

---

На правах рукописи



**ПЕДРО Антонио**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА  
НАДЕЖНОСТИ И ВЫБОР СИСТЕМЫ РЕМОНТОВ  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ АНГОЛЫ**

Специальность 05.14.02  
Электрические станции и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново 2009

Работа выполнена на кафедре "Электрические станции, подстанции и диагностика электрооборудования" в ГОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ)

Научный руководитель: **доктор технических наук, профессор Назарычев Александр Николаевич**

Официальные оппоненты: **доктор технических наук, профессор Папков Борис Васильевич**

**кандидат технических наук, доцент Герасимов Сергей Евгеньевич**

Ведущая организация: **ОАО "Зарубежэнергопроект" г. Иваново**

Защита состоится **15 декабря 2009 г. в 10<sup>00</sup>** на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу:

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: **153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-94, факс (4932) 38-57-01,**

**E-mail: kafedra@esde.ispu.ru**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ.

Автореферат разослан 14 ноября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета Д 212.064.01  
доктор технических наук, профессор



А.В. Мошкарин

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Назарычев А.Н., Андреев Д.А., Блудов А.Ю., **Педро Антонио** Математическая модель оценки расхода ресурса электрооборудования с учетом режимов его работы // Вестник ИГЭУ. – Вып.2/2007. – С. 77 – 80.

2. Назарычев А.Н., Андреев Д.А., **Педро Антонио**, Киреев Е.А. Исследование влияния температуры окружающей среды на расход ресурса электрооборудования // Вестник ИГЭУ. – Вып.3/2009. – С. 57 – 60.

Публикации в других изданиях

3. Андреев Д.А., Назарычев А.Н., Блудов А.Ю., **Педро Антонио**. Уточнение периодичности технического обслуживания и ремонта электрооборудования с учетом технического состояния // Вестник научно-промышленного общества. Вып. 11 – М.: Издательство «АЛЕВ-В», 2007. – С. 3 – 5.

4. Назарычев А.Н., **Педро Антонио**, Андреев Д.А., Блудов А.Ю. Математическая модель оценки расхода коммутационного ресурса электрооборудования с учетом режимов его работы и влияния температуры окружающей среды // Актуальные проблемы электроэнергетики: Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Т. 66. – Нижний Новгород: Нижегородский гос. тех. ун-т., 2007. – С. 57 – 63.

5. Андреев Д.А., Назарычев А.Н., **Педро Антонио**. Учет климатических условий Анголы при оценке эксплуатационной надежности действующего электрооборудования // Состояние и перспективы развития электротехнологии. В кн.: «XIV Бенардосовские чтения». Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Т.1. - Иваново, 2007. – С.133.

6. **Педро Антонио**, Назарычев А.Н., Модель оценки расхода ресурса электрооборудования для энергосистемы Республики Ангола // Состояние и перспективы развития электротехнологии. В кн.: «XIV Бенардосовские чтения». Тез. докл. междунар. науч.-тех. конф., Т.1. - Иваново, 2007. – С.140.

7. **Педро Антонио** Контроль параметров состояния и релейная защита оборудования подстанций 110(30)/10(6) кВ республики Ангола с помощью устройств «Seram 1000+» // Материалы докл. II молодежной междунар. науч. конф. «Гинчуриинские чтения». Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т., 2007. – С. 74 – 75.

8. Блудов А.Ю., **Педро Антонио** О математической модели оценки расхода ресурса электрооборудования с учетом режимов его работы и влияния эксплуатационных факторов // Состояние и перспективы развития электротехнологии. В кн.: «XV Бенардосовские чтения». Тез. докл. междунар. науч.-тех. конф., Т.1. - Иваново, 2009. – С.147.

4. На основании моделей оценки показателей надежности электрооборудования, а также экспериментальных и статистических данных определены математические модели расчета технического ресурса, вероятности безотказной работы и отказа для высоковольтных выключателей, силовых трансформаторов, асинхронных электродвигателей, изоляционных конструкций, кабелей.

5. Разработаны и усовершенствованы математические модели проведения технической эксплуатации электрооборудования для различных стратегий ремонтов на основе целевой функции средних суммарных затрат на проведение ТОиР, которая более учитывает все составляющие: затраты на проведение диагностирования, профилактического ТОиР и аварийного ремонта; значения показателей надежности и вероятностной характеристики назначения ремонта по результатам технической диагностики. Получены модели целевой функции и предложена их классификация для различных стратегий ТОиР, учитывающая характер проявления отказов и результаты технической диагностики.

6. Предложена методика выбора рациональной стратегии проведения ТОиР электрооборудования на энергообъектах Анголы, в основе которой лежит сравнение значений отношения целевых функций для стратегий планово-предупредительных ремонтов, аварийных ремонтов или по техническому состоянию. Предложено использовать в качестве показателей надежности при выборе стратегии ТОиР фактический сработанный ресурс с учетом закона распределения и статистики отказов. Показано, что для более полного расходования ресурса ЭО предпочтительны две стратегии организации ремонтов – САР и СТС. Стратегия ППР с этой точки зрения имеет ограниченную область применения. Предложенная методика выбора стратегии ремонтов позволяет обоснованно рекомендовать для условий Анголы наиболее рациональную стратегию проведения ТОиР по техническому состоянию.

7. На основе реальных эксплуатационных данных о работе электрооборудования энергосистем Анголы проведены расчеты численных примеров по определению сработанного ресурса и вероятности безотказной работы с учетом воздействия утяжеленных рабочих токов, температуры и влажности для высоковольтных выключателей, силовых масляных трансформаторов, асинхронных электродвигателей, изоляционных конструкций, кабелей. Достоверность полученных результатов подтверждается данными эксплуатации и аварийного ремонта этих видов электрооборудования.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Все более важную роль в электроэнергетической системе Анголы играет проблема обеспечения надежности, безопасности и экономичности эксплуатации оборудования электростанций и подстанций. С развитием электроэнергетической отрасли в Анголе возрастает экономическая ответственность энергетических компаний за нарушение нормального режима работы энергосистемы и отключение потребителей. Поэтому энергетические компании заинтересованы в обеспечении надежности работы электрооборудования (ЭО). Для условий Анголы имеют место следующие основные факторы, влияющие на надежность ЭО и энергосистемы в целом: рост нагрузки; эксплуатация ЭО с утяжеленными токами в нормальных режимах работы; нарастающий износ оборудования; отсутствие на многих энергетических предприятиях системы профилактического технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

Анализ аварий, выполненный на основе обследования энергетических предприятий Анголы, показывает, что степень износа ЭО в среднем составляет 58,5 %, при этом ЭО подстанций – 67 %, зданий и сооружений – 49,3 %. Большая часть подстанций или разрушена, или задействована частично. Из всех ЛЭП в рабочем состоянии находится не более 39 %. В этих условиях проблема поддержания на требуемом уровне показателей безотказности и долговечности ЭО становится всё более острой.

Существенное влияние на степень износа ЭО Анголы оказывают также климатические факторы внешней среды, среди которых наиболее важными являются температура и влажность. Они приводят к накоплению и развитию дефектов, к более раннему наступлению предельного состояния и отказу ЭО. Утяжеленные режимы работы и климатические факторы увеличивают скорость износа ЭО, что создает серьезную проблему в энергетике Анголы, от решения которой зависит надежность ее функционирования.

В настоящее время в Анголе для поддержания технического состояния ЭО применяют систему аварийно-восстановительных ремонтов. Эта система позволяет наиболее полно расходовать заложенный в ЭО ресурс, но она приводит к частым остановкам технологических процессов, что обуславливает значительные затраты, ущерб и время простоя ЭО в аварийном ремонте, вызывает ухудшение технико-экономических показателей энергообъектов. Следовательно, для энергетики Анголы важен выбор рациональной стратегии ТОиР оборудования. Для решения этой проблемы необходимо знать фактические значения показателей долговечности и безотказности ЭО с учетом воздействия утяжеленных режимов работы и климатических факторов внешней среды. Поэтому актуальной задачей является совершенствование системы ремонтов, методов и моделей количественной оценки показателей эксплуатационной надежности, позволяющих учесть реальные эксплуатационные факторы, которые влияют на износ ЭО, и наметить необходимые работы по ТОиР.

