$  А), 2 – КТПВ600 ( $I_H = 63$  А), 3 – КП1 ( $I_H = 75$  А); зависимость вероятности времени безотказной работы контактов контакторов от количества коммутационных циклов:

4 – КП1 ( $I_H = 20$  А), 5 – КТПВ600 ( $I_H = 63$  А), 6 – КП1 ( $I_H = 75$  А)

Автоматические выключатели. Выборка начальных сопротивлений контактов автоматических выключателей составлена для автоматических выключателей серии АЕ, ВА-51 и ВА-57.

Данные для построения зависимости вероятности времени безотказной работы автоматических выключателей от количества коммутационных циклов рассчитываются аналогично, как и для магнитных пускателей. Графики, пока-

зывающие данную зависимость и приблизительную зависимость среднего сопротивления контактов автоматических выключателей от количества коммутационных циклов, представлены на рисунке 3.12.

На графике (рисунок 3.12) по оси абсцисс отложено число включений и отключений (циклов) автоматических выключателей за время эксплуатации.

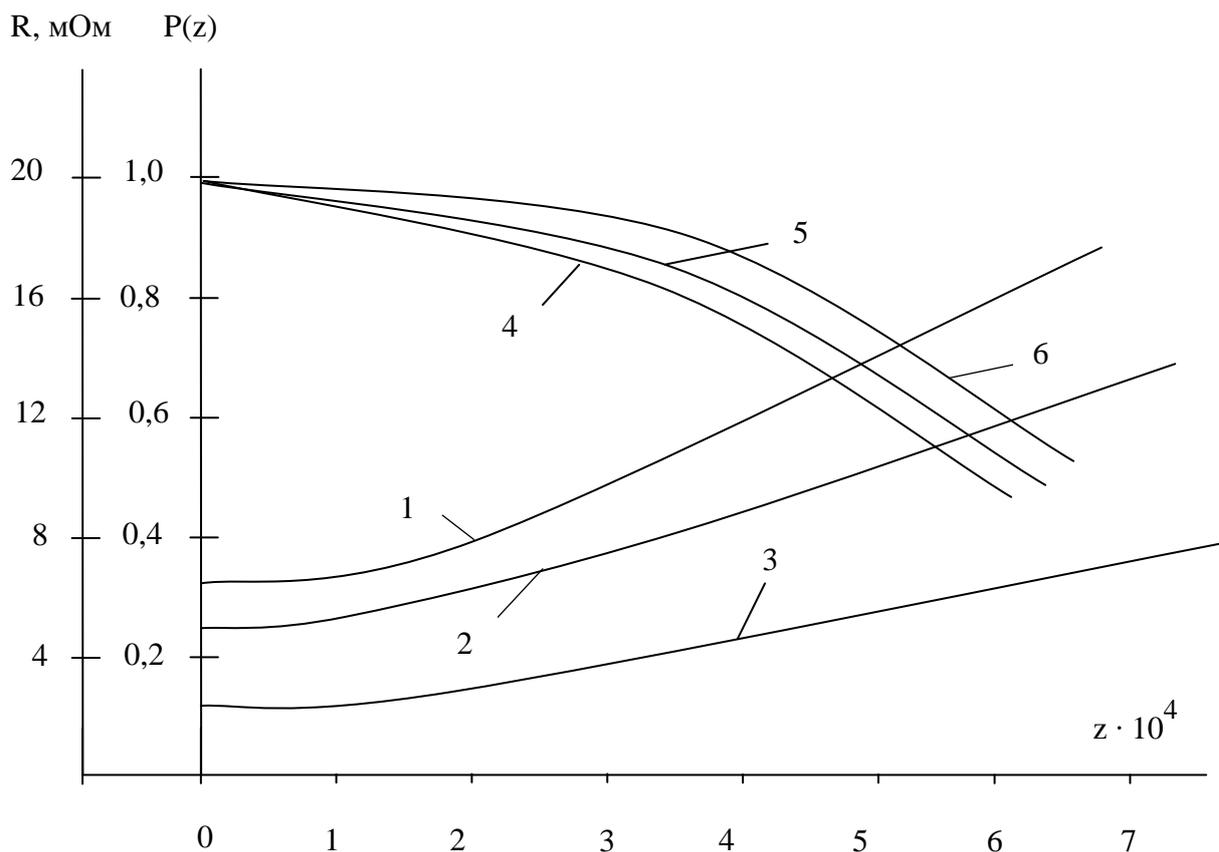


Рисунок 3.12 – Зависимость сопротивления контактов автоматических выключателей от количества коммутационных циклов: 1 – АЕ2443 ( $I_H = 50$  А), 2 – ВА-51 ( $I_H = 63$  А), 3 – ВА-57 ( $I_H = 100$  А); зависимость вероятности времени безотказной работы контактов автоматических выключателей от количества коммутационных циклов: 4 – АЕ2443 ( $I_H = 50$  А), 5 – ВА-51 ( $I_H = 63$  А), 6 – ВА-57 ( $I_H = 100$  А)

3.3.3 Оценка функциональных параметров некоторых российских и зарубежных аппаратов. По результатам экспериментальных исследований установ-

лено, что для автоматических выключателей ИЕК скорость изменения сопротивления будет находиться, как

$$v = \frac{dR}{dz} = (-3,704 \cdot e^{-0,06I_{\text{НОМ}}} + 0,06)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} < 60\text{А};$$

$$v = \frac{dR}{dz} = (-0,0794 \cdot e^{-0,01I_{\text{НОМ}}} + 0,00175)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} > 60 \text{ А.} \quad (3.26)$$

Графически изменение вероятности времени безотказной работы и сопротивления контактов показано на рисунке 3.13.

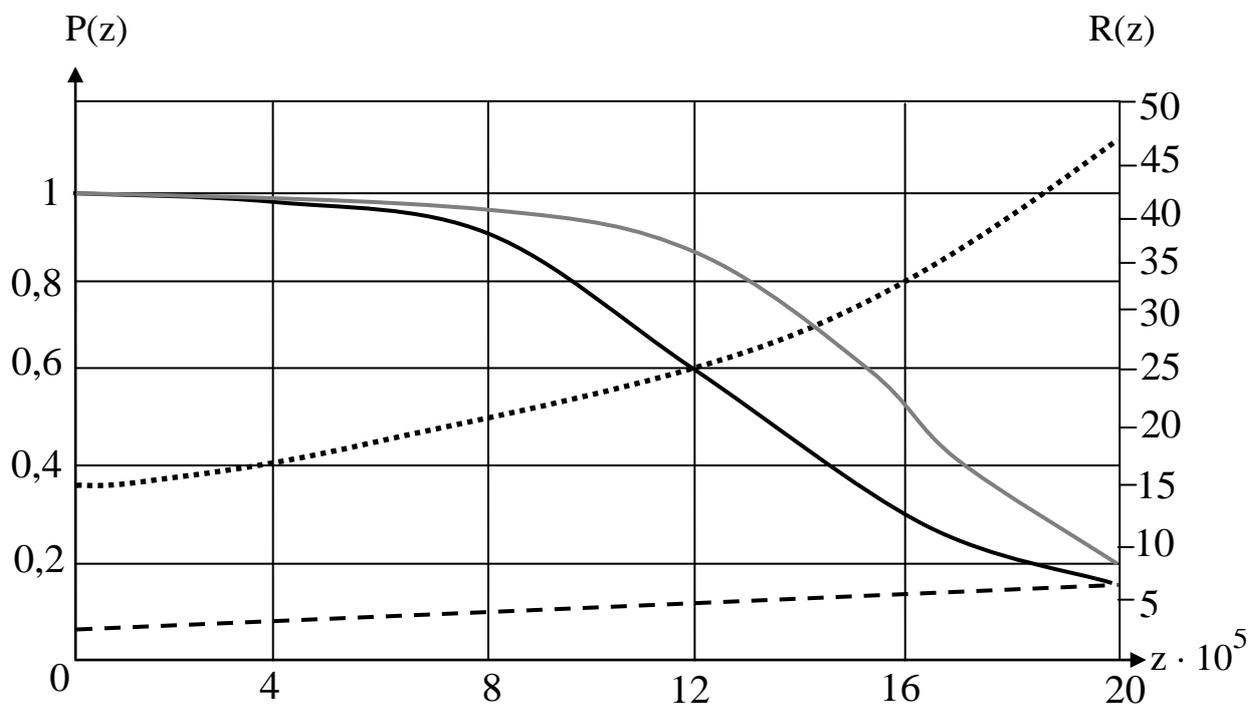


Рисунок 3.13 – Графики вероятности времени безотказной работы  $P(z)$  и сопротивления контактов  $R(z)$  автоматических выключателей ИЕК с  $I_{\text{НОМ}} = 50 \text{ А}$  и  $200 \text{ А}$ :  
 $P(z)$  50 А ( — ), 200 А ( — );  $R(z)$  50А ( ..... ), 200 А ( - - - )

Для автоматических выключателей АВВ скорость изменения сопротивления по результатам исследований имеет следующий вид

$$v = \frac{dR}{dz} = (-2,5 \cdot e^{-0,05I_{\text{НОМ}}} + 0,04)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} < 60 \text{ А};$$

$$v = \frac{dR}{dz} = (-0,062 \cdot e^{-0,01I_{\text{НОМ}}} + 0,001)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} > 60 \text{ А.} \quad (3.27)$$

Графически изменение вероятности времени безотказной работы и сопротивления контактов будет представлено на рисунке 3.14.

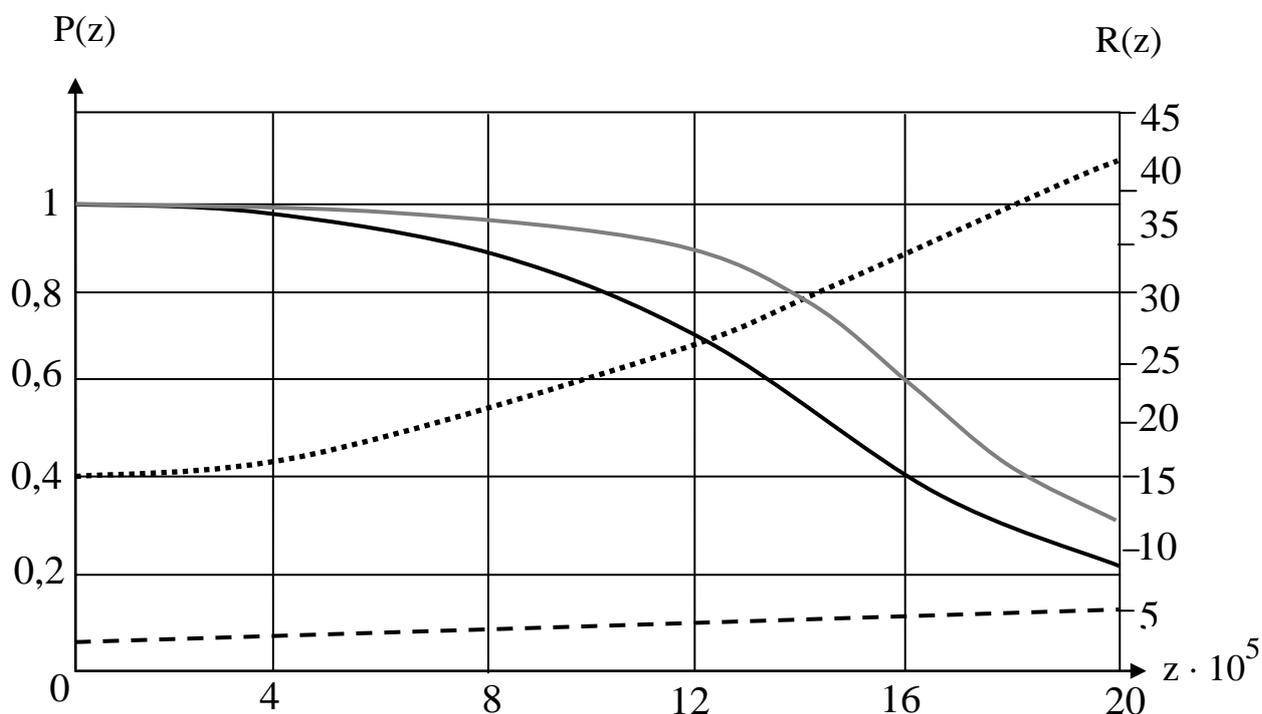


Рисунок 3.14 – Графики вероятности времени безотказной работы  $P(z)$  и сопротивления контактов  $R(z)$  автоматических выключателей АВВ

с  $I_{\text{НОМ}} = 50 \text{ А}$  и  $200 \text{ А}$ :

$P(z)$  50 А ( — ), 200 А ( — );  $R(z)$  50А ( ······ ), 200 А ( - - - )

Наиболее распространенными характеристиками случайной величины  $X$  (в данном случае сопротивления  $R$ ) являются математическое ожидание (среднее значение)  $m_x$  и среднеквадратичное отклонение

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}{n-1}},$$

где  $x_i$  – значение величины  $X$ ;  $n$  – число значений.

Минимальный объем выборки, достаточный для определения математического ожидания сопротивления контактов с заданной точностью  $\Delta$ , %, и достоверностью  $P$ , определяют по выражению

$$\omega = \left( \frac{t\gamma_x \cdot 100}{\Delta} \right)^2,$$

где  $t$  – параметр, зависящий от желаемого значения  $P$  (при  $P = 0,95$ ,  $t = 2$ );

$\gamma_x$  – коэффициент вариации величины  $X$ , определяемый по формуле

$$\gamma_x = \sigma_x / m_x.$$

Проверим достоверность результатов сопротивления контактных соединений по минимальному объему выборки, чтобы с вероятностью 0,95 погрешность  $\Delta$  не превышала 5 %.

В этом случае математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение сопротивления будут принимать значения (рисунок 3.13):

$$M[\Delta_{\text{IEK}}] = 84 \text{ мОм}; \quad \sigma[\Delta R_{\text{IEK}}] = 20,16 \text{ мОм},$$

откуда  $\gamma[\Delta R_{\text{IEK}}] = 0,24$ .

Определяем объем выборки, необходимый для обеспечения погрешности 5 %:

$$\omega = \left( \frac{2 \cdot 0,24 \cdot 100}{5} \right)^2 = 92.$$

Следовательно, минимальный объем выборки необходимый для показателей достоверности  $P = 0,95$  составляет 92 аппарата, исследованное же количество автоматических выключателей фирмы IEK составляет более 300 аппаратов.

Для аппаратов АВВ аналогично высчитывается минимальный объем выборки:  $\omega = \left( \frac{2 \cdot 0,21 \cdot 100}{5} \right)^2 = 72$ , т. е. для показателей достоверности  $P = 0,95$  необходимо 72 аппарата, исследованное количество автоматических выключателей фирмы АВВ составляет более 200 аппаратов.

Для магнитных пускателей IEK по данным исследований скорость изменения сопротивления будет находиться, как

$$v = \frac{dR}{dz} = (-3,956 \cdot e^{-0,045I_{\text{НОМ}}} + 0,112)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} < 70 \text{ А};$$

$$v = \frac{dR}{dz} = (-0,2083 \cdot e^{-0,01I_{\text{НОМ}}} + 0,006)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} > 70 \text{ А.} \quad (3.28)$$

Графически изменение вероятности времени безотказной работы и сопротивления контактов показано на рисунке 3.15.

Для магнитных пускателей АВВ по результатам исследований скорость изменения сопротивления находится

$$v = \frac{dR}{dz} = (-3,2 \cdot e^{-0,04I_{\text{НОМ}}} + 0,1)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} < 70 \text{ А};$$

$$v = \frac{dR}{dz} = (-0,175 \cdot e^{-0,01I_{\text{НОМ}}} + 0,005)z \text{ при } I_{\text{НОМ}} > 70 \text{ А.} \quad (3.29)$$

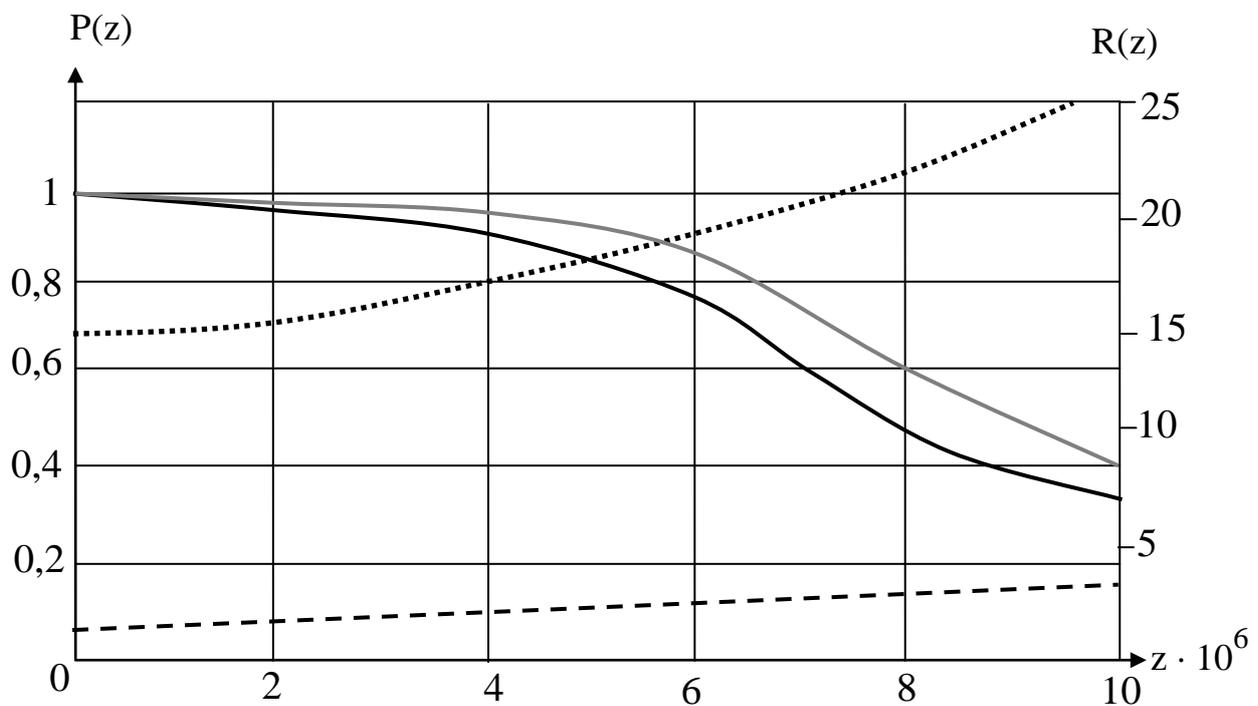


Рисунок 3.15 – Графики вероятности времени безотказной работы  $P(z)$  и сопротивления контактов  $R(z)$  магнитных пускателей IEK с  $I_{НОМ} = 50$  А и 200 А:

$P(z)$  50 А ( — ), 200 А ( — );  $R(z)$  50А ( ······ ), 200 А ( - - - )

Графически изменение вероятности времени безотказной работы и сопротивления контактов представлено на рисунке 3.16.

Для магнитных пускателей, аналогично автоматическим выключателям, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение сопротивления будут принимать значения

$$M[\Delta R_{IEK}] = 102 \text{ мОм}; \quad \sigma[\Delta R_{IEK}] = 21,5 \text{ мОм},$$

откуда  $\gamma[\Delta R_{IEK}] = 0,21$ .

Определяем объем выборки, необходимый для обеспечения погрешности 5 %:

$$\omega = \left( \frac{2 \cdot 0,21 \cdot 100}{5} \right)^2 = 71.$$

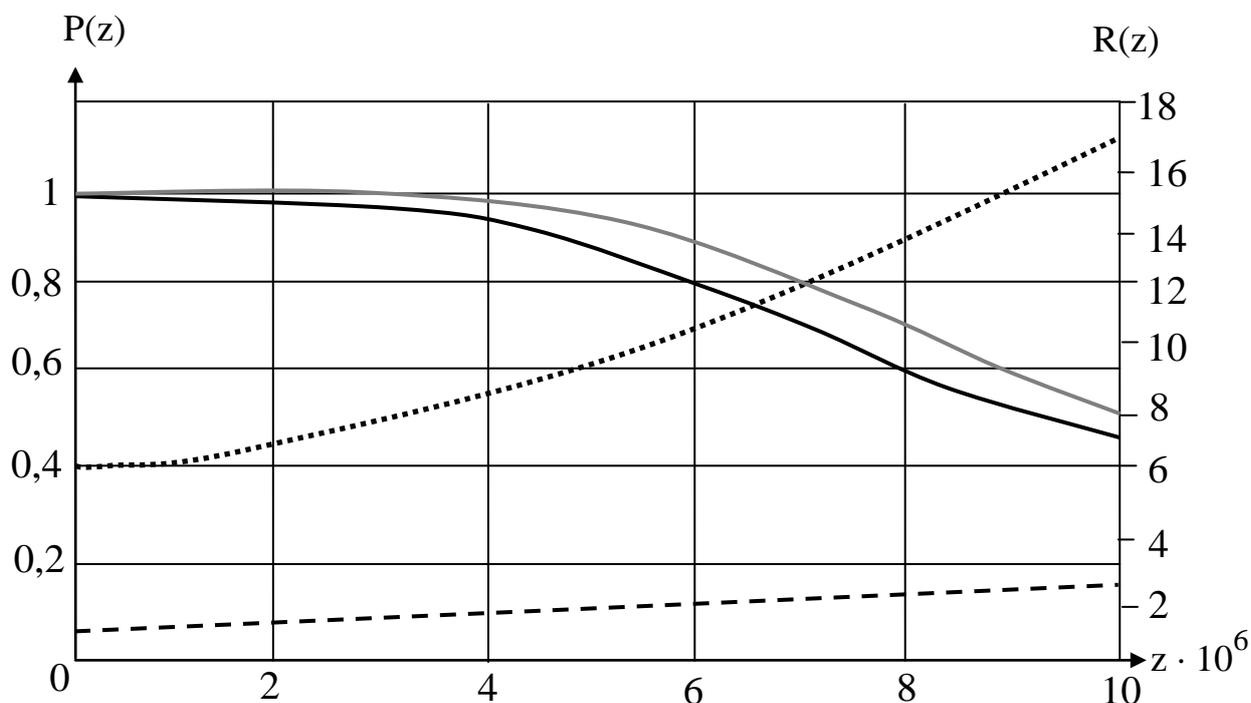


Рисунок 3.16 – Графики вероятности времени безотказной работы  $P(z)$  и сопротивления  $R(z)$  контактов магнитных пускателей АВВ с  $I_{НОМ} = 50$  А:  
 $P(z)$  50 А ( — ), 200 А ( — );  $R(z)$  50А ( ······ ), 200 А ( - - - )

Следовательно, минимальный объем выборки необходимый для показателей достоверности  $P = 0,95$  составляет 71 аппарат, исследованное количество магнитных пускателей фирмы ИЕК составляет более 200 аппаратов.

Для магнитных пускателей фирмы АВВ минимальный объем выборки составил 64 аппарата ( $\omega = \left( \frac{2 \cdot 0,20 \cdot 100}{5} \right)^2 = 64$ ), исследовано более 170 аппаратов.

Как показали результаты исследований, пределы изменения сопротивлений контактных систем и вероятности безотказной работы автоматических выключателей и магнитных пускателей марок ИЕК и АВВ примерно равны.

Таким образом, представленный метод оценки функциональных параметров позволяет прогнозировать надежность низковольтных аппаратов по результатам изменения сопротивлений их контактных соединений.

Как отмечалось выше, в процессе эксплуатации коммутационных аппаратов происходит износ их контактов, за счет чего увеличивается эквивалентное

сопротивление. Естественно, что этот процесс постепенный и сопротивление в данном случае рассматривается как величина, зависящая от множества факторов: износ при замыкании и размыкании, влияние тока и материала контактов, влияние среды, влияние частоты операций, влияние кривизны контактной поверхности, места контактирования, нажатия, массы контактов и скорости их сближения на износ при замыкании и др. Эти и многие другие факторы по-разному изменяются при эксплуатации коммутационного аппарата, но в совокупности они влияют на сопротивление контактов, и вероятность времени безотказной работы, изменения которых представлено на графиках рисунков 3.7-3.13.

Естественно, что с увеличением сопротивления контактов растут и потери в коммутационных аппаратах, установленных на линии.

Например, потери мощности в автоматическом выключателе АЕ-2443 ( $I_{\text{НОМ}} = 50 \text{ А}$ ) при загрузке аппарата номинальным током при начальном сопротивлении  $r_{\text{нач}} = 7 \text{ мОм}$  составили 5,2 Вт, а для сопротивления  $r_{\text{кр}} = 21 \text{ мОм}$  – 15,6 Вт.

Износ контактов ведет к снижению надежности работы коммутационных аппаратов, и к росту потерь мощности в них. Это является важным при определении показателей эффективности функционирования цеховых сетей.

### 3.4 Расчетный метод определения сопротивления контактов и температуры контактных площадок аппаратов

В ходе экспериментов в результате проведенных исследований [33, 122] установлены размеры контактов аппаратов. Используя размеры контактов аппаратов, определим сопротивление контактов в зависимости от номинального тока и коэффициента загрузки [33]:

$$R_{\text{к.с}} = \frac{2\sqrt{\lambda f k_T S}}{(I_H \cdot k_3)^2} \cdot \left( \theta_K - \frac{(I_H \cdot k_3)^2 \rho (1 + \alpha \vartheta_K)}{k_T f S} \right), \quad (3.30)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность материала проводника, для меди  $\lambda = 390$  Вт/(м · К);  $f$  – поверхность охлаждения, м<sup>2</sup> ( $f = 2(c + d) \cdot 1 \cdot 10^{-3}$  при прямоугольной поверхности;  $f = 2\pi r \cdot 1 \cdot 10^{-3}$  при круглой поверхности);  $k_T$  – коэффициент теплоотдачи, для меди  $k_T = 16$  Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $S$  – контурная площадка касания контактных соединений, м<sup>2</sup> ( $S = c \cdot d$  для прямоугольной поверхности;  $S = \pi r^2$  для круглой поверхности);  $I_H$  – номинальный ток аппарата, А;  $k_3$  – коэффициент загрузки;  $\vartheta_K$  – температура контактных площадок;  $\theta_K$  – допустимый перепад температуры контакта над температурой окружающей среды,  $\theta_K = 45$  °С;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, для меди  $\rho = 1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, для меди  $\alpha = 0,0043$ .

