

На правах рукописи



**Утеулиев Бауыржан Айдилдаевич**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО  
РЕСУРСА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Специальность 05.14.02 - Электрические станции и электроэнергетические  
системы

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

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Целебровский Юрий Викторович**

**Официальные оппоненты:** **Воробьев Николай Павлович**  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», кафедра «Электрификация производства и быта», заведующий кафедрой,  
г. Барнаул

**Хальясмаа Александра Ильмаровна,**  
кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Автоматизированные электрические системы», доцент, г. Екатеринбург

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева» Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск

Защита состоится: 25 апреля 2019 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [https://www.nstu.ru/science/dissertation\\_sov/dissertations/view?id=17342](https://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=17342)

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Осинцев Анатолий Анатольевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Надёжность электроэнергетической системы во многом связана с надёжностью электрических сетей и, в частности, с надёжностью воздушных линий электропередачи (ВЛ). Электроэнергетические системы России включают в себя более 460 тыс. км ВЛ. Казахстанская компания АО «KEGOC» объединена ВЛ протяженностью более 25 тыс. км. Подавляющее большинство ВЛ построены более 40 лет назад, существуют и ВЛ со сроком службы более 50 лет.

В отдельных энергетических системах число аварий в течение года достигает нескольких десятков, а годовой недоотпуск электроэнергии в результате аварий – несколько миллионов киловатт-часов. При такой высокой аварийности в энергосистемах оценка остаточного ресурса отдельных видов установок и поиск путей повышения надежности в ходе эксплуатации становятся первоочередными задачами.

В соответствии с ГОСТ 27.002-2015, остаточным ресурсом называется суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения предельного состояния. При этом предельным состоянием является состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Применительно к задаче исследования на основе вышеуказанного ГОСТа даны следующие определения:

- **остаточный ресурс ВЛ:** Суммарная наработка ВЛ от момента контроля технического состояния компонентов до момента достижения предельного состояния одного из компонентов ВЛ;
- **предельное состояние компонента ВЛ:** Состояние компонента ВЛ, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима из-за большой вероятности отказа или нецелесообразна по экономическим причинам.

Большие капитальные затраты при массовом строительстве новых ВЛ взамен устаревших определяют актуальность задачи обеспечения надежности электроснабжения с использованием стареющих ВЛ. Эта задача включает в себя определение методов минимизации числа отказов действующих ВЛ и максимального продления срока их службы путём ремонтов, замен и реконструкций.

В свете сказанного определение числа ремонтов и сроков реконструкции ВЛ с учетом остаточного ресурса, является актуальной технической и экономической задачей. В основе определения остаточного ресурса должна лежать оценка технического состояния компонентов ВЛ.

В электроэнергетической отрасли разработано немало нормативных документов по оценке технического состояния ВЛ, но практически отсутствуют нормативно-технические рекомендации по оценке показателя физического износа ВЛ и прогнозированию остаточного ресурса ВЛ. Многие специализированные организации по результатам обследования предоставляют электросетевым

компаниям только технический отчет о текущем состоянии ВЛ. Оценка остаточного ресурса ВЛ, как многоэлементного объекта, остается за их владельцами, не имеющими ни критериев, ни методов и средств такой оценки.

При проведении обследования практически все старые ВЛ имеют многочисленные дефекты, и в этом случае необходима обоснованная методика для выбора тех ВЛ, которые необходимо реконструировать в первую очередь с учетом ограниченного финансирования.

Вышеназванную задачу нельзя решить без научного обоснования и разработки методов и средств оценки остаточного ресурса ВЛ. Это и послужило основанием для выбора темы диссертационной работы.

**Цель диссертационной работы** - разработка методов определения остаточного ресурса ВЛ на основе данных о техническом состоянии компонентов, с учётом выполняемых ремонтов и замен оборудования.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка компонентной структуры ВЛ для оценки показателя физического износа ВЛ по компонентам.
2. Анализ аварийных отключений и повреждений действующих ВЛ по климатическим районам и по классам напряжения. Расчет показателей надежности по компонентам, приводящим к отказу ВЛ.
3. Выявление и анализ физических признаков сокращения остаточного ресурса.
4. Анализ наиболее повреждаемых элементов в компонентной структуре ВЛ. Выбор компонентов для оценки остаточного ресурса ВЛ.
5. Анализ факторов, влияющих на остаточный ресурс компонентов.
6. Разработка прямого и косвенного метода оценки показателя физического износа и формулировка рекомендаций по продлению ресурса эксплуатируемой ВЛ с учетом выполняемых ремонтов и замен компонентов.
7. Оценка остаточного ресурса действующей ВЛ на примере электрических сетей Республики Казахстан и определение сроков реконструкции ВЛ.

**Объект исследования** - ВЛ напряжением 220 кВ и выше.

**Предмет исследования** - методы и средства расчетной оценки остаточного ресурса компонентов ВЛ и показателя физического износа ВЛ в целом.

**Методы исследования** - в работе собраны статистические данные по отказам действующих ВЛ. При анализе этих данных и решении вышеназванных задач использованы положения теории вероятностей, теории случайных процессов, теории надежности систем. Применены методы и средства диагностики технического состояния компонентов ВЛ.

**Научная новизна:**

1. Предложена новая постановка задачи оценки остаточного ресурса ВЛ, заключающаяся:
  - в группировке элементов ВЛ по трем компонентам (опорный, изолирующий и проводниковый);
  - в выявлении уязвимых элементов в компонентной структуре ВЛ,

приводящих к отказам ВЛ;

- в методике определения сроков ремонтов и реконструкции ВЛ по достижению предельного состояния компонентов;
- в способе оценке показателя физического износа ВЛ с учетом замен предложенных компонентов при ремонтах и реконструкции ВЛ.

2. Обосновано введение следующих новых величин:

- коэффициент состояния бетона, который является исходным фактором для расчета остаточного ресурса железобетонных опор;
- коэффициент запаса прочности бетона, позволяющий определить приближенную фактическую прочность бетона центрифугированных железобетонных стоек опор.

3. С использованием статистических данных по КЗ на ВЛ и выполненными расчетами показано отсутствие влияния термического воздействия токов КЗ на срок службы проводов.

4. Разработан метод оценки остаточного ресурса ВЛ на железобетонных опорах. Этот метод включает определение остаточного ресурса ВЛ и прогноз сроков проведения ремонтов и реконструкции.

5. Разработаны прямой и косвенный методы оценки показателя физического износа ВЛ, учитывающий ранее выполненную замену элементов того или иного компонентов. Обоснована целесообразность продления нормативного срока службы компонентов ВЛ на основе методов оценки остаточного ресурса.

#### **Практическая значимость результатов работы.**

Разработанный в диссертации метод оценки остаточного ресурса ВЛ может применяться всеми организациями, эксплуатирующими ВЛ, а также специализированными и экспертными организациями, проводящими обследования ВЛ.