**Цель работы.** Совершенствование методов расчета показателей надежности и выбор системы ТОиР электрооборудования с учетом утяжеленных условий эксплуатации и влияния климатических факторов внешней среды.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующий комплекс задач.

- Проанализировать современное состояние надежности электрооборудования электроэнергетической системы Анголы.
- Исследовать влияние на надежность электрооборудования утяжеленных режимов работы электрооборудования.
- Исследовать влияние на надежность электрооборудования Анголы климатических факторов внешней среды (температуры и влажности).
- Усовершенствовать существующие модели расчета показателей долговечности и безотказности электрооборудования различных типов и классов напряжения с учетом утяжеленных режимов эксплуатации и воздействующих при этом климатических факторов внешней среды.
- Определить модели расчета технического ресурса для силовых трансформаторов, высоковольтных выключателей, изоляционных конструкций, электродвигателей и кабелей.
- Выбрать рациональную стратегию ТОиР электрооборудования для электроэнергетической системы Анголы.
- Выполнить расчеты показателей долговечности и безотказности по реальным исходным данным.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является электрооборудование электрических станций и подстанций (силовые трансформаторы, высоковольтные выключатели, электродвигатели, кабели, изоляционные конструкции). Предметом исследования являются методы и модели расчета показателей долговечности и безотказности электрооборудования.

**Методика исследований.** Для решения поставленных в работе задач использовались методы системного анализа, математического моделирования, теории вероятности и математической статистики, теории случайных процессов и экспериментально-статистического анализа надежности.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность предложенных моделей и обоснованность результатов исследования обеспечивается корректным применением теоретических методов, подтверждением полученных результатов данными других авторов, сходимостью результатов проведенных исследований и вычислительных экспериментов, а также подтверждается данными, полученными в реальных условиях эксплуатации электрооборудования и положительным опытом внедрения результатов расчета показателей надежности на энергообъектах.

**Научная новизна и значимость полученных результатов** состоит в совершенствовании методов расчета показателей надежности

Расчеты показывают, что одни двигатели могут прослужить меньше нормативного срока службы, так как работают в утяжеленных условиях, а другие дольше нормативного срока службы, так как работают в облегченных условиях. Поэтому при определении их технического состояния важно учитывать режимы и условия эксплуатации.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Проведенные в диссертационной работе исследования можно рассматривать как решение важной народно-хозяйственной проблемы для энергетики Анголы по выбору системы ТОиР электрооборудования и количественной оценке показателей надежности с учетом утяжеленных режимов работы и воздействия климатических факторов внешней среды в условиях реальной эксплуатации. Наиболее существенные научные и практические результаты заключаются в следующем.

1. Проведен анализ эксплуатационной надежности электрооборудования электроэнергетической системы Анголы, который показал, что снижение надежности работы электрооборудования связано с отсутствием системы ТОиР, процессами старения, утяжеленными режимами работы и особенностями воздействия климатических факторов. Рассмотрено влияние утяжеленных режимов работы и климатических факторов на техническое состояние электрооборудования. Обоснована необходимость учета при расчете показателей надежности воздействия на электрооборудование утяжеленных режимов токов, температуры, влажности и концентрации агрессивной среды. Показана актуальность для условий Анголы решения этой задачи, что приведет к увеличению точности и достоверности результатов определения показателей надежности электрооборудования.

2. Разработаны классификации основных структурных элементов и их дефектов для высоковольтных выключателей, силовых трансформаторов и электродвигателей. Усовершенствована математическая модель расчета фактического сработанного и остаточного ресурса электрооборудования с учетом воздействия утяжеленных эксплуатационных факторов. Математическая модель адаптирована применительно к условиям эксплуатации в энергосистемах Анголы. Получены расчетные выражения для определения фактического сработанного и остаточного ресурса электрооборудования в зависимости от воздействия утяжеленных тепловых, электрических, механических и химических эксплуатационных факторов.

3. Разработаны математические модели оценки фактического сработанного и остаточного ресурса электрооборудования, работающего в энергосистемах Анголы и подвергающихся в процессе эксплуатации воздействию климатических факторов температуры, влажности и концентрации агрессивной среды.

Таблица 4. Параметры электродвигателей

| Тип электродвигателя | $P_{ном},$ кВт | $n_{ном},$ об/мин | $s_{ном},$ % | $I_n,$ А | $K_T,$ о.е. | $C,$ кДж/(°С) | $T_0,$ мин | $T_d=2.5T_0,$ мин |
|----------------------|----------------|-------------------|--------------|----------|-------------|---------------|------------|-------------------|
| Тип 1                | 1.1            | 2830              | 0,302        | 2,4      | 6,13        | 6,90          | 12         | 30                |
| Тип 2                | 3.0            | 2880              | 0,571        | 6,1      | 6,75        | 14,65         | 12         | 30                |
| Тип 3                | 0.6            | 910               | -            | 2,0      | 11,3        | 6,90          | 12         | 30                |

Примечание:  $I_{ном}$  – номинальный ток при напряжении 380 В.

Таблица 5. Распределение нагрузки электродвигателей по времени в течение суток.

| Номер Двигателя | Рдв, кВт   |            |             |            |
|-----------------|------------|------------|-------------|------------|
|                 | 5 ч        | 10 ч       | 2 ч         | 7 ч        |
|                 | 50 % $P_n$ | 90 % $P_n$ | 110 % $P_n$ | 70 % $P_n$ |
| 1               | 0,55       | 0,99       | 1,21        | 0,77       |
| 2               | 1,5        | 2,7        | 3,3         | 2,1        |
| 3               | 0,3        | 0,54       | 0,66        | 0,42       |

Примечание: номер двигателя соответствует его положению в табл. 4.

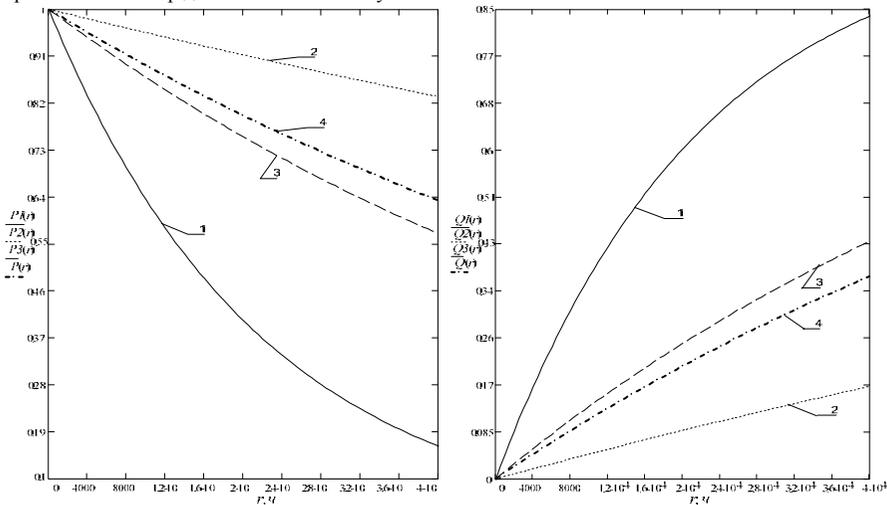


Рис.6. Вероятности безотказной работы  $P(r)$  и отказа  $Q(r)$  электродвигателей в зависимости от фактического сработанного ресурса.