Следует иметь в виду, что формула (3.30) получена для слаботочных контактов коммутационных аппаратов.

Температура контактных площадок:

$$\vartheta_K = \frac{(I_H \cdot k_3)^2 \cdot \rho + \vartheta_0 \cdot k_T \cdot f \cdot S}{k_T \cdot S \cdot f - (I_H \cdot k_3)^2 \cdot \rho \cdot \alpha}, \quad (3.31)$$

где  $\vartheta_0$  – температура окружающей среды,  $\vartheta_0 = 25$  °С.

Результаты расчетов представлены в таблице 3.9.

Основными вопросами управления электросетевыми и промышленными компаниями являются обеспечение качества энергии, бесперебойного электропитания и надежности сети. Многие компании направляют усилия на оптимизацию оперативно-диспетчерского управления и сокращение расходов на всем сроке службы компонентов сети. Поэтому важной составляющей этой деятельности является анализ постоянных затрат вследствие износа сетей [41].

Результаты расчета параметров контактов автоматических выключателей, контакторов и магнитных пускателей

		Номинальный ток $I_N$ , А	Размеры контактов	Температура контактов $\vartheta_K$ , °С	Сопротивление контактов $R_K$ , мОм
Автоматический выключатель	ВА-51	6	c = 2,8 мм, d = 2,8 мм	35,2	80
	ВА-51	10	c = 2,8 мм, d = 2,8 мм	35,7	43
	ВА-51	16	c = 2,8 мм, d = 2,8 мм	36,8	18
	ВА-51	25	c = 2,8 мм, d = 2,8 мм	36,7	13
	ВА-51	32	c = 3,8 мм, d = 3,8 мм	37,9	11
	ВА-51	40	c = 3,8 мм, d = 3,8 мм	39,5	9
	ВА-51	50	c = 3,8 мм, d = 3,8 мм	42,1	8
	ВА-51	63	c = 3,8 мм, d = 3,8 мм	46,4	7
	ВА-51	100	c = 6 мм, d = 6,2 мм	41,8	5
	ВА-88	400	c = 9 мм, d = 9,5 мм	69,6	2
Контактор	КМИ	25	c = 12 мм, d = 16 мм	35,0	15
	КМИ	40	c = 12 мм, d = 16 мм	35,1	11
	КТИ	250	c = 10 мм, d = 20 мм	38,2	4
	КТИ	400	c = 17 мм, d = 20 мм	38,9	1,2
Магнитный пускатель	ПМЛ	4	r = 3 мм	35,0	250
	ПМЛ	25	r = 4 мм	35,3	38
	ПА	40	c = 8,1 мм, d = 8,1 мм	35,5	27
	ПА	60	c = 12 мм, d = 12 мм	35,3	15

Анализ надежности распределительных сетей требует большого количества статистических данных. При исследовании надежности необходима различная информация о техническом состоянии низковольтных коммутационных аппаратов, которая также влияет на результаты расчетов (например, температура контактов, сопротивление контактов и контактных соединений аппаратов).

Схема участка цеховой сети представлена на рисунке 3.17.

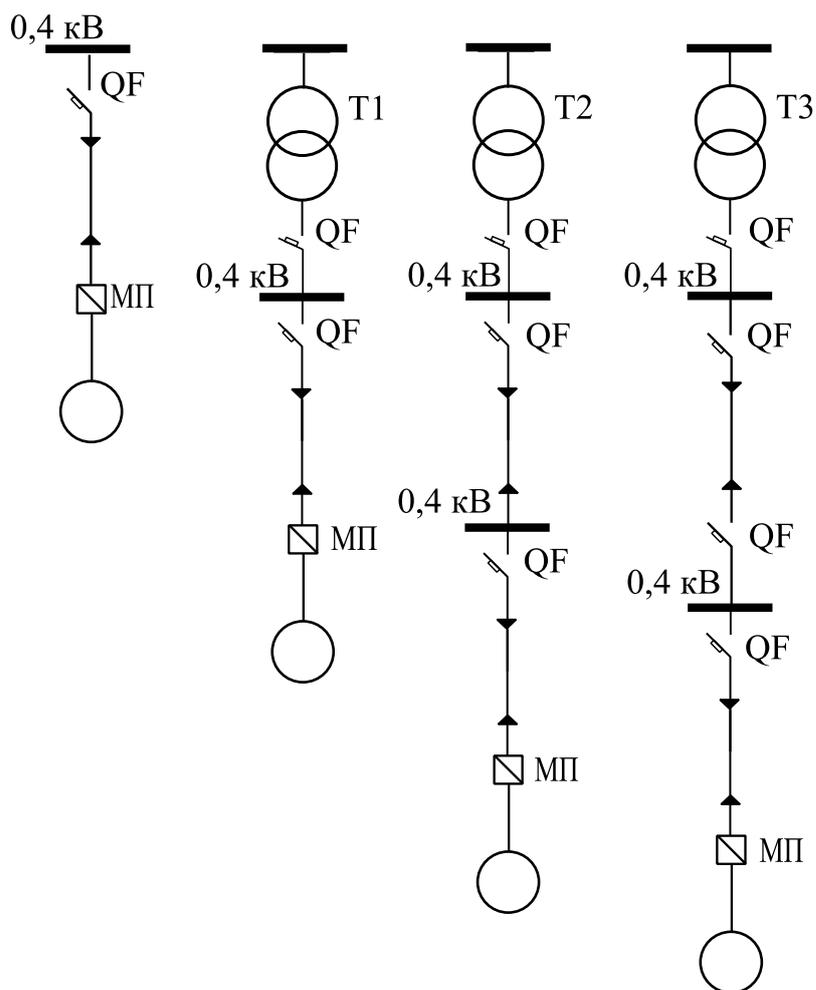


Рисунок 3.17 – Варианты линий цеховых сетей с различным количеством низковольтных коммутационных аппаратов

Учет этих параметров уточняет результаты вычислений. Целесообразным является исследование схем цеховых сетей с различным количеством и типами аппаратов, установленных на линии, длиной кабельных линий и проводов.

## Выводы

1. По результатам тепловизионных обследований в качестве критерия оценки технического состояния и эксплуатационной надежности низковольтных коммутационных аппаратов предложена величина коэффициента превышения сопротивления контактных соединений аппаратов.

2. По условиям технической эксплуатации и экспериментальным исследованиям обоснованы допустимые кратности превышения сопротивления контактных соединений по отношению к начальному значению сопротивлений новых аппаратов по достижению предельно допустимой температуры нагрева контактов: для автоматических выключателей в 2,7 раза; для контакторов в 2,8 раза; для магнитных пускателей в 3 раза; для рубильников в 2,1 раза; для пакетных выключателей в 1,9 раза, позволяющие оценивать техническое эксплуатационное состояние низковольтных коммутационных аппаратов и предотвращать развитие дефектов коммутационной аппаратуры и аварийные ситуации, а также использовать предлагаемый критерий в качестве дополнительного регламента сроков проводимых обследований коммутационной аппаратуры.

3. Разработан алгоритм и метод комплексной оценки и повышения эффективности функционирования низковольтных аппаратов и выявлены законы изменения вероятности времени безотказной работы и сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов цеховых сетей в зависимости от режимов эксплуатации с учетом их технического состояния.

4. Реализован разработанный алгоритм, позволяющий уточнять функциональные параметры низковольтных коммутационных аппаратов – вероятность времени безотказной работы и сопротивление контактных соединений и управлять режимами эксплуатации систем внутрицехового электроснабжения.

## 4 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

### 4.1 Оценка вероятностей состояния системы электроснабжения

Рассмотрим модели надежности электрооборудования СЭС с восстановлением и профилактикой. Установка из одного элемента с профилактикой и восстановлением в любой момент времени может находиться в одном из трех состояний:  $E_1$  – работоспособное состояние;  $E_0$  – аварийный простой и восстановление;  $E_2$  – плановый простой для профилактического обслуживания или ремонта. Граф переходов из состояния в состояние для такой установки изображен на рисунке 4.1, где  $\lambda$  и  $\lambda_{пл}$  – интенсивность аварийных и плановых отключений, переводящих установку в состояние  $E_0$  или  $E_2$ ;  $\mu$  и  $\mu_{пл}$  – интенсивность восстановления и окончания планового обслуживания, переводящих установку в состояние  $E_1$ .

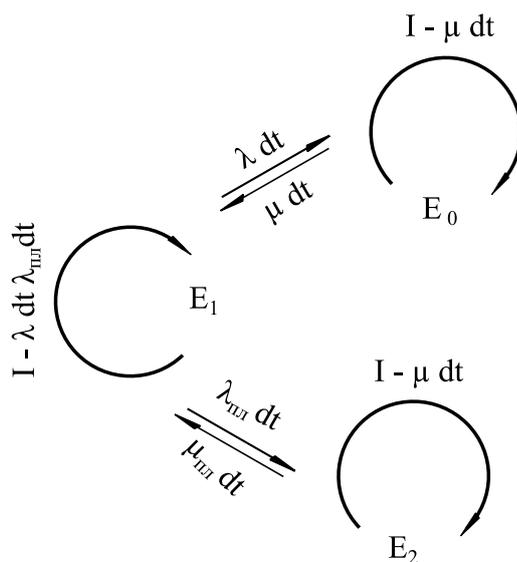


Рисунок 4.1 – Моделирование элементов с восстановлением и профилактикой

Система уравнений для описания вероятностей состояний СЭС, отвечающая этому графу, имеет вид [54]

$$\left. \begin{aligned} P_1'(t) &= -(\lambda + \lambda_{\text{ПЛ}})P_1(t) + \mu P_0(t) + \mu_{\text{ПЛ}}P_2(t); \\ P_0'(t) &= \lambda P_1(t) + \mu P_0(t); \\ P_2'(t) &= \lambda_{\text{ПЛ}}P_1(t) + \mu_{\text{ПЛ}}P_2(t). \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Полагая, что в момент  $t = 0$  элемент работоспособен, т.е.  $P_1(t) = 1$ ,  $P_0(t) = 0$ ,  $P_2(t) = 0$ ,  $P_1(t) + P_2(t) + P_0(t) = 1$ , и применяя преобразование Лапласа, получим

$$\left. \begin{aligned} P_1(t) &= \frac{\mu\mu_{\text{ПЛ}}}{\mu\mu_{\text{ПЛ}} + \lambda\mu_{\text{ПЛ}} + \mu\lambda_{\text{ПЛ}}} + \frac{(\mu + k_1)(\mu_{\text{ПЛ}} + k_1)}{k_1(k_1 + k_2)} \exp k_1 t + \\ &+ \frac{(\mu + k_2)(\mu_{\text{ПЛ}} + k_2)}{k_2(k_1 + k_2)} \exp k_2 t; \\ P_0(t) &= \frac{\lambda\mu_{\text{ПЛ}}}{\mu\mu_{\text{ПЛ}} + \lambda\mu_{\text{ПЛ}} + \mu\lambda_{\text{ПЛ}}} + \frac{\lambda(\mu_{\text{ПЛ}} + k_1)}{k_1(k_1 + k_2)} \exp k_1 t + \\ &+ \frac{\lambda(\mu_{\text{ПЛ}} + k_2)}{k_2(k_1 + k_2)} \exp k_2 t; \\ P_2(t) &= \frac{\mu\lambda_{\text{ПЛ}}}{\mu\mu_{\text{ПЛ}} + \lambda\mu_{\text{ПЛ}} + \mu\lambda_{\text{ПЛ}}} + \frac{\lambda_{\text{ПЛ}}(\mu + k_1)}{k_1(k_1 + k_2)} \exp k_1 t + \\ &+ \frac{\lambda_{\text{ПЛ}}(\mu + k_2)}{k_2(k_1 + k_2)} \exp k_2 t; \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

где

$$k_{1,2} = 0,5[-(\lambda + \lambda_{\text{пл}} + \mu + \mu_{\text{пл}}) \pm \sqrt{(\lambda + \lambda_{\text{пл}} + \mu + \mu_{\text{пл}})^2 + 4(\mu\mu_{\text{пл}} + \lambda\mu_{\text{пл}} + \mu\lambda_{\text{пл}})}]. \quad (4.3)$$

С течением времени начальные условия перестают влиять на распределение вероятностей состояний. Устанавливается равновесный или стационарный режим. Чем больше промежутки времени между отказами по сравнению с временем восстановления, тем скорее установка войдет в стационарный режим. Для элементов СЭС стационарный режим наступает уже при значениях  $t$  от одного месяца до года. Для стационарного режима справедливы соотношения [27]

$$\left. \begin{aligned} P_1(t) &= \frac{\mu\mu_{\text{пл}}}{\mu\mu_{\text{пл}} + \lambda\mu_{\text{пл}} + \mu\lambda_{\text{пл}}} = \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} + \lambda_{\text{пл}}\mu_{\text{пл}}\right)^{-1} = K_{\Gamma}; \\ P_0(t) &= \frac{\lambda\mu_{\text{пл}}}{\mu\mu_{\text{пл}} + \lambda\mu_{\text{пл}} + \mu\lambda_{\text{пл}}} = \lambda\mu \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} + \lambda_{\text{пл}}\mu_{\text{пл}}\right)^{-1} = q_{\text{ав}}; \\ P_2(t) &= \frac{\mu\lambda_{\text{пл}}}{\mu\mu_{\text{пл}} + \lambda\mu_{\text{пл}} + \mu\lambda_{\text{пл}}} = \lambda_{\text{пл}}\mu_{\text{пл}} \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} + \lambda_{\text{пл}}\mu_{\text{пл}}\right)^{-1} = q_{\text{пл}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

где  $K_{\Gamma}$  – коэффициент готовности;  $q_{\text{ав}}$  – вероятность аварийного простоя;  $q_{\text{пл}}$  – вероятность планового простоя.

Приближенно можно принимать  $q_{\text{ав}} = \lambda\tau$ ;  $q_{\text{пл}} = \lambda_{\text{пл}}\tau_{\text{пл}}$ , где  $\tau$  – время аварийного простоя;  $\tau_{\text{пл}}$  – время планового простоя.

Вероятность работоспособного состояния  $P_1$  не есть вероятность безотказной работы  $P(t)$ . Вероятность  $P(t)$  определяется при введении в модель запрета на переход из состояния  $E_0$  в любое другое, т.е. при  $\mu = \mu_{\text{пл}} = \lambda_{\text{пл}} = 0$ . Тогда система уравнений для вероятностей (4.1)

$$\left. \begin{aligned} P_1'(t) &= \mu P_0(t); \\ P_0'(t) &= \lambda P_1(t); \\ P_2'(t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Решая систему при тех же начальных условиях, получим  $P_1(t) = P(t) = \exp(-\lambda t)$ .

Для определения вероятности того, что элемент будет восстановлен за время  $t$ , рассматриваем состояния  $E_0$  и  $E_1$  как поглощающие, т.е. считаем, что  $\lambda = \mu_{пл} = \lambda_{пл} = 0$ . В этом случае система уравнений запишется в виде

$$\left. \begin{aligned} P_1'(t) &= \mu P_0(t); \\ P_0'(t) &= -\mu P_1(t); \\ P_2'(t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

Решая при начальных условиях  $P_0(0) = 1$ ;  $P_1(0) = 0$ ;  $P_2(0) = 0$ , находим  $P_1(t) = 1 - \exp(-\mu t) = V(t)$ , где  $V(t)$  – вероятность того, что система будет отремонтирована в течение времени  $t$  после отказа.

Определим вероятности состояний СЭС при помощи моделирования в программной среде MatLab.

Модель `diff_urav_sost.mld` выполненная в программном комплексе Matlab-Simulink позволяет рассчитать систему дифференциальных уравнений (4.1) с учетом (4.3) для определения вероятностей состояния СЭС.

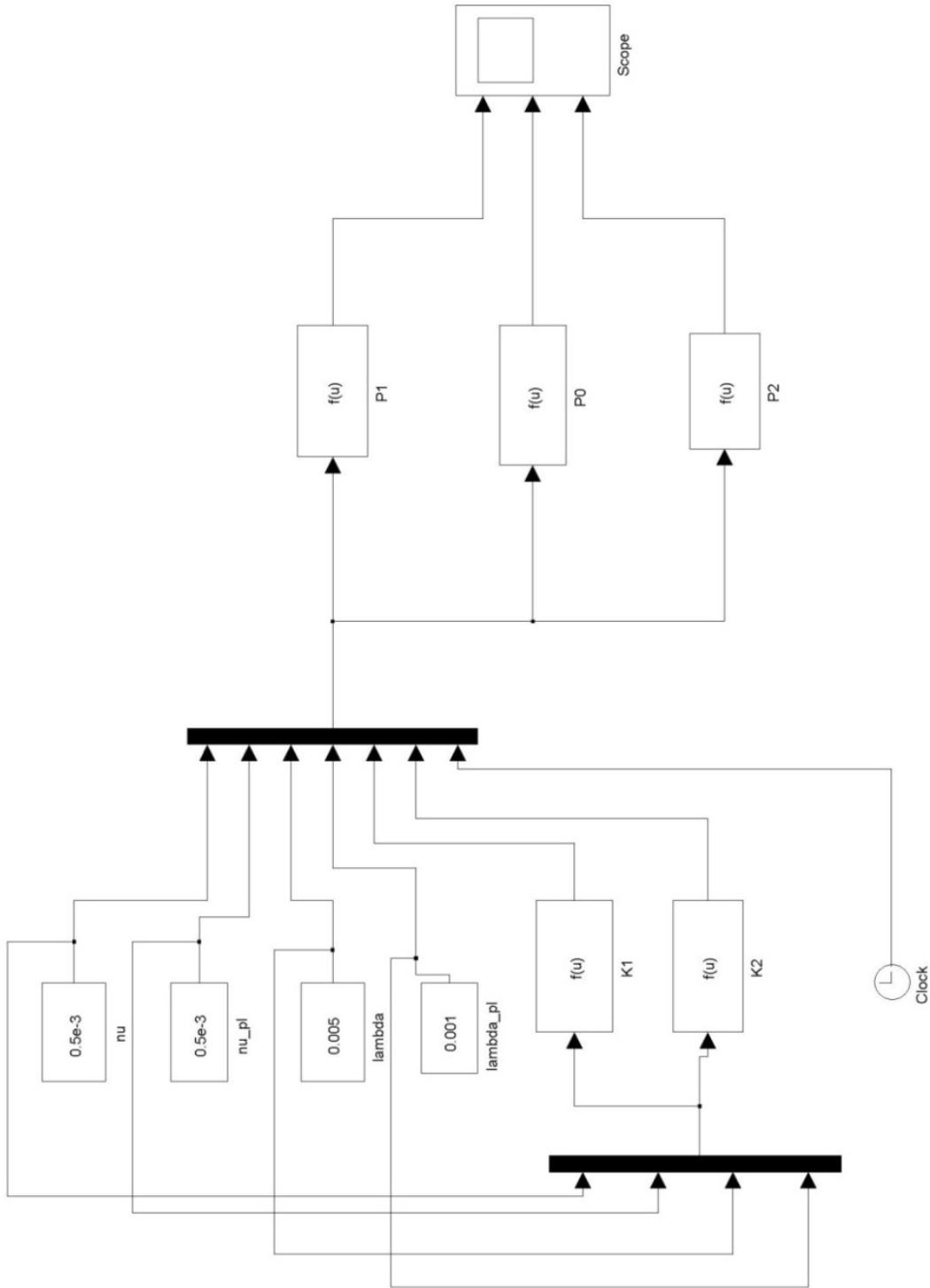


Рисунок 4.2 – Модель расчета вероятностей состояний системы электроснабжения

Модель позволяет задавать значения  $\lambda$ ,  $\lambda_{\text{пл}}$ ,  $\mu$ ,  $\mu_{\text{пл}}$ ,  $k_1$  и  $k_2$  с последующим выводом значений  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ .

Зададим следующие исходные данные:

$$\lambda = 0,005; \lambda_{\text{пл}} = 0,001; \mu = 0,5 \cdot 10^{-3}; \mu_{\text{пл}} = 0,5 \cdot 10^{-3}.$$

Расчет произведен методом Рунге-Кутты, с помощью решателя ode 23tb. Параметры решателя заданы через меню модели Configuration Parameters.

В результате расчетов при данных параметрах значение  $P_1 = 0,77$ ;  $P_2 = 0,07$ ;  $P_0 = 0,14$ .

Таким образом, предлагаемая модель (рисунок 4.2) позволяет рассчитать вероятности состояний системы непосредственно для любого исследуемого временного интервала.

Для последовательного соединения отказ любого элемента является отказом всей установки. На рисунок 4.3 показан граф переходов из состояния в состояние для такой установки. В общем случае  $k \leq n$ , так как возможно совмещение элементов во времени.

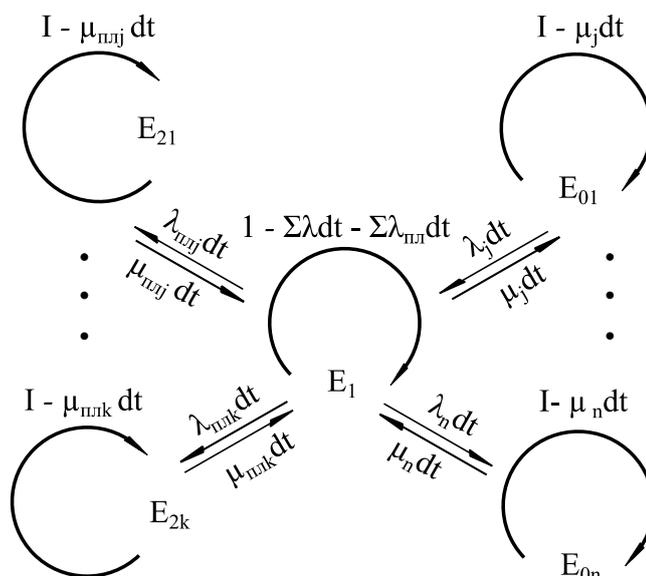


Рисунок 4.3 – Граф модели надежности системы с последовательным соединением элементов, восстановлением и профилактикой

Решением системы дифференциальных уравнений, описывающих такой процесс являются следующие выражения

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \left( 1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i} + \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_{плj}}{\mu_{плj}} \right)^{-1} = K_{\Gamma}; \\ P_0 &= K_{\Gamma} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i} = q_{ав}; \\ P_2 &= K_{\Gamma} \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_{плj}}{\mu_{плj}} = q_{пл}. \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

Приближенно (с погрешностью менее 5 %) для электрооборудования СЭС коэффициент аварийного простоя определяется

$$q_{ав} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \tau_i. \quad (4.8)$$

Для определения вероятности времени безотказной работы система уравнений составляется при условии, что состояние  $E_{0i}$  поглощающее. Полученное решение имеет следующий вид

$$P_i(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right) = P(t), \quad (4.9)$$

откуда

$$\lambda_{ав} = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (4.10)$$

Частота плановых ремонтов для последовательного соединения  $\lambda_{\text{ПЛ}} = m_{\text{Ц}}/T_{\text{Ц}}$ , где  $m_{\text{Ц}}$  – число плановых ремонтов в течение ремонтного цикла,  $T_{\text{Ц}}$  – длительность ремонтного цикла, определяемая как наименьшее общее кратное значений периодичности плановых ремонтов элементов  $T_{\text{ПЛИ}}$ . В свою очередь,  $T_{\text{ПЛИ}} = 1/\mu_{\text{ПЛИ}}$ . Среднее время одного ремонта

$$\tau_{\text{ПЛ}} = \left( \frac{1}{m_{\text{Ц}}} \right) \sum_{i=1}^n \max \tau_{\text{ПЛИ}j}, \quad (4.11)$$

где  $\max \tau_{\text{ПЛИ}j}$  – наибольшее время планового ремонта элемента из отключаемых в  $j$ -м простое.

Коэффициент планового простоя

$$q_{\text{ПЛ}} = \lambda_{\text{ПЛ}} \cdot \tau_{\text{ПЛ}}. \quad (4.12)$$

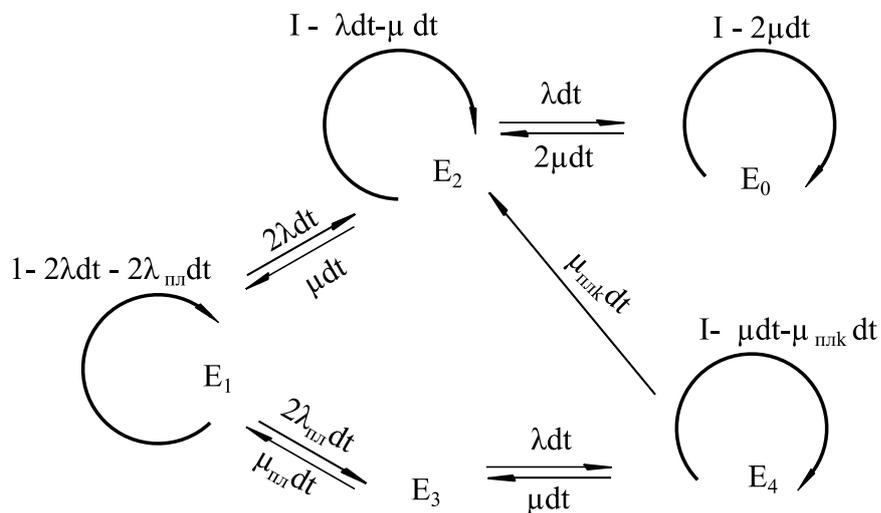


Рисунок 4.4 – Модель системы с восстановлением и профилактикой

Система из параллельных элементов с профилактикой и восстановлением может находиться в одном из пяти состояний:  $E_1$  – оба элемента работоспособ-

ны;  $E_2$  – один элемент в аварийном простое, другой работоспособен;  $E_3$  – один элемент в профилактическом обслуживании или ремонте, другой работоспособен;  $E_4$  – один элемент в профилактическом обслуживании или ремонте, другой в аварийном простое;  $E_0$  – оба элемента в аварийном простое. Моделирование состояний такой системы представлено на рисунке 4.4.

