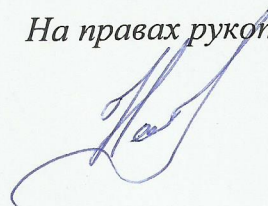


В печать  
27.05.2023

На правах рукописи



**Смирнова Наталья Сергеевна**

**Оптимизация реконструкции воздушных линий электропередач с  
учетом надежности энергоснабжения потребителей**

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения

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

Макеевка – 2023

Работа выполнена на кафедре металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

**Научный руководитель:** **Горохов Евгений Васильевич**, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», профессор кафедры металлических конструкций и сооружений

**Официальные оппоненты:** **Зверев Виталий Валентинович**, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», заведующий кафедрой металлических конструкций;

**Давиденко Александр Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования сельскохозяйственных объектов ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный аграрный университет»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Защита состоится «21» сентября 2023 г., в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 02.2.001.02 (93.0.000.06) при ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38(062) 343-7033, e-mail:d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_2023 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совет  
02.2.001.02 (93.0.000.06)



Лахтарина Сергей Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Высоковольтные линии электропередачи (ВЛ) – это сложные системы, которые состоят из ряда составляющих: концевые, угловые, промежуточные опоры, провода, изоляторы, арматура. ВЛ являются самыми ненадежными элементами электроэнергетической системы, так как они имеют большую протяженность, проходят по открытой местности, подвержены атмосферным и антропогенным воздействиям. Задача по обеспечению надежного и качественного электроснабжения и экономической эффективности сводится к установлению уровня надежности ВЛ с экономической обоснованностью, сохранности ВЛ при авариях, исключающих каскадные разрушения, и обеспечении безопасности при строительстве и эксплуатации. Вполне определяемо, что вероятность выживания системы при одинаковой надежности компонентов равна произведению вероятностей выживания каждого компонента. Координация прочности элементов системы ВЛ сводится к следующим критериям: повреждение первого компонента должно исключать догружение последующего, чтобы избежать каскадного разрушения; время и стоимость ремонта должны быть минимальны. *Таким образом определяющими в системе ВЛ являются анкерные, анкерно-угловые и концевые опоры, как элементы влекущие наибольшие последствия для нормальной передачи электроэнергии потребителям.*

Основная масса аварий электросетевых конструкций происходит из-за несвоевременно проведенных работ по восстановлению дефектов и повреждений, полученных как в результате неправильного монтажа, так и процесса эксплуатации. Это связано, прежде всего, с имущественной обособленностью владельцев, а так, как *наиболее реальным способом возмещения ущерба* в случае наступления аварийного события *является страхование*, которое основано на данных экспертной оценки технического состояния, а, следовательно, и остаточного ресурса, то определяющую роль при дальнейшей эксплуатации таких объектов имеет задача не только обеспечения надежности и долговечности конструктивных составляющих и линии в целом, но и создание денежного фонда целевого назначения, средства из которого направлялись бы на мероприятия по инженерной защите и возмещение убытков вследствие аварий строительных конструкций.

Таким образом, решение задач, связанных с обеспечением надежности в период эксплуатации опор ВЛ, а также созданием единой системы оценки показателей ресурса, является весьма актуальной.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.**  
 Диссертационная работа выполнена в рамках госбюджетных научно-исследовательских работ:

- Д2-01-06 «Мониторинг и повышение надежности воздушных линий электроснабжения при воздействии гололедно-ветровых нагрузок и воздействий» (2006-2008 гг., гос. рег. №0106 U 002950);

- Д 2-01-09 «Разработка научных и методических подходов к обоснованию моделей эксплуатационных нагрузок и воздействий, которые используются в мониторинге уникальных строительных конструкций» (2009-2010 гг., гос. рег. №0109 U 003037).

Кафедральных госбюджетных научно-исследовательских работ:

- К-2-08-06 «Усовершенствование формообразования металлических конструкций на основе диагностики и мониторинга остаточного ресурса, экономико-математическое моделирование режима эксплуатации зданий и сооружений» (2006-2010гг., гос. рег. №0107 U 000101);

- К-2-08-16 «Современные подходы к формообразованию и обеспечению надежности строительных металлоконструкций на основе использования новых информационных технологий в процессе проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации» (2016-2020гг., гос. рег. №0117 D 000263);

- К-2-08-21«Разработка методов формообразования, расчета и обеспечения надежности зданий и сооружений с металлическим каркасом на основе выполнения численных и экспериментальных исследований» (2021-2025гг., гос. рег. №0121 D 000082).

### **Степень разработанности темы.**

Исследования характеристик башенных сооружений, в частности опор воздушных линий электропередачи, в достаточной степени изложены в работах Е.В. Горохова и его учеников: Е.В. Шевченко, С.Н. Шаповалова, Я.В. Назима, С.Н. Бакаева, особое внимание следует уделить работам В.И. Золотарева, С.Н. Иванова, И.П. Смирнова, А.В. Козлова, Н.А. Семеноваой, а также J. Smith, A. Johnson, K. Müller, M. Garcia, H. Tanaka, L. Wei, E. Johnson, J. Martinez и др.

Исследования в области оценки технического состояния ВЛ проводились отечественными и зарубежными исследователями, такими как: И.А. Кравцов, А.Н. Швецов, В.И. Черкашин, А.А. Кушнир, Д.В. Смоляков, А.Ю. Кулагин, J. Doe, M. Smith, M. Garcia, H. Müller, L. Wei, E. Johnson.

Анализ проведенных исследований свидетельствует о достаточной проработке вопросов обеспечения безопасности энергоснабжения. Однако,

методики оценки остаточного ресурса представляют собой сложные и громоздкие процедуры, требующие специализированных знаний, выходящих за рамки обычного инженерного образования.

Это свидетельствует о необходимости разработки простой и удобной для использования методики, которую обычный инженер сможет применить для определения остаточного ресурса конструкций высоковольтных линий электропередач. Методика должна быть применима к большинству типов конструкций, а результаты обеспечивать возможность оценки технического состояния и оставшегося срока службы с применением в других областях, например, в области страхования объектов.

В связи с чем вопрос оптимального проектирования реконструкции воздушных линий электропередач обеспечивающее надежность энергоснабжения потребителей является весьма актуальной темой

**Целью исследования** является решение проблемы эксплуатационной надежности металлических опор ВЛ на основе определения ресурса объекта с учетом специфики работы элементов с несовершенствами.

**Научная гипотеза:** заключается в возможности определения предельных нагрузок на металлические опоры воздушных линий электропередач с учетом специфики работы элементов, содержащих дефекты и повреждения, для определения ресурса объекта.

**Задачи исследования:**

- исследование влияния несовершенств на несущую способность конструкций металлических опор ВЛ;
- разработка методики испытаний и проведения экспериментальных исследований поведения опоры ВЛ, имеющей несовершенства;
- разработка методики, позволяющей определить предельные нагрузки на существующие конструкции опор ВЛ для оценки остаточного ресурса объекта;
- усовершенствование оценки технического состояния электросетевых конструкций;
- разработка предложения по корректировке страховых тарифов в зависимости от фактического уровня конструктивной безопасности.

**Объект исследования** – металлические башенные опоры воздушных линий электропередач (анкерные, угловые и концевые).

**Предмет исследования** – показатели надежности металлических башенных опор ВЛ с учетом влияния несовершенств конструкции.

**Методы исследований:**

- методы теоретической и прикладной механики;
- методы численного моделирования с применением метода конечных элементов (МКЭ);
- экспериментальный электротензометрический метод исследования;
- метод физического моделирования с использованием методов подобия;

– методы математической статистической обработки экспериментальных данных.

### **Научная новизна полученных результатов.**

Краткое содержание научных положений и результатов, полученных автором, состоит в следующем:

◆ по результатам обследований установлены наиболее повреждаемые элементы конструкций опор ВЛ, дана оценка их влияния на НДС отдельных элементов и конструкции в целом;

◆ по результатам экспериментальных исследований выявлены особенности реальной работы элементов с конструктивными несовершенствами в виде общих искривлений решетки в пределах одной панели;

◆ установлен принцип определения остаточного ресурса конструкций ВЛ на основе конструктивной безопасности с учетом повторяемости климатических нагрузок;

◆ в зависимости от фактического уровня конструктивной безопасности разработка предложения по корректировке страховых тарифов.

### **Практическое значение результатов исследований.**

Разработанные методики позволили упростить определение остаточного ресурса объекта (из условий повторяемости климатических нагрузок), определить вклад каждой составляющей климатических нагрузок на результирующее напряженно-деформированное состояние элементов металлических опор. В том числе использованы для опор линии электропередач, находящихся в эксплуатационной ответственности технической единицы «Харцызские электрические сети».