Результаты работы использованы для оценки остаточного ресурса ВЛ в АО «КЕГОС». Запланировано их применение при реализации проекта по реконструкции ВЛ, в котором предусмотрены обследования и реконструкция ВЛ филиалов АО «КЕГОС» Межсистемные электрические сети.

**Достоверность научных положений, полученных результатов и выводов**, подтверждается строгими теоретическими расчетами с использованием теории надёжности, а также экспериментальными результатами диагностики и практикой эксплуатации ВЛ АО «КЕГОС».

**Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.** Полученные основные научные результаты соответствуют пунктам 5 «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок» и 11 «Разработка методов анализа структурной и функциональной надежности электроэнергетических систем и систем электроснабжения» паспорта специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

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

1. Для планирования работ по техническому обслуживанию и ремонту и оценки показателя физического износа ВЛ необходимо и достаточно

структурировать ВЛ по трем компонентам: опорный, проводниковый и изолирующий компоненты, отнеся к каждому из них соответствующую группу элементов ВЛ.

2. Остаточный ресурс ВЛ рассчитывается как минимум по двум компонентам – опорному и проводниковому, имеющими разную динамику изменения параметров фактического состояния во времени. Для оценки сроков реконструкции ВЛ в целом остаточные ресурсы названных компонентов сопоставляются.

3. Показатель физического износа ВЛ следует пересчитывать после проведения обследования, а также после замен компонентов ВЛ при реконструкции. В зависимости от объема реконструкции ВЛ в дальнейшем рекомендовано продлевать нормативный срок службы отдельных компонентов ВЛ.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на:

1) рабочих совещаниях с начальниками служб ЛЭП филиалов АО «КЕГОС» Межсистемные электрические сети, в апреле 2015 года и в апреле 2016 года в г. Астана (Республика Казахстан);

2) Международном производственно-техническом семинаре «Современные методы проектирования, строительства, монтажа, эксплуатации воздушных и кабельных линий электропередачи, электрических станций и подстанций», организованным Союзом инженеров-энергетиков Республики Казахстан, 25-27 февраля 2015 года в г. Алматы (Республика Казахстан);

3) Международной IEEE-Евразийской конференции по энергетике, приуроченная к международной выставке ASTANA EXPO-2017 и тринадцатой IEEE-Сибирской конференции, посвящённая достижениям в области разработки и создания систем управления и связи, 29-30 июня 2017 года в г. Астана (Республика Казахстан);

4) Международном научном семинаре имени Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», организованном Институтом систем энергетики имени М.А. Мелентьева СО РАН совместно с Петербургским энергетическим институтом повышения квалификации и ОАО «Национальная энергетическая холдинговая компания» Кыргызской Республики, 11-15 сентября 2017 года в г. Чолпон-Ата (Кыргызская Республика);

5) V Международной научно-практической конференции «Опоры и фундаменты для умных сетей: инновации в проектировании и строительстве», организованным ООО «Международная ассоциация фундаментостроителей», 4-6 июля 2018 года в г. Санкт-Петербург (Российская Федерация).

**Публикации.** По результатам исследования диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, в том числе 2 работы в рецензируемых изданиях из перечня, рекомендованных ВАК Российской Федерации, 1 работа индексирована в наукометрических базах Scopus, 10 работ в прочих изданиях.

**Личный вклад соискателя:**

- 1) выполнен анализ повреждений ВЛ АО «КЕГОС» и выявлены повреждаемые элементы, приводящие к отказу ВЛ;
- 2) разработана структура ВЛ с разделением на компоненты для оценки показателя физического износа и остаточного ресурса ВЛ;
- 3) введен коэффициент состояния бетона, позволяющий оценить остаточный ресурс железобетонных опор;
- 4) введен коэффициент запаса прочности бетона, позволяющий определить приближенную фактическую прочность бетона центрифугированных железобетонных стоек опор;
- 5) разработаны прямой и косвенный методы оценки показателя физического износа ВЛ отдельно по компонентам;
- 6) разработанные методы и средства использованы для оценки остаточного ресурса конкретной ВЛ АО «КЕГОС» и определения сроков ее ремонтов и реконструкции.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 115 наименований и 5 приложений. Общий объем работы составляет 201 страница, включая 44 таблицы и 57 рисунков.

**ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, отражена их практическая ценность, приведены краткое изложение содержания работы и основные положения, выносимые на защиту.

**В главе 1** выполнен обзор и анализ литературы, в которой рассматриваются показатели надежности, отказы, оценка технического состояния, оценка физического износа, оценка остаточного ресурса ВЛ, как одного из важнейших элементов электроэнергетической системы.

Вопросам надежности электроэнергетических систем, обязательными элементами которых являются ВЛ, посвящены труды Н.И. Воропая, Г.А. Федотовой, А.И. Хальясмаа и др. Работы этих ученых содержат фундаментальные основы исследования надежности электроэнергетических систем. Основными показателями надежности ВЛ, как восстанавливаемых объектов, являются параметр потока отказов, вероятность безотказной работы, вероятность отказа, интенсивность отказа, средняя наработка до отказа, средняя наработка на отказ, среднее время восстановления, коэффициент вынужденного простоя.

Основой для построения рассматриваемой и разрабатываемой в работе структуры ВЛ послужили труды В.А. Веникова, В.И. Идельчика и др. Каждый автор по-своему разбивает ВЛ на элементы, что приводит к затруднениям при анализе их повреждаемости для оценки показателя физического износа и остаточного ресурса ВЛ.

Выполнен анализ опубликованных материалов по отказам ВЛ из-за повреждений различных их элементов.

Оценке технического состояния ВЛ посвящены труды ОАО «Фирма ОРГРЭС», Н.С. Смирновой, В.И. Дубровина и др.

Согласно ГОСТ 8829-94 для оценки технического состояния железобетонных опор за основу принимается контрольная разрушающая нагрузка  $M_{разр}$ , прикладываемая к железобетонной конструкции:

$$M_{разр} = C \cdot M_{пред} , \quad (1)$$

где  $C$  - коэффициент безопасности, равный 1,6 для тяжелого бетона;

$M_{пред}$  - изгибающая нагрузка, соответствующая несущей способности железобетонной стойки, то есть предельному моменту.

В выражении (1) не учтено физическое состояние бетона, которое может меняться в процессе эксплуатации, снижая коэффициент безопасности.

Рассмотрению физического износа объектов посвящены работы А.Н. Асаула, Т.С. Печениной и ОАО «Фирма ОРГРЭС». В этих работах отражены методы оценки показателя физического износа многоэлементных систем. Применительно к ВЛ в существующих методах оценки показателя физического износа не учитывается замена в процессе эксплуатации компонентов после ремонтов и реконструкции. Это приводит к большим погрешностям при оценке показателя физического износа ВЛ с длительным сроком службы.