Решая систему дифференциальных уравнений, отвечающих этому графу, имеем

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= \frac{\lambda^2 \mu^2}{\left[ \frac{1 + \lambda_{\text{ПЛ}}}{\lambda + \mu_{\text{ПЛ}} + \mu} \right] P_1}; \\ P_2 &= \frac{2\lambda \lambda_{\text{ПЛ}}}{\left[ \frac{1 + \lambda_{\text{ПЛ}}}{\lambda + \mu_{\text{ПЛ}} + \mu} \right] P_1}; \\ P_3 &= \frac{2\lambda_{\text{ПЛ}} \mu_{\text{ПЛ}}}{\left[ \frac{\mu + \mu_{\text{ПЛ}}}{\lambda + \mu_{\text{ПЛ}} + \mu} \right] P_1} \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

$$P_4 = \left[ 1 + \lambda(2\mu + \lambda)(\lambda + \mu + \lambda_{\text{ПЛ}} + \mu_{\text{ПЛ}})\mu^{-2}(\lambda + \mu + \mu_{\text{ПЛ}})^{-1} + 2\lambda_{\text{ПЛ}}/\mu_{\text{ПЛ}} \right]^{-1}.$$

Для решения задачи анализа систем цехового электроснабжения используется метод эквивалентирования последовательных и дублированных цепей с помощью приведенных формул, получивший (по аналогии с расчетами токов КЗ) название аналитического [69].

## 4.2 Сравнительный анализ методов определения параметров надежности функционирования радиальных схем цеховых сетей

4.2.1 Аналитический метод расчета. Исследуем параметры надежности участка цеховой сети [88]. Для первой и второй секций шин (I СШ и II СШ) схемы (рисунок 4.5) определим интенсивность отказов и среднюю вероятность отказа. Исходные данные расчетной схемы приведены в таблице 4.1. Исследуем надежность схемы относительно:

- распределительного шкафа (ШР) и распределительного пункта (ПР);
- каждого присоединения в отдельности.

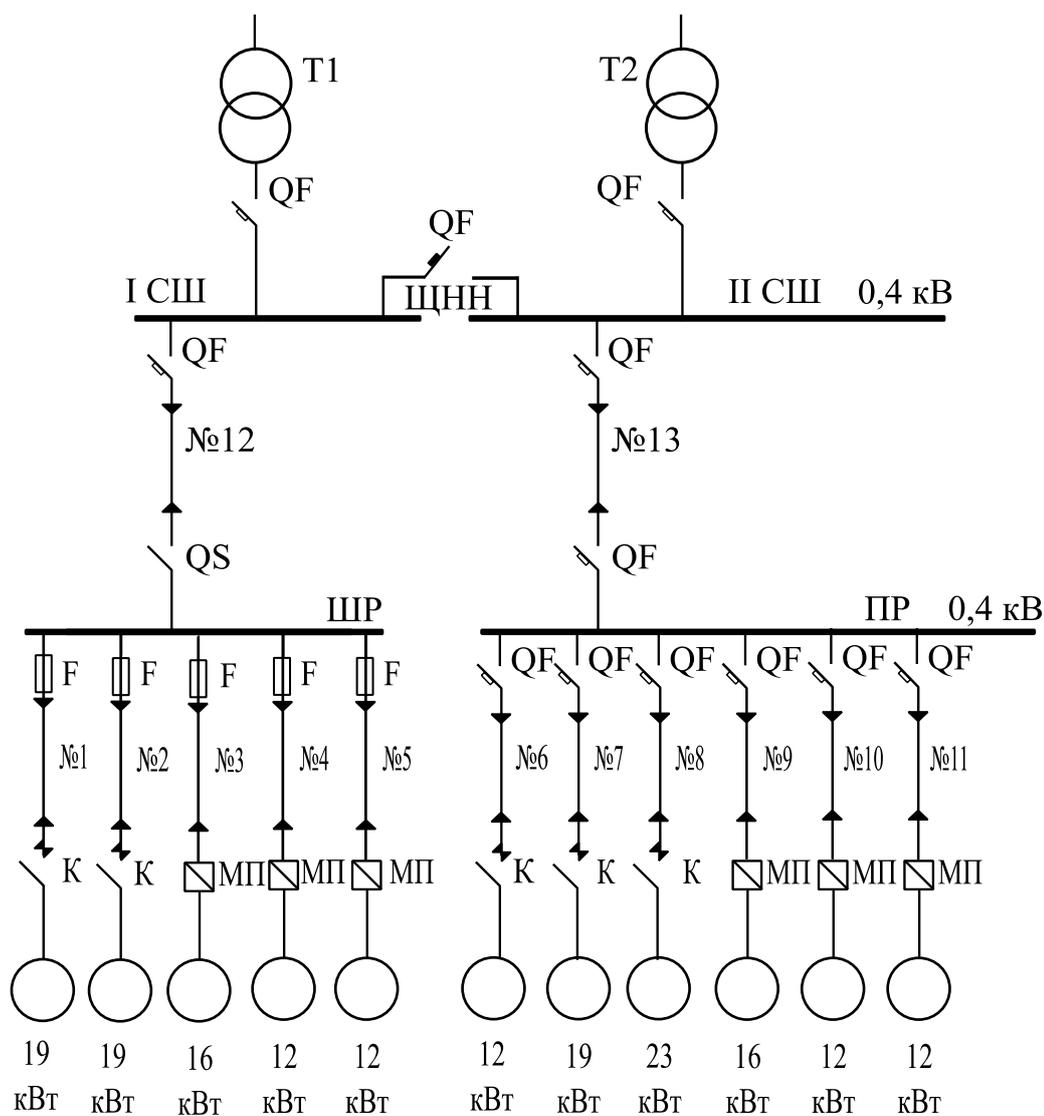


Рисунок 4.5 – Схема участка низковольтной цеховой сети

Исходные данные для расчетной схемы (рисунок 4.5)

№ присоединения	Тип кабельной линии	Длина кабельной линии, м	Мощность двигателя, кВт
1	АПВГ (3×8 + 1×4)	15	19
2	АПВГ (3×8 + 1×4)	13	19
3	АПВГ (3×6 + 1×4)	16	16
4	АПВГ (3×6 + 1×4)	26	12
5	АПВГ (3×4 + 1×2,5)	26	12
6	АПВГ (3×4 + 1×2,5)	22	12
7	АПВГ (3×8 + 1×4)	17	19
8	АПВГ (3×10 + 1×6)	13	23
9	АПВГ (3×6 + 1×4)	17	16
10	АПВГ (3×4 + 1×2,5)	15	12
11	АПВГ (3×4 + 1×2,5)	22	12
12	АПВГ (3×70 + 1×35)	52	---
13	АПВГ (3×70 + 1×35)	52	---

1. Построим логическую схему надежности для ШР (рисунок 4.6) и ПР (рисунок 4.7). При этом примем, что аварийное отключение одного из присоединений ШР приводит к отключению шкафа на время восстановительного ремонта [110]. Для того чтобы оценить надежность схемы, необходимо преобразовать ее и представить одним эквивалентным элементом. Определим параметры логической схемы надежности относительно ШР (рисунок 4.6). Значения исходных данных оборудования приведены в таблице 4.1.

Параметры интенсивности отказов кабельных линий приведены в таблице 4.2.

Интенсивность отказов схемы с последовательно соединенными элементами (рисунок 4.6) равна сумме интенсивностей отказов отдельных элементов

$$\lambda_{C1} = \lambda_{QF} + \lambda_{QF} + \lambda_{КЛ12} + \lambda_{QS} + \lambda_F + \lambda_F + \lambda_F + \lambda_F + \lambda_F +$$

$$\begin{aligned}
& + \lambda_{\text{КЛ1}} + \lambda_{\text{КЛ2}} + \lambda_{\text{КЛ3}} + \lambda_{\text{КЛ4}} + \lambda_{\text{КЛ5}} + \lambda_{\text{МП}} + \lambda_{\text{МП}} + \lambda_{\text{МП}} + \lambda_{\text{К}} + \lambda_{\text{К}} = \\
& = 2\lambda_{\text{QF}} + \lambda_{\text{QS}} + 5\lambda_{\text{F}} + 3\lambda_{\text{МП}} + 2\lambda_{\text{К}} + \lambda_{\text{КЛ12}} + \\
& + \lambda_{\text{КЛ1}} + \lambda_{\text{КЛ2}} + \lambda_{\text{КЛ3}} + \lambda_{\text{КЛ4}} + \lambda_{\text{КЛ5}}, \tag{4.14}
\end{aligned}$$

где  $\lambda_{\text{С1}}$  – интенсивность отказов схемы (рисунок 4.7);  $\lambda_{\text{QF}}$  – интенсивность отказов автоматического выключателя;  $\lambda_{\text{КЛ}} = \lambda_{\text{КЛ}i}$  – интенсивность отказов  $i$ -ой кабельной линии;  $\lambda_{\text{QS}}$  – интенсивность отказов рубильника;  $\lambda_{\text{F}}$  – интенсивность отказов предохранителя;  $\lambda_{\text{МП}}$  – интенсивность отказов магнитного пускателя;  $\lambda_{\text{К}}$  – интенсивность отказов контактора.

$$\begin{aligned}
\lambda_{\text{С1}} &= 2 \cdot 0,051 + 0,004 + 0,0038 + 0,004 + 0,006 + 0,013 + 0,038 + \\
& + 5 \cdot 0,042 + 3 \cdot 0,095 + 2 \cdot 0,098 = 0,862 \text{ 1/год.}
\end{aligned}$$

Таблица 4.2

Значения интенсивности отказов кабельных линий

№ п/п	Длина КЛ, м	Интенсивность отказов, 1/год	№ п/п	Длина КЛ, м	Интенсивность отказов, 1/год
1	15	0,004	8	13	0,003
2	13	0,003	9	17	0,004
3	16	0,007	10	15	0,004
4	26	0,006	11	22	0,005
5	26	0,006	12	52	0,013
6	22	0,005	13	52	0,013
7	17	0,004			

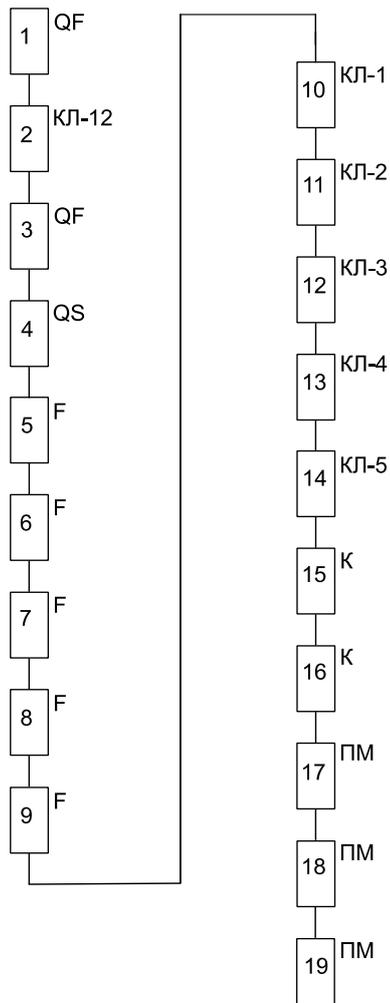


Рисунок 4.6 – Логическая схема надежности относительно распределительного шкафа

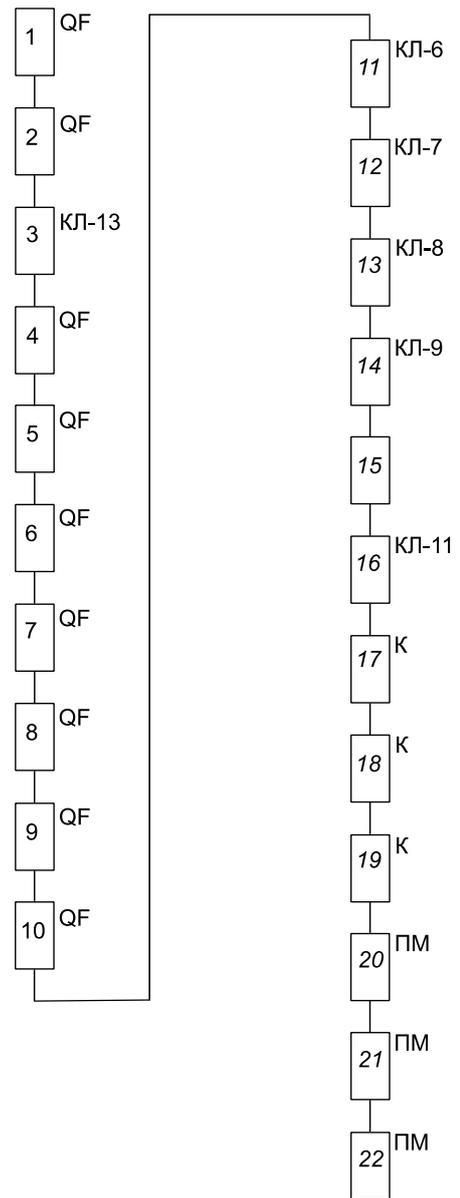


Рисунок 4.7 – Логическая схема надежности относительно распределительного пункта

Вычислим среднюю вероятность отказа системы

$$\begin{aligned}
 q_{C1} = & q_{QF} + q_{QF} + q_{QS} + q_F + q_F + q_F + q_F + q_F + q_{ПМ} + q_{КЛ12} + \\
 & + q_{КЛ1} + q_{КЛ2} + q_{КЛ3} + q_{КЛ4} + q_{КЛ5} + q_{ПМ} + q_{ПМ} + q_K + q_K, \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

где  $q_{QF}$  – вероятность отказа автоматического выключателя;  $q_{KL}$  – вероятность отказа кабельной линии;  $q_{QS}$  – вероятность отказа рубильника;  $q_F$  – вероятность отказа предохранителя;  $q_{МП}$  – вероятность отказа магнитного пускателя;  $q_K$  – вероятность отказа контактора.

По данным таблицы 4.3

$$q_{C1} = (2 \cdot 2,33 + 1,1 + 0,82 + 1,1 + 1,64 + 3,56 + 3,56 + 1,30 + 5 \cdot 1,44 + 3 \cdot 3,25 + 2 \cdot 3,36) \cdot 10^{-5} = 4,42 \cdot 10^{-4}.$$

Определим параметры логической схемы надежности относительно ПР (рисунок 4.7).

$$\lambda_{C2} = \lambda_{QF} + \lambda_{QF} + \lambda_{KL13} + \lambda_{QF} + \lambda_{QF} + \lambda_{KL6} + \lambda_{KL7} + \lambda_{KL8} + \lambda_{KL9} + \lambda_{KL10} + \lambda_{KL11} + \lambda_K + \lambda_K + \lambda_K + \lambda_{МП} + \lambda_{МП} + \lambda_{МП}$$

По данным таблицы 2.6

$$\lambda_{C2} = 4 \cdot 0,051 + 0,013 + 0,005 + 0,004 + 0,003 + 0,004 + 0,004 + 0,005 + 0,095 \cdot 3 + 0,0098 \cdot 3 = 0,928 \text{ 1/год.}$$

По данным таблицы 4.3

$$q_{C2} = q_{QF} + q_{QF} + q_{KL13} + q_{QF} + q_{QF} + q_{KL6} + q_{KL7} +$$

$$+ q_{\text{КЛ8}} + q_{\text{КЛ9}} + q_{\text{КЛ10}} + q_{\text{КЛ11}} + q_{\text{К}} + q_{\text{К}} + q_{\text{К}} + q_{\text{МП}} +$$

$$+ q_{\text{МП}} + q_{\text{МП}} = 3,85 \cdot 10^{-4}.$$

Интенсивность отказов схемы  $\lambda_{\text{С2}} = 0,928$  1/год.

$$\text{Вероятность отказа схемы } q_{\text{С2}} = 3,85 \cdot 10^{-4}.$$

Таблица 4.3

Результаты расчета вероятности отказов элементов

№ п/п	Вероятность отказа элемента	Расчетное значение вероятности отказа
1	$q_{\text{QF}}$	$2,33 \cdot 10^{-5}$
2	$q_{\text{КЛ1}}$	$1,10 \cdot 10^{-5}$
3	$q_{\text{КЛ2}}$	$8,2 \cdot 10^{-6}$
4	$q_{\text{КЛ3}}$	$1,10 \cdot 10^{-5}$
5	$q_{\text{КЛ4}}$	$1,64 \cdot 10^{-5}$
6	$q_{\text{КЛ5}}$	$1,64 \cdot 10^{-5}$
7	$q_{\text{КЛ6}}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$
8	$q_{\text{КЛ7}}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$
9	$q_{\text{КЛ8}}$	$8,22 \cdot 10^{-6}$
10	$q_{\text{КЛ9}}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$
11	$q_{\text{КЛ10}}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$
12	$q_{\text{КЛ11}}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$
13	$q_{\text{КЛ12}}$	$3,56 \cdot 10^{-5}$
14	$q_{\text{КЛ13}}$	$3,56 \cdot 10^{-5}$
15	$q_{\text{QS}}$	$1,30 \cdot 10^{-5}$
16	$q_{\text{F}}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$
17	$q_{\text{МП}}$	$3,25 \cdot 10^{-5}$
18	$q_{\text{К}}$	$3,36 \cdot 10^{-5}$

2. Определим вероятность отказа присоединений ШР первой секции шин (рисунок 4.5).

Присоединения № 1, 2 и № 3, 4, 5 имеют, соответственно, одинаковые элементы, поэтому составим логические схемы для первого (рисунок 4.8) и третьего (рисунок 4.9) присоединений.

Интенсивность отказов схемы первого присоединения (рисунок 4.8) по данным таблицы 2.6

$$\lambda_{C1C1} = 2\lambda_{QF} + \lambda_{КЛ12} + \lambda_{КЛ1} + \lambda_{QS} + \lambda_F + \lambda_K$$

$$\lambda_{C1C1} = 0,277 \text{ 1/год.}$$

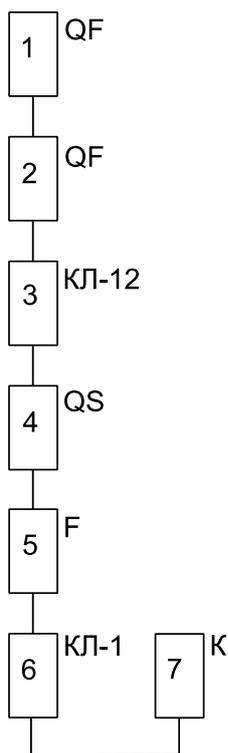


Рисунок 4.8 – Логическая схема надежности относительно первого присоединения распределительного шкафа

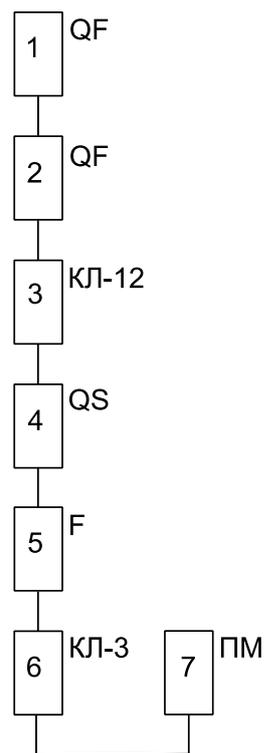


Рисунок 4.9 – Логическая схема надежности относительно третьего присоединения распределительного шкафа

Вероятность неработоспособного состояния первого присоединения (рисунок 4.8)

$$q_{C1C1} = 2q_{QF} + q_{KЛ12} + q_{KЛ1} + q_{QS} + q_F + q_K = 2,39 \cdot 10^{-4}.$$

$$q_{C1C1} = 2,39 \cdot 10^{-4}.$$

Расчет параметров надежности относительно второго присоединения аналогичен

$$\lambda_{C1C2} = 0,276 \text{ 1/год.}$$

$$q_{C1C2} = 2,39 \cdot 10^{-4}.$$

Определим параметры надежности относительно третьего присоединения (рисунок 4.9). Интенсивность отказов схемы

$$\lambda_{C1C3} = 2\lambda_{QF} + \lambda_{KЛ12} + \lambda_{KЛ3} + \lambda_{QS} + \lambda_F + \lambda_{ПМ} = 0,283 \text{ 1/год.}$$

Вероятность неработоспособного состояния схемы относительно третьего присоединения

$$q_{C1C3} = 2q_{QF} + q_{KЛ12} + q_{KЛ3} + q_{QS} + q_F + q_{ПМ} = 1,53 \cdot 10^{-4}.$$

Расчет параметров надежности относительно четвертого и пятого присоединений аналогичен

$$\lambda_{C1C4,C5} = 0,282 \text{ 1/год; } q_{C1C4,C5} = 1,68 \cdot 10^{-4}.$$

Определим вероятность отказа присоединений ПР второй секции шин (рисунок 4.5). Присоединения № 6, 7, 8 и № 9, 10, 11 имеют, соответственно, одинаковый состав элементов, поэтому построим логические схемы надежности относительно шестого и девятого присоединений (рисунок 4.10, 4.11).

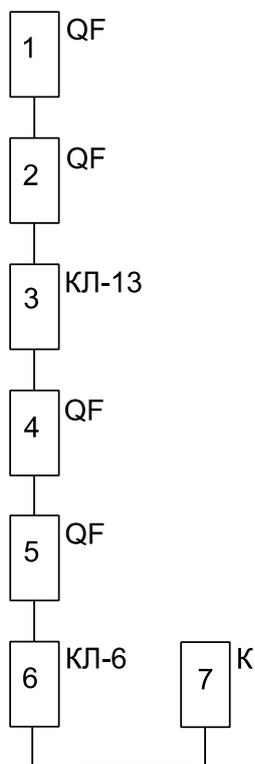


Рисунок 4.10 – Логическая схема надежности относительно шестого присоединения распределительного пункта

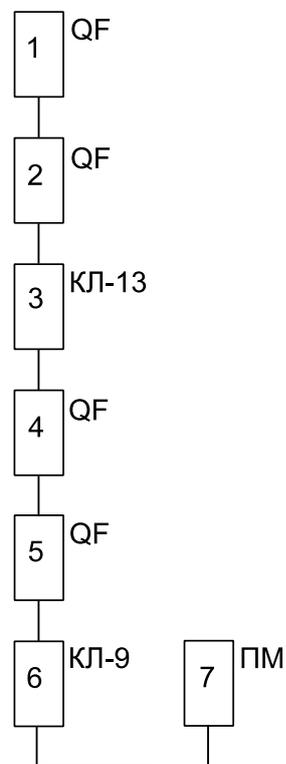


Рисунок 4.11 – Логическая схема надежности относительно девятого присоединения распределительного пункта

Интенсивность отказов схемы

$$\lambda_{C2C6} = 0,317 \text{ 1/год.}$$

Вероятность неработоспособного состояния

$$q_{C2C6} = 4q_{QF} + q_{КЛ13} + q_{КЛ6} + q_{К} = 1,62 \cdot 10^{-4}.$$

Параметры надежности схемы относительно седьмого присоединения

$$\lambda_{C2C7} = 0,281 \text{ 1/год}; q_{C2C7} = 1,35 \cdot 10^{-4}.$$

Параметры надежности схемы относительно восьмого присоединения

$$\lambda_{C2C8} = 0,280 \text{ 1/год}; q_{C2C8} = 1,249 \cdot 10^{-4}.$$

Рассчитаем параметры надежности относительно девятого присоединения. Логическая схема надежности представлена на рис 4.11. Интенсивность отказов

$$\lambda_{C2C9} = 4\lambda_{QF} + \lambda_{КЛ13} + \lambda_{КЛ9} + \lambda_{ПМ} = 0,355 \text{ 1/год}.$$

Вероятность неработоспособного состояния

$$q_{C2C9} = 0,886 \cdot 10^{-4}.$$

Параметры надежности схемы относительно десятого присоединения

$$\lambda_{C2C10} = 0,355 \text{ 1/год}, q_{C2C10} = 0,886 \cdot 10^{-4}.$$

Параметры надежности схемы относительно одиннадцатого присоединения

$$\lambda_{C2C11} = 0,356 \text{ 1/год}, q_{C2C11} = 1,75 \cdot 10^{-4}.$$

4.2.2 Логико-вероятностный метод расчета. Изложение данного метода, адаптировано применительно к расчету надежности электроснабжения секций распределительных устройств 0,4 кВ.

Состояние отказа системы считается событием, связанным с невыполнением ее функций при определенных обстоятельствах. На диаграмме это определение помещается вверху листа и обводится рамкой. Высказывание может быть конечным, промежуточным или первичным. Конечное высказывание обводится двойной рамкой, остальные – одинарной [54, 69].