Полученные результаты позволили разработать рекомендации по предоставлению страховым организациям информации для дальнейшего создания денежного фонда целевого назначения.

Даны новые технические решения, защищенные патентами, по усилению и ремонту электросетевых конструкций.

### **Внедрение результатов работы.**

Результаты исследований были использованы:

– для разработки проектных предложений по обследованию, реконструкции и усилению металлических опор линии электропередач, находящихся в эксплуатационной ответственности технической единицы «Харцызские электрические сети»;

– в учебном процессе ГОУ ВПО «ДОННАСА» при подготовке специалистов по направлениям подготовки 08.03.01, 08.04.01 «Строительство»;

- получены два патента на варианты усиления баз и фундаментов металлических решетчатых опор.

#### **Личный вклад соискателя.**

Приведенные в диссертационной работе результаты исследований получены соискателем самостоятельно. Личный вклад автора состоит в следующем:

– разработка всех методик и выполнение численных экспериментов, приведенных в диссертации;

– статистическая обработка информации, полученной при проведении численных исследований;

- непосредственное участие в проведении натурных обследований, испытаний и лабораторных исследованиях;

- разработка рекомендаций по предоставлению экспертной информации для дальнейшего страхования объекта;

– систематизация и научный анализ полученных результатов.

**Степень достоверности результатов** подтверждена данными экспериментальных исследований, натурального освидетельствования конструкций, которые выполнены с использованием поверенного измерительного оборудования, статистической обработкой данных, а также соответствие численных исследований НДС конструкций с использованием лицензионных программных комплексов.

#### **Апробация результатов диссертации.**

Основные результаты исследований докладывались на научно-технических конференциях и семинарах:

–Вторая международная конференция «Многогранные гнутые стойки (МГС)» (Днепропетровск, 2007);

–Научно-практическая конференция «Реконструкция действующих подстанций, воздушных и кабельных линий электропередачи в условиях возрастания возможностей энергопотребления» (Макеевка, 2008);

- IX Всероссийская выставка Научно-технического творчества молодежи. I Международная научно-практическая конференция « Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях» (Москва, 2009)

- VIII Международная научная конференция «Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий» (Макеевка, 2009).

– Международная научно-техническая конференция к 50-летию ГОУ ВПО «ДонНАСА» «Оптимальное проектирование зданий и сооружений с учетом требований долговечности, надежности и эксплуатации» (Макеевка, 2022).

**Публикации.** Основные положения, результаты и выводы диссертационной работы опубликованы в 14 научных работах, из них 9 включены в международные наукометрические базы, 1 в отраслевом нормативном документе, 2 патентах.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников и трех приложений. Общий объём диссертационной работы – 187 страниц, в том числе 101 страниц основного текста, список использованных источников на 23 страницах, 25 полных страниц с рисунками и таблицами, приложений на 34 страницах.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, дана характеристика объекта и предмета исследования, показана научная новизна, практическое значение и реализация результатов.

**В первом разделе «Анализ конструктивных и эксплуатационных особенностей при определении остаточного ресурса ВЛ»** анализируется состояние вопроса и научные достижения в области исследования определения остаточного ресурса металлических конструкций в общем, и конструкций ВЛ в частности.

Выполнен критический анализ научно-технической и нормативной литературы по направлениям исследований: влияние несовершенств на НДС элементов ВЛ; особенности учета воздействий на металлические опоры ВЛ; аспекты натурного исследования башенных сооружений, методы определения остаточного ресурса.

С целью определения технического состояния конструкций ВЛ и выявления наиболее значимых несовершенств было обследовано более 1500 км трасс высоковольтных линий, из них более 654 металлических опор, из которых 176 анкерно-угловые. По результатам обследования было выявлено, что наиболее распространенным повреждением является коррозия элементов (до 80% опор) и щелевая коррозия узловых соединений (до 55% опор) (от 1мм до 15мм), погнутости и погиби элементов встречаются в 50% опор (от 4мм до 70мм).



Т.к. коррозионный износ элемента достаточно несложно учесть изменением расчетных характеристик элемента, было принято решение о более детальном рассмотрении дефектов в виде погнутостей в элементах с наибольшей гибкостью.

Во втором разделе «Разработка методики и проведение численных исследований конструкции опоры с несовершенствами в виде выгибов решетки из плоскости граней» были рассмотрены режимы работы металлической анкерно-угловой опоры У220-2+9, определены схемы нагружений, которые являются расчетными для расколов ствола конструкции. Дальнейший расчет выполнялся для режима работы конструкции Шк (Опора концевая. Оборван провод, дающий наибольший крутящий момент на опору. Трос не оборван. Схема является расчетной для расколов ствола опоры (рисунок 1).

Статический расчет конструкций выполнен с помощью программного комплекса ПК«ЛИРА САПР». При построении пространственной модели опоры принимались следующие допущения:

- стержни в расчетной схеме стержневой конструкции заменялись их продольными осями;
- действительные опорные узлы заменялись идеальными опорными связями;
- нагрузки, собранные с поверхности стержней переносились на оси (рисунок 2).

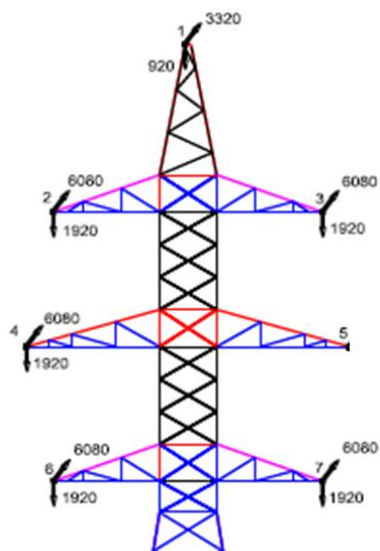


Схема нагружения №Шк  
Опора концевая. Оборван провод, дающий наибольший крутящий момент на опору. Трос не оборван.  $t=-50^{\circ}\text{C}$ ;  $C=20\text{мм}$ ;  $q=0$

Рисунок 1 - Схема нагружения №Шк. Опора концевая. Оборван провод, дающий наибольший крутящий момент на опору. Трос не оборван.  $t=-50^{\circ}\text{C}$ ;  $C=20\text{мм}$ ;  $q=0$

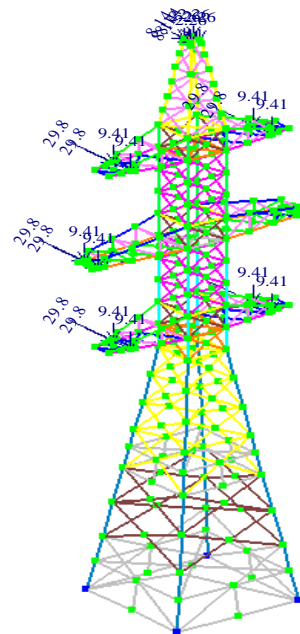


Рисунок 2 - Пространственная модель опоры ВЛ У220-2р+9 с приложением нагрузок в ПК «ЛИРА САПР»

В результате расчета конструкций опор ВЛ вычислены усилия в стержнях опоры для вышеуказанного нагружения при работе конструкции без дефектов и с выгибами. Направления выгибов моделировались на сжатый и растянутый раскос (рисунок 3). Несовершенства конструкции в виде выгиба моделировались путем разбиения элементов на части с целью повторения геометрии дефекта рис 4. в двух параллельных гранях поочередно.

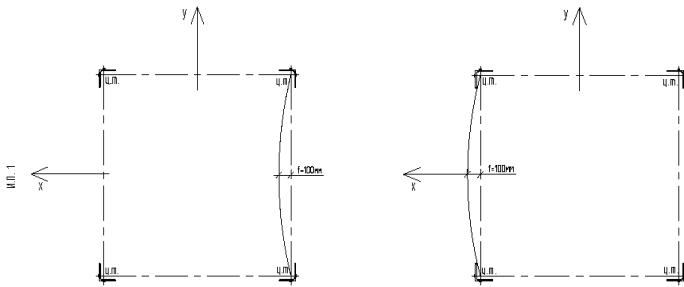


Рисунок 3 - Направление выгиба на сжатый и растянутый раскос

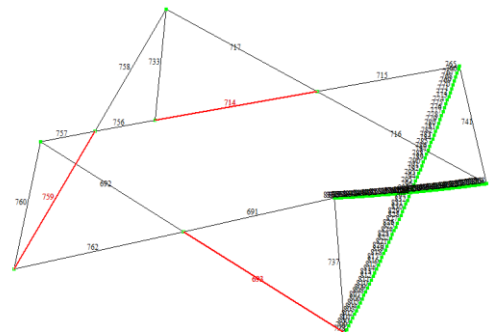


Рисунок 4 - Схема сечения содержащей несовершенства с нумерацией элементов и выгибом решетки «на растянутый раскос»

Внутренние продольные усилия сжатия и растяжения в стержнях опоры ВЛ по каждой схеме приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты определения расчетных усилий в элементах нижней сечения ствола опоры У220-2+9

№	№ элемента	Тип стержня	без дефекта	выгиб на растянутый раскос	выгиб на сжатый раскос
1	737	пояс	-614.9	-615	-615.1
2	760	пояс	-634.8	-634.5	-635
3	733	пояс	561.4	561.1	561.2
4	741	пояс	581.8	582	582
5	691	раскос	27.2	26.8	28.4
6	692	раскос	-8.8	-8.7	-10.2
7	757	раскос	12.6	12.4	17.2
8	758	раскос	-11.6	-11.4	-18.5
9	717	раскос	6.5	6.4	7.5
10	716	раскос	-23.3	-23	-24.5
11	827	раскос	21.2	21	21.1
12	849	раскос	-20.7	-20.6	-20.6

Анализ результатов расчета позволяет сделать заключения о том, что в результате изменения геометрии раскосов (элементов для которых данный режим работы является расчетным), усилия в деформированных стержнях модели увеличиваются по сравнению с работой схемы без несовершенств до 15%.