Оценкам остаточного ресурса ВЛ посвящены труды Н.П. Воробьева, Г.М. Боровика, ОАО «Фирма ОРГРЭС» и др. В их работах заложены основы методов оценки остаточного ресурса объектов.

Обзор литературы позволил сформулировать конкретные задачи исследования, на основе которых решается главная задача: разработка методов и средств оценки остаточного ресурса ВЛ с учетом замены в процессе эксплуатации ее элементов, ресурс которых исчерпан.

**В главе 2** применительно к поставленным задачам обоснована и разработана основная структура ВЛ, проанализирована статистика отказов ВЛ.

В структуре выполнена группировка элементов ВЛ в компоненты: опорный, изолирующий и проводниковый. Компонентная структура удобна для оценки показателя физического износа и остаточного ресурса ВЛ. Кроме того, такая структура ВЛ удобна для использования в автоматизированной системе управления производственными активами, в которой ведется планирование технического обслуживания и ремонта ВЛ.

В главе приведен анализ повреждений компонентов ВЛ на примере электрических сетей АО «КЕГОС», и рассчитаны показатели надежности элементов, приведших к отказам ВЛ (устойчивому прекращению работоспособности). Анализ отказов ВЛ выполнен с учетом климатических районов. Расположение ВЛ по климатическим районам определено на основании СНиП РК 2.04-01-2010.

За период 1999 – 2016 гг. в электрических сетях напряжением 220-1150 кВ произошел 251 отказ ВЛ. К отказам ВЛ приводили повреждения следующих элементов:

- 1) изолирующие подвески (42% от общего количества);
- 2) провода (20% от общего количества);
- 3) стойка опоры (17% от общего количества);
- 4) грозозащитные тросы (17% от общего количества);
- 5) анкерные узлы крепления тросовых оттяжек опор (4% от общего количества).

Распределение этих отказов по климатическим зонам показано в таблице 1.

Таблица 1 – Отказы ВЛ АО «КЕГОС»

| №   | Наименование элементов, приведших к отказу             | Число отказов при среднем абсолютном годовом минимуме температуры воздуха |               |          |
|-----|--|---|---------------|----------|
|     |  | от -45 до -40   | от -40 до -25 | выше -25 |
| 1   | Стойки опор, в том числе:                              | 3   | 34            | 5        |
| 1.1 | железобетонные центрифугированные                      | -   | 23            | 3        |
| 1.2 | металлические решетчатые                               | 3   | 11            | 2        |
| 2   | Анкерные узлы крепления тросовых оттяжек, в том числе: | -   | 10            | -        |
| 2.1 | подземные  | -   | 8             | -        |
| 2.2 | надземные  | -   | 2             | -        |
| 3   | Провода, в том числе:                                  | 3   | 42            | 7        |
| 3.1 | в пролете  | 1   | 25            | 2        |
| 3.2 | в петлях (шлейфах)                                     | 2   | 17            | 5        |
| 4   | Грозозащитные тросы (в пролете)                        | 3   | 34            | 6        |
| 5   | Изолирующие подвески, в том числе:                     | 3   | 83            | 18       |

Построены зависимости числа повреждений элементов от срока службы ВЛ. Анализ показал, что повреждения чаще и больше происходят у железобетонных опор на 24-31 годы эксплуатации, металлических опор – с 32 лет эксплуатации, подземных анкерных узлов – на 27-28 годы эксплуатации, проводов – на 37-45 годы эксплуатации, грозозащитных тросов – на 34-39 годы эксплуатации, изолирующих подвесок со стеклянными и фарфоровыми изоляторами – на 37-38 годы эксплуатации, а с полимерными изоляторами – в первые годы эксплуатации.

Расчетом показателей надежности элементов ВЛ установлено, что наибольшее внимание необходимо обращать на опорный компонент. Несмотря на то, что изолирующий компонент чаще подвергается отказам, он имеет преимущество, заключающееся в быстром восстановлении и в наименьших

затратах на восстановление его элементов по сравнению с проводниковым компонентом. Поэтому для более глубокого исследования приняты к рассмотрению железобетонные опоры, процент повреждений которых выше, чем у металлических опор, а также провода и грозозащитные тросы.

**В главе 3** определяются критерии оценки технического состояния центрифугированных железобетонных стоек опор, проводов и грозозащитных тросов. Проводится анализ влияния числа токов КЗ на ВЛ и уровня термического воздействия токов КЗ на ресурс проводов. Разрабатывается метод оценки остаточного ресурса ВЛ на железобетонных опорах.

После длительной эксплуатации ВЛ прочность бетона железобетонных стоек снижается из-за различных нарушений структуры бетона. В результате равенство (1) не выполняется, поэтому в работе введена дополнительная величина  $K_c$ , корректирующая коэффициент  $C$  в выражении (1)

$$M_{разр} = (C - K_c) \cdot M_{пред} \quad (2)$$

Величина  $K_c$  названа коэффициентом состояния бетона.

$$K_c = C \cdot \left(1 - \frac{R_x}{R_0}\right), \quad (3)$$

где  $R_0$  - исходная (марочная) прочность бетона;

$R_x$  - фактическая прочность бетона по результатам обследования.

Железобетонная центрифугированная стойка считается исчерпавшей свой ресурс (несущую способность), если изгибающая разрушающая нагрузка равна предельному моменту  $M_{разр} = M_{пред}$ . В таком случае значение коэффициента состояния бетона должно быть в пределах  $0 < K_c < 0,6$ .

Прочность бетона и несущей способности железобетонных стоек опор при ультразвуковом контроле оценивается по следующим показателям:

- показатель П1 представляет собой время распространения ультразвука в бетоне в поперечном направлении ( $t_{\leftrightarrow}$ ) по отношению к продольной оси опоры на заданной базе измерений;
- показатель П2 представляет собой отношение времени распределения ультразвука в поперечном направлении ( $t_{\leftrightarrow}$ ) ко времени его распространения в продольном направлении опоры ( $t_{\updownarrow}$ ) при одинаковой базе измерений в том и другом направлениях. Физически этот показатель характеризует степень насыщения бетона микроповреждениями и является основным при оценке состояния стоек и их отбраковке.

Для промежуточных состояний опор, когда значения показателей П1 и П2

больше допускаемых, но меньше предельных значений, несущую способность конструкций предложено оценивать по показателю П2 в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 – Несущая способность стоек опор в зависимости от показателя П2

| Показатель П2   | 1,1 | 1,15 | 1,2 | 1,25 | 1,3 | 1,35 | 1,4 |
|---|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| Коэффициент безопасности с учетом коэффициента состояния бетона $C-K_c$ | 1,6 | 1,5  | 1,4 | 1,3  | 1,2 | 1,1  | 1,0 |
| Коэффициент состояния бетона $K_c$                                      | 0   | 0,1  | 0,2 | 0,3  | 0,4 | 0,5  | 0,6 |

Оценку технического состояния проводов и грозозащитных тросов следует производить по однородным зонам ВЛ и по выборочным образцам, демонтированным с ВЛ. При обследовании осуществляется проверка обрыва жил, потери сечения из-за коррозионного износа проводов и грозозащитных тросов.