Сложные высказывания обозначаются на диаграмме числовым или буквенным кодом. Если такое высказывание располагается на верхнем уровне нарисованного дерева (на выходе диаграммы), то его код заключается в треугольник. Сложное высказывание может вводиться в другую диаграмму на любом уровне, кроме выходного, также с помощью кода, заключенного в треугольник. Удобно кодировать высказывания так, чтобы по коду можно было бы судить о том, простое оно или сложное, на каком уровне дерева от конечного высказывания располагается, к какому элементу относится и что собой представляет (событие, состояние или отказ срабатывания).

Для расчетной схемы (рисунок 4.5) определим частоту отключений первой и второй секций шин, рассмотрев их независимо. Рассчитаем параметры надежности схемы относительно:

- ШР и ПР (рисунки 4.12 и 4.13);
- каждого присоединения в отдельности (рисунки 4.14 и 4.15).

Условные обозначения элементов, принятых на рисунках 4.12 и 4.13 представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Условные обозначения элементов оборудования

Код	Наименование элемента
b	Автоматический выключатель 0,4 кВ
c	Кабельная линия 0,4 кВ
m	Рубильник с ручным приводом
p	Предохранитель
k	Контактор
d	Магнитный пускатель

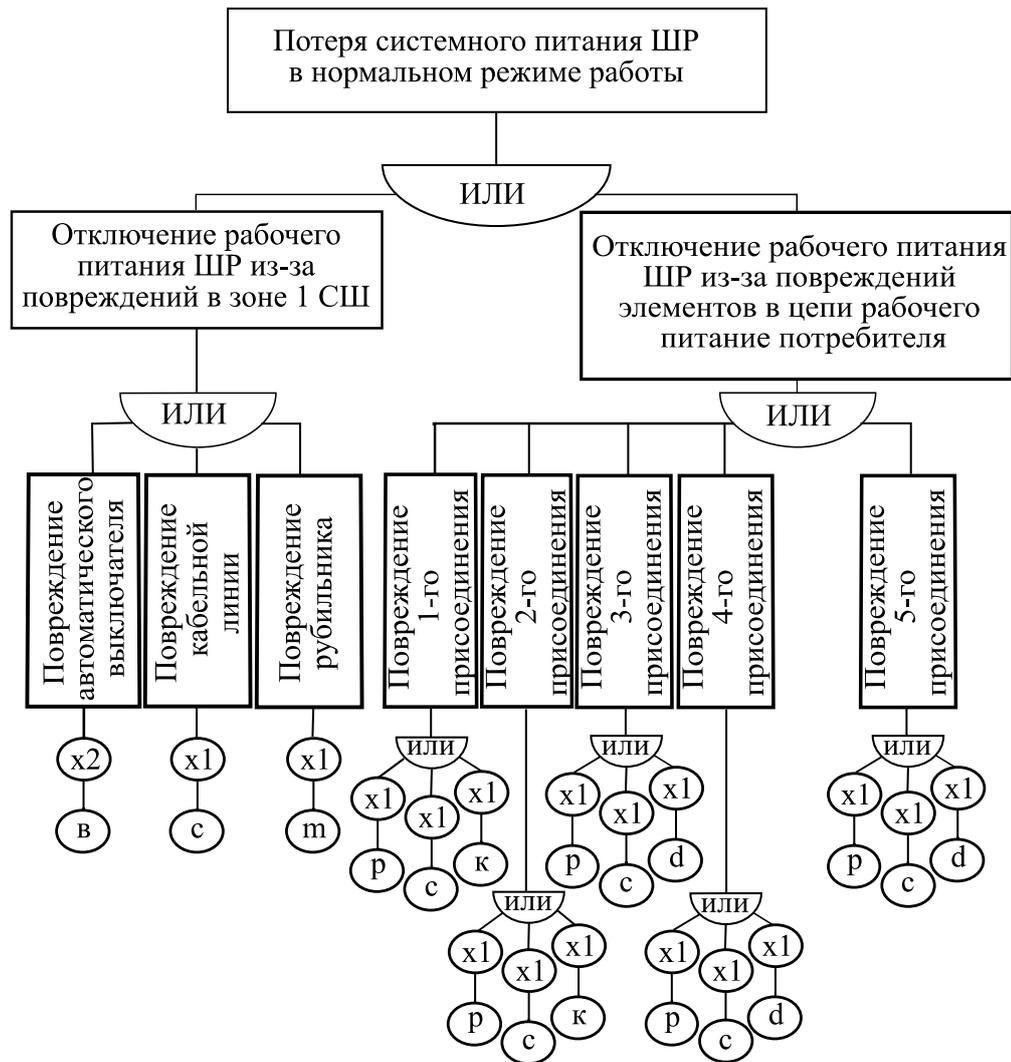


Рисунок 4.12 – Дерево отказов для оценки частоты потери системного питания распределительного шкафа

Функция отказа при потере системного питания ШР (рисунок 4.12) запишется

$$\begin{aligned}
 \bar{Y}_C(\text{ШР}) &= 2b + c + m + (k + p + c) + (k + p + c) + (d + p + c) + \\
 &+ (d + p + c) + (d + p + c) = \\
 &= 2b + c + m + 2(k + p + c) + 3(d + p + c).
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

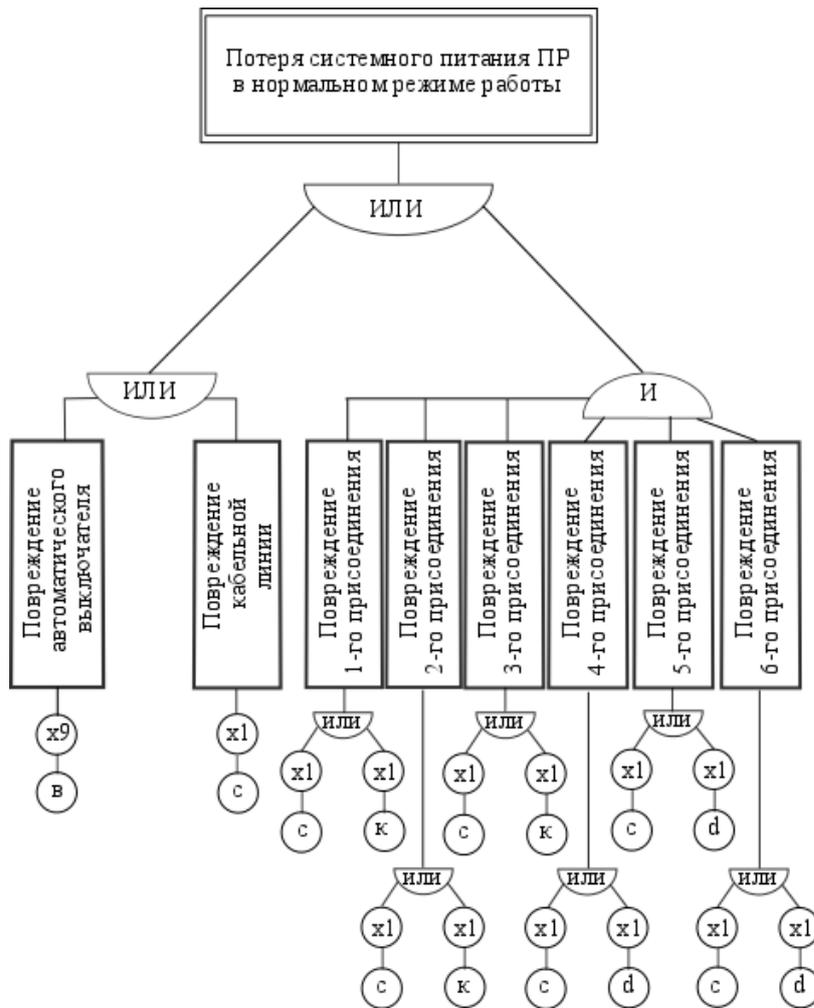


Рисунок 4.13 – Дерево отказов для оценки частоты потери системного питания распределительного пункта

Функция оценки частоты отключений от системного питания

$$\Lambda_c = 2\lambda(b) + 6\lambda(c) + \lambda(m) + 2\lambda(k) + 3\lambda(d) + 5\lambda(p). \quad (4.17)$$

Исходные данные (таблица 4.4):

$$\Lambda_c = 2 \cdot 0,051 + 6 \cdot 0,026 + 0,038 + 2 \cdot 0,098 + 3 \cdot 0,095 + \\ + 5 \cdot 0,042 = 0,987 \text{ 1/год.}$$

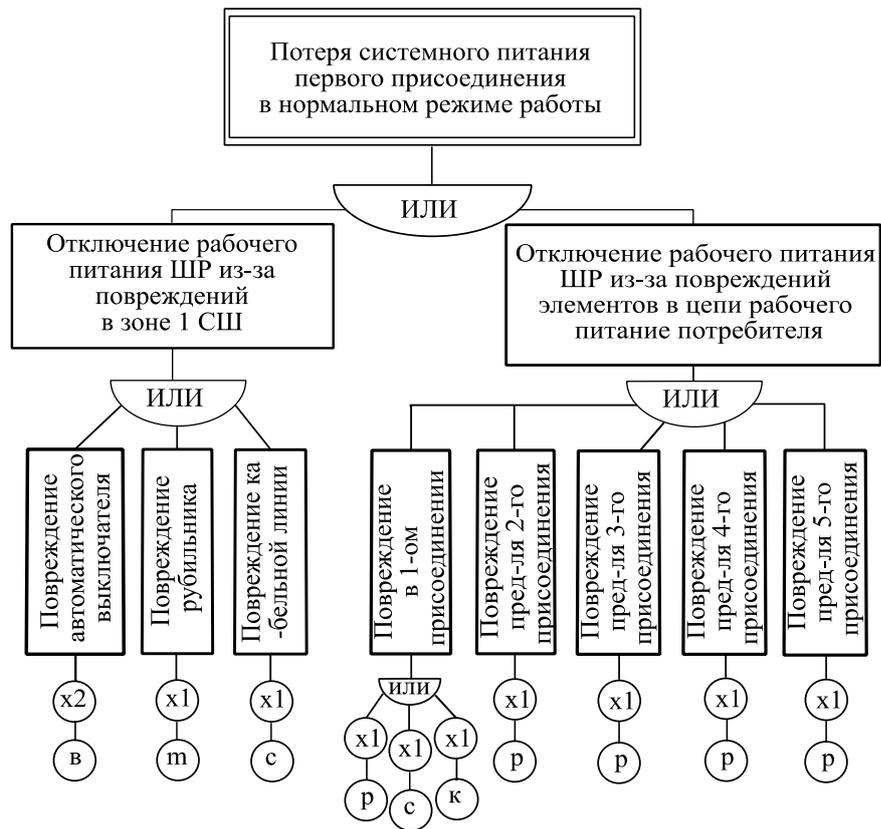


Рисунок 4.14 – Дерево отказов для оценки частоты потери системного питания первого присоединения распределительного шкафа

(При использовании аналитического метода расчета  $\lambda_{C1} = 0,862$ ).

Функция отказа при потере системного питания схемы (рисунок 4.13) для ПР запишется

$$\begin{aligned} \bar{Y}_c(\text{ПР}) = & 2b + c + b + (b + c + k) + (b + c + k) + (b + c + k) + \\ & + (b + c + d) + (b + c + d) + (b + c + d). \end{aligned} \quad (4.18)$$

Функция оценки частоты отключений от системного питания

$$\Lambda_c = 9\lambda(b) + \lambda + 7\lambda(c) + 3\lambda(d) + 3\lambda(k). \quad (4.19)$$

$$\Lambda_c = 9 \cdot 0,051 + 7 \cdot 0,026 + 3 \cdot 0,098 + 3 \cdot 0,095 = 1,22 \text{ 1/год.}$$

(При использовании аналитического метода  $\lambda_{C2} = 0,928$ ).

Определим частоту отказов для каждого присоединения в отдельности.

Дерево отказов для первого и второго присоединения ШР одинаковое.

На рисунке 4.14 представлено дерево отказов для оценки частоты потери системного питания первого присоединения ШР, а на рисунке 4.15 – дерево отказов для оценки частоты потери системного питания шестого присоединения ПР.

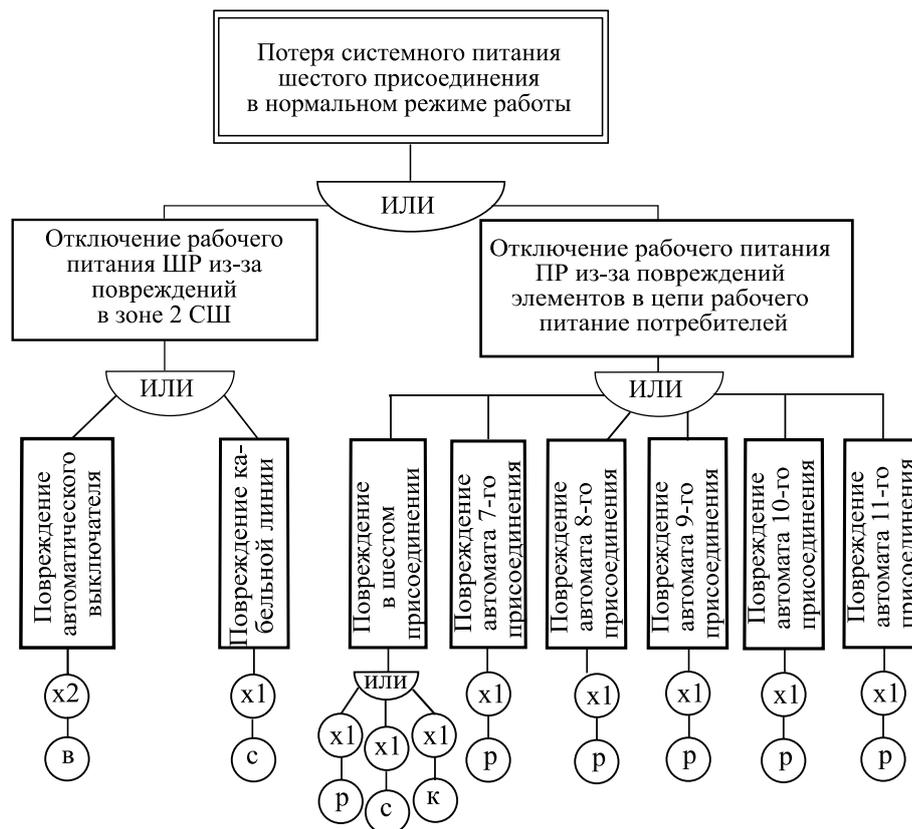


Рисунок 4.15 – Дерево отказов для оценки частоты потери системного питания шестого присоединения распределительного пункта

Результаты расчетов параметров надежности схемы относительно ПР и ШР показывают, что при использовании логико-вероятностного метода численные оценки ( $\lambda$ ) оказываются завышенными на 13 % для секции ШР и на 24 % для ПР, что объясняется использованием усредненных показателей интенсивности отказов кабельных линий  $\lambda_{КЛ}$ .

### 4.3 Алгоритм расчета вероятности времени безотказной работы схем цеховых сетей с помощью коэффициентов отношения

Определим изменение вероятности времени безотказной работы ШР (рисунок 4.6) в зависимости от числа присоединений к ним, используя результаты вычислений по статистическим данным (п. 4.2).

Оценим следующую ситуацию оперативных переключений схемы (рисунок 4.6) когда в случае отказа электрооборудования в присоединении производится отключение всего ШР на время восстановительного ремонта (рисунки 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20).

На рисунке 4.16 представлена схема первого присоединения. Определим вероятность времени безотказной работы  $P(t)$  в течение 7 лет эксплуатации первого присоединения.

$$P_1(t = 1 \text{ год}) = P_{QF}^2 \cdot P_{KJ12} \cdot P_{QS} \cdot P_F \cdot P_{KJ1} \cdot P_K = 0,990,$$

$$P_1(t = 2 \text{ год}) = P_{QF} \cdot P_{QF} \cdot P_{KJ12} \cdot P_{QS} \cdot P_F \cdot P_{KJ1} \cdot P_K = 0,985,$$

$$P_1(t = 3 \text{ год}) = P_{QF} \cdot P_{QF} \cdot P_{KJ12} \cdot P_{QS} \cdot P_F \cdot P_{KJ1} \cdot P_K = 0,933,$$

$$P_1(t = 4 \text{ год}) = P_{QF} \cdot P_{QF} \cdot P_{KJ12} \cdot P_{QS} \cdot P_F \cdot P_{KJ1} \cdot P_K = 0,831,$$

$$P_1(t = 5 \text{ год}) = P_{QF} \cdot P_{QF} \cdot P_{KJ12} \cdot P_{QS} \cdot P_F \cdot P_{KJ1} \cdot P_K = 0,696,$$

$$P_1(t = 6 \text{ год}) = P_{QF} \cdot P_{QF} \cdot P_{KJ12} \cdot P_{QS} \cdot P_F \cdot P_{KJ1} \cdot P_K = 0,497,$$

$$P_1(t = 7 \text{ год}) = P_{QF} \cdot P_{QF} \cdot P_{KJ12} \cdot P_{QS} \cdot P_F \cdot P_{KJ1} \cdot P_K = 0,285.$$

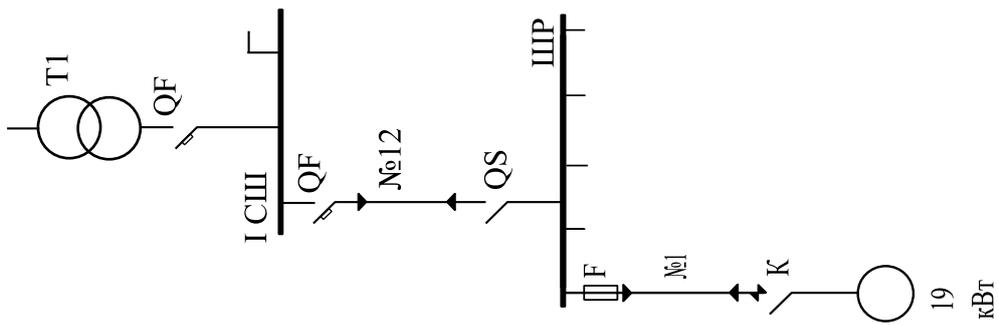


Рисунок 4.16 – Схема распределительного шкафа с одним присоединением

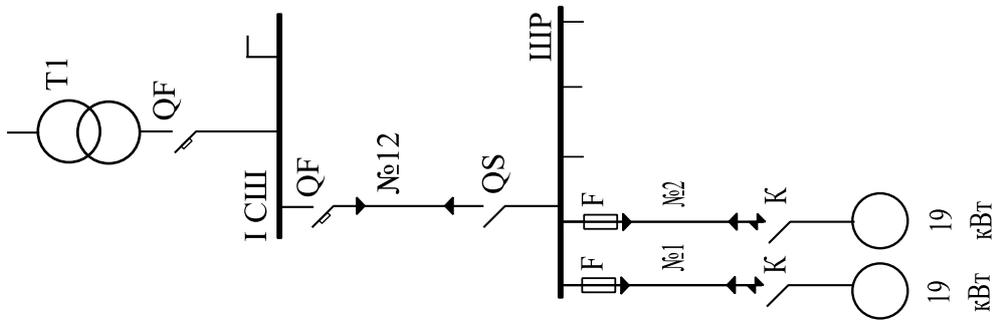


Рисунок 4.17 – Схема распределительного шкафа с двумя присоединениями

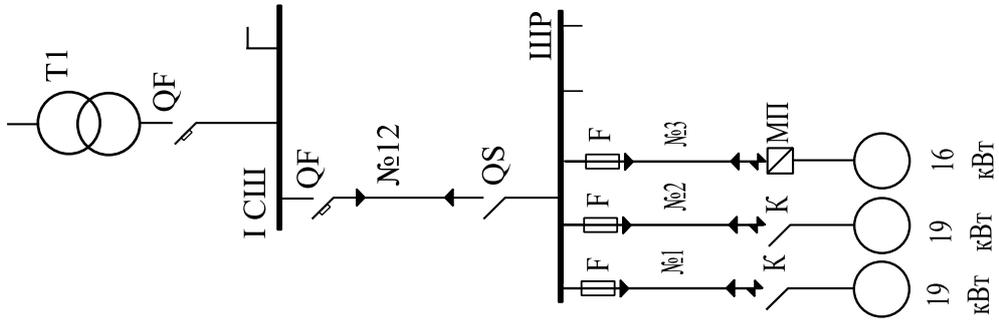


Рисунок 4.18 – Схема распределительного шкафа с тремя присоединениями

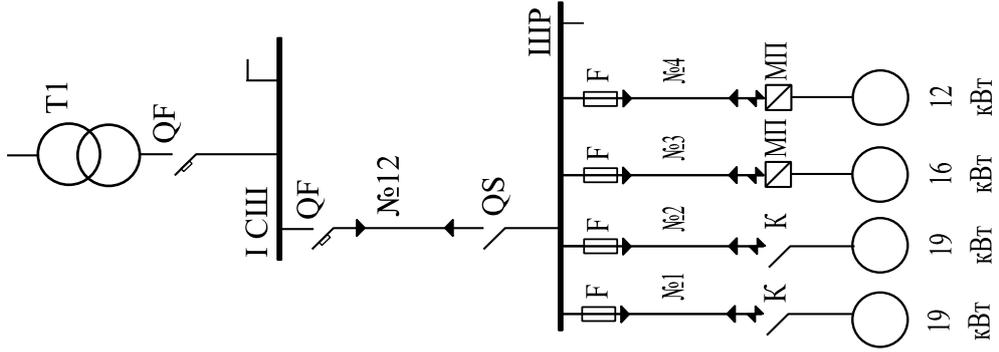


Рисунок 4.19 – Схема распределительного шкафа с четырьмя присоединениями

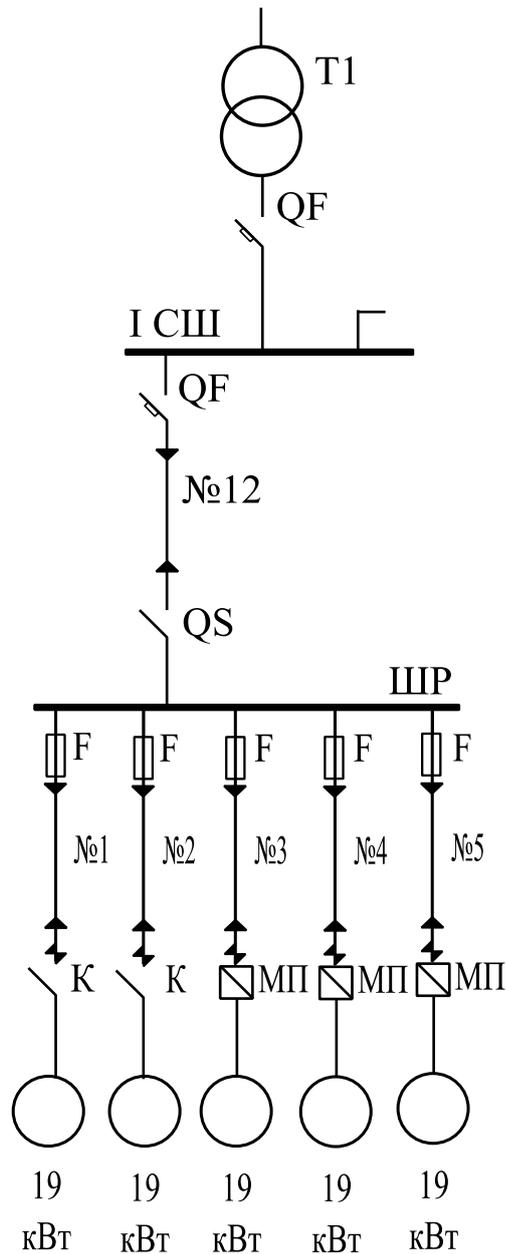


Рисунок 4.20 – Схема распределительного шкафа с пятью присоединениями

Далее рассчитаем  $P(t)$  первого и второго; первого, второго, третьего; первого, второго, третьего, четвертого; первого, второго, третьего, четвертого и пятого присоединений. На логической схеме будут последовательно добавляться соответствующие элементы и при расчете надежности схемы с пятью присоединениями схема примет вид рисунка 4.6. Результаты расчетов представлены в таблице 4.5.