В результате анализа расчетов определено включение в работу панелей перпендикулярных граням с несовершенствами, т.е. перераспределением усилий по конструкции в отличие от типового расчета, где конструкция раскладывается на плоские фермы, которые рассчитываются в отдельности друг от друга.

С целью проведения анализа живучести стержневой конструктивной формы опоры линии электропередачи выполнен проверочный расчет в программном комплексе, разработанном на основе языка программирования MATLAB разработанной на кафедре теоретической и прикладной механики ДонНАСА, по результатам которого определяется и фиксируется группа разрушенных элементов, определяющих верхнюю границу надежности конструкции в целом.

Количество элементов выходящих из строя на четвертом пригрузении и график выхода из строя элементов конструкции в зависимости от шага нагружения представлены на рисунках 5,6.

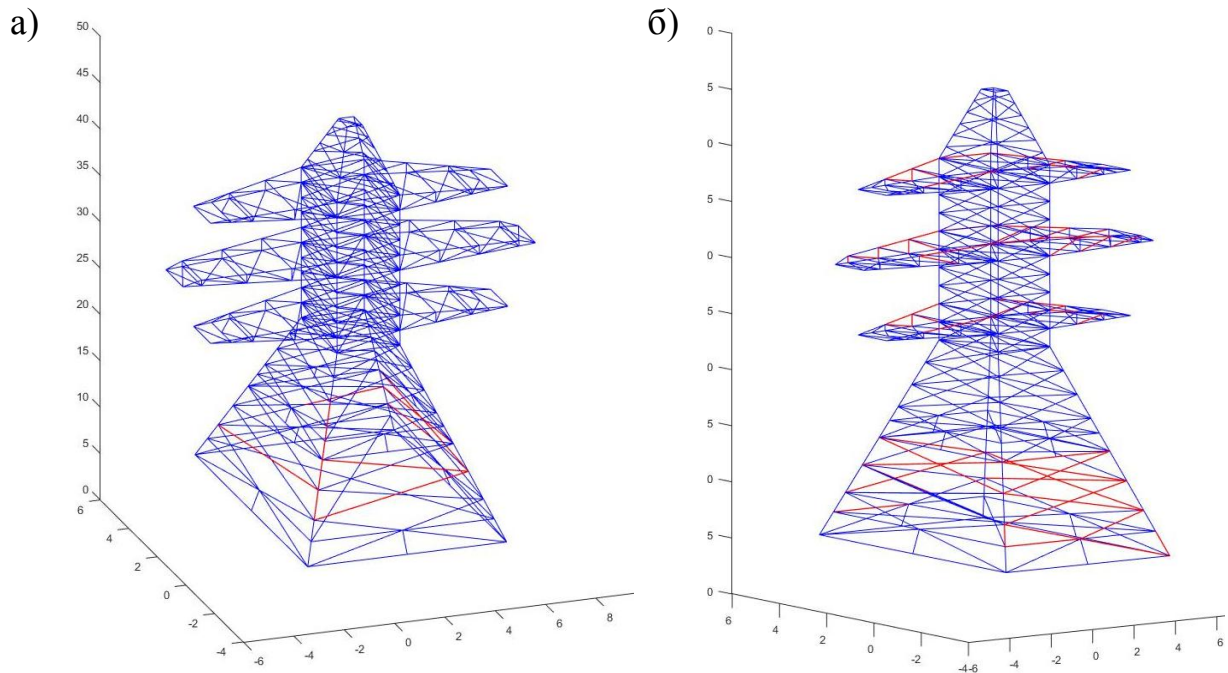


Рисунок 5 - Количество элементов выходящих из строя на четвертом пригрузении: а – с выгибом решетки на сжатый элемент; б – с выгибом решетки на растянутый элемент.

По результатам расчета в программном комплексе было установлено, что характеристика безопасности для опоры с дефектом решетки в виде выгиба на сжатый элемент составляет – 9,32, в виде выгиба на растянутый элемент составляет – 6,0

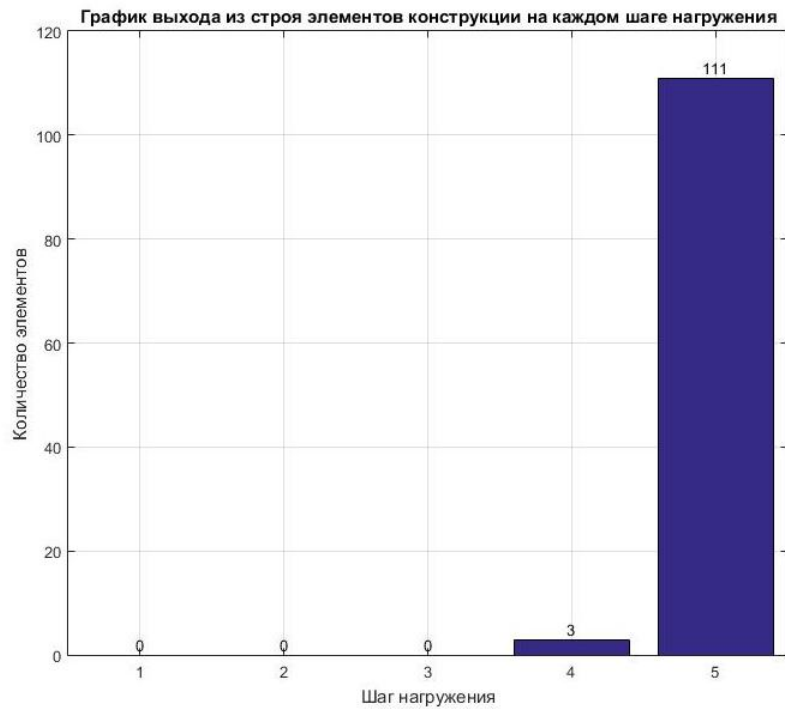


Рисунок 6 – График выхода из строя элементов конструкции в зависимости от шага нагружения.

Численные расчеты опоры с несовершенствами приводят к необходимости подтверждения полученных данных экспериментальным путем, позволяют определить места проведения тензометрических исследований для анализа отклика исследуемой конструкции на стержень с предельной деформацией.

В разделе 3 «**Экспериментальные исследования анкерной опоры У220-2р+9 с несовершенствами при действии статических нагрузок**», на основе численных исследований, разработана методика проведения натуральных экспериментальных исследований по влиянию несовершенств в виде выгиба решетки на НДС конструкции опоры.

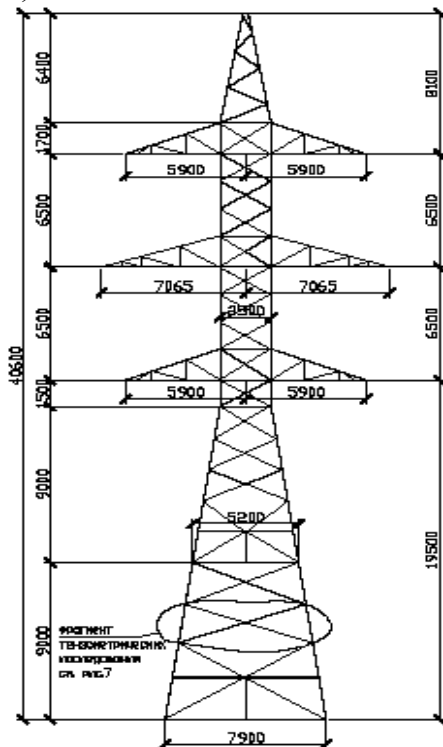
Исследуемый объект представляет собой четырехгранную широкобазую анкерно-угловую опору линии электропередач У220-2+9 с раскосной решеткой из одиночных уголков высотой 40,6м с примыкающими к стволу в трех уровнях параллельными траверсами и тросостойкой. Опора представляет собой пространственную стержневую конструкцию (рисунок 7).