Возможность прогнозирования остаточного ресурса ВЛ обеспечивается при одновременном наличии следующих условий:

- 1) известны параметры, определяющие фактическое состояние элементов;
- 2) известны критерии предельного состояния элементов;
- 3) имеется возможность периодического (или непрерывного) контроля значений технического состояния элементов.

За параметр фактического состояния  $x_{\phi}$  для железобетонных опор приняты коэффициент состояния бетона, для проводов – относительная потеря прочности стального сердечника, для грозозащитных тросов – потеря сечения.

Приняты три уровня категорий технического состояния:

- 1) первая категория – работоспособное состояние, при котором изменение параметра фактического состояния характеризует нарушение работоспособности ВЛ или единичный случай отказа, незначительно снижающий надежность;
- 2) вторая категория – критическое состояние, при котором изменение параметра фактического состояния приводит к возникновению частых отказов с большой вероятностью, которые значительно снижают надежность;
- 3) третья категория – предельное состояние, при котором изменение параметра фактического состояния приводит к многочисленным отказам, восстановление которых несут большие затраты и дальнейшая эксплуатация недопустима.

Для каждой категории параметра фактического состояния определены граничные допускаемые значения (таблица 3).

Таблица 3 – Характеристика параметра фактического состояния

| Категория состояния | Уровень работоспособности | Железобетонные стойки:<br>Коэффициент состояния бетона<br>$K_c$ | Относительная потеря прочности провода, %.<br>Потери сечения грозозащитного троса, % |
|---------------------|---------------------------|---|--|
| Первая категория    | Работоспособное состояние | $0 \leq x_{\phi 1} \leq 0,3$                                    | $0 \leq x_{\phi 1} \leq 5$   |
| Вторая категория    | Критическое состояние     | $0,3 \leq x_{\phi 2} \leq 0,6$                                  | $5 \leq x_{\phi 2} \leq 10$  |
| Третья категория    | Предельное состояние      | $x_{\phi 3} > 0,6$  | $x_{\phi 3} > 10$  |

Для выбора закона распределения рассмотрен вариационный ряд значений наработок на отказы железобетонных опор, проводов и грозозащитных тросов. Эмпирические характеристики показали, что гистограмма числа отказов железобетонных опор описывается нормальным законом распределения, а гистограмма числа отказов проводов и грозозащитных тросов – распределением Вейбулла.

При прогнозировании остаточного ресурса компонентов с учетом изменения параметра фактического состояния элементов ВЛ для построения графика изменения параметра фактического состояния от времени:

- 1) определено среднее значение параметра фактического состояния компонентов;
- 2) определена средняя наработка компонента на отказ;
- 3) определена интенсивность изменения параметра фактического состояния (для железобетонных опор по нормальному закону распределения, для проводникового компонента по закону распределения Вейбулла);
- 4) определена траектория изменения параметра фактического состояния (рисунок 1);
- 5) определено среднее значение параметра фактического состояния элементов с учетом остаточного износа;
- 6) определена плотность распределения вероятностей прогнозируемых наработок (рисунок 2);
- 7) определен срок проведения ремонтов или реконструкции по наивысшим пикам плотностей распределения (рисунок 2) по каждому дрейфу параметра фактического состояния.



Рисунок 1 - Пример изменения параметра фактического состояния железобетонных опор

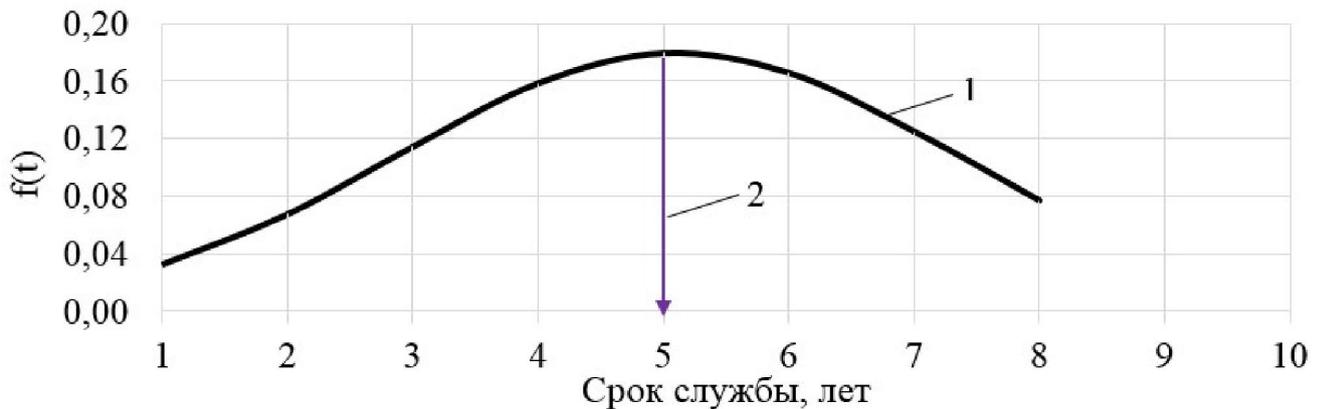


Рисунок 2 - Пример изображения плотности распределения параметра фактического состояния

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

1 – плотность распределения вероятностей прогнозируемых наработок для ремонта или реконструкции;

2 – проекция пика плотности распределения на траекторию дрейфа параметра фактического состояния, определяющая начало ремонта или реконструкции.

Количественная оценка степени термического воздействия тока короткого замыкания на провода выполнена с помощью интеграла Джоуля выборочно на четырех ВЛ.

Значение интеграла Джоуля, определенные расчетным путем по концам ВЛ по фиксирующим приборам, соединены между собой прямыми линиями на рисунке 3. Точками показаны места возникновения короткого замыкания, ромбиком – место обрыва провода. Графики распределения интеграла Джоуля от протяженности ВЛ были построены для каждой фазы.