Значения вероятности времени безотказной работы  
присоединений распределительного шкафа

Год наблюдения t, год	Вероятность безотказной работы 1-го присоединения $P_1(t)$ , рисунок 4.21	Вероятность безотказной работы 2-х присоединений $P_2(t)$ , рисунок 4.22	Вероятность безотказной работы 3-х присоединений $P_3(t)$ , рисунок 4.23	Вероятность безотказной работы 4-х присоединений $P_4(t)$ , рисунок 4.24	Вероятность безотказной работы 5-ти присоединений $P_5(t)$ , рисунок 4.25
1	0,990	0,971	0,960	0,951	0,941
2	0,985	0,970	0,955	0,941	0,927
3	0,933	0,871	0,813	0,759	0,708
4	0,831	0,739	0,710	0,615	0,586
5	0,696	0,522	0,450	0,435	0,411
6	0,497	0,288	0,277	0,265	0,250
7	0,285	0,159	0,137	0,123	0,110

Введем понятие «коэффициента отношения». По полученным данным таблицы 4.5 определим коэффициенты отношения

1) если в схеме имеются два присоединения нагрузки (рисунок 4.17)

$$P_2(t) = k_1 \cdot P_1(t), \quad (4.20)$$

2) если в схеме имеются три присоединения нагрузки (рисунок 4.18)

$$P_3(t) = k_2 \cdot P_1(t), \quad (4.21)$$

3) если в схеме имеются четыре присоединения нагрузки (рисунок 4.19)

$$P_4(t) = k_3 \cdot P_1(t), \quad (4.22)$$

4) если в схеме имеются пять присоединений нагрузки (рисунок 4.20)

$$P_5(t) = k_4 \cdot P_1(t), \quad (4.23)$$

где  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ ,  $P_3(t)$ ,  $P_4(t)$ ,  $P_5(t)$  – вероятность времени безотказной работы 1-го, 2-х, 3-х, 4-х, 5-ти присоединений нагрузки;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  – коэффициенты отношения вероятностей указанных присоединений

$$k_1(t) = \frac{P_2(t)}{P_1(t)}, \quad k_2(t) = \frac{P_3(t)}{P_1(t)}, \quad k_3(t) = \frac{P_4(t)}{P_1(t)}, \quad k_4(t) = \frac{P_5(t)}{P_1(t)}. \quad (4.24)$$

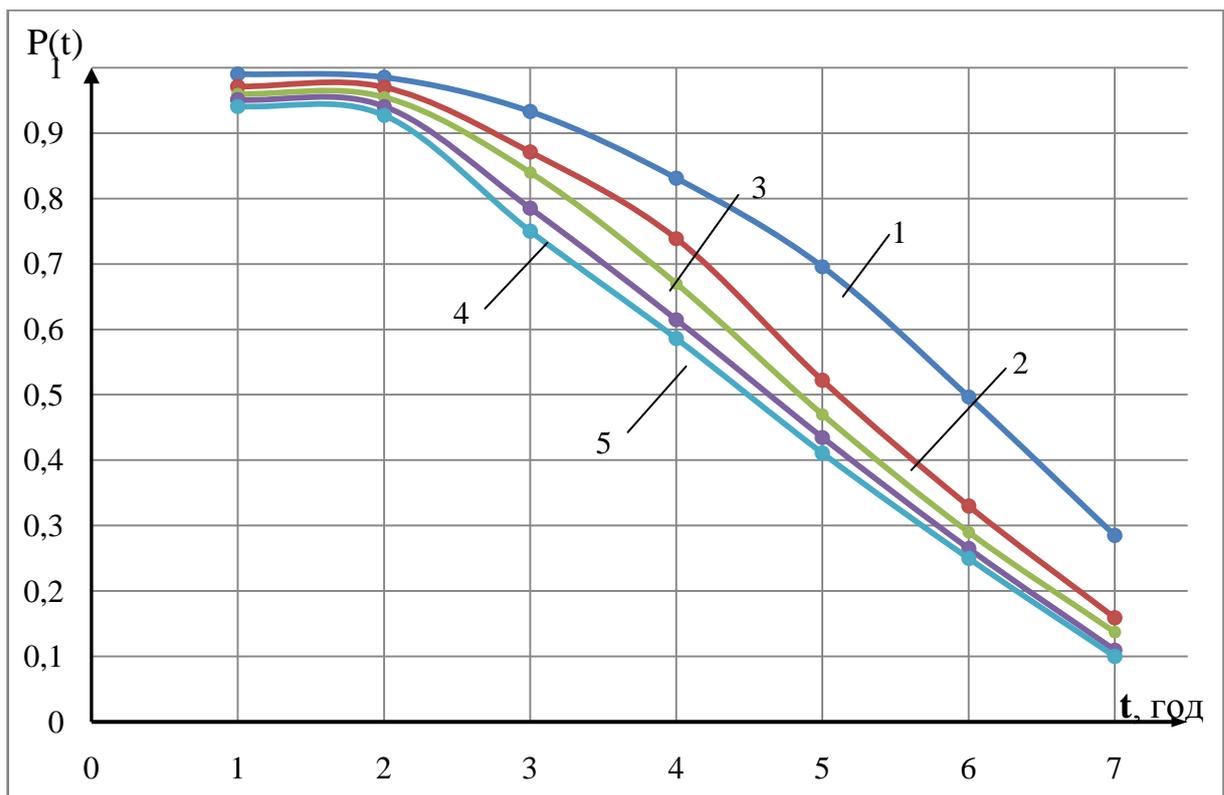


Рисунок 4.21 – Графики изменения вероятности времени безотказной работы в зависимости от числа присоединений

Рассчитаем коэффициенты отношения по данным таблицы 4.5, результаты вычислений представлены в таблице 4.6.

Результаты вычислений коэффициентов отношения

Год наблюдения	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$
1	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95
2	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94
3	0,93	0,87	0,81	0,76	0,75
4	0,88	0,85	0,74	0,70	0,62
5	0,75	0,64	0,62	0,59	0,46
6	0,57	0,55	0,53	0,50	0,37
7	0,55	0,48	0,43	0,38	0,30

Смоделируем значения коэффициента  $k_5$  при возможных шести присоединениях нагрузки (таблица 4.6).

Построим графики изменения во времени значений коэффициентов отношения  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  (рисунок 4.22).

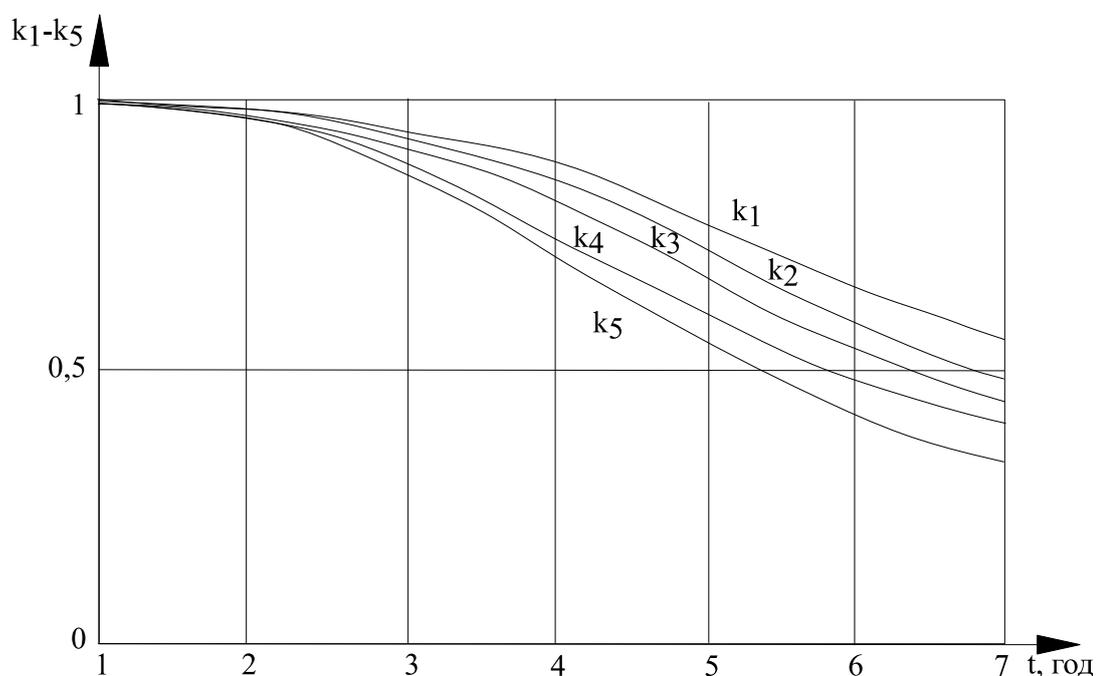


Рисунок 4.22 – Графики зависимостей изменения значений коэффициентов отношений от времени эксплуатации схемы

Смоделированные зависимости (рисунок 4.22) позволяют определять  $P(t)$  распределительных устройств низкого напряжения с предохранителями на отходящих линиях с учетом количества присоединений и фактора времени эксплуатации оборудования.

#### 4.4 Оценка погрешности методики расчета с использованием коэффициентов отношения

Исследуем надежность участка схемы цеховой сети 0,4 кВ (рисунок 4.23).

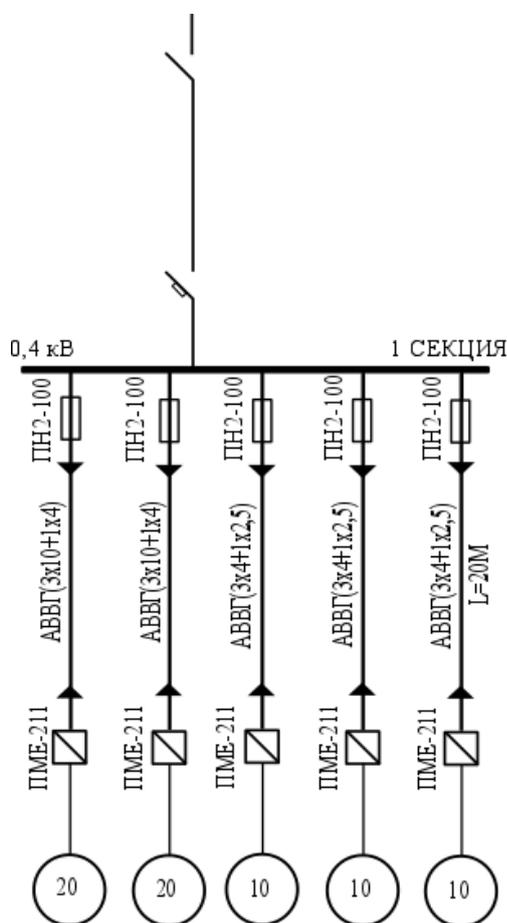


Рисунок 4.23 – Участок схемы электроснабжения компрессорной ТЭЦ

Используя статистические данные показателей надежности электрооборудования, определим  $P(t)$  первого присоединения относительно секции шин

$$P_1(t = 1 \text{ год}) = 0,990, \quad P_1(t = 2 \text{ год}) = 0,983, \quad P_1(t = 3 \text{ год}) = 0,927,$$

$$P_1(t = 4 \text{ год}) = 0,845, \quad P_1(t = 5 \text{ год}) = 0,671, \quad P_1(t = 6 \text{ год}) = 0,541,$$

$$P_1(t = 7 \text{ год}) = 0,402.$$

Затем вычислим  $P_2(t)$ ,  $P_3(t)$ ,  $P_4(t)$  и  $P_5(t)$  для различного числа присоединений нагрузки по коэффициентам отношения (таблица 4.6).

Результаты вычислений приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7

Значения вероятностей времени безотказной работы присоединений, вычисленные по коэффициентам отношения

Год наблюдения	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
1	0,990	0,97	0,96	0,95	0,95
2	0,983	0,96	0,95	0,940	0,93
3	0,927	0,86	0,81	0,75	0,70
4	0,845	0,751	0,722	0,600	0,596
5	0,671	0,503	0,434	0,419	0,397
6	0,541	0,313	0,301	0,288	0,272
7	0,402	0,232	0,193	0,174	0,155

Определим вероятности времени безотказной работы присоединений схемы (рисунок 4.23) по статистическим данным  $P_1^*$ ,  $P_2^*$ ,  $P_3^*$ ,  $P_4^*$ ,  $P_5^*$  (таблица 4.8) и сравним с результатами таблицы 4.7.

Определим относительную погрешность вычислений по выражению

$$\delta(t)\% = \frac{|P(t) - P^*(t)|}{P^*(t)} \cdot 100.$$

Результаты представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.8

Значения вероятностей времени безотказной работы  
присоединений по статистическим данным

Год наблюдения	* $P_1$	* $P_2$	* $P_3$	* $P_4$	* $P_5$
1	0,990	0,980	0,970	0,96	0,950
2	0,983	0,966	0,949	0,933	0,917
3	0,927	0,860	0,800	0,742	0,688
4	0,845	0,729	0,678	0,570	0,567
5	0,671	0,402	0,398	0,388	0,379
6	0,541	0,294	0,282	0,267	0,257
7	0,402	0,210	0,177	0,157	0,144

Таблица 4.9

Значения погрешности расчетов

Год наблюдения	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
1	1,02	1,3	1,04	0
2	0,62	0,11	0,75	1,42
3	0	1,25	1,07	1,74
4	3	6,4	5,3	5,1
5	2,5	9,0	8,0	5,8
6	6,5	6,7	7,9	5,8
7	10,5	9,0	10,8	7,6

Как показали исследования, погрешность разработанной методики определения вероятности времени безотказной работы цеховых сетей относительно присоединений распределительных устройств низкого напряжения с использованием коэффициентов отношения не превышает 11 %, что подтверждается практическими расчетами параметров схем. Моделирование численных значений коэффициентов отношения может быть реализовано для любого количества присоединений нагрузки распределительных устройств низкого напряжения.

Предлагаемая методика рекомендована для оценки и прогнозирования показателей надежности функционирования систем внутрицехового электроснабжения; определения максимальных и минимальных возможных показателей надежности узлов; уточнения компоновочных решений оборудования схем, надежность которых удовлетворяет заданному уровню показателей; поиска путей повышения уровня надежности за счет применения усовершенствованного оборудования; технико-экономических расчетов, а также уточнения сроков планирования и замены оборудования и эффективного проведения планово-предупредительных ремонтов и текущего обследования оборудования.

Целенаправленный отбор и количественная оценка вкладов в ненадежность внутризаводских СЭС отказов элементов системы, ее состояний и режимов, а также эффективности различных противоаварийных мероприятий позволяют выявить слабые звенья СЭС и наметить конкретные пути по ее совершенствованию в процессе человеко-машинного синтеза СЭС. При проектировании на этой основе осуществляется поиск новых схемных решений, изменение структуры схемы и состава ее оборудования для усиления слабых мест, исключения излишнего или, напротив, использования более надежного оборудования.

В процессе эксплуатации внутризаводских СЭС возможно решение нескольких задач: выбора рационального варианта проведения ремонтного режима из ряда возможных вариантов; определения степени зависимости различных ремонтных режимов по влиянию на надежность электроснабжения узлов нагрузки и допустимости их совместного проведения; выбора рациональной стратегии эксплуатации (например, размещение по территории системы ремонтных бригад и дежурного персонала) в текущем режиме СЭС; оценки целесообразности сооружения новых участков или демонтажа старых участков; выбора более надежных вариантов схем развития СЭС.

## Выводы

1. Разработана модель, выполненная в программном комплексе Matlab-Simulink для определения вероятностей состояния с восстановлением и профилактикой системы электроснабжения.

2. Определены параметры надежности участка цеховой сети с учетом вероятностных характеристик оборудования относительно распределительного шкафа и распределительного пункта. Результаты расчетов параметров надежности показали, что при применении логико-вероятностного метода численные оценки интенсивности отказов оказываются завышенными на 13 % для секции распределительного шинпровода и на 24 % для распределительного пункта, что объясняется использованием усредненных показателей интенсивности отказов кабельных линий при помощи аналитического и логико-вероятностного методов расчета.

3. Разработан алгоритм и методика оценки параметров надежности функционирования систем внутрицехового электроснабжения относительно присоединений нагрузки и распределительных устройств низкого напряжения с помощью коэффициентов отношения относительно первого присоединения нагрузки, погрешность вычислений при этом не превышает 11 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в разработке и обобщении моделей надежности функционирования внутрицехового электроснабжения, что позволяет повысить эффективность эксплуатации таких систем. Полученные материалы диссертации позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Выявлены особенности оценки надежности и определены характеристики структуры и функционирования, которые рекомендуется учитывать при анализе надежности систем, а также показаны основные направления повышения надежности СЭС.

2. На основании статистических эксплуатационных данных рассчитаны доверительные интервалы параметра потока отказов и определены значения интенсивности отказов, вероятности времени безотказной работы низковольтных коммутационных аппаратов и кабельных линий в зависимости от срока эксплуатации и доказана гипотеза о возможности применения нормального закона распределения вероятностных характеристик электроустановок схем цехового электроснабжения.

3. По результатам тепловизионных обследований в качестве критерия оценки технического состояния и надежности функционирования низковольтных коммутационных аппаратов предложена величина коэффициента превышения сопротивления контактных соединений аппаратов.

4. По условиям технической эксплуатации и экспериментальным исследованиям обоснованы допустимые кратности превышения сопротивления контактных соединений по отношению к начальному значению сопротивлений новых аппаратов по достижению предельно допустимой температуры нагрева контактов: для автоматических выключателей в 2,7 раза; для контакторов в 2,8 раза; для магнитных пускателей в 3 раза; для рубильников в 2,1 раза; для пакет-

ных выключателей в 1,9 раза. Предлагаемые коэффициенты позволяют оценивать эксплуатационное состояние низковольтных коммутационных аппаратов и предотвращать развитие дефектов коммутационной аппаратуры и аварийные ситуации, а также использовать предлагаемый критерий в качестве дополнительного регламента сроков проводимых обследований коммутационной аппаратуры.

5. Разработан алгоритм и метод комплексной оценки и повышения эффективности функционирования низковольтных аппаратов и выявлены законы изменения вероятности времени безотказной работы и сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов цеховых сетей в зависимости от режимов эксплуатации с учетом их технического состояния.

6. Разработан алгоритм и методика оценки параметров надежности функционирования систем внутрицехового электроснабжения относительно присоединений нагрузки и распределительных устройств низкого напряжения с помощью коэффициентов отношения относительно первого присоединения нагрузки, погрешность вычислений при этом не превышает 11 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамович, Б. Н. Надежность систем электроснабжения: учебное пособие / Б. Н. Абрамович, В. В. Полищук. – СПб.: СПбГГИ, 1997. – 37 с.
2. Абрамович, Б. Н. Современные проблемы электротехнических наук: учебное пособие / Б. Н. Абрамович, Ю. А. Сычев, Д. А. Устинов. – СПб.: Нац. минер.-сырьевой ун-т «Горный», 2012. – 89 с.
3. Абрамович, Б. Н. Системы электроснабжения электромеханических комплексов в горной и нефтегазовой промышленности: учебное пособие / Б. Н. Абрамович, Ю. А. Сычев. – СПб.: Лема, 2017. – 115 с.
4. Анохин, А. Н. Анализ деятельности оператора: модели и методы: учебное пособие / А. Н. Анохин. – Обнинск: ИАТЭ, 1992. – 88 с.
5. Аполлонский, С. М. Надежность и эффективность электрических аппаратов: учебное пособие / С. М. Аполлонский, Ю. В. Куклев. – СПб.: Лань, 2011. – 443 с.
6. Афонин, В. А. Основы теории надежности: учебное пособие / В. А. Афонин; под ред. И. И. Ладыгина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 208 с.
7. Баринов, В. А. Режимы энергосистем: Методы анализа и управления / В. А. Баринов, С. А. Совалов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 440 с.
8. Баринов, В. А. Совершенствование нормативов надежности функционирования электроэнергетических систем / В. А. Баринов, Г. А. Вояков, В. В. Калита, Ф. Л. Коган, А. С. Маневич, В. В. Могилев, Ф. И. Синьчугов и др. // Электричество. – 1993. – № 7. – С. 1-9.
9. Богданофф, Дж. Вероятностные модели накопления повреждений / Дж. Богданофф, Ф. М. Козин. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
10. Бондарь, Н. Ф. Прогнозирование электроснабжения промышленного предприятия / Н. Ф. Бондарь, А. В. Федосеева // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. – 2005. – № 15. – С. 101-105.

11. Бредихин, А. П. Электрические контактные соединения / А. П. Бредихин, М. В. Хомяков. – М.: Энергия, 1980. – 167 с.
12. Бруевич, Н. Г. Количественные оценки надежности изделий / Н. Г. Бруевич // Основные вопросы теории и практики надежности: сб. – М.: 1971. – 392 с.
13. Буторин, В. А. Эксплуатация и надежность восстановленного электрооборудования: учебное пособие / В. А. Буторин. – Челябинск: Челяб. гос. агроинж. ун-т, 2006. – 162 с.
14. Буторин, В. А. Эксплуатация и надежность электрооборудования: учебное пособие / В. А. Буторин. – Челябинск: [б. и.], 2009. – 168 с.
15. Вавилов, А. А. Структурный и параметрический синтез сложных систем / А. А. Вавилов. – Л.: Изд-во ЛЭТИ, 1979. – 87 с.
16. Валиев, Р. Т. Сравнительная эффективность методов расчета показателей балансовой надежности энергосистем / Р. Т. Валиев, В. П. Обоскалов, С. А. Гусев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 9-10. – С. 119-125.
17. Вдовин, А. М. Повышение эффективности системы электроснабжения энергонасыщенного производства / А. М. Вдовин. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2012. – 226 с.
18. Витенберг, М. И. Предельные значения сопротивления электрических контактов / М. И. Витенберг // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника проводной связи. – 1969. – Вып. 3. – С. 57-63.
19. Влияние режимных и схемных параметров электрооборудования на эквивалентное сопротивление цеховых сетей / Р. Р. Садыков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 7–8. – С. 92-97.
20. Волик, А. С. Переходное сопротивление и перегрев металлокерамических контактов в зависимости от нагрузки током и контактного нажатия / А. С. Волик. – М.: Академия, 2003. – 164 с.
21. Волков, Н. Г. Надежность электроснабжения: учебное пособие / Н. Г. Волков. – Томск: ТПУ, 2003. – 140 с.

22. Воропай, Н. И. Надежность систем электроснабжения: учебное пособие / Н. И. Воропай; М-во образования и науки Рос. Федерации, Иркут. нац. исслед. техн. ун-т [и др.]. – [Изд. 2-е, перераб. и доп.], – Новосибирск: Наука, 2015. – 206 с.

23. Гаджиев, С. С. Надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования электростанций и подстанций: производственно-практическое издание / С. С. Гаджиев. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 168 с.

24. Глущенко, В. В. Прогнозирование / В. В. Глущенко. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Вузовская книга, 2000. – 258 с.

25. Глущенко, П. В. Техническая диагностика: Моделирование в диагностировании и прогнозировании состояния технических объектов / П. В. Глущенко. – М.: Вузовская книга, 2004. – 248 с.

26. Годжелло, А. Г. Оценка надежности коммутационной аппаратуры на основе цензурированной статистической информации / А. Г. Годжелло, Е. Г. Егоров, С. П. Иванова, Д. И. Леонтьев // Электротехника. – 2010. – № 4. – С. 46-49.

27. Голинкевич, Т. А. Прикладная теория надежности / Т. А. Голинкевич. – М.: Наука, 1985. – 168 с.

28. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.

29. ГОСТ 2933-83. Аппараты электрические низковольтные. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 26 с.

30. ГОСТ 403-73. Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Допустимые температуры нагрева частей аппарата. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 5 с.

31. ГОСТ Р 50030.4.1-2012 (МЭК 60947-4-1:2009) Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 4. Контактторы и пускатели. Раздел 1. Электромеханические контактторы и пускатели. – М.: Стандартинформ, 2013. – 93 с.

32. 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.

33. 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.

34. Григорьев, В. И. Электроснабжение и электрооборудование цехов: учебное пособие / В. И. Григорьев, Э. А. Киреева, В. А. Миронов, А. Н. Чохонелидзе. – М.: – 2003. – 345 с.

35. Грязнов, М. В. Основы теории надежности / М. В. Грязнов // В книге: Организация перевозок и управление на транспорте / А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов. – Магнитогорск. – 2005. – С. 189-193.

36. Губаева, О. Г. Безопасность, экология и надежность электроустановок: учебно-методическое пособие к выполнению практических работ / О. Г. Губаева, Е. А. Миронова. – Казань: КГЭУ, 2014. – 48 с.

37. Губинский, А. И. Надежность и качество функционирования энергетических систем / А. И. Губинский. – Л.: Наука, 1982. – 269 с.

38. Гук, Ю. Б. Оценка надежности электроустановок: производственно-практическое издание / Ю. Б. Гук, Э. А. Лосев, А. В. Мясников; под ред. Б. А. Константинова. – М.: Энергия, 1974. – 200 с.

39. Гуревич, Ю. Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Ю. Е. Гуревич. – М.: Изд-во «ЭЛЕКС-КМ», 2005. – 407 с.

40. Гуров, С. В. Надежность систем при неполной информации / С. В. Гуров, Л. В. Уткин. – СПб.: Любавич, 1999. – 160 с.

41. Гутов, И. А. Надежность работы электрических сетей и пути ее повышения / И. А. Гутов // Ползуновский альманах: Вестник Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. – 2004. – № 1. – С. 40-42.

42. Давыдов, П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем / П. С. Давыдов. – М.: Радио и связь, 1988. – 255 с.
43. Дарьенков, А. Б. Энергетическая политика / А. Б. Дарьенков. – М.: КноРус, 2014. – 183 с.
44. Дубицкий, М. А. Надежность основного оборудования электроэнергетических систем / М. А. Дубицкий // Современные технологии и научно-технический прогресс: межвузовская научно-техническая конференция «Современные технологии и научно-технический прогресс». – 2012. – Т. 1. – № 1. – С. 12.
45. Дьяков, А. Ф. Пути повышения надежности энергоснабжения страны / А. Ф. Дьяков // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82. – № 3. – С. 214.
46. Ермаков, В. Ф. Надежность электрических сетей в кратковременных аварийных режимах / В. Ф. Ермаков, Ф. А. Кушнарев, В. И. Свешников // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 1997. – № 1. – С. 26-28.
47. Жежеленко, И. В. Развитие методов расчета электрических нагрузок / И. В. Жежеленко, В. М. Степанов // Электричество. – 1993. – № 2. – С. 2-9.
48. Зорин, В. В. Надежность систем электроснабжения / В. В. Зорин и др. – Киев: Виша шк, 1984. – 192 с.
49. Иванов, В. П. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов / В. П. Иванов, В. И. Курт, В. А. Овсяников, В. Л. Филиппов. – Казань: Отечество, 2006. – 595 с.
50. Ивченко, Г. И. Теория массового обслуживания / Г. И. Ивченко, В. А. Каштанов, И. Н. Коваленко. – М.: Высшая школа, 1982. – 256 с.
51. Измайлов, В. В. Прогнозирование остаточного ресурса электроконтактных соединений на основе статистического анализа данных тепловизионного мониторинга / В. В. Измайлов, М. В. Новоселова, А. Е. Наумов // Электротехника. – 2009. – № 5. – С. 59-63.
52. Иыуду, К. А. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем / К. А. Иыуду. – М.: Высшая школа, 1989. – 214 с.