Элементы секций соединяются болтами нормальной точности, класса прочности 5.6. Пояса смежных секций соединены между собой фланцами на болтах класса прочности 5.6. Материал конструкций – углеродистые стали для сварных конструкций ВСт3 по ГОСТ 380-71\*, которые соответствуют марке С245.

Эксплуатационные свойства металлических опор ВЛ характеризуются двумя основными факторами: восприимчивостью к образованию дефекта и

верхним пределом внешней нагрузки, при которой обеспечивается нормальная эксплуатация конструкции, характеризуемая первой группой предельных состояний.

а)



б)

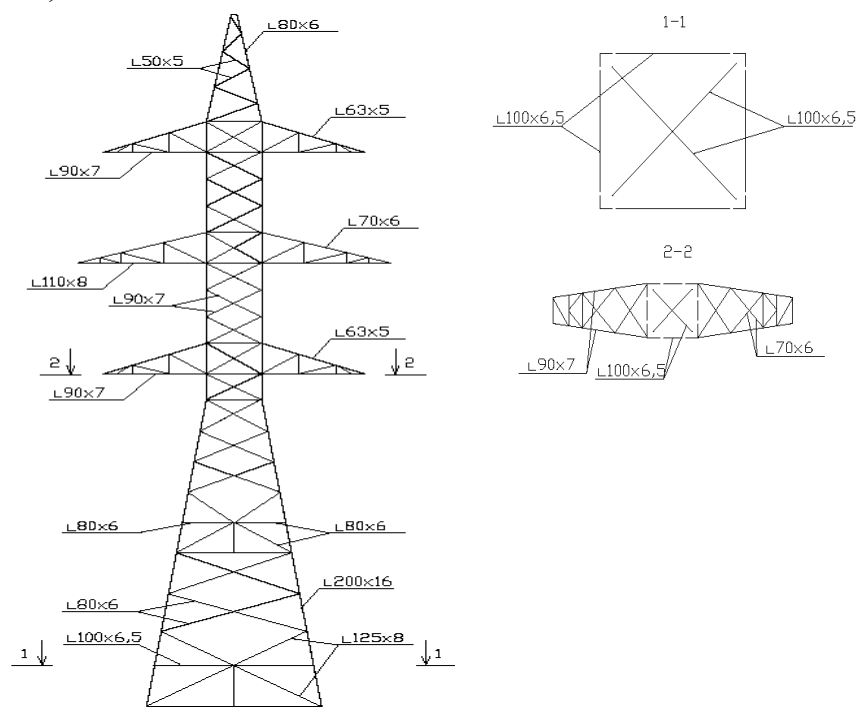


Рисунок 7 -Схема опоры У220-2р+9: а) геометрические размеры; б) жесткости конструкции

По результатам численного эксперимента в были определены элементы, воспринимающие наибольшие усилия от внешних нагрузок, поэтому анализ испытаний *выполняется в два этапа. На первом этапе* рассматривается поведение отдельных элементов и узлов опоры в процессе образования дефекта в виде общего искривления стержня из плоскости конструкции. *На втором этапе* анализируется отклик исследуемой конструкции на дефектный стержень, т.е. способность к локализации влияния дефекта в пределах отдельного стержня или к перераспределению усилия от выведенного из строя дефектного стержня на соседние.

В ходе данного эксперимента моделировалась ситуация образования общего искривления элементов решетки из плоскости грани опоры рисунок 9.

Испытания опоры проводились на Полигоне испытаний опор линий электропередачи и башенных сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (далее «Полигон») рисунок 10, оборудованным в соответствии со стандартом МЭК 60652.

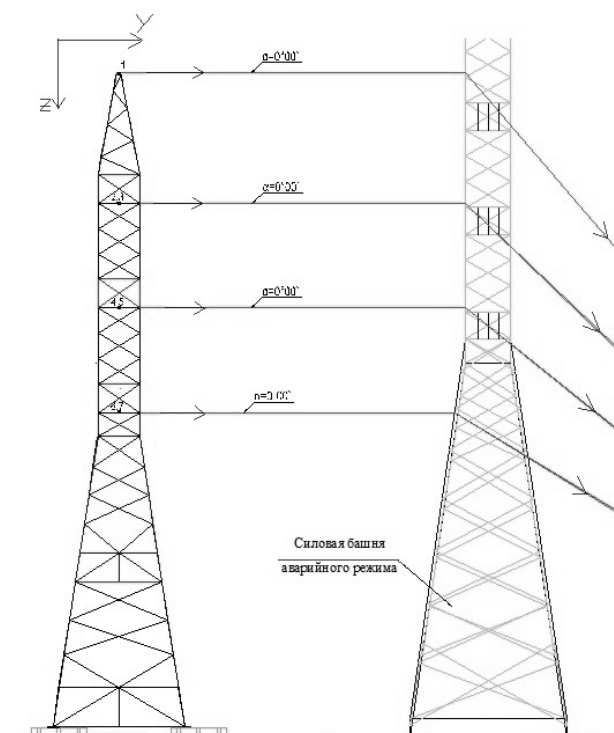


Рисунок 8 - Расположение тяговых тросов и точек приложения нагрузок. Вид на силовую башню аварийного режима: 1-7 – номера точек приложения нагрузок



Рисунок 9 - Фиксирование выгиба решетки нижней части опоры

Для сравнения показателей НДС элементов опоры проводилось два нагрузочных испытания опоры по аналогичным схемам. В процессе первого испытания производились загрузки опоры без несовершенств, ее стабилизация и снятие нагрузки ступенями в обратном порядке от загрузки, осмотр на возможные отклонения от геометрических параметров и подготовка ко второму загрузению конструкции с несовершенствами решетки.

Искривления в элементах решетки создавались с помощью натяжного устройства. В процессе выгиба трос крепился в плоскости выгиба к стержню, при этом фиксировалась нагрузка, создаваемая натяжным устройством и стрелка выгиба стержня. Величина стрелки искривления контролировалась с помощью теодолита 2Т30 по металлической линейке, прикрепленной в узле пересечения раскосов. Нагрузка, создаваемая натяжным устройством, прикладывалась ступенями, величина которых определяется появлением пластических деформаций в изгибаемом стержне.

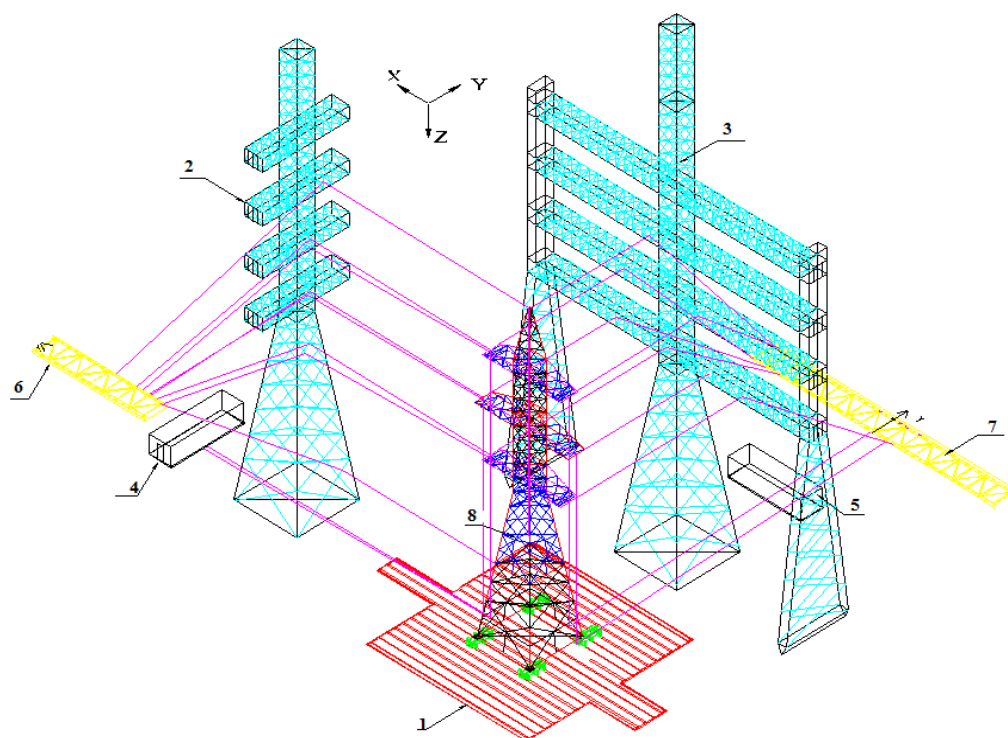


Рисунок 10 - Полигон испытаний башенных конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры: 1-универсальный силовой пол – 24x24м; 2-силовая башня нормального режима – Н=55м; 3-силовая башня аварийного режима – Н=62м; 4-площадка с лебедками башни нормального режима; 5- площадка с лебедками башни аварийного режима; 6-силовая площадка для полиспастов нормального режима; 7-силовая площадка для полиспастов аварийного режима; 8-испытываемая опора.