Примечание: 1- Тип 1; 2- Тип 2; 3- Тип 3; 4-экспоненциальный закон при  $\lambda_0=0,1$  (1/год) без учёта эксплуатационных факторов и особенностей двигателя

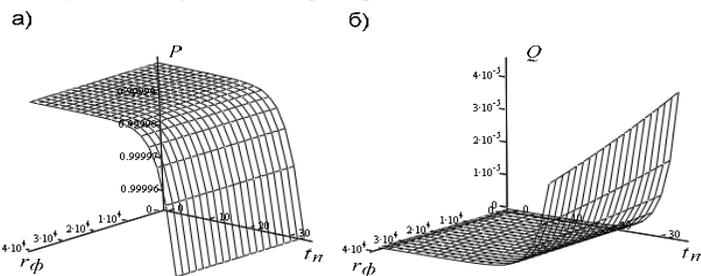


Рис. 7. Вероятность безотказной работы а) и отказа б) для электродвигателя Тип 1 в зависимости от фактического сработанного ресурса  $r_\phi$  и времени пуска  $t_n$ .

электрооборудования с учетом утяжеленных режимов работы и климатических условий эксплуатации и заключается в следующем.

1. Усовершенствованы математические модели оценки показателей долговечности и безотказности электрооборудования, позволяющие определять его фактический сработанный и остаточный ресурс, отличающиеся от известных, учетом воздействия утяжеленных режимов работы на износ электрооборудования.
2. Разработаны модели оценки сработанного ресурса электрооборудования, учитывающие воздействие климатических факторов внешней среды.
3. Обоснована методика выбора рациональной стратегии ТОиР электрооборудования по техническому состоянию с учетом особенностей его эксплуатации в энергосистемах Анголы.
4. Выполнена оценка технического ресурса и вероятностей безотказной работы и отказа для электрооборудования Анголы (силовых трансформаторов, высоковольтных выключателей, асинхронных электродвигателей, силовых кабелей, изоляционных конструкций) различных классов напряжения по реальным исходным данным.

**Практическая ценность работы.** Практическое значение результатов работы состоит в получении количественных значений показателей надежности электрооборудования с учетом воздействия утяжеленных режимов и реальных климатических условий эксплуатации в Анголе. Полученные результаты позволяют наметить мероприятия по обеспечению надежности, а также решать задачи эксплуатации и ремонта электрооборудования с учетом его технического состояния, что уменьшает число отказов электрооборудования и повышает надежность работы энергообъектов и электроснабжения потребителей.

**Реализация результатов работы.** Полученные в диссертации результаты исследований апробированы, внедрены и используются в практике работы на энергообъектах Национального государственного энергетического предприятия Анголы ENE. Результаты исследований также используются в учебном процессе и научной работе на кафедре "Электрические станции, подстанции и диагностика электрооборудования" Иванковского государственного энергетического университета (ИГЭУ).

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Усовершенствованные математические модели оценки показателей долговечности и безотказности электрооборудования с учетом утяжеленных режимов работы.
2. Модель оценки технического ресурса электрооборудования, учитывающую воздействие климатических факторов внешней среды.
3. Результаты выбора рациональной стратегии проведения ТОиР электрооборудования.
4. Результаты численных и аналитических исследований по определению эксплуатационных показателей долговечности и безотказности для силовых

трансформаторов, высоковольтных выключателей, асинхронных электродвигателей, изоляционных конструкций и кабелей.

**Личный вклад автора** состоит в постановке задач и цели исследования, сборе, обработке и анализе статистических данных о повреждаемости, условиях и режимах работы электрооборудования, разработке и совершенствовании методов и математических моделей, выполнении расчетов, обобщении и анализе результатов.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на трех международных и всероссийских конференциях:

XIV, XV Международные научно-технические конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» – Бенардосовские чтения (г.Иваново 2007, 2009 гг.).

II Молодежная международная научная конференция «Тинчуринские чтения» (Казань 2007 г.).

Диссертация обсуждалась и получила одобрение на расширенном заседании кафедр электроэнергетического факультета ИГЭУ (г. Иваново, 2009).

**Список публикаций.** По материалам диссертационной работы опубликовано 8 печатных работы, в том числе 2 статьи в журналах утвержденных ВАК, 2 статьи в других журналах, 4 статьи, опубликованных в сборниках тезисов докладов всероссийских и международных конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 126 наименований. Объем диссертации составляет 214 страниц. Работа содержит 33 рисунка и 37 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** определена актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи, указаны методы исследования, показана научная новизна и практическая ценность, приведена структура диссертации.

**В первой главе** выполнен анализ эксплуатационной надежности ЭО энергосистем Анголы, рассматриваются основные причины аварий и технологических нарушений. Проводится анализ структуры электроэнергетической системы Анголы, описывается состав основного ЭО, выявляются специфические особенности, связанные с наличием трех основных независимых и территориально распределенных энергосистем. Определяются перспективы развития энергетики Анголы в ближайшие годы.

Особое внимание уделено анализу надежности ЭО электрических станций и подстанций (силовым трансформаторам, высоковольтным выключателям, воздушным линиям электропередач, кабелям, асинхронным электродвигателям), особенностям его эксплуатации после завершения в Анголе гражданской войны. Установлено, что износ основного ЭО энергетических предприятий Анголы составляет около 60 %. Доля отказов вызванных износом оборудования в общем количестве отказов продолжает

использовать выражения для расчета сработки коммутационного фактического ресурса дополнительно к приведенным в главе 2 зависимостям учета климатических условий. Фактический сработанный и остаточный ресурс высоковольтных выключателей определяется по выражениям (9), (10):

$$R^* = R_0^* + \sum_{j=1}^K \left( \int_0^{R_j^*} e^{\frac{X_1^* - 1}{\Delta X_1^*} dr} - R_j^* \right); R_{\text{ост}}^* = R_{0,\text{ост}}^* - \sum_{j=1}^K \left( \int_0^{R_j^*} e^{\frac{X_1^* - 1}{\Delta X_1^*} dr} - R_j^* \right), \quad (9), (10)$$

где  $X_1^*$  – относительное значение эксплуатационного фактора, учитывающего воздействие коммутируемого выключателем тока  $I$ ;  $\Delta X_1^*$  – относительное отклонение фактора  $X_1^*$ .

Для учета полного цикла включение–отключение выключателя в работе получены переводные коэффициенты  $k_{\text{ВО}}=1,75 \div 2,35$ , которые позволяют перейти от известного количества отключений или включений к оценке ресурса по циклу включение–отключение. Указанные коэффициенты в основном получены для вакуумных выключателей. В работе проведены многовариантные расчеты технического ресурса для вакуумных выключателей, показывающие возможность применения разработанных методик на практике совместно с учетом климатических воздействий.

Для расчета фактического сработанного ресурса электродвигателей в относительных единицах, с учетом эксплуатации их при утяжеленных токах и повышенной температуре окружающей среды в работе предлагается использовать следующее выражение

$$R^* = R_0^* + \sum_{j=1}^K R_j^* \left[ \exp \left( \frac{\frac{1}{J_0} \left[ \vartheta_{\text{охл}} + \frac{\Delta P T_{\text{д}}}{C} \right] - 1}{\Delta J^*} \right) - 1 \right]. \quad (11)$$

где  $\vartheta_0$  – температура при нормативной сработке ресурса;  $\vartheta_{\text{охл}}$  – температура охлаждающей среды;  $\Delta \vartheta^*$  – относительное отклонение температуры принимается в зависимости от класса изоляции;  $R_0$  – нормативный срок сработки ресурса;  $C$  – полная теплоемкость электродвигателя;  $T_{\text{д}}$  – тепловая постоянная времени;  $\lambda_0$  – интенсивность отказов.