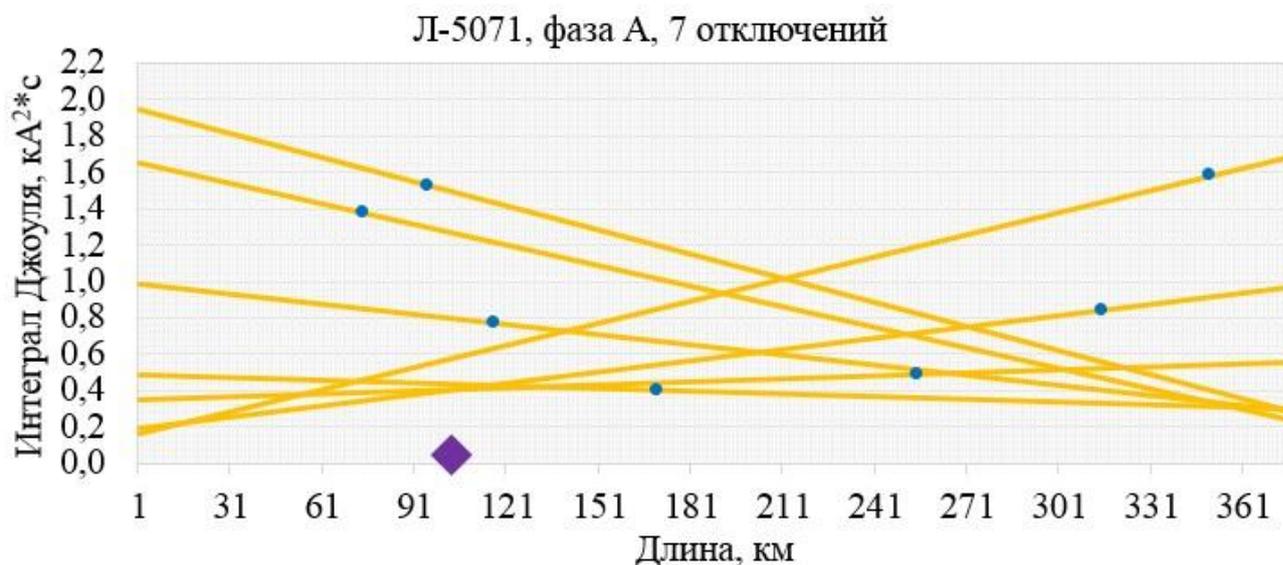


Рисунок 3 - Диаграмма термического воздействия тока КЗ на ВЛ

На основании анализа влияния токов короткого замыкания на ресурс проводов, выявлено, что число коротких замыканий и их термическое воздействие не оказывают влияния на обрывы проводов.

**В главе 4** разрабатываются прямой и косвенный методы оценки параметров физического износа ВЛ. При прямом методе определение физического износа проводится с помощью средств технического диагностирования. При косвенном методе определение физического износа проводится по нормативному сроку службы.

Для оценки показателя физического износа ВЛ прямым методом определены доли дефектных компонентов. Степень износа опорного компонента определена по следующей формуле

$$F_{on} = \frac{\sum_i^n f_{def.on.i} \cdot n_{on.i}}{N_{on}} \cdot K_{on}, \quad (4)$$

где  $f_{def.on.i}$  – вес износа опор при соответствующем коэффициенте состояния бетона, %;

$n_{on.i}$  – число  $i$ -ых дефектных опор, шт;

$N_{on}$  – число опор на ВЛ, шт;

$K_{on}$  – весовой коэффициент опорного компонента  $K_{on} = 0,5$ .

Аналогично определены степени износа проводникового и изолирующего компонента. Таким образом, показатель физического износа ВЛ прямым методом определяется следующим выражением:

$$F = F_{on} + F_{np} + F_{из}, \quad (5)$$

где  $F_{on}, F_{np}, F_{из}$  - степени износа опорной, проводникового и изолирующего компонентов, %.

Приведенные в главе 1 существующие косвенные методы оценки физического износа ВЛ имеют большие недостатки, которые сильно завышают износ при фактическом сроке службы близкие к нормативному. Кроме того, при проведении замен элементов в компонентной структуре ВЛ, их физический износ интегрально должен снижаться и остаточный ресурс – продлеваться.

Нормативный срок службы достаточно установить для каждого компонента ВЛ. Для этих компонентов устанавливается нормативный срок службы согласно ГОСТ 839-80, ГОСТ Р 51177 и «Методических указаниях по оценке технического состояния ВЛ напряжением 35-750 кВ и их элементов».

Для оценки физического износа ВЛ косвенным методом принят учет ранее проведенных ремонтов и реконструкций. При этом введены весовые коэффициенты для каждого компонента ВЛ путем объединения весовых коэффициентов, приведенные в «Методических указаниях по оценке технического состояния ВЛ напряжением 35-750 кВ и их элементов». К примеру, суммированы весовые коэффициенты линейной арматуры и изоляторов, в результате получен весовой коэффициент изолирующего компонента.

Степень износа опорного компонента косвенным методом определена по формуле:

$$F_{on}^1 = \frac{K_{on} \cdot 100}{N_{on} \cdot T_{н.он}} \cdot \sum_i^n (T_{iф.он} \cdot N_{ion.зам}) \quad (6)$$

где  $T_{ф.он}$  – фактический срок службы опорного компонента, лет;

$T_{н.он}$  – нормативный срок службы опорного компонента, лет;

$N_{он.зам}$  – число замененного опорного компонента, шт;

$N_{он}$  – число опор на ВЛ, шт;

$K_{он}$  – весовой коэффициент опорного компонента  $K_{он} = 0,5$ .

Аналогично определена степень износа проводникового и изолирующего компонентов. Показатель физического износа ВЛ косвенным методом определяется по формуле:

$$F^1 = F_{on}^1 + F_{np}^1 + F_{из}^1, \quad (7)$$

Расчет физического износа проведён на примере ВЛ 220 кВ Л-2540

«Правобережная – Индер» (далее – Л-2540):

По результатам обследования Л-2540 показатель физического износа прямым методом согласно формуле (5) составил 48%, а косвенным методом согласно формуле (7) составил 86%.

Если реконструкция ВЛ не предусматривается, то расчет физического износа косвенным методом адаптируется под результаты обследования. Тогда в последующие годы отсчет физического износа начинается с 48%.

Результаты обследования показали, что больше половины опор Л-2540, грозозащитные тросы и изолирующие подвески находятся в удовлетворительном состоянии.

При частичной замене компонентов необходимо устанавливать нормативный срок службы с продлением ресурса, описанного в главе 3. Таким образом, остальные, не замененные опоры в количестве 539 шт имеют незначительный износ и их параметр фактического состояния находится в пределах допустимого для дальнейшей эксплуатации. Поэтому после проведения реконструкции, параметр фактического состояния оставшихся опор будет иметь некоторое значение. Рассчитав остаточный износ, определено фактическое значение параметра фактического состояния. По полученным результатам произведено построение графика изменения параметра фактического состояния от времени (рисунок 4).