53. Кадомская, К. П. Теория вероятностей и ее применение к задачам электроэнергетики / К. П. Кадомская. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 376 с.
54. Капур, К. Надежность и проектирование систем: переводное издание / К. Капур, Л. Ламберсон; пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 603 с.
55. Киреева, Э. А. Электроснабжение и электрооборудование цехов промышленных предприятий : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / Э. А. Киреева. – 2-е изд., стер. – М.: Кнорус, 2013. – 368 с.
56. Князевский, Б. А. Электроснабжение и электрооборудование промышленных предприятий и цехов / Б. А. Князевский, Б. Ю. Липкин. – М.: Энергия, 1971. – 373 с.
57. Ковалев, А. П. Методика расчета надежности электроснабжения узлов нагрузки с учетом трех видов отказов элементов системы / А. П. Ковалев, В. П. Муха, А. А. Васин, В. В. Якимишина // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДонНТУ, 2002. – № 50. – С. 125-133.
58. Конюхова, Е. А. Электроснабжение: учебник / Е. А. Конюхова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 510 с.
59. Конюхова, Е. А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий: производственно-практическое издание / Е. А. Конюхова, Э. А. Киреева. – М.: Энергопрогресс, 2001. – 92 с.
60. Кобец, Б. Б. Smart Grid: концептуальные положения / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова // Энергорынок. – 2010. – № 3. – С. 67-72.
61. Котеленец, Н. Ф. Испытания и надежность электрических машин: учебное пособие / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
62. Кузнецов, Н. Л. Надежность электрических машин: учебное пособие для вузов / Н. Л. Кузнецов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
63. Левцев, А. П. Проблемы и пути реализации энергосберегающих проектов, дающих наибольший эффект / А. П. Левцев, В. Ю. Ш. Ауджаеави, О. А. Кручинкина // Регионология. – 2015. – № 3 (92). – С. 79-86.

64. Любимов, А. К. Введение в теорию надежности: учебное пособие / А. К. Любимов. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. госун-та, 2012. – 99 с.
65. Михайлов, В. В. Надежность электроснабжения промышленных предприятий / В. В. Михайлов. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1982. – 152 с.
66. Моисеев, В. С. Теория надежности: учебное пособие / В. С. Моисеев и др.; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования «Казан. гос. техн. ун-т». – Казань: Изд-во Казанского государственного технического университета, 2010. – 104 с.
67. Мурахтин, М. А. Надежность систем электроснабжения / М. А. Мурахтин // Вестник научных конференций. – 2015. – № 4–2 (4). – С. 101-102.
68. Надежность систем энергообеспечения предприятий: метод. указания / сост.: Э. Ю. Абдуллазянов, В. К. Ильин, М. А. Наумова. – Казань: КГЭУ, 2004. – 54 с.
69. Надежность технических систем / Под ред. Е. В. Сучака, Н. В. Василенко. – Красноярск: МГП «Раско», 2001. – 600 с.
70. Нормы и испытания электрооборудования и аппаратов электроустановок потребителей. – М.: Главгосэнергонадзор, 1982. – 104 с.
71. Объем и нормы испытаний электрооборудования: СО 34.45-51.300-97; РД 34.45-51.300-97 / Рос. акц. о-во энергетики и электрификации «ЕЭС России»; [под общ. ред.: Б. А. Алексеева, Ф. Л. Когана, Л. Г. Мамиконянца]. – 6-е издание, с изменениями и дополнениями, по состоянию на 01.10.2006. – Москва: ЭНАС, 2007. – 255 с.
72. Осика, Л. К. Организационные и технические мероприятия по обеспечению надежности электроснабжения потребителей – субъектов оптового и розничного рынков электроэнергии / Л. К. Осика // Электрика. – 2004. – № 6. – С. 3-11.
73. Пампуро, В. И. Управление надежностью электроэнергетических объектов / В. И. Пампуро // Электричество. – 1991. – № 12. – С. 15-21.

74. Папков, Б. В. Возможности управления электропотреблением и оценка ущерба от нарушений электроснабжения в структурно сложных технических системах / Б. В. Папков // Известия АИН: сб. науч.-техн. тр. Т. 15. – Н. Новгород: НГТУ, 2005. – С. 121-126.

75. Папков, Б. В. Надежность и эффективность электроснабжения: учебное пособие / Б. В. Папков. – Н. Новгород: НГТУ, 1996. – 209 с.

76. Папков, Б. В. Надежность систем электроснабжения: учебное пособие / Б. В. Папков, Д. Ю. Пашали. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2007. – 192 с.

77. Попырин, Л. С. Надежность сложных энергетических объектов: Теоретические основы / Л. С. Попырин // Известия Российской Академии наук. Энергетика. – 1995. – № 5. – С. 12-25.

78. Пospelова, Т. Г. Основы энергосбережения / Т. Г. Пospelова. – Мн.: Технология, 2000. – 353 с.

79. Прошан, Ф. Многозначные монотонные системы / Ф. Прошан, Г. Ж. Цатурян. – М.: Надежность и контроль качества, Т. 1, 1990. – С. 6-16.

80. Прусс, В. Л. Повышение надежности сельских электрических сетей: производственно-практическое издание / В. Л. Прусс, В. В. Тисленко. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.

81. Разгильдеев, Г. И. Надежность электромеханических систем и электрооборудования: учебное пособие / Г. И. Разгильдеев. – Кемерово: КузГТУ, 2008. – 175 с.

82. Райнин, В. Е. Совершенствование защитных характеристик автоматических выключателей низкого напряжения / В. Е. Райнин, А. С. Кобозев // Электротехника. 2009. – № 2. – С. 44-51.

83. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. – М.: НЦ ЭНАС, 2004. – 256 с.

84. Розанов, М. Н. Надежность электроэнергетических систем: научное издание / М. Н. Розанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 200 с.

85. Розанов, М. Н. Надежность электроэнергетических систем: производственно-практическое издание / М. Н. Розанов. – М.: Энергия, 1974. – 176 с.

86. Рябчицкий, М. В. Низковольтные коммутационные (силовые) аппараты для нужд электроэнергетики / М. В. Рябчицкий, Д. Н. Нечаев, А. В. Кокорин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 8. – С. 17-25.

87. Рябчицкий, М. В. Низковольтные коммутационные (силовые) аппараты для нужд электроэнергетики / М. В. Рябчицкий, Д. Н. Нечаев, А. В. Кокорин // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2014. – № 8 (61). – С. 4-10.

88. Садыков, Р. Р. Анализ надежности функционирования оборудования цеховых сетей / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Надежность и безопасность энергетики. – 2016. – № 2(33). – С. 46-50.

89. Садыков, Р. Р. Оценка результатов исследования технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Надежность и безопасность энергетики. – 2015. – № 4(31). – С. 57-60.

90. Садыков, Р. Р. Некоторые особенности исследования основных показателей надежности низковольтных аппаратов / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Вестник КГЭУ. – 2016. – № 1(29). – С. 105-115.

91. Садыков, Р. Р. Обработка статистической информации с целью выявления законов изменения параметров надежности оборудования цеховых сетей / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Вести высших учебных заведений Черноземья. Энергоэнергетика. – 2016. – № 2(44). – С. 34-43.

92. Садыков, Р. Р. Исследование и оценка функциональных параметров низковольтных аппаратов / Е. И. Грачева, А. Р. Сафин, Р. Р. Садыков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – № 5-6. – С. 13-21.

93. Садыков, Р. Р. Оценка надежности низковольтных цеховых сетей промышленного электроснабжения / Р. Р. Садыков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – № 5-6. – С. 70-71.

94. Садыков Р. Р. Влияние режимных и схемных параметров электрооборудования на эквивалентное сопротивление цеховых сетей / А. И. Федотов, Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 7-8. – С. 92-97.

95. Садыков, Р. Р. Исследование вероятностных характеристик систем электроснабжения / Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – № 1-2. – С. 94-100.

96. Садыков, Р. Р. Влияние режимов эксплуатации систем внутрицехового электроснабжения на их функциональные характеристики / Е. И. Грачева, А. Р. Сафин, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Надежность и безопасность энергетики. – 2016. – № 4(35). – С. 50-55.

97. Садыков, Р. Р. Применение аналитического метода расчета надежности элементов систем электроснабжения на основе вероятностных моделей / Е. И. Грачева, А. Р. Сафин, Р. Р. Садыков // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – № 1(36). – С. 48-52.

98. Садыков, Р. Р. Моделирование характеристик надежности низковольтных коммутационных аппаратов на основе случайных выборок на примере контакторов / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, А. Р. Сафин, Р. Р. Садыков // Вести высших учебных заведений Черноземья. Электроэнергетика. – 2016. – № 4(46). – С. 36-41.

99. Садыков, Р. Р. Влияние тока, проходящего через контакты низковольтных аппаратов, на их нагрев / Е. И. Грачева, Т. А. Серпионова, Р. Р. Садыков // Техника и технология: новые перспективы развития: Материалы XIX Международной научно-практической конференции (20.11.2015). – М.: Изд. «Спутник+», 2015. – С. 16-21.

100. Садыков, Р. Р. Формирование моделей оценки эксплуатационной надежности участков цеховых сетей / Е. И. Грачева, Т. А. Серпионова, Р. Р. Садыков // Научная дискуссия: вопросы технических наук. Сборник статей по материалам XLI международной заочной научно-практической конференции. – М.: Изд. «Интернаука», 2015. – № 12(30). – С. 63-69.

101. Садыков, Р. Р. Экспериментальные исследования сопротивлений контактных соединений низковольтных электрических аппаратов / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Научные исследования: от теории к практике: Материалы VI Международной научно-практической конференции (Чебоксары,

31 дек. 2015 г.). – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – № 5(6). – С. 214-217.

102. Садыков, Р. Р. Исследование параметров эффективности эксплуатации систем внутрицехового электроснабжения с учетом основных влияющих факторов / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Т. А. Серпионова, Р. Р. Садыков // Фундаментальные и прикладные научные исследования в XXI веке: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции (Новосибирск, 14 марта 2016 г.) – Новосибирск: ЦСРНИ, 2016. 38-56.

103. Садыков, Р. Р. Моделирование параметров функциональных характеристик цеховых сетей / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Т. А. Серпионова, Р. Р. Садыков // Технические науки – от теории к практике: Сб. ст. по материалам LIII международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2015. – С. 105-114.

104. Садыков, Р. Р. Прогнозирование эффективности функционирования электрических систем внутризаводского электроснабжения / Т. А. Серпионова, Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков // Материалы докладов XI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (23–25 марта 2016 г.) в 3-х т.; Т 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – С. 127-128.

105. Садыков, Р. Р. Моделирование основных функциональных характеристик и структуры систем внутрицехового электроснабжения / Т. А. Серпионова, Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков // Материалы докладов XI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (23–25 марта 2016 г.) в 3-х т.; Т 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – С. 131-132.

106. Садыков, Р. Р. Анализ основных технических характеристик низковольтной аппаратуры / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Актуальные проблемы электроэнергетики: Сб. науч.-технич. статей. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2016. – С. 173-177.

107. Садыков, Р. Р. Исследование достоверности величины потерь электроэнергии в низковольтных сетях промышленных предприятий / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Актуальные проблемы электроэнергетики: Сб.

науч.-технич. статей. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2016. – С. 178-182.

108. Садыков, Р. Р. Исследования работоспособности автоматических выключателей по статистическим данным / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли», Т. 2. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт. – 2016. – С. 104-107.

109. Садыков, Р. Р. Формирование моделей оценки эксплуатационной надежности систем внутризаводского электроснабжения / Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков // Вести высших учебных заведений Черноземья. Электроэнергетика. – 2017. – № 1(47). – С. 27-37.

110. Садыков, Р. Р. Методы оценки надежности функционирования систем внутрицехового электроснабжения // Материалы докладов XII Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения» (26–28 апреля 2017 г.) в 3-х т.; Т 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С. 173-175.

111. Садыков, Р. Р. Основные аспекты исследования надежности функционирования систем электроснабжения промышленных предприятий // Материалы докладов XII Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения» (26–28 апреля 2017 г.) в 3-х т.; Т 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С. 176-177.

112. Садыков, Р. Р. Оптимизация проектирования систем электроснабжения с учетом возможных ситуаций и вероятностных параметров надежности / Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков // Вести высших учебных заведений Черноземья. Электроэнергетика. – 2017. – № 2(48). – С. 22-26.

113. Садыков, Р. Р. Сравнительный анализ методов оценки надежности низковольтных цеховых сетей / Е.И. Грачева, Р.Р. Садыков, Р.Р. Кызрачев, С.А. Саэтгараева, А.А. Юсупова // Материалы докладов XII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и

управление в электроэнергетике» (01–03 ноября 2017 г.) – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С. 50-57.

114. Садыков, Р. Р. Основные аспекты исследования надежности функционирования оборудования систем внутриводского электроснабжения // Е.И. Грачева, Р.Р. Садыков, Р.Р. Кызрачев, С.А. Саегараева, А.А. Юсупова // Материалы докладов XII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (01–03 ноября 2017 г.) – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С. 58-65.

115. Садыков, Р. Р. Моделирование изменения параметров надежности функционирования оборудования систем цехового электроснабжения / Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков, А. В. Шагидуллин // Вести высших учебных заведений Черноземья. Автоматизация и информатика. – 2017. – № 3(49). – С. 59-67.

116. Свидетельство № 2017662973 Российская Федерация. Оценка вероятностей состояния системы электроснабжения : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Р. Р. Садыков, А. Р. Сафин ; заявитель и правообладатель Казан. гос. энерг. ун-т. – № 2017619720 ; заявл. 28.09.2017 ; зарегистр. 22.11.2017. – 1 с.

117. Садыков, Р. Р. Учет потерь холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, Р. Р. Садыков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 1-2. – С. 53-63.

118. Сазыкин, В. Г. Повышение надежности элементов электрической сети / В. Г. Сазыкин, А. Г. Кудряков, Г. А. Султанов, Е. А. Кочубей // Наука XXI века: сборник научных статей по итогам Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 80-82.

119. Секретарев, Ю. А. Надежность электроснабжения: учебное пособие / Ю. А. Секретарев. – Новосибирск: [б. и.], 2010 – 103 с.

120. Смагин, В. А. Немарковские задачи теории надежности / В. А. Смагин. – Мин. обор. СССР, 1982. – 269 с.

121. Стрельников, Н. А. Электроснабжение промышленных предприятий: учебное пособие / Н. А. Стрельников. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 100 с.
122. Судаков, Р. С. Испытания технических систем / Р. С. Судаков. – М.: Машиностроение, 1988. – 271 с.
123. Таубкин, И. И. Предельная чувствительность и информативность тепловизоров и других оптико-электронных преобразователей изображения / И. И. Таубкин, М. А. Тришенков // Оптический журнал. – 1996. – Т. 63. – № 6. – С. 18-41.
124. Тошходжаева, М. И. Надежность систем электроснабжения как экономический показатель / М. И. Тошходжаева // Новое слово в науке: перспективы развития. V Международная научно-практическая конференция. – 2015. – № 4(6). – С. 176-178.
125. Трубицын, В. И. Надежность электрической части электростанций: учебное пособие / В. И. Трубицын. – М.: МЭИ, 1993. – 112 с.
126. Трубицын, В. И. Оценка надежности схем электрических соединений станций и подстанций: учебное пособие / В. И. Трубицын. – М.: ИУЭ ГУУ, 2003. – 99 с.
127. Труханов, В. М. Прогнозирование надежности современных технических систем на этапах проектирования, производства и эксплуатации / В. М. Труханов // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 8. – С. 54-57.
128. Фазылов, Х. Ф. Оптимизация режимов электроэнергетических систем / Х. Ф. Фазылов, Х. Ю. Юлдашев. – Ташкент: Фан, 1987. – 152 с.
129. Федоров, О. В. Приоритетные отрасли новых технологических укладов: монография / О. В. Федоров, Б. Я. Татарских, А. М. Якушева. – М.: КноРус, 2016. – 280 с.
130. Хольм, Р. Электрические контакты: пер. с англ. / Р. Хольм. – М.: Изд-во иностранная литература, 1961. – 464 с.
131. Хомутов, О. И. Электроснабжение промышленных предприятий / О. И. Хомутов // Сборник статей: ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова». – 2002. – С. 110.

132. Худяков, В. В. Повышение надежности электрических сетей / В. В. Худяков // Электротехника. – 2011. – № 9. – С. 6-11.
133. Чернышев, К. В. Основы теории надежности и диагностики: учебное пособие / К. В. Чернышев. – Волгоград: РПК Политехник, 2003. – 58 с.
134. Чукреев, Ю. Я. Исследование надежности при управлении развитием многоузловых электроэнергетических систем / Ю. Я. Чукреев, Н. А. Манов, Ю. В. Слободян. – Сыктывкар: Коми научный центр УрО АН СССР, 1987. – 28 с.
135. Шлейников, В. Б. Электроснабжение цеха промышленного предприятия: учебное пособие / Шлейников В. Б. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2012. – 115 с.
136. Шульгин, И. В. Статистическое моделирование электрических нагрузок в задаче определения интегральных характеристик систем распределения электрической энергии: монография / И. В. Шульгин, А. А. Герасименко. – Красноярск: СФУ, 2014. – 207 с.
137. Шкундин, С. З. Электробезопасность на горных предприятиях: учебное пособие / С. З. Шкундин, Е. Ф. Цапенко. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во Московского ГГУ, 2008. – 103 с.
138. Шлейников, В. Б. Электроснабжение силовых электроприемников цеха промышленного предприятия: учебное пособие / В. Б. Шлейников. – Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2012. – 110 с.
139. Шишмарев, В. Ю. Надежность технических систем: учебник / В. Ю. Шишмарев. – М.: Академия, 2010. – 304 с.
140. Шубинский, И. Б. Распределение работ по этапам в дискретных системах / И. Б. Шубинский, С. В. Гуров, Л. В. Уткин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 1997. – Вып. 5 (163). – С. 161-170.
141. Щедрин, Н. Н. Упрощение электрических систем при моделировании / Н. Н. Щедрин. – Л.: Энергия, 1966. – 159 с.
142. Яшков, В. А. Надежность систем промышленного электроснабжения, функционирующих в условиях влияния метеофакторов / В. А. Яшков, А. А. Конарбаева, Г. К. Кабдешова // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2. – № 4. – С. 68-71.

143. Cznaznecki and M. Lindmayer. «Influence of contact material properties on the behavior of vacuum arcs around current zero», in Int. Conf. on Electrical Contacts, Electromechanical Components and their Applications, 1986. Nagoya, Japan.

144. J. Kosmac, P. Zunko. A Statistical Vacuum Circuit Breaker model for simulation of Transient Overvoltages. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, № 1, 1995.

145. Somani A. K., Ritcey J. A., Au S. H. L. Computationally efficient phased-mission reliability analysis for systems with variable configurations, TREE Trans. Reliab. R-41. pp. 504-510, 1992.

146. Who Kee Chung, Reliability and availability analysis of cold standby system with repair and multiple non-critical and critical errors, Microelectron. Reliab., 34, 1891-1896, 1994.

147. Sadykov, R. R. Determination of resistance change dependence for contact connections of low-voltage devices according to their nominal parameters / R. R. Sadykov, E. I. Gracheva, O. V. Naumov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – № 24.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФУНКЦИИ ВЕРОЯТНОСТИ  
БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ НИЗКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Значения статистической функции распределения вероятности времени  
безотказной работы магнитного пускателя ПМЕ-211

Год наблюдения, t	Количество элементов			Эмпирическая функция распределения вероятности	
	отказавших за год, n	сумма отказавших, n(t)	исправных, I	безотказной работы, $P^*(t) = P = (N_0 - n(t))/N_0$	отказа, $Q^*(t) = 1 - P^*(t)$
1	1	1	177	0,994	0,006
2	2	3	175	0,987	0,017
3	8	11	167	0,938	0,062
4	15	26	142	0,854	0,146
5	30	56	112	0,685	0,315
6	41	97	71	0,455	0,545
7	38	135	33	0,242	0,758

Значения теоретической функции распределения вероятности времени безотказной работы магнитного пускателя ПМЕ-211

Год наблюдения, t	$(T_{cp} - t)/\sigma$	$F((T_{cp} - t)/\sigma)$	$T_{cp}/\sigma$	$F(T_{cp0}/\sigma)$	Теоретическая функция распределения вероятности	
					безотказной работы, $P(t) = F((T_{cp} - t)/\sigma)/F(T_{cp0}/\sigma)$	отказа, Q(t)
1	4,8	0,998	5,200	1,000	0,998	0,002
2	4,4	0,991	5,200	1,000	0,991	0,009
3	4,0	0,964	5,200	1,000	0,964	0,036
4	3,6	0,885	5,200	1,000	0,885	0,115
5	3,2	0,726	5,200	1,000	0,726	0,274
6	2,8	0,500	5,200	1,000	0,500	0,500
7	2,4	0,274	5,200	1,000	0,274	0,726

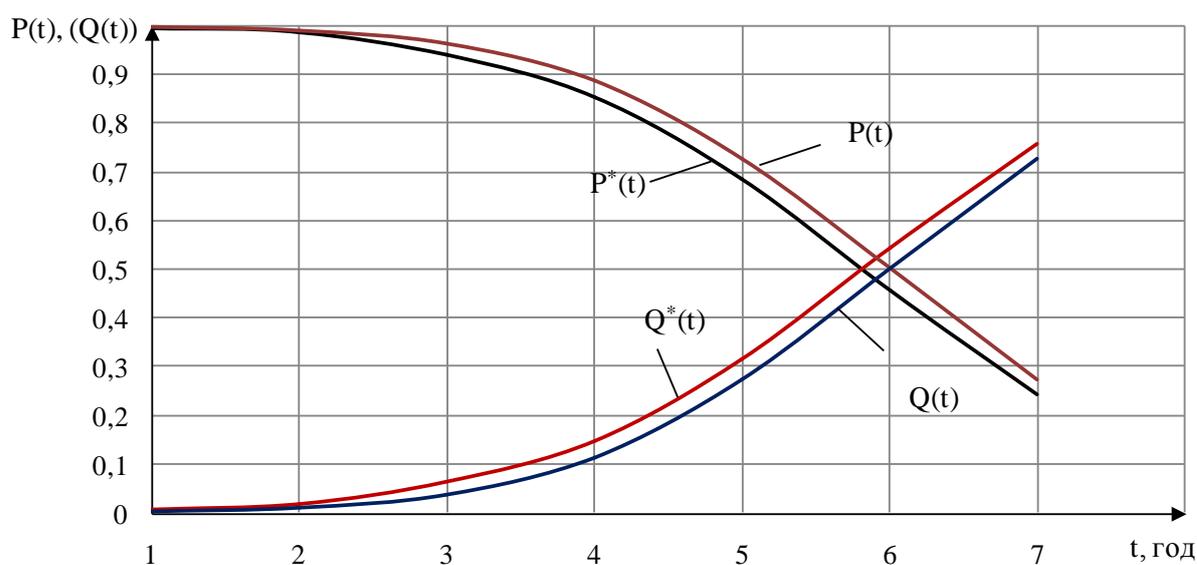


Рисунок А1 – Теоретическая и статистическая функции вероятности безотказной работы (отказа) магнитного пускателя ПМЕ-211

Проверка гипотезы по критерию Колмогорова  
для магнитного пускателя ПМЕ-211

Год наблюдения, t	Теоретическая вероятность отказа, Q(t)	Статистическая вероятность отказа, Q*(t)	Расхождение, $D_n =  Q^*(t) - Q(t) $	Случайная величина, $Y_n = D_n \sqrt{n}$	Значение функции, p(Y <sub>n</sub> )
1	0,002	0,006	0,004	0,064	
2	0,009	0,017	0,008	0,132	
3	0,036	0,062	0,026	0,434	
4	0,115	0,146	0,031	0,523	
5	0,274	0,315	0,041	0,683	
6	0,500	0,545	0,045	0,756	0,618
7	0,726	0,758	0,032	0,546	

Значения статистической функции распределения вероятности времени безотказной работы магнитного пускателя КТ

Год наблюдения, t	Количество элементов			Эмпирическая функция распределения вероятности	
	отказавших, n	сумма отказавших, n(t)	исправных, I	безотказной работы, $P^*(t) = P(N_0 - n(t))/N_0$	отказа, $Q^*(t) = 1 - P^*(t)$
1	1	1	179	0,994	0,006
2	1	2	178	0,989	0,011
3	8	10	170	0,944	0,056
4	10	20	160	0,889	0,111
5	25	45	135	0,750	0,250
6	38	83	97	0,539	0,461
7	40	123	57	0,317	0,683

Значения теоретической функции распределения вероятности времени  
безотказной работы магнитного пускателя КТ

Год наблюдения, t	$(T_{\text{ср}} - t)/\sigma$	$F((T_{\text{ср}} - t)/\sigma)$	$T_{\text{ср}}/\sigma$	$F(T_{\text{ср}}/\sigma)$	Теоретическая функция распределения вероятности	
					безотказной работы, $P(t) = F((T_{\text{ср}} - t)/\sigma)/F(T_{\text{ср}} - \sigma)$	отказа, Q(t)
1	2,9	0,998	3,529	1,000	0,998	0,002
2	2,4	0,992	3,529	1,000	0,992	0,008
3	1,8	0,964	3,529	1,000	0,964	0,036
4	1,2	0,885	3,529	1,000	0,885	0,115
5	0,6	0,726	3,529	1,000	0,726	0,274
6	0,0	0,500	3,529	1,000	0,500	0,500
7	-0,6	0,274	3,529	1,000	0,274	0,726