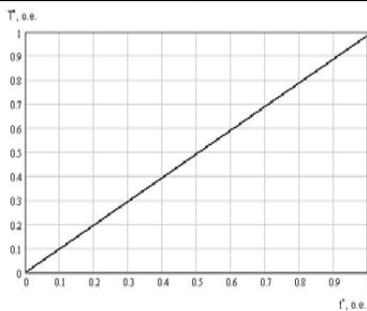
Для пусковых режимов работы электродвигателей также получены расчетные выражения, определяющие технический ресурс в зависимости от кратности пусковых токов и времени пуска. Выражения для определения вероятностей безотказной работы и отказа электродвигателей получены путем подстановки формул фактического сработанного ресурса в выражения для определения показателей безотказности. Для ряда двигателей (табл. 4, 5), работающих с известной токовой нагрузкой проведены расчеты указанных показателей. Примеры результатов расчета показателей надежности в зависимости от фактически сработанного ресурса приведены на рис. 6 – 7.

при коротком замыкании примем равной  $55^{\circ}\text{C}$  (короткое замыкание произошло в пределах 5 лет, при которых температура кабеля была равна  $55^{\circ}\text{C}$ ). В этом случае расчетом определено, что за 2 с протекания тока короткого замыкания фактический сработанный ресурс кабеля составил приблизительно 1,5 года. Суммируя значения фактического сработанного ресурса при нормальной эксплуатации и при коротком замыкании, получим суммарный фактический сработанный ресурс от 9 до 13 лет, нормативный остаточный соответственно от 11 до 7 лет. Для эксплуатации целесообразно использовать нижнюю границу.

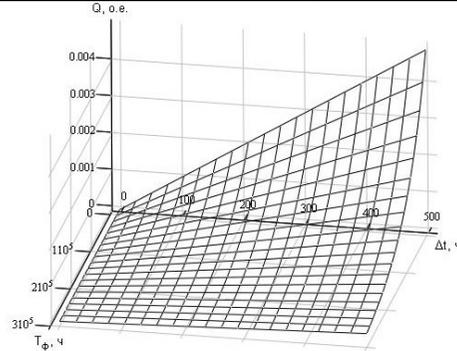
В работе проведены расчеты по определению технического ресурса и показателей безотказности для полимерных изоляционных конструкций в зависимости от уровня действующего напряжения. Так, для изоляционной конструкции класса напряжения 150 кВ, работающей в течение суток при напряжениях, указанных в табл. 3, рассчитан фактический сработанный ресурс, а также вероятность отказа (рис. 4 и 5). При этом принято значение интенсивности отказов  $\lambda=0,00001 \text{ ч}^{-1}$ .

**Таблица 3. Режимы работы изоляционной конструкции в течение суток**

| № Режима     | 1  | 2    | 3   | 4   |
|--------------|----|------|-----|-----|
| $T_{12}$ , ч | 16 | 4    | 2   | 2   |
| $U^*$ , о.е. | 1  | 0,95 | 0,9 | 1,1 |



**Рис. 4. Зависимость  $T^*(t^*)$**



**Рис. 5. Зависимость вероятность отказа Q от величины  $T_{\phi}$  и  $\Delta t$**

При  $t^*=24/24=1$  о.е.  $T^*=0,987$  о.е., т.е. при  $t=24$  ч  $T=0,987 \cdot 24=23,7$  ч. Это означает, что при данной совокупности режимов работы изоляционной конструкции (см. табл. 1) она в целом работает при облегченных условиях эксплуатации по перенапряжениям. Нормативный остаточный ресурс при этом равен  $T_{0,ост}=24-23,7=0,3$  ч. На рис. 5 показаны вероятности безотказной работы и отказа на интервале наработки  $\Delta t$ , после того как изоляционная конструкция сработала фактический ресурс  $T_{\phi}$ .

Для высоковольтных выключателей, работающих в Анголе, в сложных не только климатических, но и коммутационных условиях, предлагается

непрерывно расти, и, как правило, такие отказы сопровождаются экономическим ущербом. Следовательно, надежность электроэнергетических объектов Анголы в ближайшее время будет определяться надежностью и техническим состоянием действующего оборудования.

Проведенный анализ эксплуатационной надежности ЭО электроэнергетической системы Анголы показал, что снижение надежности связано главным образом с отсутствием на энергообъектах системы ТОиР, процессами старения, утяжеленными режимами работы и особенностями воздействия климатических факторов.

Рассмотрено влияние утяжеленных режимов работы и климатических факторов на техническое состояние ЭО. Обоснована необходимость определения показателей надежности с учетом режимов и условий эксплуатации оборудования.

Современная нормативно-техническая документация вводит ограничения на параметры условий и режимов работы ЭО, а также на продолжительность его работы в том или ином режиме. Как правило, эти ограничения связаны с допустимым временем работы ЭО при различных температурах, что является недостаточным для достоверной оценки его эксплуатационной надежности.

Выполнен анализ моделей оценки показателей надежности ЭО. Существенный вклад в решение данной проблемы внесли участники Всероссийского научного семинара РАН "Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики". Методы и модели расчета надежности энергетического оборудования и электроэнергетических систем исследовались и развивались в работах российских и зарубежных авторов: Н.И. Ворояя, П.Г. Грудинского, Ю.Б. Гука, В.Г. Китушина, Г.Ф.Ковалева, Н.А. Манова, Л.А. Мелентьева, А.В. Мясникова, В.А.Непомнящего, В.Р. Огорокова, Б.В. Папкина, А.С. Проникова, М.Н.Розанова, Ю.Н. Руденко, В.А. Савельева, А.И.Таджибаева, Ю.А. Фокина, Дж. Эндрени, Р. Биллингтона, Р. Алана, Г. Франка, С.Л. Хаками и др.

Однако проблема оценки показателей надежности с учетом условий эксплуатации в различных странах в них исследована недостаточно полно. Существующие математические модели не учитывают в полном объеме режимы и климатические условия работы ЭО и воздействующие при этом эксплуатационные факторы. Решение этой задачи позволит учесть воздействие на ЭО утяжеленных рабочих токов, температуры, влажности и концентрации агрессивной среды, а также перейти к системе ТОиР оборудования по техническому состоянию.

**Во второй главе** совершенствуются и дорабатываются существующие методики расчета показателей надежности ЭО с целью применения их при оценке долговечности и безотказности ЭО в энергосистемах Анголы. В качестве основных показателей долговечности и безотказности принимаются согласно ГОСТ 27.002 – 89 соответственно величины технического ресурса и вероятностей безотказной работы и отказа.

Электроустановки являются сложными системами, содержащими множество структурных элементов, каждый из которых в разной степени влияет на показатели надежности системы в целом. В работе дана классификация дефектов основного ЭО электростанций и подстанций (трансформаторов, выключателей, электродвигателей). На основании этих классификаций выделяются соответствующие структурные элементы этого ЭО. Для них выделяются причины возникновения дефектов и основные факторы, влияющие на надежность элемента. Существует два пути оценки надежности электроустановки с учетом показателей надежности структурных элементов.

1. Оценка надежности системы осуществляется по наиболее важному и ответственному узлу. В этом случае считается, что система отказывает, когда отказывает заранее определенный статистическим путем наиболее важный структурный элемент. При этом за показатели надежности системы, в данном случае электроустановки, принимаются показатели надежности данного структурного элемента.
2. Оценка надежности системы производится с учетом функциональной взаимосвязи всех структурных элементов. При этом необходимо иметь методику оценки функциональной взаимосвязи показателей надежности каждого элемента электроустановки с соответствующими показателями надежности системы в целом.

С учетом имеющихся в наличии исходных данных и опыта исследований в работе отдается предпочтение первому пути определения показателей надежности ЭО. Однако при этом рассматривается возможность применения и второго пути на основании результатов первого на основе применения известных подходов, например: с помощью основных теорем теории вероятностей; составления и решения системы дифференциальных уравнений, описывающих марковский процесс перехода установки из состояния в состояние; посредством эквивалентных преобразований расчетной схемы с использованием формул теории вероятностей и марковских моделей; на базе топологического анализа расчетной схемы на связанность с помощью формирования диаграммы и логической функции дерева отказов; путем статистического моделирования случайного процесса перехода установки в различные состояния (метод Монте-Карло) и т.д.