Испытания проводились для режима работы Шк. Загрузки опоры производятся пятью ступенями: 25%, 50%, 75%, 100% и 102,5% от предельных нагрузок.

Продолжительность выдержки опоры на каждой ступени загрузки ограничивалось временем, необходимым для измерения отклонений, нагрузок, визуального осмотра опоры и фиксации параметров НДС, причем, снятие показаний осуществляется после выхода на режим стабилизации деформации в опоре

Статические нагрузки прикладывались так, чтобы не возникало никаких динамических воздействий.

В качестве регистрирующей аппаратуры использовалась тензометрическая система «СИИТ-3» на сто каналов измерения, объединенных через групповой коммутатор (рисунок 11). Тензорезисторы применялись на бумажной основе с базой 20мм и ценой деления 0,37МПа, которая определялась по контрольной тарировке. Тензорезисторы наклеивались на подготовленную поверхность элементов при помощи клея «цианопан» (рисунок 12).



Рисунок 11 - Регистрирующая аппаратура тензометрическая система «СИИТ-3»

При анализе поведения опоры с несовершенствами решетки в нижней секции была выявлена специфика ее действительной работы под нагрузкой. Выполнения сопряжения элементов решетки непосредственно на поясах, повышение деформативности дефектных стержней и малая жесткость пояса приводит к его повороту. В случае выгиба элементов решетки на сжатый

раскос, поворот пояса в узле вдоль продольной оси способствует повышению момента в расчетном сечении сжатых раскосов соседних панелей. Данный вывод сделан на основании напряженно-деформированного состояния в момент потери устойчивости сжатого раскоса при стрелке выгиба элементов решетки на сжатый раскос  $1/70$ . Потеря устойчивости произошла при 100% загрузки от предельной нагрузки (рис. 11). Следовательно данная конструкция стержневой системы чувствительна к конструктивным несовершенствам

При изгибе элементов на растянутый раскос напряженно-деформированное состояние имеет иной характер, чем при изгибе на сжатый раскос. Прогиб узла пересечения изогнутых раскосов из плоскости грани опоры, находящейся под нагрузкой, практически отсутствует, и за счет малой деформативности изогнутых раскосов из плоскости отсутствует догружающий момент в сжатых раскосах соседних панелей.

Общая же картина изменения продольной силы в элементах опоры практически не зависит от направления выгиба. При этом интенсивность изменения продольной силы в случае выгиба на сжатый раскос зависит от первоначальной стрелы искривления и практически не изменяется при выгибе на растянутый раскос. Это можно объяснить тем, что при выгибе на сжатый раскос величина продольной силы в нем увеличивается, а в растянутом уменьшается, т.е. поддерживающие свойства в нем снижаются и получается более деформированная система. В случае выгиба на растянутый раскос его поддерживающие свойства увеличиваются за счет более рациональной деформированной схемы панели опоры, при которой продольная сила увеличивается в обоих стержнях панели. Однако перераспределение усилий в стержнях с деформированными элементами не отразилось на общей деформативности системы и после снятия нагрузки вернулись в прежнее состояние.



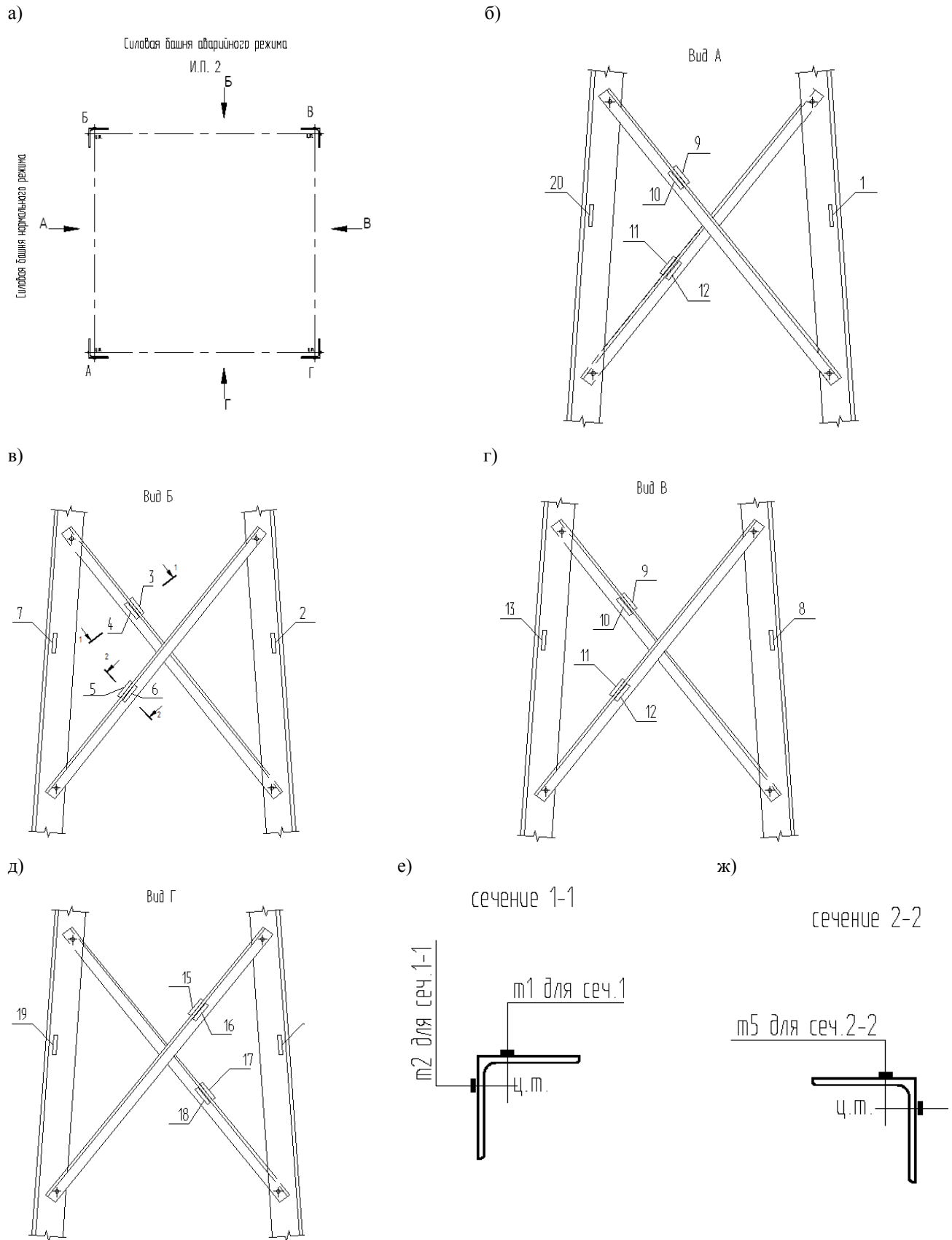


Рисунок 12 - Расположение сечений с тензодатчиками по стержням опоры и их нумерация: а) схема расположения элементов относительно силовых башен; б-д) виды опоры; е) сечение 1-1; ж) сечение 2-2

а)



б)

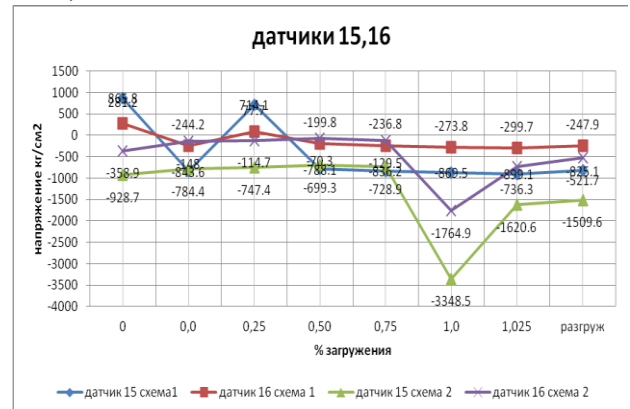


Рисунок 13 - Диаграммы напряжений в элементах опоры: а – пояс опоры; б – решетки опоры.