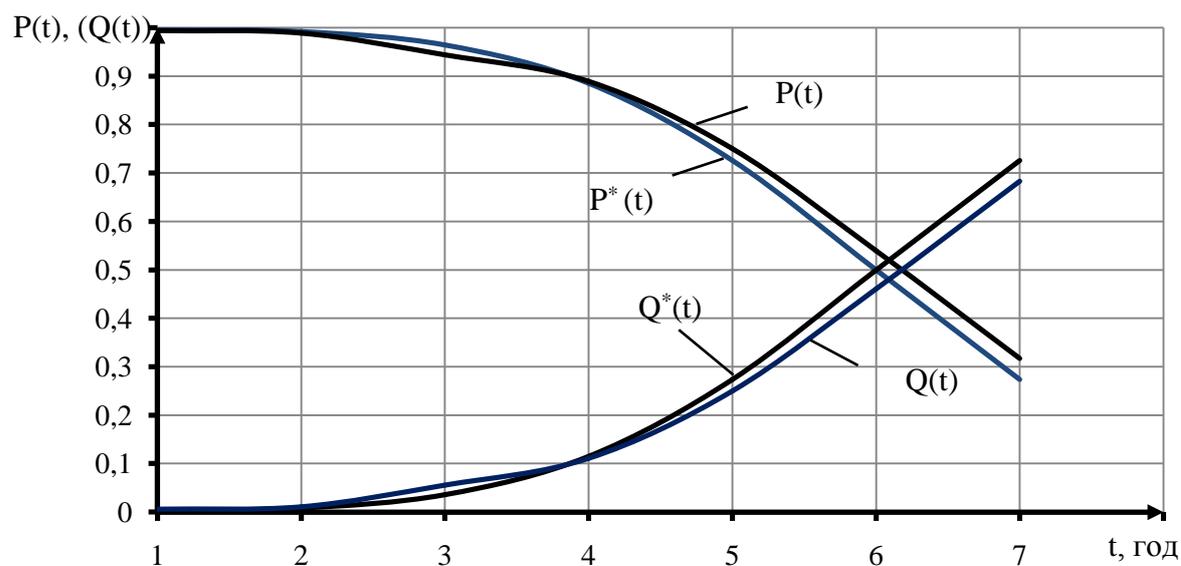


Рисунок А2 – Теоретическая и статистическая функции вероятности  
безотказной работы (отказа) контактора КТ

Проверка гипотезы по критерию Колмогорова  
для контактора КТ

Год наблюдения, t	Теоретическая вероятность отказа, $Q(t)$	Статистическая вероятность отказа, $Q^*(t)$	Расхождение $D_n =  Q^*(t) - Q(t) $	Случайная величина $Y_n = D_n \sqrt{n}$	Значение функции $P(Y_n)$
1	0,002	0,006	0,004	0,060	
2	0,008	0,011	0,003	0,052	
3	0,036	0,056	0,020	0,329	
4	0,115	0,111	0,004	0,065	
5	0,274	0,250	0,024	0,404	
6	0,500	0,461	0,039	0,654	
7	0,726	0,683	0,043	0,718	0,680

Значения статистической функции распределения  
вероятности времени безотказной работы предохранителя ПН2-100

Год наблюдения, t	Количество элементов			Эмпирическая функция распределения вероятности	
	отказавших, n	сумма отказавших, n(t)	исправных, I	безотказной работы, $P^*(t) = P(N_0 - n(t))/N_0$	отказа, $Q^*(t) = 1 - P^*(t)$
1	2	3	4	5	6
1	1	1	280	0,996	0,004
2	0	1	280	0,996	0,004

Таблица А7 (окончание)

1	2	3	4	5	6
3	2	3	278	0,989	0,011
4	0	3	278	0,989	0,011
5	0	3	278	0,989	0,011
6	0	3	278	0,989	0,011
7	1	4	277	0,986	0,014
8	1	5	277	0,982	0,018
9	3	8	274	0,972	0,028
10	11	19	263	0,932	0,068
11	10	29	253	0,897	0,103
12	14	43	239	0,847	0,153
13	25	68	214	0,758	0,242
14	36	104	178	0,630	0,370
15	44	148	134	0,473	0,527
16	42	190	92	0,324	0,676

Таблица А8

Значения теоретической функции распределения вероятности  
времени безотказной работы предохранителя ПН2-100

Год наблюдения, t	$(T_{cp} - t)/\sigma$	$F((T_{cp} - t)/\sigma)$	$T_{cp}/\sigma$	$F(T_{cp}/\sigma)$	Теоретическая функция распределения вероятности	
					безотказной работы, $P(t) = F((T_{cp} - t)/\sigma) / F(T_{cp}/\sigma)$	отказа, Q(t)
1	2	3	4	5	6	7
1	5,4	1,000	5,769	1,000	1,000	0,000
2	5,0	1,000	5,769	1,000	1,000	0,000

Таблица А8 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7
3	4,6	1,000	5,769	1,000	1,000	0,000
4	4,2	1,000	5,769	1,000	1,000	0,000
5	3,8	1,000	5,769	1,000	1,000	0,000
6	3,5	0,999	5,769	1,000	0,999	0,001
7	3,1	0,999	5,769	1,000	0,999	0,001
8	2,7	0,996	5,769	1,000	0,996	0,004
9	2,3	0,989	5,769	1,000	0,989	0,011
10	1,9	0,971	5,769	1,000	0,971	0,029
11	1,5	0,933	5,769	1,000	0,933	0,067
12	1,2	0,885	5,769	1,000	0,885	0,115
13	0,8	0,788	5,769	1,000	0,788	0,212
14	0,4	0,655	5,769	1,000	0,655	0,345
15	0,0	0,500	5,769	1,000	0,500	0,500
16	-0,4	0,345	5,769	1,000	0,345	0,655

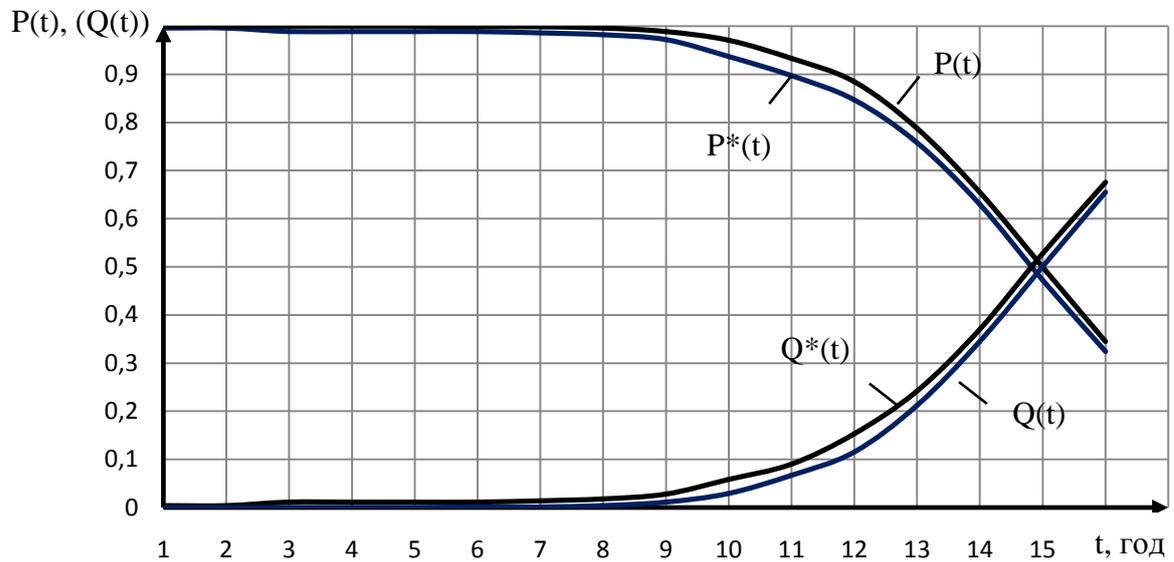


Рисунок А3 – Теоретическая и статистическая функции вероятности безотказной работы (отказа) предохранителя ПН2-100

Проверка гипотезы по критерию Колмогорова  
для предохранителя ПН2-100

Год наблюдения, t	Теоретическая вероятность отказа, $Q(t)$	Статистическая вероятность отказа, $Q^*(t)$	Расхождение $D_n =  Q^*(t) - Q(t) $	Случайная величина $Y_n = D_n \sqrt{n}$	Значение функции $p(Y_n)$
1	0,000	0,004	0,004	0,052	
2	0,000	0,004	0,004	0,052	
3	0,000	0,011	0,011	0,157	
4	0,000	0,011	0,011	0,156	
5	0,000	0,011	0,011	0,156	
6	0,001	0,011	0,010	0,143	
7	0,001	0,014	0,013	0,195	
8	0,004	0,018	0,014	0,203	
9	0,011	0,028	0,017	0,257	
10	0,029	0,068	0,039	0,569	0,895
11	0,067	0,103	0,036	0,533	
12	0,115	0,153	0,038	0,560	
13	0,212	0,242	0,030	0,442	
14	0,345	0,370	0,025	0,370	
15	0,500	0,527	0,027	0,393	
16	0,655	0,676	0,021	0,312	

Значения статистической функции распределения  
вероятности времени безотказной работы пакетного выключателя ПВ-3

Год наблюдения, t	Количество элементов			Эмпирическая функция распределения вероятности	
	отказавших, n	сумма отказавших, n(t)	исправных, I	безотказной работы, $P^*(t) = P(N_0 - n(t))/N_0$	отказа, $Q^*(t) = 1 - P^*(t)$
1	0	0	206	1,000	0,000
2	0	0	206	1,000	0,000
3	0	0	206	1,000	0,000
4	0	0	206	1,000	0,000
5	0	0	206	1,000	0,000
6	0	0	206	1,000	0,000
7	1	1	205	0,995	0,005
8	0	1	205	0,995	0,005
9	0	1	205	0,995	0,005
10	1	2	204	0,990	0,010
11	0	2	204	0,990	0,010
12	0	2	204	0,990	0,010
13	1	3	203	0,985	0,015
14	1	4	203	0,981	0,019
15	3	7	200	0,966	0,034

Значения теоретической функции распределения  
вероятности времени безотказной работы пакетного выключателя ПВ-3

Год наблюдения, t	$(T_{cp} - t)/\sigma$	$F((T_{cp} - t)/\sigma)$	$T_{cp}/\sigma$	$F(T_{cp}/\sigma)$	Теоретическая функция распределения вероятности	
					безотказной работы, $P(t) = F((T_{cp} - t)/\sigma)/F(T_{cp} - \sigma)$	отказа, Q(t)
1	6,6	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
2	6,2	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
3	5,9	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
4	5,5	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
5	5,2	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
6	4,8	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
7	4,5	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
8	4,1	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
9	3,8	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
10	3,4	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
11	3,1	0,999	6,897	1,000	0,999	0,001
12	2,8	0,997	6,897	1,000	0,997	0,003
13	2,4	0,992	6,897	1,000	0,992	0,008
14	2,1	0,982	6,897	1,000	0,982	0,018
15	1,7	0,955	6,897	1,000	0,955	0,045

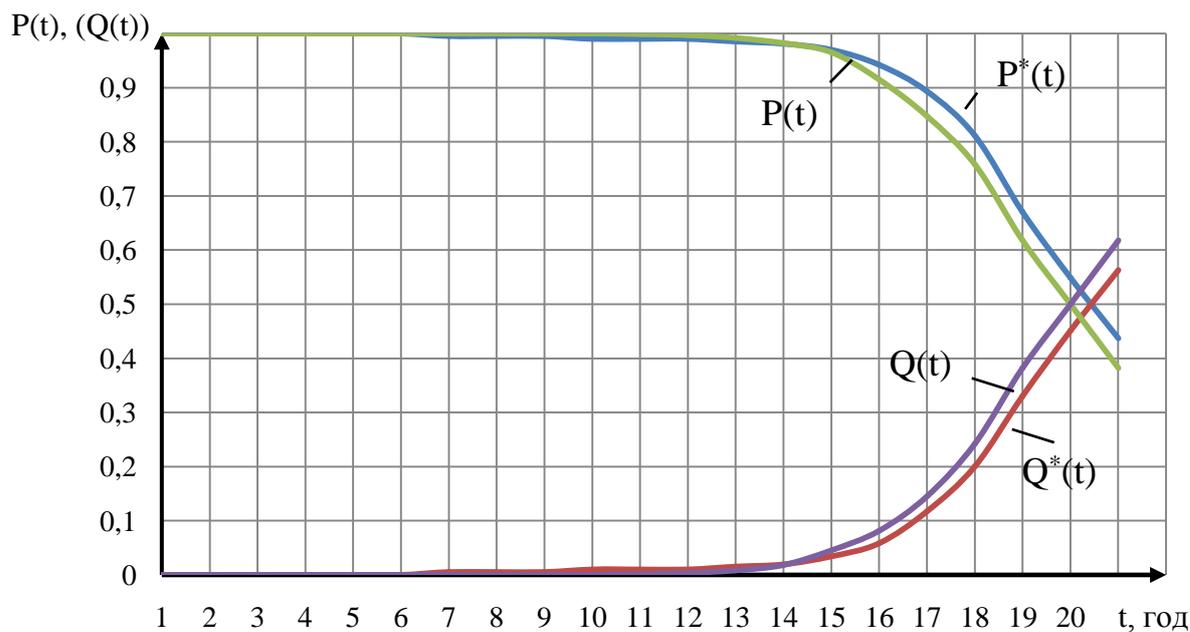


Рисунок А4 – Теоретическая и статистическая функции вероятности безотказной работы (отказа) пакетного выключателя ПВ-3

Таблица А12

Проверка гипотезы по критерию Колмогорова для пакетного выключателя ПВ-3

Год наблюдения, $t$	Теоретическая вероятность отказа, $Q(t)$	Статическая вероятность отказа, $Q^*(t)$	Расхождение $D_n =  Q^*(t) - Q(t) $	Случайная величина $Y_n = D_n \sqrt{n}$	Значение функции $r(Y_n)$
1	2	3	4	5	6
1	0,000	0,000	0,000	0,000	
2	0,000	0,000	0,000	0,000	
3	0,000	0,000	0,000	0,001	
4	0,000	0,000	0,000	0,000	
5	0,000	0,000	0,000	0,000	
6	0,000	0,000	0,000	0,000	
7	0,000	0,005	0,005	0,072	
8	0,000	0,005	0,005	0,072	
9	0,000	0,005	0,005	0,072	

Таблица А12 (окончание)

1	2	3	4	5	6
10	0,000	0,010	0,010	0,143	
11	0,001	0,010	0,009	0,128	
12	0,003	0,010	0,007	0,099	
13	0,008	0,015	0,007	0,099	
14	0,018	0,019	0,001	0,021	
15	0,045	0,034	0,011	0,162	0,531

Таблица А13

Значения статистической функции распределения  
вероятности времени безотказной работы рубильника Р

Год наблюдения, t	Количество элементов			Эмпирическая функция распределения вероятности	
	отказавших, n	сумма отказавших, n(t)	исправных, I	безотказной работы, $P^*(t) = N_0 - n(t)/N_0$	отказа, $Q^*(t) = 1 - P^*(t)$
1	2	3	4	5	6
1	0	0	163	1,000	0,000
2	0	0	163	1,000	0,000
3	0	0	163	1,000	0,000
4	1	1	162	0,994	0,006
5	0	1	162	0,994	0,006
6	1	2	161	0,998	0,012
7	0	2	161	0,998	0,012
8	2	4	159	0,975	0,025
9	0	4	159	0,975	0,025
10	0	4	159	0,975	0,025
11	0	4	159	0,975	0,025
12	0	4	159	0,975	0,025
13	2	6	157	0,963	0,037

Таблица А13 (окончание)

1	2	3	4	5	6
14	2	8	155	0,951	0,049
15	4	12	151	0,926	0,074

Таблица А14

Значения теоретической функции распределения  
вероятности времени безотказной работы рубильника Р

Год наблюдения, t	$(T_{cp} - t)/\sigma$	$F((T_{cp} - t)/\sigma)$	$T_{cp}/\sigma$	$F(T_{cp}/\sigma)$	Теоретическая функция распределения вероятности	
					безотказной работы, $P(t) = F((T_{cp} - t)/\sigma)/F(T_{cp}/\sigma)$	отказа, $Q(t) = 1 - P(t)$
1	6,6	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
2	6,2	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
3	5,9	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
4	5,5	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
5	5,2	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
6	4,8	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
7	4,5	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
8	4,1	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
9	3,8	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
10	3,4	1,000	6,897	1,000	1,000	0,000
11	3,1	0,999	6,897	1,000	0,999	0,001
12	2,8	0,997	6,897	1,000	0,997	0,003
13	2,4	0,992	6,897	1,000	0,992	0,008
14	2,1	0,982	6,897	1,000	0,982	0,018
15	1,7	0,955	6,897	1,000	0,955	0,045

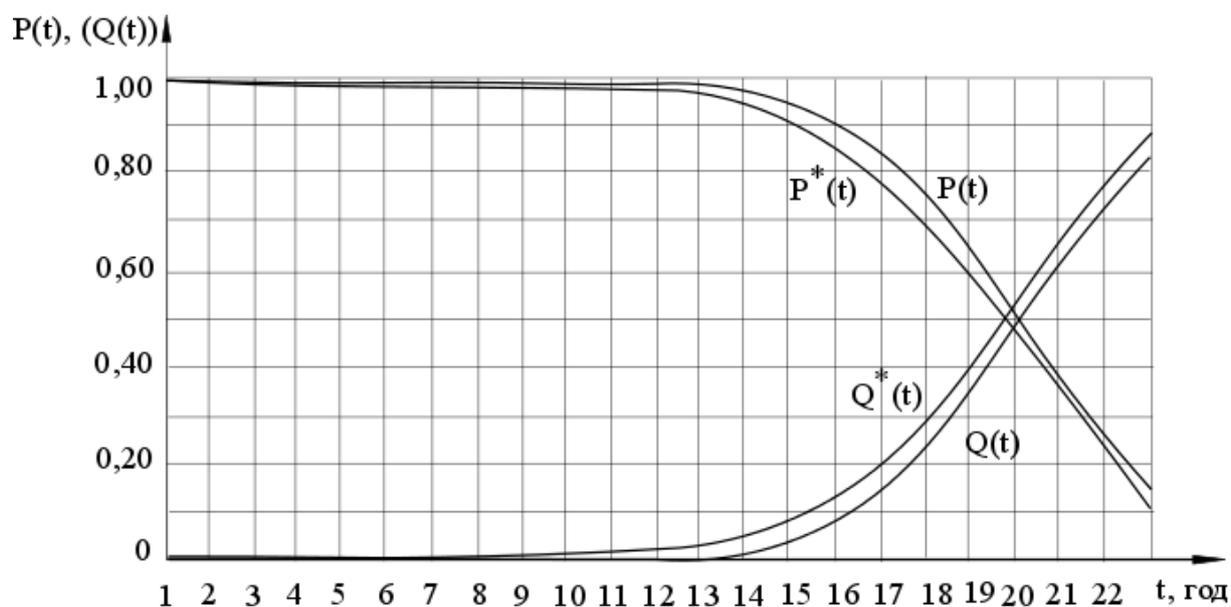


Рисунок А5 – Теоретическая и статистическая функции вероятности безотказной работы (отказа) рубильника Р

Таблица А15

Проверка гипотезы по критерию Колмогорова для рубильника

Год наблюдения, t	Теоретическая вероятность отказа, Q(t)	Статистическая вероятность отказа, Q*(t)	Расхождение $D_n =  Q^*(t) - Q(t) $	Случайная величина $Y_n = D_n \sqrt{n}$	Значение функции, p(y <sub>n</sub> )
1	2	3	4	5	6
1	0,000	0,000	0,000	0,000	
2	0,000	0,000	0,000	0,000	
3	0,000	0,000	0,000	0,000	
4	0,000	0,006	0,006	0,078	
5	0,000	0,006	0,006	0,078	
6	0,000	0,012	0,012	0,157	
7	0,000	0,012	0,012	0,157	
8	0,000	0,025	0,025	0,313	
9	0,000	0,025	0,024	0,312	
10	0,000	0,025	0,024	0,309	
11	0,001	0,025	0,024	0,301	

Таблица А15 (окончание)

1	2	3	4	5	6
12	0,003	0,025	0,022	0,275	
13	0,008	0,037	0,029	0,368	
14	0,018	0,049	0,031	0,397	
15	0,045	0,074	0,029	0,365	
23	0,841	0,883	0,042	0,542	0,631

Таблица А16

Значения статистической функции распределения  
вероятности времени безотказной работы кабельной линии АВВГ

Год наблюдения, t	Количество элементов			Эмпирическая функция распределения вероятности	
	отказавших, n	сумма отказавших, n(t)	исправных, I	безотказной работы, $P^*(t) = N_0 - n(t)/N_0$	отказа, $Q^*(t) = 1 - P^*(t)$
21	0	0	72	1,000	0,000
22	0	0	72	1,000	0,000
23	0	0	72	1,000	0,000
24	0	0	72	1,000	0,000
25	0	0	72	1,000	0,000
26	0	0	72	1,000	0,000
27	0	0	72	1,000	0,000
28	0	0	72	1,000	0,000
29	1	1	71	0,986	0,014
30	0	1	71	0,986	0,014
31	0	1	71	0,986	0,014
32	0	1	71	0,972	0,014
33	1	2	70	0,972	0,028
34	0	2	70	0,972	0,028
35	0	2	70	0,972	0,028

Значения теоретической функции распределения  
вероятности времени безотказной работы кабельной линии АВВГ

Год наблюдения, t	$(T_{cp} - t)/\sigma$	$F((T_{cp} - t)/\sigma)$	$T_{cp}/\sigma$	$F(T_{cp}/\sigma)$	Теоретическая функция распределения вероятности	
					безотказной работы, $P(t) = F((T_{cp} - t)/\sigma)/F(T_{cp}/\sigma)$	отказа, $Q(t) = 1 - P(t)$
21	8,5	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
22	8,2	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
23	7,9	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
24	7,6	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
25	7,4	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
26	7,1	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
27	6,8	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
28	6,5	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
29	6,2	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
30	5,9	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
31	5,6	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
32	5,3	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
33	5,0	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
34	4,7	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
35	4,4	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000

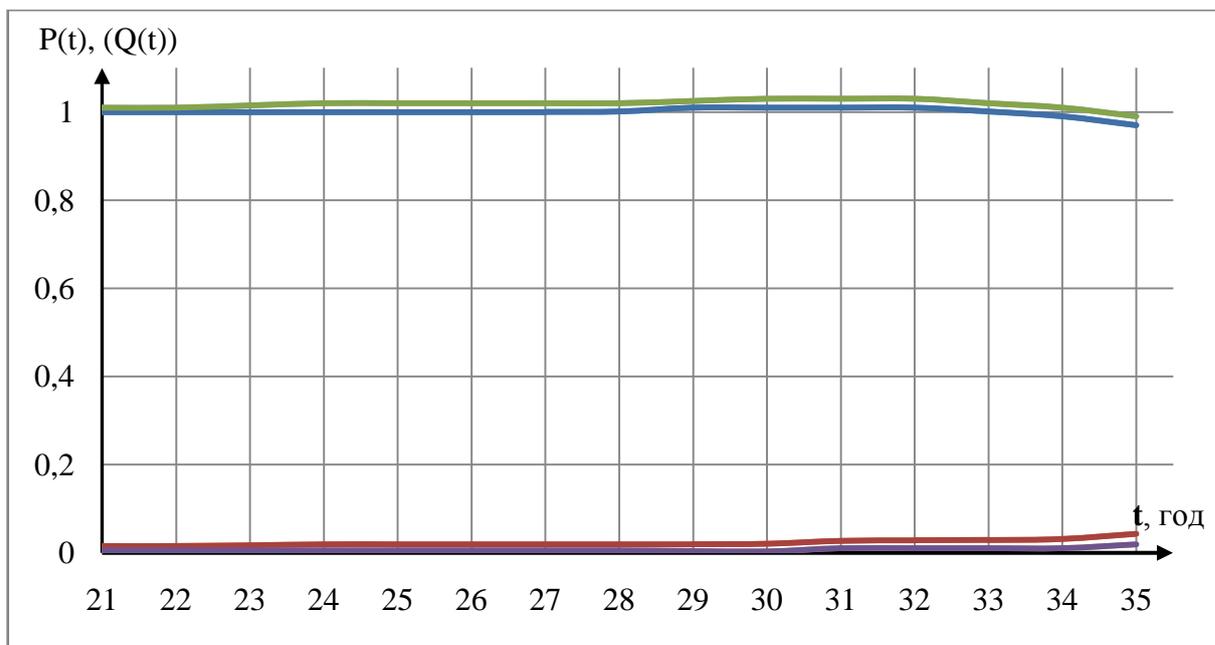


Рисунок А6 – Теоретическая и статическая функции вероятности безотказной работы (отказа) кабельной линии АВВГ 0,4 кВ

Таблица А18

Проверка гипотезы по критерию Колмогорова для кабельной линии АВВГ

Год наблюдения, t	Теоретическая вероятность отказа, Q(t)	Статистическая вероятность отказа, Q*(t)	Расхождение $D_n =  Q^*(t) - Q(t) $	Случайная величина $Y_n = D_n \sqrt{n}$	Значение функции, p(y <sub>n</sub> )
1	2	3	4	5	6
21	0,000	0,000	0,000	0,000	
22	0,000	0,000	0,000	0,000	
33	0,000	0,000	0,000	0,000	
24	0,000	0,000	0,000	0,000	
25	0,000	0,000	0,000	0,000	
26	0,000	0,000	0,000	0,000	
27	0,000	0,000	0,000	0,000	