Алгоритмы расчетов по всем вышеуказанным способам известны и подробно описаны в научно-технической литературе по надежности. Исходными данными для всех указанных выше способов являются показатели надежности (в основном безотказности) всех учитываемых при расчете структурных элементов, а именно вероятности безотказной работы или отказа, рассчитанные с учетом тех или иных факторов.

Используя модели расчета показателей безотказности с учетом условий и режимов работы в зависимости от календарной наработки  $t$  или на заданном интервале наработки  $\Delta t$  совместно с вышеуказанными способами оценки надежности по структурным элементам возможно получить методику расчета надежности электроустановки с учетом показателей надежности ее

На Рис. 3 показано влияние влажности на ресурс ЭО. При этом необходимо отметить, что чем больше коэффициент  $n$ , тем наблюдается меньший разброс влияния величины влажности на ресурс ЭО.

Расчетные примеры выполнены для силовых трансформаторов, однако, при иных значениях коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $m$ ,  $n$  они полностью пригодны и для другого ЭО. Модель (2) позволяет рассчитать фактический сработанный и остаточный ресурс ЭО с учетом влияния климатических факторов (температуры, влажности и агрессивности окружающей среды).

На основании моделей расчета технического ресурса, приведенных в главе 2, а также закона Вант Гоффа Аррениуса (формулы (5), (6)) и 6,8,10-градусных правил (формулы (7), (8)) разработаны конкретные расчетные выражения для определения данных показателей для силовых кабелей с ПЭ и ПВХ изоляцией:

$$R=R_0+\sum_{j=1}^K\left[\int_0^{R_j}e^{\frac{\vartheta-\vartheta_0}{\vartheta_{доп}-\vartheta_0}\ln\left(\frac{R_0-1}{4T}\right)}dr-R_j\right]; \quad (5)$$

$$R_{ост}=R_{0,ост}-\sum_{j=1}^K\left[\int_0^{R_j}e^{\frac{\vartheta-\vartheta_0}{\vartheta_{доп}-\vartheta_0}\ln\left(\frac{R_0-1}{4T}\right)}dr-R_j\right]; \quad (6)$$

$$R=R_0+\sum_{j=1}^K\left[\int_0^{R_j}e^{\frac{1/\vartheta-1/\vartheta_0}{1/\vartheta_{доп}-1/\vartheta_0}\ln\left(\frac{R_0-1}{4T}\right)}dr-R_j\right]; \quad (7)$$

$$R_{ост}=R_{0,ост}-\sum_{j=1}^K\left[\int_0^{R_j}e^{\frac{1/\vartheta-1/\vartheta_0}{1/\vartheta_{доп}-1/\vartheta_0}\ln\left(\frac{R_0-1}{4T}\right)}dr-R_j\right], \quad (8)$$

где  $R$ ,  $R_{ост}$  – фактический сработанный (остаточный) ресурс;  $R_0$ ,  $R_{0,ост}$  – нормативный (нормативный остаточный) ресурс;  $T$  – постоянная времени при известных условиях прокладки кабеля;  $\vartheta_0=\{60; 65; 70; 90\}$  °С – нормальная рабочая температура жилы кабеля;  $\vartheta$  – фактическая температура жилы кабеля;  $R_j$  – участок наработки;  $j=1..K$  – номера участка наработки.

По выражениям (5) – (8) проведены расчеты для алюминиевых кабелей с ПВХ-изоляцией сечением  $1 \times 120$  мм<sup>2</sup>. При этом нормативный срок службы данного кабеля составляет  $R_0=20$  лет,  $\vartheta_0=70$  °С. Данный кабель отработал свой нормативный срок службы, однако 5 лет он эксплуатировался с температурой 50 °С, а остальные 15 – с температурой 68 °С. Фактический сработанный ресурс при этом составил от 7,5 до 11,5 лет в зависимости от используемых выражений (5) – (8), нормативный остаточный соответственно – от 12,5 до 8,5 лет.

В процессе своей эксплуатации кабель подвергся воздействию тока короткого замыкания величиной 5 кА в течение 2 с. Начальную температуру

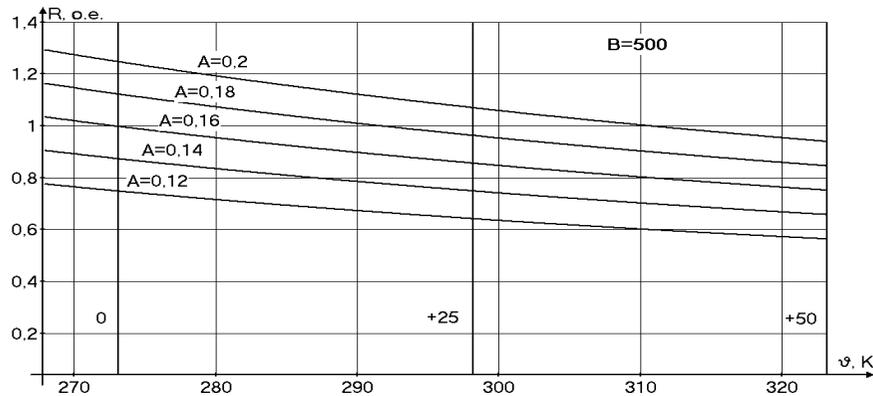


Рис.1. Технический ресурс электрооборудования с учётом изменения температуры (при  $n=2$ )

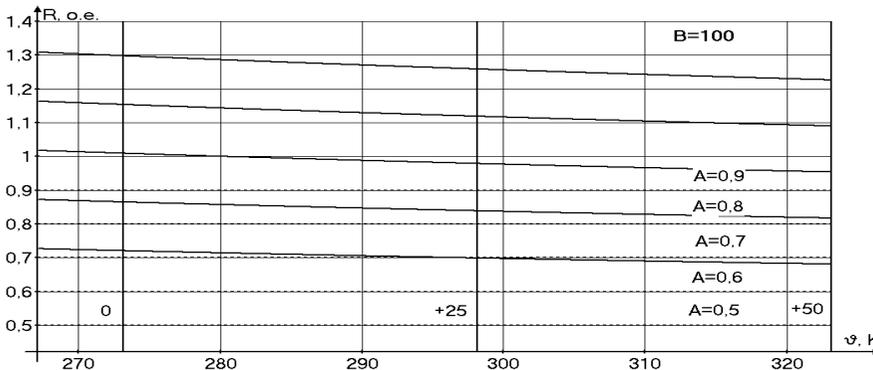


Рис.2. Технический ресурс электрооборудования с учётом: 1) — изменения температуры; 2) — изменения температуры и 100% влажности (при  $n=2$ )

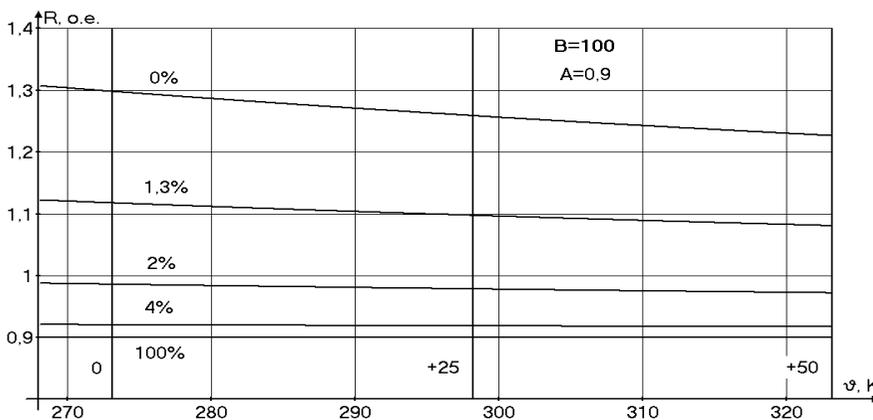


Рис.3. Технический ресурс электрооборудования с учётом изменения температуры и влажности (при  $n=2$ )

структурных элементов. Для этого разработаны модели расчета показателей надежности для наиболее ответственного структурного элемента рассматриваемой единицы оборудования применительно к фактическим условиям ее эксплуатации. Данные модели адаптированы и применены для оценки показателей надежности в условиях Анголы.