Для уточнения лобового давления ( $C_x$ ) от ветрового воздействия с учетом угла атаки ветра относительно профиля трассы линии электропередач выполнено экспериментальное исследование в аэродинамической трубе МАТ-1, разработанной в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (ДОННАСА) [53,118]. Характеристики МАТ-1 приведены на рисунке 3.12: рабочая часть закрытого типа - длина 4,8 м; ширина 1,0 м; высота 0,7 м; диаметр поворотного круга 0,9 м; максимальная скорость потока 20 м/с; 1 вентилятор мощностью 8 кВт, 220 В

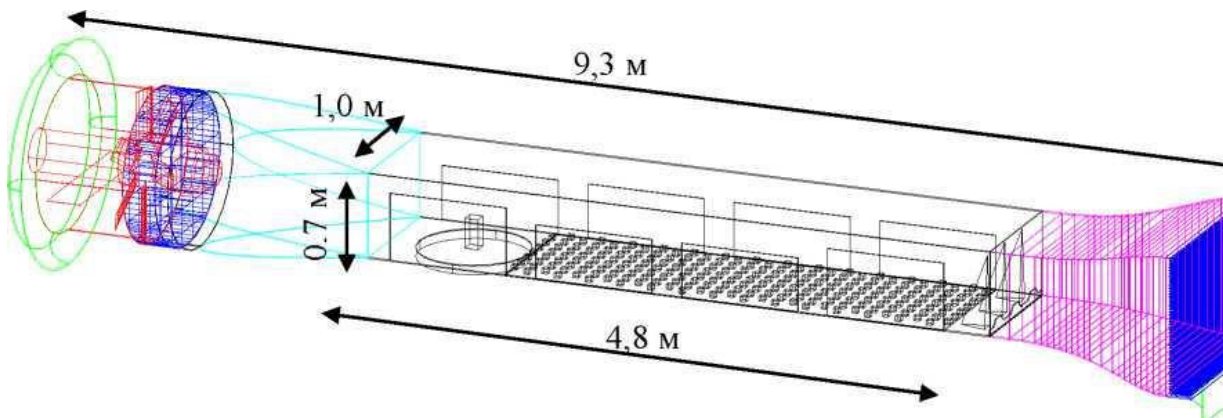


Рисунок 14 - Схема метеорологической аэродинамической трубы МАТ-1, ДонНАСА.

В ходе эксперимента испытываемая модель обдувалась на различных скоростях от 3 м/с до 25 м/с для выявления критического числа Рейнольдса и поиска оптимальной скорости набегающего ветрового потока. Данная операция проводится для моделей с углами атаки ветрового потока на испытываемую модель от  $0^{\circ}$  до  $90^{\circ}$  с шагом  $10^{\circ}$ .

С использованием тензометрических трехкомпонентных весов был проведен эксперимент, в результате которого был определен коэффициент полного давления ( $C_x$ ).

а)



б)



Рисунок 15 - Модель опоры У 220-2+9 в рабочей части аэродинамической трубы МАТ-1: а) без имитации проводов и троса; б) с имитацией проводов и троса.

На основании проведенных экспериментальных исследований было установлено, что выявленный коэффициент  $C_x = 1,31$  (коэффициент сопротивления) не превышает нормативное значение, установленное на уровне 1,4

В разделе 4 «**Определение остаточного ресурса металлических опор ВЛ с учетом повторяемости климатических нагрузок**» было определено, что для принятия решений по восстановлению нормальной эксплуатации линии с гарантированным сроком эксплуатации необходимо установить остаточный ресурс. Под остаточным ресурсом подразумевается срок безаварийной работы с учетом имеющихся конструктивных несовершенств и повторяемости гололедно-ветровых нагрузок и их сочетаний.

Т.к. существуют несколько расчетных режимов для опор воздушных линий электропередачи, которые нормируются требованиями ПУЭ. При проведении реконструкции число расчетных режимов может быть существенно увеличено.

Рассмотрим расчетный режим совместного действия ветра с гололедом. В данном случае норматив ИЕС 60826 рекомендует учитывать три расчетных подрежима:

- режим максимального скоростного напора ветра и сопутствующий вес гололедных отложений;
- режим максимального веса гололедных отложений при сопутствующем ветре;
- режим максимальных размеров гололеда при сопутствующем ветре.

В данном случае для визуализации методики используем один расчетный режим, который в данном случае максимальный по какому либо параметру, имея ввиду что для получения количественных результатов необходим совместный учет трех расчетных режимов.

Все указанные нагрузки имеют собственные коэффициенты надежности по нагрузке, и с учетом возможных сочетаний, определяемых долей составляющих от гололеда и ветра в суммарной нагрузке могут существенно отличаться и вносить различный «вклад» в результирующее напряженно-деформируемое состояние указанного расчетного режима.

В общем случае при расчетах металлических опор создается расчетная схема, после определения усилий в которой, выполняется подбор отдельных элементов. При проектировании реконструкции задача несколько видоизменяется, т.е. согласно существующей конструкции создается расчетная схема, которая проверяется на соответствие расчетным нагрузкам.

Учитывая все вышесказанное, результирующее усилие в элементе опоры ВЛ можно записать следующим образом:

$$\sigma_{рез} = \sigma_{св}^{np} + \sigma_{св}^{on} + \sigma_{\epsilon}^{np} + \sigma_{\epsilon}^{on} + \sigma_{z}^{np} \leq R_y \gamma_c, \quad (1)$$

где  $\sigma_{npсв}$   $\sigma_{онсв}$  – напряжения в элементе от собственного веса проводов, тросов и опоры;

$\sigma_{np\epsilon}$   $\sigma_{npz}$   $\sigma_{он\epsilon}$  – соответственно напряжения в элементе от ветрового давления на провода и трос покрытые гололедом, от веса гололеда на проводах и тросах, ветрового давления на конструкцию опоры.

Отделив варьируемые параметры в левой части от определенных параметров получим:

$$\sigma_{\epsilon}^{np} + \sigma_{\epsilon}^{on} + \sigma_{z}^{np} \leq R_y \gamma_c - \sigma_{св}^{np} + \sigma_{св}^{on}. \quad (2)$$

Таким образом, на основании выражения (2) можно достоверно определить напряжения в элементе, которые обусловлены действием климатических, т.е. варьируемых во времени нагрузок. С учетом требований СП «Стальные конструкции» и принципа суперпозиции сил предыдущее выражение записывается следующим образом:

$$\frac{(N_z^{ед} \cdot g_z^{np}) + (N_{\epsilon}^{ед} \cdot W_{\epsilon}^{он}) + (N_{\epsilon}^{ед} \cdot W_{\epsilon}^{np})}{\varphi \cdot A \cdot c_d} \leq R_y \gamma_c - \sigma_{св}^{np} + \sigma_{св}^{он}, \quad (3)$$

где  $N_{едz}$ ,  $N_{ед\epsilon}$ ,  $N_{ед\epsilon}$  – усилия в элементе металлической конструкции от единичных нагрузок от веса гололеда, ветрового давления на конструкцию опоры и ветрового давления на провода покрытые гололедом;

$g_{npz}$   $W_{он\epsilon}$   $W_{np\epsilon}$  – искомые предельные усилия от веса гололеда, ветрового давления на конструкцию опоры и ветрового давления на провода покрытые гололедом;

$\varphi$ ,  $A$ ,  $c_d$  – характеристики элемента.

Для каждой метеостанции и для каждого исследуемого параметра климатической нагрузки (в данном случае для расчетных значений  $N$ ) справедливо следующее выражение:

$$N = a' \cdot \ln(T) + \epsilon' , \quad (4)$$

где  $T$  – средний период повторяемости климатической нагрузки, лет;

$a', \epsilon'$  – параметры климатической нагрузки по данной метеостанции.

Выразив из (4) период повторяемости получим выражение:

$$T = a \cdot e^{\epsilon \cdot x} , \quad (5)$$

где  $a, \epsilon$  – параметры климатической нагрузки по данной метеостанции, которые являются функциями  $a', \epsilon'$ ;

$x$  – расчетное значение нагрузочного параметра.

Выражение (5) для каждого нагрузочного параметра содержит два неизвестных:  $x$  и  $T$ . Таким образом, с учетом (3) получаем систему четырех уравнений с четырьмя неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} \frac{(N_g^{ed} \cdot g_z^{np}) + (N_g^{ed} \cdot W_g^{on}) + (N_g^{ed} \cdot W_g^{np})}{\varphi \cdot A \cdot c_d} &= R_y \gamma_c - \sigma_{cb}^{np} + \sigma_{cb}^{on} \\ a_z^{np} \cdot e^{\epsilon_z^{np} \cdot g_z^{np}} &= T_x \\ a_g^{on} \cdot e^{\epsilon_g^{on} \cdot W_g^{on}} &= T_x \\ a_g^{np} \cdot e^{\epsilon_g^{np} \cdot W_g^{np}} &= T_x \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

*Решение системы позволит определить остаточный ресурс, а также предельные нагрузки на исследуемую конструкцию, и период повторяемости указанных нагрузок.*

Приведенная методика также позволяет оценить степень влияния каждого из климатических параметров на результирующее напряженно-деформируемое состояние элементов металлической опоры ВЛ с учетом одинаковой вероятности их проявления. Одним из основных результатов использования данной методики является определение предельных нагрузок, которые может выдержать существующая конструкция опоры ВЛ, запроектированная по ранее действовавшим нормативам, и безопасный ресурс.