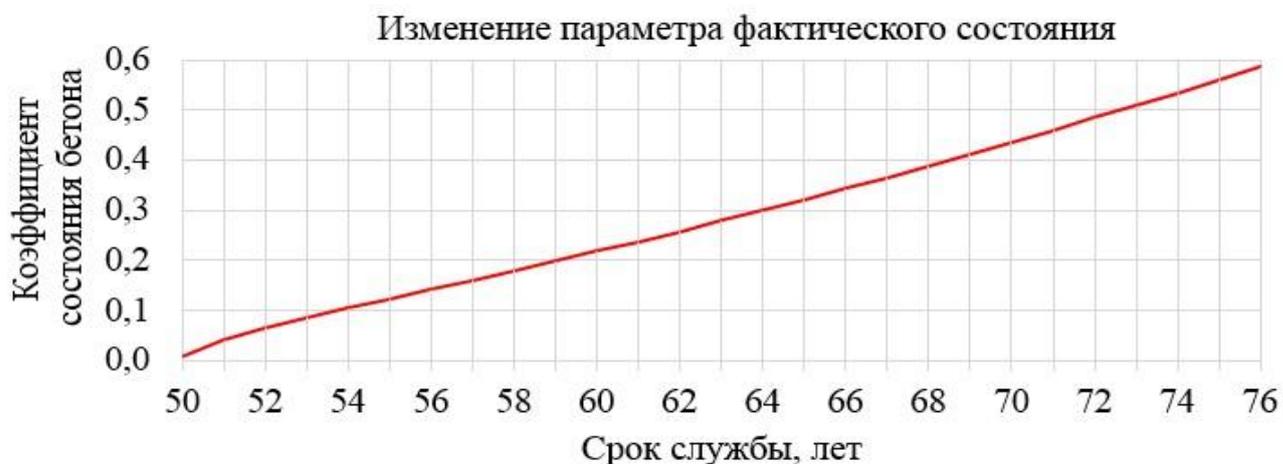


Рисунок 4 - График изменения параметра фактического состояния железобетонных опор Л-2540 до прогнозируемого предельного состояния

Следовательно, нормативный срок службы опорного компонента продлевается на 27 лет с момента проведения реконструкции (при выборе варианта реконструкции с одним ремонтом железобетонных опор 49 лет), то есть до 76 года срока службы. Тогда показатель физического износа косвенным методом после реконструкции Л-2540 согласно формуле (7) составит

$$F^1 = \frac{0,5 \cdot 100}{803 \cdot 76} (49 \cdot 539 + 0 \cdot 264) + \frac{0,4 \cdot 100}{787,6 \cdot 45} (0 \cdot 787,6) + \frac{0,1 \cdot 100}{2502 \cdot 40} (0 \cdot 2502) \approx 22\%$$

Прямой метод определения физического износа отражает реальный износ компонентов ВЛ.

В главе 5 анализируются результаты диагностики железобетонных опор, выполнен расчет остаточного ресурса действующей ВЛ и сравнительный анализ вариантов остаточного ресурса.

Расчет проведен для Л-2540, находящийся в Республике Казахстан (опоры марки ПБ-220-3 и ПБ-220-1, провода марки АС 300/39, грозозащитные тросы марки ТК-11, год ввода в эксплуатацию 1974, район по нормативному ветровому давлению – III (32 м/с), район по нормативной толщине стенки гололеда – I (10 мм)).

Результаты расчета приведены на рисунке 5, на котором под обозначением 4 показан рекомендуемый срок проведения ремонта, так как область спада пика плотности распределения вероятностей прогнозируемых наработок соответствует 43-44 годам срока службы, что означает вероятность наступления отказа ВЛ из-за ухудшения состояния опор. Аналогично, область проведения реконструкции ВЛ соответствует 49-52 годам срока службы.

Изменение первого параметра фактического состояния до предельного состояния (0,6) будет соответствовать гарантийному ресурсу железобетонных опор, на рисунке 5 этот ресурс составляет 47 лет.

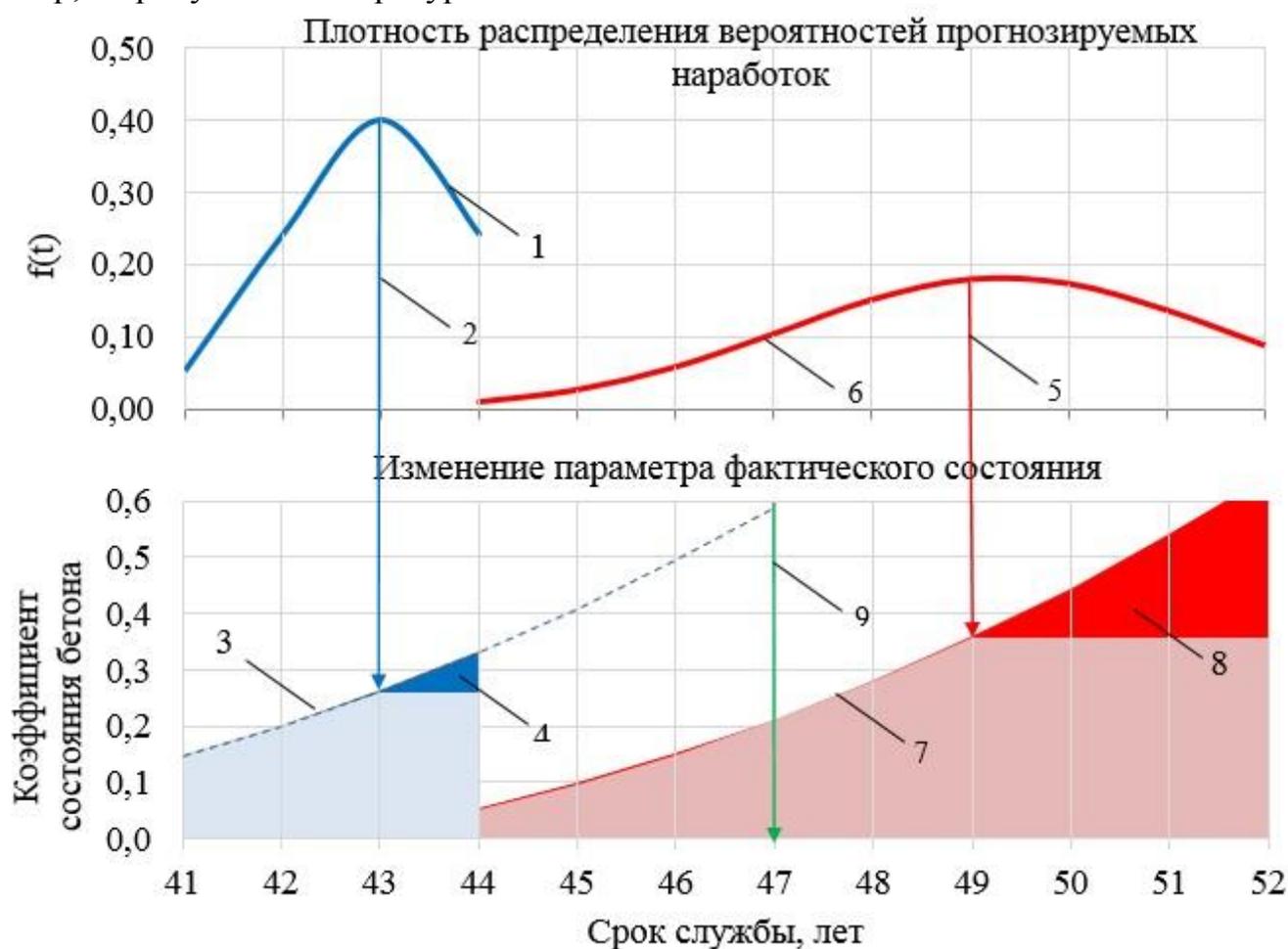


Рисунок 5 - График определения остаточного ресурса железобетонных опор по варианту с одним ремонтом