За основу принят известный подход, где при эксплуатации ЭО основными показателями, характеризующими его надежность, являются безотказность и долговечность, так как, воздействуя именно на них, можно управлять его надежностью и техническим состоянием. При этом используются показатели нормативного  $R_0$  и нормативного остаточного ресурса  $R_{0,ост}$ , фактического сработанного  $R$ , фактического остаточного ресурса  $R_{ост}$ , а также вероятностей безотказной работы и отказа ЭО.

Проведенный в главе 1 анализ статистических данных о повреждаемости ЭО Анголы различных типов и классов напряжения, а также обобщение результатов исследований, приведенных в научной литературе, позволили применить следующую комплексную математическую модель определения фактического сработанного ресурса  $R^*$  (в относительных единицах – о.е.) для ЭО, работающего в утяжеленных режимах эксплуатации:

$$R^* = R_0^* + \sum_{j=1}^K \left( \int_0^{R_j^*} \exp \left( \sum_{i_T=1}^{N_T} \frac{(X_{y_{i_T}^*} - 1)}{\Delta X_{i_T}^*} + \sum_{i_Э=1}^{N_Э} \frac{(X_{y_{i_Э}^*} - 1)}{\Delta X_{i_Э}^*} + \sum_{i_M=1}^{N_M} \frac{(X_{y_{i_M}^*} - 1)}{\Delta X_{i_M}^*} + \sum_{i_X=1}^{N_X} \frac{(X_{y_{i_X}^*} - 1)}{\Delta X_{i_X}^*} \right) dr^* - R_j^* \right), \quad (1)$$

где  $R_0^*$  – нормативный ресурс,  $R_0^*=1$  о.е.;  $i_T=1 \dots N_T$ ,  $i_Э=1 \dots N_Э$ ,  $i_M=1 \dots N_M$ ,  $i_X=1 \dots N_X$  – количество тепловых, электрических, механических и химических эксплуатационных факторов;  $X_{y_{i_T}^*}$ ,  $X_{y_{i_Э}^*}$ ,  $X_{y_{i_M}^*}$ ,  $X_{y_{i_X}^*}$  – величины  $i_T$ -го,  $i_Э$ -го,  $i_M$ -го,  $i_X$ -го утяжеленных эксплуатационных факторов, о.е.;  $\Delta X_{i_T}^*$ ,  $\Delta X_{i_Э}^*$ ,  $\Delta X_{i_M}^*$ ,  $\Delta X_{i_X}^*$  – относительное (отнесенное к нормативному значению соответствующего эксплуатационного фактора) отклонение  $i_T$ -го,  $i_Э$ -го,  $i_M$ -го,  $i_X$ -го теплового, электрического, механического, химического факторов, о.е.;  $R_j^*$  – фактический сработанный ресурс на  $j$ -м интервале наработки в нормативных условиях эксплуатации, о.е.;  $j=1 \dots K$  – количество интервалов наработки объемом  $R_j^*$ . По выражению (1) величина  $R^*$  рассчитывается за наработку в объеме  $R_0^*$ , причем  $\sum_{i=1}^K R_j^* \leq R_0^*$ . Если требуется рассчитать фактический ресурс за наработку  $r^*$ , отличную от наработки в объеме нормативного ресурса  $R_0^*$ , то в выражении (1) необходимо принять  $R_0^*=r^*$ , тогда  $\sum_{i=1}^K R_j^* \leq r^*$ . Нормативный остаточный ресурс определяется, как

$R_{0,ост}^* = 1 - R^*$ , а фактический остаточный ресурс  $R_{ост}^*$  корректируется с учетом прогнозируемых условий эксплуатации.

В работе использованы выражения для определения вероятности безотказной работы и отказа при воздействии совокупности эксплуатационных факторов  $\{X_i\}$  в зависимости от наработки  $t$ . Очевидно, что определить интенсивности отказов  $\lambda$  для всего множества условий эксплуатации крайне сложно и требует значительных затрат. Поэтому целесообразно привести условия эксплуатации ЭО к нормативным с помощью модели оценки фактического сработавшего ресурса (1).

В выражениях для определения вероятностей безотказной работ и отказа могут быть применены различные законы распределения в зависимости от имеющихся статистических данных. Собранный информация о надежности ЭО Анголы позволяет использовать экспоненциальный закон распределения.

Выражения для определения показателей безотказности могут быть использованы как на заданном интервале, так и на интервале наработки в объеме нормативного ресурса.

Электрооборудование Анголы работает, как правило, в утяжеленных условиях. Это, прежде всего, связано с утяжеленными токами и климатическими условиями, для которых характерна высокая влажность и температура воздуха, в отдельных районах сильная запыленность, а также крайне низкий уровень системы ТОиР.

Электрооборудование рассчитано и спроектировано на эксплуатацию в нормативных, установленных паспортными данными условиях эксплуатации. Нарботка до предельного состояния в нормативных условиях эксплуатации указывается в паспортных данных и должна соответствовать фактическому сработавшему ресурсу ЭО в этих условиях. Для утяжеленных условий эксплуатации эта величина подвергается корректировке. При этом считается, что величина ресурса обладает свойством аддитивности, которое заключается в том, что суммарный фактический сработанный ресурс складывается из суммы значений фактического сработавшего ресурса на каждом  $j$ -м участке наработке  $R_j$ . Применение экспоненциального основания степени в расчетных выражениях методики объясняется тем, что длина участков наработки при эксплуатации ЭО в конкретно взятых утяжеленных условиях невелика и на них с высокой точностью приближения зависимость фактического сработавшего ресурса от эксплуатационных факторов можно аппроксимировать экспоненциальной функцией. Очевидно, что чем меньше рассматриваемый участок наработки  $R_j$ , тем точнее будет аппроксимация. Кроме того, в процессе эксплуатации ЭО процесс развития повреждений носит накопительный (кумулятивный характер). Этим и обусловлено свойство кумулятивности величины фактического сработавшего ресурса.

Важным аспектом при этом является необходимость учитывать климатические условия республики Анголы. Воздействующие в процессе эксплуатации значения факторов внешней среды необходимо учитывать при

всегда выгоднее, чем стратегия САР. Стратегия САР может быть выгодна только вне нормативного срока службы ЭО ( $t > T_{сл}$ ), что подтверждается опытными данными. Поэтому, применяя в настоящее время САР, энергетика Анголы несет огромные затраты. Следовательно, для условий Анголы определение стратегии ТОиР сводится к выбору между ППР и СТС.

Предложенный подход, разработанная классификация стратегий ТОиР и их целевые функции позволяют выбрать наиболее целесообразную стратегию проведения ТОиР для Анголы по техническому состоянию, учитывая при этом конкретные условия эксплуатации, место установки ЭО, важность и ответственность его в технологическом процессе.

**В четвертой главе** на основе полученных выражений по оценке показателей надежности, разработанных в главе 2, выводятся расчетные модели для определения показателей надежности различных видов ЭО, адаптированные к условиям Анголы.

Рассмотрим примеры разработанных математических выражений для определения фактического сработавшего и остаточного ресурса, а также вероятностей безотказной работы и отказа для различных видов ЭО при использовании экспоненциального закона распределения. Расчеты в основном выполнены на примере российского и зарубежного оборудования, которое установлено или в перспективе может быть поставлено в Анголу.