**В разделе 5 «Реконструкция опор ВЛ с учетом требований эксплуатации и надежности»** предложен механизм управления безопасностью эксплуатируемых электросетевых объектов по результатам оценки конструктивных рисков, основанный на принципах экономической ответственности по результатам технического освидетельствования линии.

Разработанный в разделе 4 метод расчетной оценки остаточного ресурса позволяет обозначить оптимальную схему управления качеством эксплуатируемых несущих конструкций с целью обеспечения заданного

уровня конструктивной безопасности. Управление осуществляется через механизм страхования и основывается на информации о текущих значениях конструктивных рисков, формируемой в процессе экспертной оценки технического состояния объекта рисунок 16.

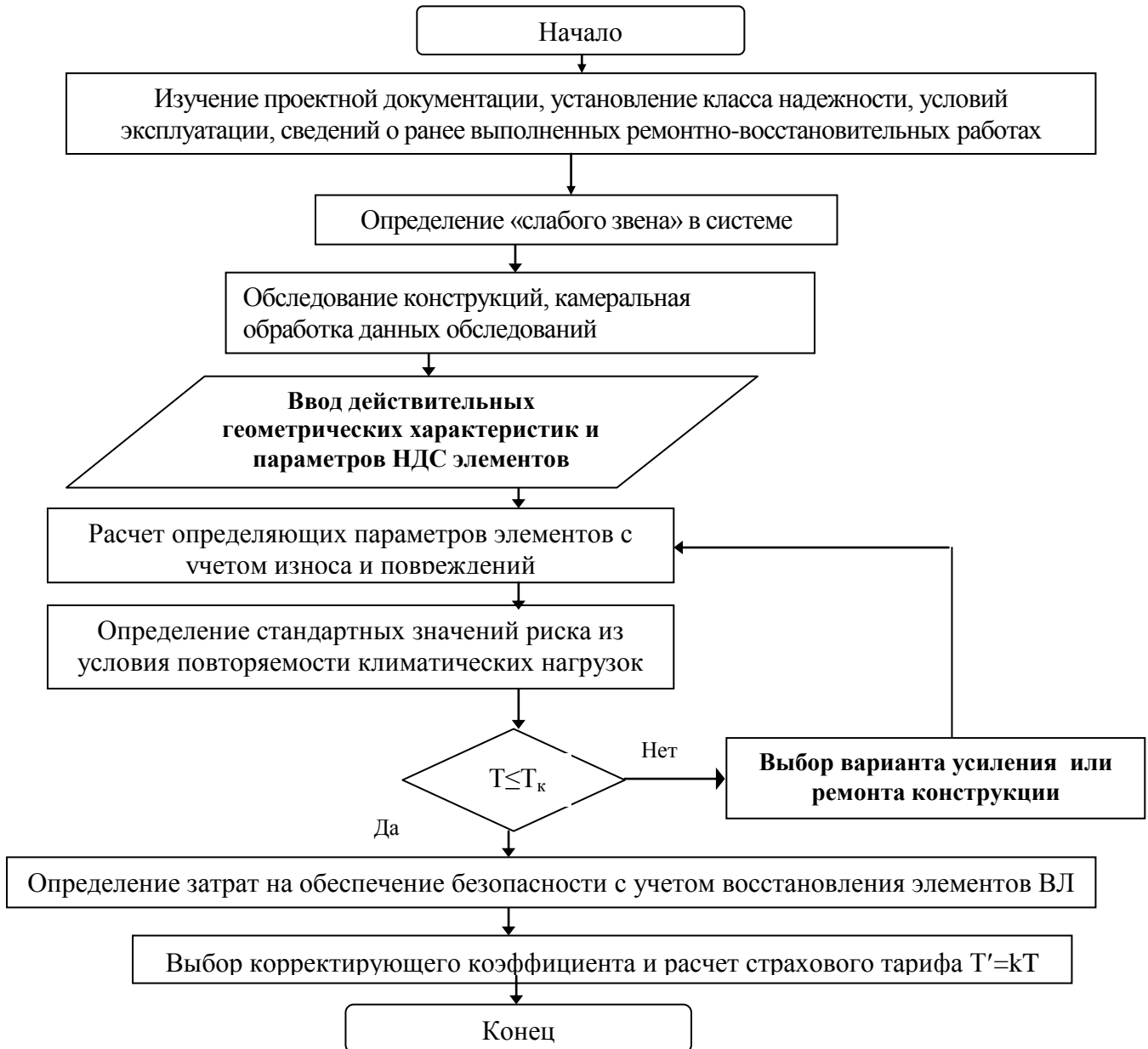


Рисунок 16. Блок-схема вычисления удельных затрат на обеспечение конструктивной безопасности и страховых тарифов.

В предложенной схеме управления конструктивной безопасностью способы ее регулирования определяются регламентом и правилами страхования.

Правила страхования предусматривают непрерывную количественную оценку конструктивных рисков и осуществляемую на ее основе корректировку (увеличение или снижение) страхового платежа с целью достижения максимально точного соответствия между реальной

подверженностью строительных конструкций риску аварии и вероятностью возникновения финансовой ответственности страховщика.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.**

1. В результате анализа обследований более 1500км трасс прохождения электросетей выявлены дефекты и повреждения опор ВЛ вносящие наибольший вклад в НДС конструкции: коррозионный износ в процентном соотношении до 90% всех неоцинкованных опор, общие погнутости до 1/125 длины элемента, щелевая коррозия от 0,5 до 18мм на 50% опор, отрыв и отсутствие элементов на 15% опор.

2. Разработана методика определения остаточного ресурса объекта из условий повторяемости климатических нагрузок, которая позволяет определить вероятность непревышения нагрузок в заданный период эксплуатации, причем данная величина характеризует также величину безотказности опоры в целом. Так для для пояса верхней секции опоры У220 она составляет 0,1674 , а для второго расчетного (менее «слабого») элемента пояса траверсы вероятность не превышения нагрузок за тот же срок службы составляет 0,999974. Таким образом, величину вероятности непревышения расчетных значений нагрузок можно увеличить с 0,1674 до 0,844699 при увеличении сечения одного элемента всего на 4 см<sup>2</sup>. Увеличение сечения элемента U3 в два раза приводит к увеличению надежности до 0,9927.

3. Анализ экспериментальных исследований поведения решетки выявил специфику действительной ее работы под нагрузкой при возникновении общих искривлений решетки в пределах одной панели на сжатые и растянутые элементы. Было определено, что в случае выгиба элементов решетки на сжатый раскос поворот пояса в узле вдоль продольной оси способствует повышению момента в расчетном сечении сжатых раскосов соседних панелей. Данный вывод сделан на основании напряженно-деформированного состояния в момент потери устойчивости сжатого раскоса при стрелке выгиба элементов решетки на сжатый раскос 1/70 *l*. (Потеря устойчивости произошла при 100% загрузки от предельной нагрузки)

4. На основании экспериментальных исследований определено, что аэродинамический коэффициент  $C_x$  равный 1,31, не превышает нормативного значения (1,4). При этом подтверждены наиболее нагруженные углы атаки ветрового потока в 45° и 90°.

5. Созданы теоретические основы по предоставлению экспертной информации для дальнейшего создания денежного фонда целевого назначения (страхования объекта).