Таблица А18 (окончание)

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
28	0,000	0,000	0,000	0,000	
29	0,000	0,000	0,000	0,000	
30	0,000	0,014	0,014	0,117	
31	0,000	0,014	0,014	0,115	
32	0,000	0,014	0,014	0,118	
33	0,000	0,014	0,014	0,118	
34	0,000	0,028	0,028	0,236	
35	0,000	0,028	0,028	0,236	0,984

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
(обязательное)

ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ  
НИЗКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Интенсивность отказов магнитного пускателя ПМЕ-211

Год наблюдения $t$ , год	Значение $(T_{cp} - t)/\sigma$	Значение функции $F((T_{cp} - t)/\sigma)$	Интенсивность отказов, 1/год
1	2,9	0,998	$3,11 \cdot 10^{-3}$
2	2,4	0,991	$1,49 \cdot 10^{-2}$
3	1,8	0,964	$5,13 \cdot 10^{-2}$
4	1,2	0,855	0,133
5	0,6	0,726	0,272
6	0,0	0,500	0,469
7	-0,6	0,274	0,720

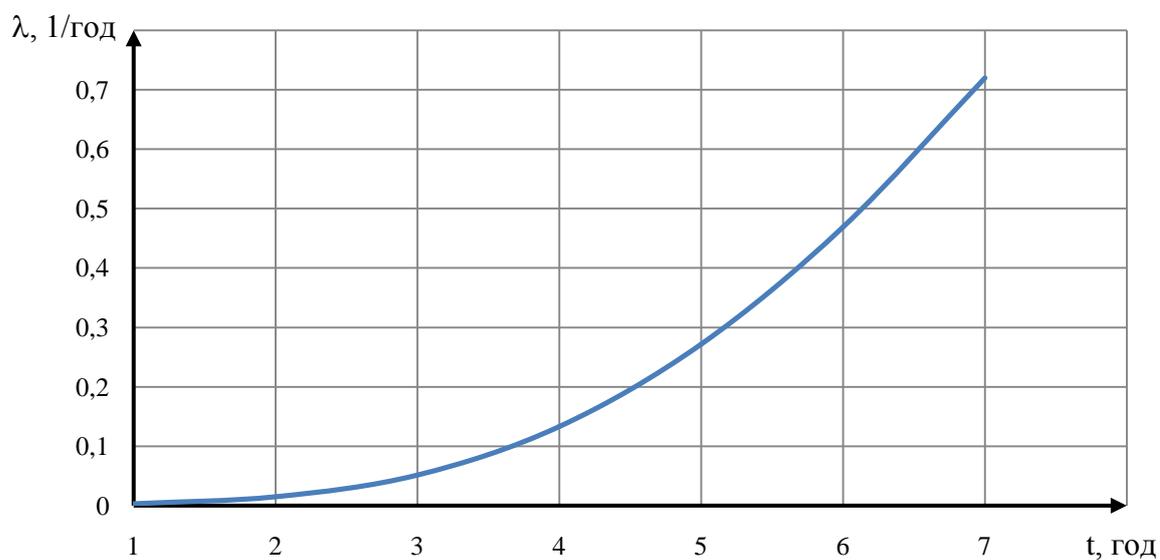


Рисунок Б1 – Интенсивность отказов магнитного пускателя ПМЕ-211

Интенсивность отказов контактора КТ

Год наблюдения $t$ , год	Значение $(T_{\text{ср}} - t)/\sigma$	Значение функции $F((T_{\text{ср}} - t)/\sigma)$	Интенсивность отказов, 1/год
1	2,9	0,998	$3,11 \cdot 10^{-3}$
2	2,4	0,991	$1,49 \cdot 10^{-2}$
3	1,8	0,964	$5,13 \cdot 10^{-2}$
4	1,2	0,855	0,133
5	0,6	0,726	0,272
6	0,0	0,500	0,469
7	-0,6	0,274	0,720

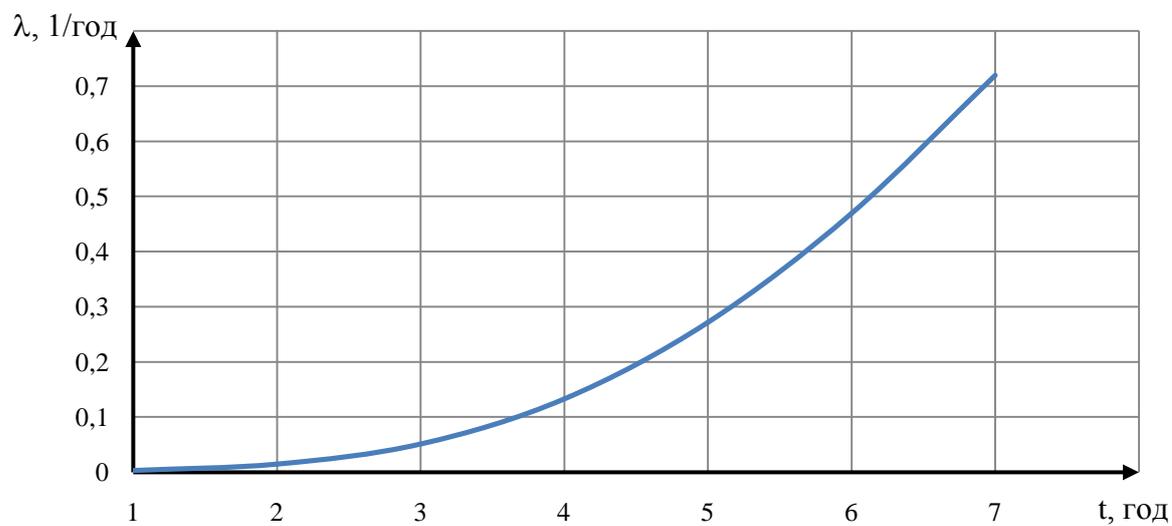


Рисунок Б2 – Интенсивность отказов контактора КТ

Интенсивность отказов предохранителя ПН2-100

Год наблюдения t, год	Значение ( $T_{cp} - t$ )/ $\sigma$	Значение функции $F((T_{cp} - t)/\sigma)$	Интенсивность отказов, 1/год	Год наблюдения t, год	Значение ( $T_{cp} - t$ )/ $\sigma$	Значение функции $F((T_{cp} - t)/\sigma)$	Интенсивность отказов, 1/год
1	5,4	1,000	$1,35 \cdot 10^{-8}$	9	2,3	0,989	$1,88 \cdot 10^{-3}$
2	5,0	1,000	$9,91 \cdot 10^{-8}$	10	1,9	0,971	$4,31 \cdot 10^{-3}$
3	4,6	1,000	$6,3 \cdot 10^{-7}$	11	1,5	0,933	$8,73 \cdot 10^{-3}$
4	4,2	1,000	$3,45 \cdot 10^{-6}$	12	1,2	0,885	$1,54 \cdot 10^{-2}$
5	3,8	1,000	$1,63 \cdot 10^{-5}$	13	0,8	0,788	$2,51 \cdot 10^{-2}$
6	3,5	0,999	$6,66 \cdot 10^{-5}$	14	0,4	0,655	$3,77 \cdot 10^{-2}$
7	3,1	0,999	$2,34 \cdot 10^{-4}$	15	0,0	0,500	$5,32 \cdot 10^{-2}$
8	2,7	0,996	$7,12 \cdot 10^{-4}$	16	-0,4	0,345	$7,16 \cdot 10^{-2}$

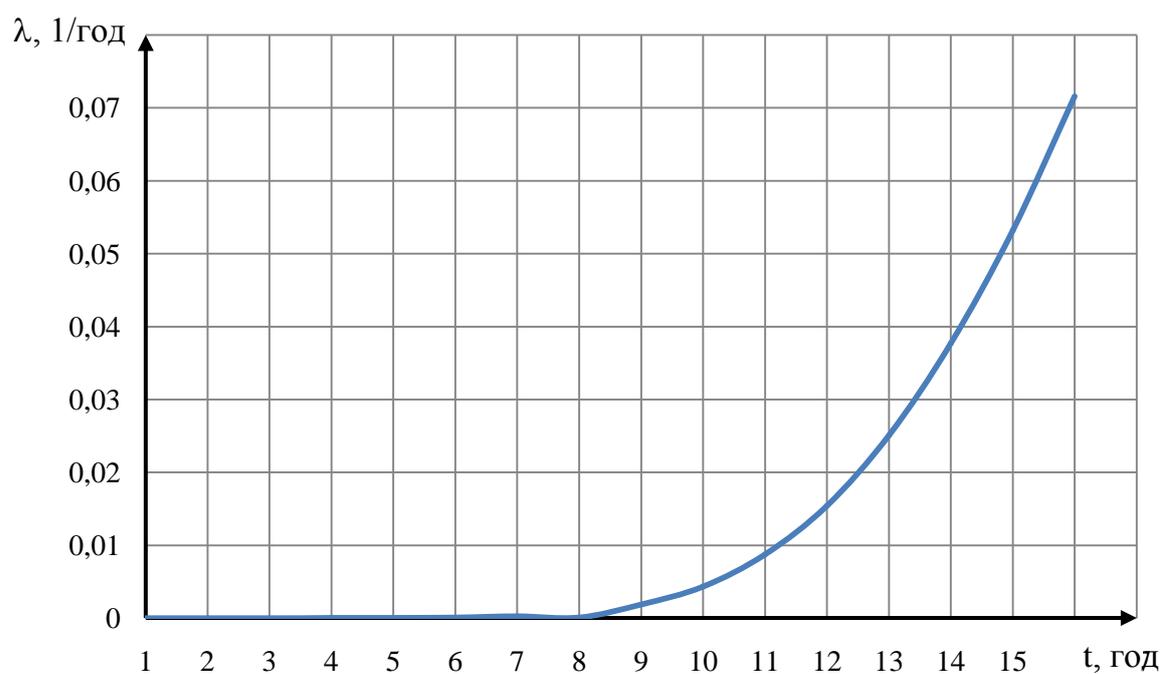


Рисунок Б3 – Интенсивность отказов предохранителя ПН2-100

Интенсивность отказов пакетного выключателя ПВ-3

Год наблюдения $t$ , год	Значение $(T_{cp} - t)/\sigma$	Значение функции $F((T_{cp} - t)/\sigma)$	Интенсивность отказов, 1/год	Год наблюдения $t$ , год	Значение $(T_{cp} - t)/\sigma$	Значение функции $F((T_{cp} - t)/\sigma)$	Интенсивность отказов, 1/год
1	6,6	1,000	$6,57 \cdot 10^{-10}$	12	2,8	0,997	$3,07 \cdot 10^{-3}$
2	6,2	1,000	$5,93 \cdot 10^{-10}$	13	2,4	0,992	$7,53 \cdot 10^{-3}$
3	5,9	1,000	$4,75 \cdot 10^{-9}$	14	2,1	0,982	$1,65 \cdot 10^{-3}$
4	5,5	1,000	$3,38 \cdot 10^{-8}$	15	1,7	0,955	$3,26 \cdot 10^{-2}$
5	5,2	1,000	$2,13 \cdot 10^{-7}$	16	1,4	0,919	$5,78 \cdot 10^{-2}$
6	4,8	1,000	$1,19 \cdot 10^{-6}$	17	1,0	0,841	$9,58 \cdot 10^{-2}$
7	4,5	1,000	$5,96 \cdot 10^{-6}$	18	0,7	0,758	0,143
8	4,1	1,000	$2,64 \cdot 10^{-5}$	19	0,3	0,618	0,210
9	3,8	1,000	$1,03 \cdot 10^{-4}$	20	0,0	0,500	0,275
10	3,4	1,000	$3,60 \cdot 10^{-4}$	21	-0,3	0,382	0,339
11	3,1	0,999	$1,12 \cdot 10^{-3}$	22	-0,7	0,242	0,448

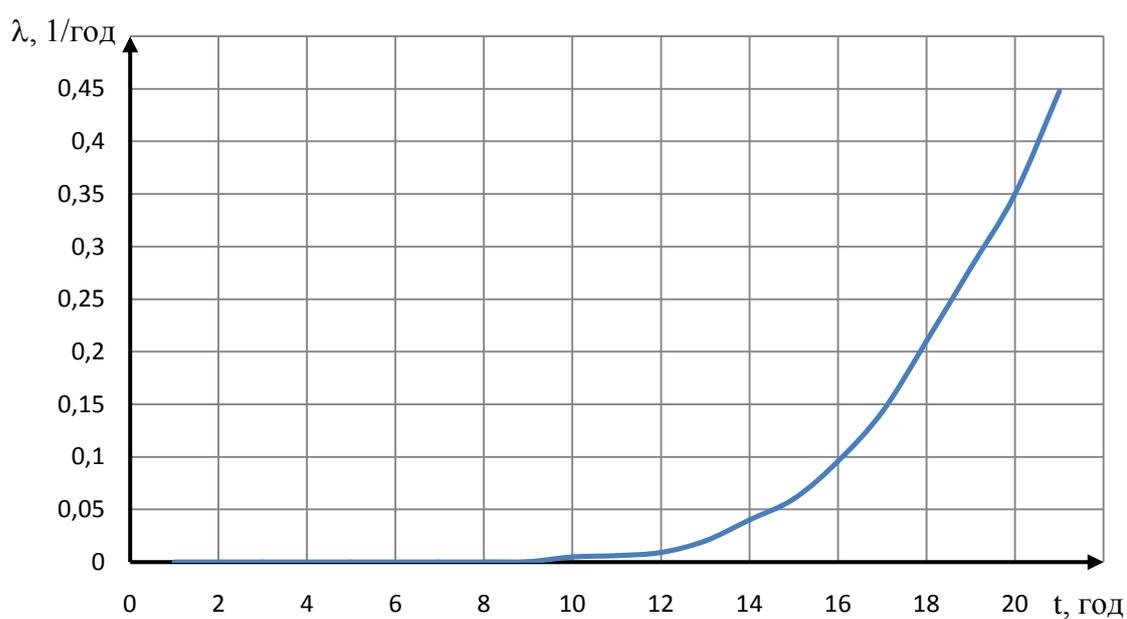


Рисунок Б4 – Интенсивность отказов пакетного выключателя ПВ-3

## Интенсивность отказов рубильника Р

Год наблюдения t, год	Значение $(T_{cp} - t)/\sigma$	Значение функции $F((T_{cp} - t)/\sigma)$	Интенсивность отказов, 1/год	Год наблюдения t, год	Значение $(T_{cp} - t)/\sigma$	Значение функции $F((T_{cp} - t)/\sigma)$	Интенсивность отказов, 1/год
1	6,6	1,000	$6,57 \cdot 10^{-10}$	12	2,8	0,997	$3,07 \cdot 10^{-3}$
2	6,2	1,000	$5,93 \cdot 10^{-10}$	13	2,4	0,992	$7,53 \cdot 10^{-3}$
3	5,9	1,000	$4,75 \cdot 10^{-9}$	14	2,1	0,982	$1,65 \cdot 10^{-2}$
4	5,5	1,000	$3,38 \cdot 10^{-8}$	15	1,7	0,955	$3,26 \cdot 10^{-2}$
5	5,2	1,000	$2,13 \cdot 10^{-7}$	16	1,4	0,919	$5,78 \cdot 10^{-2}$
6	4,8	1,000	$1,19 \cdot 10^{-6}$	17	1,0	0,841	$9,58 \cdot 10^{-2}$
7	4,5	1,000	$5,96 \cdot 10^{-6}$	18	0,7	0,758	0,143
8	4,1	1,000	$2,64 \cdot 10^{-5}$	19	0,3	0,618	0,210
9	3,8	1,000	$1,03 \cdot 10^{-4}$	20	0,0	0,500	0,275
10	3,4	1,000	$3,60 \cdot 10^{-4}$	21	-0,3	0,382	0,339
11	3,1	0,999	$1,12 \cdot 10^{-3}$	22	-0,7	0,242	0,448

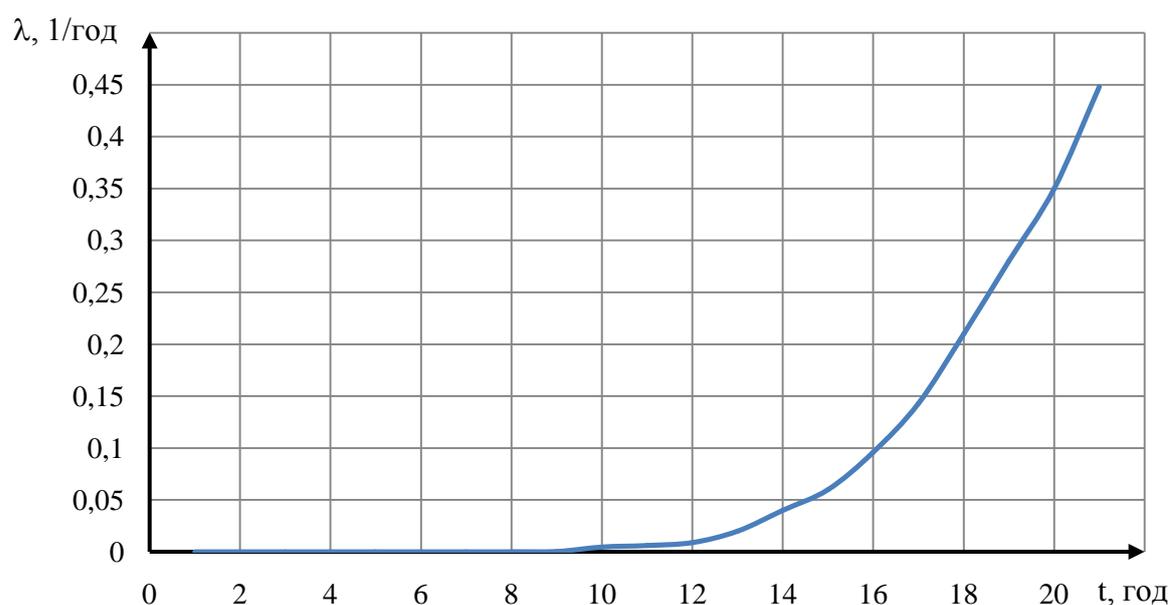


Рисунок Б5 – Интенсивность отказов рубильника Р

## Интенсивность отказов кабельной линии АВВГ-0,4 кВ

Год наблюдения t, год	Значение $(T_{cp} - t)/\sigma$	Значение функции $F((T_{cp} - t)/\sigma)$	Интенсивность отказов, 1/год
1	3,8	1,000	$7,85 \cdot 10^{-5}$
2	3,5	1,000	$2,32 \cdot 10^{-4}$
3	3,2	0,999	$6,27 \cdot 10^{-4}$
4	2,9	0,998	$1,56 \cdot 10^{-2}$
5	2,6	0,995	$3,55 \cdot 10^{-2}$
6	2,4	0,992	$7,43 \cdot 10^{-2}$
7	2,1	0,982	$1,44 \cdot 10^{-2}$
8	1,8	0,964	$2,57 \cdot 10^{-2}$
9	1,5	0,933	$4,27 \cdot 10^{-2}$
10	1,2	0,885	$6,64 \cdot 10^{-2}$
11	0,9	0,816	$9,74 \cdot 10^{-2}$
12	0,6	0,726	0,136
13	0,3	0,618	0,182
14	0,0	0,500	0,235
15	-0,3	0,382	0,294
16	-0,6	0,274	0,360

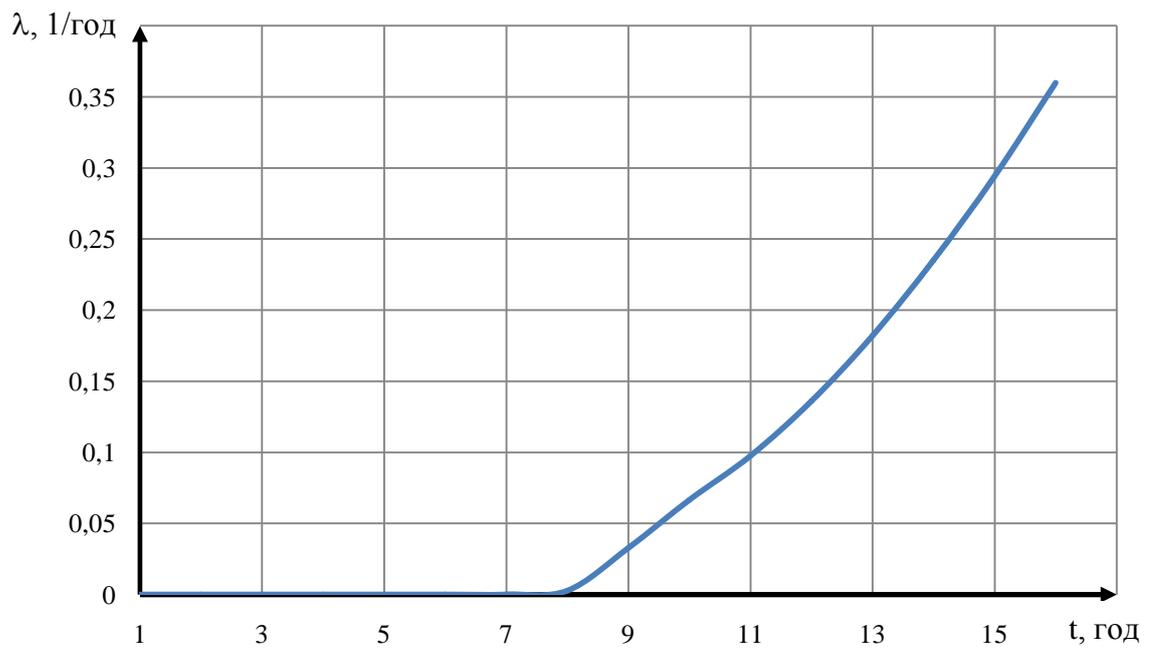


Рисунок Б6 – Интенсивность отказов кабельной линии АВВГ-0,4 кВ

ПРИЛОЖЕНИЕ В  
(справочное)

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
КАЗАНСКИЙ  
МЕДИКО - ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ  
ЗАВОД

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер АО «КМИЗ»

А К Т

о внедрении научно-исследовательских результатов  
диссертационной работы Садыкова Руслана Рустемовича

Настоящим подтверждаю, что практические и научные результаты диссертационной работы Садыкова Руслана Рустемовича использованы в ОАО «Казанский медико-инструментальный завод».

Объектом внедрения являются:

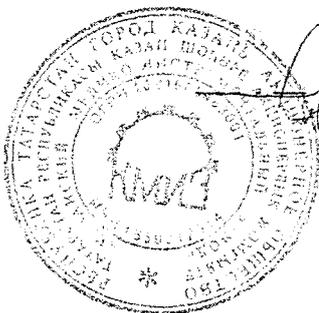
1. Предложения по внедрению методики оценки технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов, применяемых в цеховых сетях.

2. Предложения по использованию программы планирования сроков приобретения низковольтного оборудования с учетом динамики безотказности работы оборудования.

3. Программы и модели, позволяющие прогнозировать надежность функционирования радиальных схем цеховых сетей относительно присоединений нагрузки распределительных устройств низкого напряжения с использованием коэффициентов отношения.

4. Концептуальные подходы, позволяющие эффективно внедрять мероприятия по повышению надежности цеховых сетей при модернизации оборудования и уточнения компоновочных решений с использованием разработанных методики, алгоритмов и моделей.

Главный энергетик АО «Казанский медико-инструментальный завод»





# КАЗАНЬОРГСИНТЕЗ

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

ПАО «Казаньоргсинтез»

## А К Т

о внедрении результатов научных исследований

Настоящим подтверждаю, что в ПАО «Казаньоргсинтез» были использованы результаты диссертационной работы и научных исследований Садыкова Руслана Рустемовича:

- при реализации программы последовательности замены низковольтных коммутационных аппаратов с учетом оценки их эксплуатационного состояния, что позволило повысить эффективность проведения планово-предупредительных ремонтов и текущего обследования оборудования;

- при проведении энергетических обследований систем внутрицехового электроснабжения, что позволило оценивать и прогнозировать уровень надежности низковольтных сетей в среднесрочной перспективе.

Главный энергетик ПАО «Казаньоргсинтез»



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования



КГЭУ

«КАЗАНСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

ПЕРВЫЙ ПРОРЕКТОР – ПРОРЕКТОР  
ПО УЧЕБНОЙ РАБОТЕ

Красносельская ул., д. 51, Казань, 420066  
тел./факс (8-843) 527-92-44, 527-92-48

E-mail: kgeu@kgeu.ru

03.07.2018 № 47/18

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор  
по учебной работе ФГБОУ ВО  
«Казанский государственный  
энергетический университет»

А. В. Леонтьев

«3» июля 2018 г.

### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Садыкова Р. Р.  
«Повышение эффективности функционирования внутрицехового  
электрообеспечения промышленных предприятий» в учебный процесс

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Садыкова Р. Р. «Повышение эффективности функционирования внутрицехового электрообеспечения промышленных предприятий» внедрены в учебный процесс кафедры «Электрообеспечение промышленных предприятий» и используются при проведении практических занятий в рамках дисциплины «Проектирование систем электрообеспечения» подготовки магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Использование указанных результатов позволило повысить качество образовательного процесса.

Заведующий кафедрой  
«Электрообеспечение  
промышленных предприятий»  
профессор, д.т.н.

И. В. Ившин

Директор Института  
электроэнергетики и электроники  
профессор, д.т.н.

И. В. Ившин