На рисунке 5 приняты следующие обозначения:

1 – плотность распределения вероятностей прогнозируемых наработок для ремонта;

2 – проекция пика плотности распределения на траекторию дрейфа параметра фактического состояния, определяющая начало ремонта;

3 – траектория дрейфа параметра фактического состояния для ремонта;

4 – период проведения ремонта;

5 – проекция пика плотности распределения на траекторию дрейфа параметра фактического состояния, определяющая начало реконструкции;

6 – плотность распределения вероятностей прогнозируемых наработок для реконструкции;

7 – траектория дрейфа параметра фактического состояния для реконструкции;

8 – период проведения реконструкции.

9 – проекция пика плотности распределения на ось, определяющая гарантированный ресурс железобетонных опор.

Увеличивая число ремонтов, можно продлевать остаточный ресурс железобетонных опор.

Характер изменения параметра фактического состояния проводов определяется аналогично. По полученным результатам построен график изменения параметра фактического состояния проводов от времени, который показан на рисунке 6.



Рисунок 6 - График определения остаточного ресурса провода Л-2540

На рисунке 6 приняты следующие обозначения:

- 1 – плотность распределения вероятностей прогнозируемых наработок для реконструкции;
- 2 – проекция пика плотности распределения на траекторию дрейфа параметра фактического состояния, определяющая начало реконструкции;
- 3 – траектория дрейфа параметра фактического состояния для реконструкции;
- 4 – период проведения реконструкции.

Аналогично проводу построен график изменения параметра фактического состояния грозозащитного троса от времени.

При прогнозировании остаточного ресурса и определении срока реконструкции ВЛ выбирают самый наихудший вариант предельного состояния компонентов ВЛ.

Сопоставление вариантов оценки остаточного ресурса опорного и проводникового компонентов Л-2540 показало, что достижение предельного состояния ранее всего выявляется у опорного компонента. Следовательно, реконструкцию Л-2540 (с заменой дефектных опор, полной заменой проводниковой и изолирующей компонентов) рекомендуется выполнить по опорному компоненту с вариантом одним ремонтом при сроке службы 49 лет, независимо от предельного состояния проводникового компонента, который наступает позже.

В данном случае планирование реконструкции Л-2540 по проводниковому компоненту экономически не выгодно, так как потребуются постоянная мобилизация бригад для периодического ремонта ВЛ, что влечет за собой дополнительные затраты и периодические длительные отключения ВЛ.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основании поставленных в работе и решенных задач по структурной надежности электроэнергетических систем в части оценки остаточного ресурса ВЛ получены следующие результаты:

1. Разработана структура ВЛ с группировкой элементов ВЛ по трем компонентам (опорный, изолирующий и проводниковый). Каждый компонент классифицируется по ряду признаков: назначение, принципиальные особенности, количество цепей, нормируемые размеры. В каждом компоненте содержится группа элементов. Компонентная структура ВЛ удобна для планирования ее технического обслуживания и ремонта с использованием автоматизированных систем управления производственными активами. Данная структура позволяет оценивать остаточный ресурс и рассчитать физический износ ВЛ в целом.

2. Выполнен анализ отказов ВЛ АО «КЕГОС» за период 1999-2016 гг., при этом выявлено, что отказы происходили по причине повреждений следующих элементов:

- изолирующие подвески (42%);
- провода (20%);

- стойка опоры (17%);
- грозозащитные тросы (17%);
- анкерные узлы крепления тросовых оттяжек опор (4%).

Рассчитаны показатели надежности перечисленных элементов ВЛ, в результате доказано, что:

1) в изолирующем компоненте показатели надежности хуже у подвесок с полимерными изоляторами. Причиной является ошибки проектирования при выборе гасителей вибрации, которые недостаточно обеспечивают гашение вибрации, и жесткая конструкция (стеклопластиковый стержень) полимерного изолятора подвергается излому;

2) в проводниковом компоненте провода более подвержены повреждению по сравнению с грозозащитными тросами. Провод требует больших затрат при аварийно-восстановительной работе по сравнению с изолирующей подвеской;

3) к длительному простоя ВЛ приводят повреждения опорного компонента, при этом чаще повреждаются железобетонные опоры по сравнению со стальными опорами. Показатели надежности у подземных анкерных узлов крепления тросовых оттяжек опор хуже, чем у надземных.

**3.** По результатам расчетов показателей надежности элементов ВЛ, для более глубокого исследования приняты к рассмотрению ВЛ на железобетонных опорах.

За время эксплуатации железобетонных опор происходит насыщение бетона микротрещинами, о чем свидетельствуют результаты диагностирования. В работе предложены коэффициент запаса прочности бетона, позволяющий определить приближенную фактическую прочность бетона железобетонной стойки опор, и коэффициент состояния бетона, позволяющий моделировать и прогнозировать остаточный ресурс центрифугированных железобетонных стоек опор, как элемента опорного компонента.

Во время эксплуатации проводникового компонента появляется коррозия, что снижает прочность проводов и грозозащитных тросов. Для прогнозирования остаточного ресурса проводникового компонента приняты относительная потеря прочности провода и потеря сечения грозозащитного троса.

Анализом токов КЗ на примере ВЛ казахстанских электрических сетей доказано, что термическое воздействие при токах КЗ не влияет на срок службы проводов.

Таким образом, при прогнозировании остаточного ресурса ВЛ за параметр фактического состояния приняты:

- коэффициент состояния бетона для железобетонных опор;
- относительная потеря прочности для проводов;
- потеря сечения для грозозащитных тросов.

**4.** Изменение параметра фактического состояния компонентов ВЛ определено по трем уровням категории технического состояния с выбором закона распределения. Доказано, что распределение отказов ВЛ из-за повреждений железобетонных опор подчиняются нормальному закону распределения, а

провода и грозозащитные тросы – распределению Вейбулла.

Для проводникового компонента не предусматриваются ремонты, так как замены небольших поврежденных участков (вставка) не продлевают ее остаточный ресурс. Для проводникового компонента определены только сроки реконструкции, то есть замена по всей длине ВЛ.