На примере силовых трансформаторов в работе проведены расчеты технического ресурса с учётом влияния температуры и влажности окружающей среды. За технический ресурс с учетом технологического назначения трансформаторов целесообразно принять временные единицы измерения наработки – срок службы. На основании выражения (2) получены зависимости (рис. 1) срока службы ЭО  $T_{сл}$  от температуры окружающей среды при различных постоянных коэффициентах  $A$  и  $B$ .

Из представленных на рис.1 графиков следует, что для снижения износа ЭО, поддержания его ресурса на необходимом уровне и планирования сроков ремонта необходимо учитывать температуру окружающей среды, что является очень важным для африканской страны с таким жарким климатом, как в республике Ангола. Результаты расчета показали, что ресурс работы трансформаторов зависит от температуры окружающей среды, при этом срок службы трансформатора в районах с повышенной температурой снижается в среднем на 2,5% при увеличении температуры на  $10^\circ\text{C}$ .

Полученные кривые (рис. 1) построены без учета фактора влажности окружающей среды. Воспользуемся выражениям (2) для учета влажности и получим кривые, представленные на рис. 2 – 3. Как видно из этих рисунков дополнительный учёт фактора влажности приводит к уменьшению технического ресурса ЭО. При этом влияние тем выше, чем больше коэффициент  $B$ . Таким образом, можно сделать вывод, что чем меньше величина энергии активации ( $E_a$ ), тем меньше на сработку ресурса ЭО влияет влажность.

стратегии ТОиР. Учет признаков позволяет дать классификацию всех возможных для условий Анголы стратегий ТОиР (табл. 1).

**Таблица 1. Классификация моделей ТОиР электрооборудования**

| Признак классификации | Значение признака | Характеристика применения признака классификации   |
|-----------------------|-------------------|--|
| W1                    | 0                 | Учитываются только внезапные отказы  |
|                       | 1                 | Учитываются только постепенные отказы  |
|                       | 2                 | Учитываются и внезапные и постепенные отказы   |
| W2                    | 0                 | Результаты ТД не учитываются, т.е. проводится ППР  |
|                       | 1                 | Результаты ТД не учитываются, плановые ремонты не проводятся, т.е. проводится САР                                    |
|                       | 2                 | Результаты ТД учитываются лишь для электрооборудования с вероятностью $f(t)$ , т.е. проводится ПКС.                  |
|                       | 3                 | Результаты ТД учитываются при проведении работ по техническому обслуживанию и ремонту, то есть проводятся только СТС |

В символах принятой классификации общая модель (3) запишется как  $M=\langle 2,2 \rangle$ . Модели стратегий САР, ППР, ПКС и СТС при различных сочетаниях признаков классификации, полученные с учетом необходимых преобразований целевой функции (3), сведены в табл. 2.

**Таблица 2. Выражения для определения критерия оптимизации при разных признаках классификации стратегий ТОиР электрооборудования**

| Группа стратегий | Признак классификации  | Расчетные выражения для определения критерия оптимизации   |
|------------------|------------------------|--|
| ППР              | $\langle 0, 0 \rangle$ | $Z(t)=C_P(T_{ср}-t)/t+C_{ав}(\lambda_0 t-0,5\lambda_0^2 t^2)+Z_{ТО}$                                   |
|                  | $\langle 1, 0 \rangle$ | $Z(t)=C_P(T_{ср}-t)/t+C_{ав}\lambda^2 t^2+Z_{ТО}$  |
|                  | $\langle 2, 0 \rangle$ | $Z(t)=C_P(T_{ср}-t)/t+C_{ав}(\lambda_0 t+(\lambda^2-0,5\lambda_0^2)t^2)+Z_{ТО}$                        |
| САР              | $\langle 0, 1 \rangle$ | $Z(t)=C_{ав}(\lambda_0 t-0,5\lambda_0^2 t^2)+Z_{ТО}$   |
|                  | $\langle 1, 1 \rangle$ | $Z(t)=C_{ав}\lambda^2 t^2+Z_{ТО}$  |
|                  | $\langle 2, 1 \rangle$ | $Z(t)=C_{ав}(\lambda_0 t+(\lambda^2-0,5\lambda_0^2)t^2)+Z_{ТО}$  |
| ПКС              | $\langle 0, 2 \rangle$ | $Z(t)=C_P(T_{ср}-t)/t+(1-f(t)+kf(t))C_{ав}(\lambda_0 t-0,5\lambda_0^2 t^2)+C_d f(t)+Z_{ТО}$            |
|                  | $\langle 1, 2 \rangle$ | $Z(t)=C_P(T_{ср}-t)/t+(1-f(t)+kf(t))C_{ав}\lambda^2 t^2+C_d f(t)+Z_{ТО}$                               |
|                  | $\langle 2, 2 \rangle$ | $Z(t)=C_P(T_{ср}-t)/t+(1-f(t)+kf(t))C_{ав}(\lambda_0 t+(\lambda^2-0,5\lambda_0^2)t^2)+C_d f(t)+Z_{ТО}$ |
| СТС              | $\langle 0, 3 \rangle$ | $Z(t)=C_P(T_{ср}-t)/t+kC_{ав}(\lambda_0 t-0,5\lambda_0^2 t^2)+C_d+Z_{ТО}$                              |
|                  | $\langle 1, 3 \rangle$ | $Z(t)=C_P(T_{ср}-t)/t+kC_{ав}\lambda^2 t^2+C_d+Z_{ТО}$   |
|                  | $\langle 2, 3 \rangle$ | $Z(t)=C_P(T_{ср}-t)/t+kC_{ав}(\lambda_0 t+(\lambda^2-0,5\lambda_0^2)t^2)+C_d+Z_{ТО}$                   |

Разработана методика выбора рациональной стратегии проведения ТОиР. Она основана на сравнении значений отношения целевых функций при переходе от стратегии ППР ( $Z_1(T)$ ) к САР ( $Z_2(T)$ ) и СТС ( $Z_3(T)$ ):  $\{Z_1(T)/Z_2(T)$  и  $Z_1(T)/Z_3(T)\}$ . Целью выбора является определение эффективности применения САР, ППР или СТС. Проведение ремонтов ЭО в соответствии со стратегией ППР будет целесообразно, если  $Z_1(T) < Z_2(T)$  и  $Z_1(T) < Z_3(T)$ . Выбор рациональной стратегии ремонтов ЭО осуществляется путем анализа систем уравнений, связывающих сравниваемые стратегии. Проведенные исследования показывают, что для ЭО стратегия ППР на отрезке  $(0, T_{ср})$

определении параметров надежности ЭО, изменение которых связано с достаточно длительными процессами старения, диффузии водяных паров, коррозии, электролиза, гидролиза и воздействия агрессивных сред. Исследования воздействия влажности и температуры, а также концентрации агрессивной среды на сроки службы и ресурс ЭО установили, что влияние этих значений на скорости указанных химических и физических процессов, могут быть определены экспоненциальным законом.

В работе, с учетом вышеизложенной теории, а также ГОСТ 15160 – 69, была определена математическая модель влияния значений влажности, температуры и концентрации агрессивной среды на ресурс ЭО, которая представлена следующим выражением:

$$L = R = Ae^{\frac{B}{\theta} \cdot \eta^{-n} \cdot C^{-m}} = R_0 e^{\frac{X_K}{R/E_3}}, \text{ при этом } X_K = \frac{1}{\theta} \cdot \eta^{-n} \cdot C^{-m} \quad (2)$$

где  $R = T_{ср}$  – срок службы или ресурс ЭО;  $\theta$  – температура, °K;  $\eta$  – относительная влажность воздуха, %;  $C$  – концентрация агрессивной среды воздуха, г/м<sup>3</sup> или %;  $A, B, n, m$  – постоянные коэффициенты, зависящие от природы материала и условий применения, определяемые экспериментально для конкретного материала или оборудования;  $V = E_3/R$ ;  $E_3$  – эффективная энергия активации процесса, вызывающего отказ, определяемая для конкретного материала или ЭО;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Если требуется учитывать по выражению (2) воздействие на ЭО только: влажности воздуха, то принимаем  $m=0$ ; жидких агрессивных сред, принимаем  $n=0$ ; температуры, принимаем  $m=0$  и  $n=0$ . Подставляя полученные выражения для оценки ресурса в формулы определения вероятностей безотказной работы и отказа, можно рассчитать значения вероятностей безотказной работы и отказа ЭО с учетом воздействия климатических факторов.