6. Разработаны и внедрены технические решения по реконструкции, усилению и ремонту опор ВЛ, в частности запатентованы варианты усиления баз и фундаментов металлических решетчатых опор

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

1. СОУ-Н ЕЕ 20.571:2007 Методические указания по оценке технического состояния воздушных линий электропередач напряжением 35-750кВ [Текст]. Часть 2 Конструктивные элементы линий. – К. : НТСЕУ, ОЕП «ГРИФРЕ», 2007 – 92 с. *(Даны рекомендации по проведению технической оценки ВЛ)*
2. Турбин С. В. Методика определения предельных нагрузок на металлические опоры ВЛ / С. В. Турбин, Н. С. Смирнова. — Текст : непосредственный // Сборник докладов второй международной конференции «Многогранные гнутые стойки (МГС)». — 2007. — № . — С. 218-308. *(Разработана методика определения предельных нагрузок на металлические опоры ВЛ)*
3. Определение остаточного ресурса металлических опор ВЛ / под. ред. Горохов Е.В., Гримуд Г.И. // Эффективность энергетического строительства и эксплуатации в Украине. – Макеевка.: РИО ДонНАСА, 2008. – С. 66-80. *(Предложен метод определение остаточного ресурса металлических опор ВЛ)*
4. Восстановление работоспособности приопорной зоны башенных конструкций / Е.В. Горохов, Н.С. Я.В. Назим, Н.С. Смирнова, М.В. Бусько — Текст : непосредственный // Металлические конструкции — Макеевка, 2009 - - Т.15, №2 – С. 105-114. *(Проведен анализ разрушений и предложены варианты восстановления работоспособности приопорной зоны башенных конструкций)*
5. Смирнова Н.С., Влияние повреждаемости элементов воздушных линий электропередач на общую надежность конструкции. / IX Всероссийская выставка Научно-технического творчества молодежи. I Международная научно-практическая конференция « Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях». Сборник научных докладов/ Мос.гос. строит. ун-т – М : МГСУ , 2009. – С.54-56 *(приведен анализ влияния повреждаемости элементов воздушных линий электропередач на общую надежность конструкции)*
6. Экспериментальные исследования узлов крепления типа КГП для обеспечения надежности ВЛ. / Я. В. Назим, В. Н. Василев, С. М. Бакаев [и др.]. — Текст : непосредственный // Металлические конструкции — Макеевка, 2010 - Т.16, №3 – С. 199-208. *(Исследованы крепления КГП как следствие аварий на ВЛ «Каховская –Джанкой» и « Каховская – Островская», даны рекомендации по повышению надежности энергосистемы)*
7. Патент № 59075 Украина, МПК (2011.01), E02D 37/00, E04G 23/00. Способ усиления узла опирания стойки : опубл. 10.05.2011 / Горохов Е.В., Смирнова Н.С., Бусько М.В., Лещенко А.А. *(Запатентован вариант восстановления работоспособности приопорной зоны башенных конструкций)*



8. Патент № 62559 Украина, МПК (2011.01), E02D 37/00, E04G 23/00. Способ усиления узла опирания стойки : опубл. 12.09.2011 / Горохов Е.В., Смирнова Н.С., Бусько М.В. *(Запатентован вариант восстановления работоспособности приопорной зоны башенных конструкций)*.

9. Пути повышения надежности вл с учетом координации прочности элементов в районах с повышенными гололедно-ветровыми нагрузками \ Е. В. Горохов, В. Н. Васылев, Я. В. Назим [и др.]. — Текст : непосредственный // Современное промышленное и гражданское строительство . — Макеевка, 2010 — Т.6. № 2. — С. 113-130. *(Предложен ряд мер по обеспечению бесперебойной поставки элетроэнергии в Крым)*

10. Смирнова, Н. С. Анализ конструктивных и эксплуатационных особенностей при определении остаточного ресурса воздушных линий электропередачи / Н. С. Смирнова. — Текст : непосредственный // Современное промышленное и гражданское строительство — Макеевка, 2012 — Т.21. № 2. — С. 87-97. *(Выполнен анализ основных дефектов и повреждений опор ВЛ)*

11. Повышение надежности эксплуатации воздушных линий электропередач (комплекс работ и предложений по действующим ВЛ) \ С.Н. Бакаев, Н.С. Смирнова, В.В. Моргай. — Текст : непосредственный // Металлические конструкции – Макеевка, 2015 - Т.21, №3 – С. 147–165. *(Определена очередность проведения мероприятий по повышению надежности ВЛ)*

12. Методика экспериментальных исследований анкерной опоры У220+9 с несовершенствами при действии статических загрузок / Н.С. Смирнова, А.Н. Миронов. — Текст : непосредственный // Металлические конструкции – Макеевка, 2020 – Т.26, №4 – С. 165-176. *(Разработана методика проведения экспериментальных исследований по определению влияния несовершенств в виде выгиба решетки на конструкцию Опоры ВЛ У 220-2+9)*

13. Экспериментальные исследования анкерной опоры У220+9 с несовершенствами при действии статических нагрузок / Е.В. Горохов, Н.С. Смирнова, А.Н. Миронов. — Текст : непосредственный // Металлические конструкции – Макеевка, 2022 – Т.28, №2 – С. 95-106. *(Выполнен натурный эксперимент по определению несовершенств в виде выгиба решетки)*

14. Напряженно-деформированное состояние анкерно-угловой опоры 220кВ с несовершенствами при действии статических загрузок / Е.В. Горохов, Н.С. Смирнова, А.Н. Миронов, С.Н. Бакаев. — Текст : непосредственный // Металлические конструкции – Макеевка, 2022 – Т.28, №4 – С. 207-215. *Выполнен численный эксперимент по определению влияния несовершенств в виде выгиба решетки на НДС конструкции)*

## АННОТАЦИЯ

**Смирнова Наталья Сергеевна. Оптимизация реконструкции воздушных линий электропередач с учетом надежности энергоснабжения потребителей. - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2.1.1 - Строительные конструкции, зданий и сооружения. – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская государственная академия строительства и архитектуры». - г. Макеевка, 2023 г.

Диссертация посвящена теоретическому и экспериментальному обоснованию оптимизации реконструкции ВЛ с учетом надежности энергоснабжения потребителей исходя из возможности оценки показателей остаточного ресурса конструкций опор при их работе с дефектами и повреждениями.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные результаты, полученные автором, показаны их научная новизна, практическое значение и реализация.

В первом разделе произведен анализ состояния вопроса и научные достижения в области исследования остаточного ресурса конструкций опор ВЛ. Выполнен анализ обследований технического состояния трасс высоковольтных линий, определены наиболее распространенные дефекты и повреждения металлических конструкций.

Во втором разделе рассмотрены режимы работы металлической анкерно-угловой опоры, описана методика и приведены результаты численных исследований по влиянию выгиба решетки на напряженно-деформированное состояние конструкции.

В третьем разделе описана методика и проведен анализ натуральных экспериментальных исследований влияния выгиба решетки на сжатый и растянутый пояс с точки зрения влияния дефекта на НДС конструкции.

В четвертом разделе представлена методика определения остаточного ресурса металлических опор ВЛ с учетом повторяемости климатических нагрузок, уточнен аэродинамический коэффициент конструкции.

В пятом разделе предложен механизм управления надежностью бесперебойного энергоснабжения потребителей по результатам оценки технического состояния конструкций опор ВЛ с учетом влияния несовершенств и определения остаточного ресурса объекта с учетом повторяемости климатических нагрузок.

Ключевые слова: воздушные линии электропередач, дефекты и повреждения, выгибы решетки опор ВЛ, моделирование, остаточный ресурс, напряженно-деформированное состояние .

### **ABSTRACT**

Smirnova Natalia Sergeevna. Optimization of the reconstruction of overhead power lines, taking into account the reliability of energy supply to consumers. The manuscript. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. 2.1.1 - Building structures, buildings and structures. – State educational institution of higher professional education "Donbass State Academy of Construction and Architecture". Makeyevka, 2023 The dissertation is devoted to the theoretical and experimental substantiation of the optimization of the reconstruction of overhead lines, taking into account the reliability of power supply to consumers, based on the possibility of assessing the indicators of the residual life of support structures when they work with defects and damages. In the introduction, the relevance of the topic is substantiated, the purpose and objectives of the research are formulated, the main results obtained by the author are presented, their scientific novelty, practical significance and implementation are shown.

In the first section, an analysis of the state of the issue and scientific achievements in the field of research of the residual resource of overhead line support structures are made. The analysis of surveys of the technical condition of high-voltage lines was carried out, the most common defects and damages of metal structures were determined. In the second section, the operating modes of the metal anchor-angular support are considered, the methodology is described and the results of numerical studies on the effect of the bending of the lattice on the stress-strain state of the structure are presented.

In the third section, the methodology is described and the analysis of full-scale experimental studies of the effect of the bending of the lattice on the compressed and stretched belt from the point of view of the effect of the defect on the VAT of the structure is carried out. The fourth section presents a methodology for determining the residual life of metal overhead line supports, taking into account the repeatability of climatic loads, the aerodynamic coefficient of the structure is clarified.

In the fifth section, a mechanism for managing the reliability of uninterrupted power supply to consumers is proposed based on the results of assessing the technical condition of overhead line support structures, taking into account the

influence of imperfections and determining the residual resource of the object, taking into account the repeatability of climatic loads.

Keywords: overhead power lines, defects and damages, bends of the grid of overhead line supports, modeling, residual resource, stress-strain state.