**5.** Разработаны прямой (метод наблюдения) и косвенный методы оценки показателя физического износа ВЛ. Для оценки доли степени износа компонентов введены весовые коэффициенты для каждого компонента ВЛ.

Для прямого метода предложено использовать веса износов компонентов, что позволяют учитывать незначительные дефекты в пределах допустимых норм. Вес износа компонентов определен как процентное отношение фактического параметра фактического состояния к его предельному значению.

Для косвенного метода предложено учитывать срок службы каждого элемента в компонентной структуре ВЛ, так как в процессе эксплуатации элементы подвергаются замене. Установлен нормативный срок службы отдельно для каждого компонента ВЛ согласно нормативно-техническим документам, а не на ВЛ в целом.

Разработана методика адаптации расчета физического износа косвенным методом под результаты обследования (прямого метода), если не проводится реконструкция ВЛ. Таким образом уточняется физический износ косвенным методом, что позволяет пересчитать амортизацию ВЛ в последующие годы эксплуатации ВЛ.

**6.** Сформулированы следующие рекомендации для оценки физического износа и остаточного ресурса ВЛ:

1) после проведения реконструкции ВЛ, нормативный срок службы компонента следует оставить прежним, если произведена замена компонента в полном объеме. При частичной замене компонентов необходимо устанавливать их продленный нормативный срок службы до гарантированного ресурса в соответствии с изменением параметра фактического состояния;

2) после обследования ВЛ необходимо осуществлять проверку достоверности результатов диагностирования путем проведения механических испытаний. Если результаты диагностирования и испытаний совпадают, то результаты диагностирования можно применять для оценки остаточного ресурса ВЛ.

3) по каждому ремонту и на период реконструкции ВЛ необходимо распределить количество заменяемых опор в зависимости от параметра фактического состояния.

4) для определения сроков реконструкции ВЛ необходимо выполнить сопоставление вариантов по каждому компоненту. Срок реконструкции ВЛ определяют по наилучшему варианту компонентов или по другим сценариям, оценивая затраты на проводимые ремонты;

5) остаточный ресурс компонентов ВЛ может отличаться, так как в процессе эксплуатации ВЛ параметры фактического состояния этих компонентов изменяются различной интенсивностью. В результате расчетов принимают

наихудший вариант из компонентов для определения срока реконструкции;

б) разработанный метод оценки остаточного ресурса целесообразно применять при составлении перспективных графиков реконструкции обследованных ВЛ, которые можно использовать в качестве обоснования инвестиционных затрат.

7. Разработанный метод оценки остаточного ресурса ВЛ продемонстрирован на примере ВЛ 220 кВ в электрических сетях Казахстана.

Рекомендуемый период реконструкции Л-2540 определен по наилучшему варианту достижения предельного состояния ее компонентов. Предложено выполнение реконструкции при сроке службы 49 лет с частичной заменой дефектных опор, полной заменой проводникового и изолирующего компонентов.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИЙ**

### *Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Утеулиев, Б.А. Ресурс опор воздушных линий электропередачи / Б.А. Утеулиев, А.Г. Тарасов // Научный вестник НГТУ. – 2015. – №2 (59). – С. 89-97.
2. Утеулиев, Б.А. Определение остаточного ресурса железобетонных опор воздушных линий электропередачи 110 кВ и выше / Б.А. Утеулиев // Энергетик. – 2017. – №3. – С. 13-17.

### *Публикации в зарубежных конференциях и изданиях, входящих в наукометрические базы данных Scopus, Web of Science и др.:*

3. Bauyrzhan Uteuliyev, Residual life assessment of overhead transmission lines 110 kV and above and determination of their reconstruction terms // E3S Web of Conferences 25, 04005 (2017) RSES 2017, DOI: 10.1051/e3sconf/20172504005, p.5

### *Публикации результатов в научных изданиях:*

4. Утеулиев, Б.А. Адаптация метода ультразвукового контроля прочности бетона к оценке остаточного ресурса железобетонных стоек опор воздушных линий электропередачи / Б.А. Утеулиев, А.Г. Тарасов // Вестник КазНТУ. – 2015. – №1 (107). – С. 284-292.
5. Утеулиев, Б.А. Надежность элементов ВЛ 220 кВ и выше / Б.А. Утеулиев // Куатты энергетика КЗ. – 2015. – №1 (01). – С. 8-38.
6. Утеулиев, Б.А. Оценка значимости элементов ВЛ в формировании ее ресурса / Б.А.Утеулиев, А.В.Михеев // Вестник КазНТУ. – 2015. – №1 (107). – С. 273-284.
7. Утеулиев, Б.А. Ультразвуковой метод контроля прочности бетона применительно к железобетонным центрифугированным стойкам опор ВЛ / Б.А. Утеулиев, А.Г. Тарасов // Куатты энергетика КЗ. – 2015. – №1 (01). – С. 61-87.
8. Утеулиев, Б.А. Структура воздушной линии электропередачи. Конструктивные особенности / Б.А. Утеулиев // Промышленность Казахстана. – 2016. – №6 (99) – С. 30-33.
9. Утеулиев, Б.А. Оценка физического износа воздушных линий

электропередачи / Б.А. Утеулиев // Энергия единой сети. – 2018. – №4 (40). – С. 80-89.

***Публикации в материалах научных конференций:***

10. Утеулиев, Б.А., Оценка остаточного ресурса ВЛ 110 кВ и выше и определение сроков реконструкции / Б.А. Утеулиев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Сборник научных трудов 89 заседания Международного научного семинара имени Ю.Н. Руденко. – Издательство: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2017. – С. 669-677.

11. Утеулиев, Б.А., Обеспечение надежности действующих воздушных линий электропередачи для энергетики будущего [Электронный ресурс] / Б.А.Утеулиев // Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи (International Siberian Conference On Control And Communications, SIBCON). – 2017. – Режим доступа: <http://ieeetpu.ru/proceedings/papers/rep242.pdf>. свободный.

12. Утеулиев, Б.А., Оценка остаточного ресурса железобетонных опор и проводов действующих ВЛ 110-500 кВ / Б.А. Утеулиев // Опоры и фундаменты для умных сетей: Инновации в проектировании и строительстве: Сборник докладов в V международной научно-практической конференции. – Спб.: 2018 – С. 103-106.

13. Утеулиев, Б.А., Косвенная оценка остаточного ресурса ВЛ в процессе эксплуатации с применением параметров физического износа / Б.А. Утеулиев // Опоры и фундаменты для умных сетей: Инновации в проектировании и строительстве: Сборник докладов в V международной научно-практической конференции. – Спб.: 2018. – С. 107-110.

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
тел./факс. (383) 346-08-57  
формат 60x84 1/16, объем 1.5 п.л., тираж 100 экз.  
заказ № 438 подписано в печать 14.02.2019 г.