Для упрощения расчетов в работе приведены выражения для определения эффективных значений температуры  $\theta_э$ , относительной влажности воздуха  $\eta_э$  в сочетании с температурой, и концентрации газообразных агрессивных сред  $C_э$  в сочетании с относительной влажностью и температурой.

При рассмотрении воздействия температуры, влажности воздуха и агрессивных сред в процессе эксплуатации установлено, что ресурс  $R$  представляет собой наработку или же часть наработки, в течение которой среда воздействует на ЭО (или отдельные сборочные единицы или изоляцию), температура поверхности которого равна температуре внешней среды или превышает ее не более чем на 5 °C.

Принимая во внимание важность климатических факторов (температуры и влажности), в работе рассматриваются подходы к определению влагозащиты оборудования для условий Анголы. При этом под продолжительностью влагозащиты понимается такая продолжительность непрерывного воздействия постоянных и переменных значений влажности, в течение которой параметры ЭО (или электрической изоляции), определяемые влиянием влажности внешней среды, превышают установленные критические

значения в условиях эксплуатации или испытаний, что соответствует выражению (2) для оценки технического ресурса с учетом климатических условий.

При использовании представленной модели (2) учитывается следующее ограничение: при изменении температуры, влажности или концентрации агрессивной среды может происходить изменение основного процесса, определяющего возникновение отказа, в связи с чем изменяется энергия активации или порядок процесса. В этом случае модель (2) теряет непрерывность и может быть применена отдельно в каждом из диапазонов значений климатических факторов.

**В третьей главе** разработаны и усовершенствованы математические модели проведения технической эксплуатации для различных стратегий ТОиР. Предложена методика и выбрана наиболее рациональная стратегия проведения ТОиР для условий Анголы.

Известные правила технической эксплуатации ЭО основываются на одной из трех стратегий ТОиР (или их сочетании на энергообъекте в различной пропорции) – "по регламенту" (стратегия планово-предупредительного ремонта (ППР)), "по отказам" (стратегия аварийного ремонта (САР)), "по состоянию" (стратегия ремонта по техническому состоянию (СТС)). Данные как зарубежных, так и российских ученых показывают, что если принять ремонтно-эксплуатационные затраты, в случае выполнения ТОиР по стратегии ППР за 100 %, то ремонтно-эксплуатационные затраты по САР будут составлять 130 %, а по СТС – 70 %.

Принципиальным различием стратегий ТОиР, характеризующим принципы проведения ремонтных работ и устанавливающим нормативные параметры каждой стратегии, является отношение к определению и использованию информации о техническом состоянии ЭО. В качестве целевой функции стратегии ТОиР принята функция средних суммарных затрат  $Z(t)$  на проведение ТОиР. Обобщенная математическая модель стратегии ТОиР имеет вид

$$Z(t) = C_p \frac{T_{cl} - t}{t} + (1 - f(t) + kf(t)) C_{ав} Q(t) + C_d f(t) + Z_{ТО}, \quad (3)$$

где  $Z_{ТО}$ ,  $C_d$ ,  $C_p$ ,  $C_{ав}$  – средние стоимости технического обслуживания, диагностирования, планового и аварийного ремонтов ЭО;  $f(t)$  – вероятность проведения технической диагностики (ТД) к моменту времени  $t$ ;  $k$  – вероятность достоверной оценки технического состояния ЭО, предшествующего аварийному переходу ЭО в предельное состояние;  $T_{cl}$  – срок службы ЭО;  $t$  – периодичность ремонтов. Вероятность  $Q(t) = 1 - e^{-\lambda_0 t} e^{-\lambda' t^2}$  – эксплуатационная вероятность отказа ЭО к моменту времени  $t$ ; где  $\lambda_0$  – базисная интенсивность отказов;  $\lambda'$  – удельный прирост интенсивности износных отказов за счет сработки ресурса ЭО.

При назначении ЭО диагностики вероятность его аварийного ремонта из-за отказов снижается. Если отказы полностью исключаются, то в формуле (3) необходимо скорректировать составляющую затрат на аварийные ремонты на

величину  $(1-f(t))$ , если частично, то вероятность отказов при диагностике снижается в  $k$  раз, где  $0 \leq k \leq 1$ . Величина  $k$  является вероятностью обнаружения ТС оборудования, предшествующего аварийному переходу его в предельное состояние. В работе получена оценка значения вероятности  $k$ . Для условий Анголы  $k=0,75$ .

Целевая функция (3) средних суммарных затрат на проведение ТОиР отличается от известных тем, что более полно учитывает все составляющие: затраты на проведение диагностирования, профилактического ТОиР и аварийных ремонтов; значения показателей надежности и вероятностной характеристики назначения ремонта по результатам технической диагностики. В целевой функции (3) затраты на амортизационные отчисления отдельно не выделяются, так как предполагается, что они входят в затраты на техническое обслуживание при линейном способе начисления амортизации. Если амортизационные отчисления определяются нелинейно, например, по способу уменьшаемого остатка или способу списания стоимости по сумме числа лет использования ЭО, то по годам эксплуатации сумма амортизационных отчислений может существенно отличаться. Тогда затраты на амортизацию следует выделять отдельно, так как в этом случае значительно возрастает удельный вес амортизации в суммарных эксплуатационных расходах. В модели (3) не включен ущерб от аварийных и плановых отключений ЭО, так как для энергообъектов с полным резервированием ЭО его величина минимальна. Для других энергообъектов ущерб учитывается. Выражение, которое описывает модель проведения ТОиР с учетом дисконтирования затрат, амортизационных отчислений и ущерба от аварийных и плановых отключений ЭО имеет вид

$$Z_D = \sum_{t=0}^T \frac{Z_{it} + Z_{AMt} + Y_{At} + Y_{Пт}}{(1+E)^t}, \quad (4)$$

где  $t$  – рассматриваемый период эксплуатации;  $Z_{it}$  – затраты на проведение ТОиР по  $i$ -й стратегии;  $Z_{AMt}$  – затраты на амортизацию;  $E$  – ставка доходности;  $Y_{At}$  и  $Y_{Пт}$  – ущерб от аварийных и плановых отключений.

Выражение (3) в значительной мере определяется вероятностью  $f$  ( $0 < f < 1$ ). Если  $f = 0$ , то выражение (4) характеризует затраты на эксплуатацию ЭО по стратегии ППР. Если  $f = 1$ , то выражение (3) характеризует затраты на эксплуатацию ЭО, выполняемую по стратегии СТС. Стратегия САР характеризуется отсутствием плановых ремонтов и ТД  $f(t)=0$ . При использовании модели (3) были получены промежуточные конкурирующие стратегии (ПКС), которые представляют собой сочетание в различной пропорции стратегии ППР, САР и СТС.

В работе предложена классификация моделей для различных стратегий ТОиР, учитывающая изменения показателей надежности, характер проявления отказов и результаты технической диагностики. Для этого в модель (3) введены признаки классификации  $M = \langle W_1, W_2 \rangle$ , учитывающие характер отказов ЭО и вид стратегии ТОиР. При этом признак  $W_1 = \{0, 1, 2\}$  учитывает характер проявления отказов, а признак  $W_2 = \{0, 1, 2, 3\}$  – вид