

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ДЕМЕНТЬЕВ Сергей Сергеевич

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА
ГОЛОЛЁДООБРАЗОВАНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие системы
(в машиностроении)»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор
Шилин Александр Николаевич

Волгоград – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ	11
1.1 Методы, устройства и системы для контроля гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи	11
1.2 Методы и средства распознавания аварийных режимов при повреждениях воздушных линий электропередачи	21
Выводы по главе 1	29
2 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ: КОНТРОЛЬ ГОЛОЛЁДНО-ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА ЛИНИИ	31
2.1 Диагностика оледенения по провисанию провода	31
2.1.1 Моделирование напряжённо-деформированного состояния провода	35
2.1.2 Выбор компонентов видеоконтрольного устройства и оценка влияния метеоусловий на эффективность его функционирования	46
2.1.3 Диагностика оледенения по провисанию провода бесконтактным методом	56
2.2 Диагностика оледенения по прогибу опоры	67
Выводы по главе 2	79
3 АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПРОВОДАХ ЛИНИИ.....	81
3.1 Отклонение физико-механических характеристик провода	81
3.2 Прогиб стоек «гибких» опор.....	83
Выводы по главе 3	95
4 ДИАГНОСТИКА ГОЛОЛЁДНЫХ АВАРИЙ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	97
4.1 Нейрокомпьютерная система прогнозирования и диагностики коротких замыканий	97

4.2 Особенности применения гололёдных постов бесконтактного исполнения.....	111
4.3 Математическое моделирование воздушной линии электропередачи для диагностики коротких замыканий.....	114
4.4 Влияние рельефа местности и удлинения провода на точность нейролокации.....	124
Выводы по главе 4.....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	132

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время стратегическим направлением развития Единой энергетической системы России, как наиболее крупного централизованно управляемого энергообъединения в мире, является внедрение активно-адаптивных электрических сетей. Данная технология, получившая за рубежом наименование Smart Grid (дословно «интеллектуальная сеть»), подразумевает снижение физической уязвимости всех составляющих энергосистемы путём её оснащения средствами автоматической идентификации рисков аварийных возмущений и организации предупреждения неисправностей [24]. Тем не менее внедрение технологии Smart Grid в России требует учёта и всей специфики функционирования электрических сетей в наших условиях.

Так, к одной из отличительных особенностей Единой энергосистемы относятся значительные расстояния, покрываемые воздушными линиями электропередачи (ВЛЭП), общая протяжённость которых составляет более 500 тыс. км [45]. Большое удаление объектов генерации и потребления электроэнергии друг от друга послужило причиной того, что электрические сети, образуемые высоковольтными ВЛЭП, зачастую обладают магистральной топологией, что приводит к трудности их резервирования [50].

В силу этого низкая конструкционная надёжность воздушных линий, обусловленная непрерывным климатическим воздействием (гололёд, ветер, осадки, солнечная радиация), в совокупности с их высокой степенью износа (около 50 % от общего числа ВЛЭП изношены более чем на 90 % [19]) становятся причиной частой повреждаемости электрических сетей и недоотпуска электроэнергии.

Таким образом, обеспечение безаварийной эксплуатации воздушных линий является сложной задачей, решение которой тем не менее имеет важнейшее значение для нормального функционирования социальной и производственной инфраструктуры. В связи с этим возникающие на ВЛЭП

аварии требуют скорейшего устранения, однако в осенне-зимний период сложные метеоусловия и ухудшение состояния дорог практически полностью исключают быстрое завершение ремонтно-восстановительных работ.

По мере физического и морального устаревания всё большая доля неисправностей ВЛЭП приходится на неблагоприятные климатические условия, к числу которых следует в первую очередь отнести формирование гололёдно-изморозевых отложений на проводах и грозозащитных тросах. Так, согласно статистическим данным более 50 % от общего количества повреждений на линиях Единой энергосистемы приходится именно на гололёдные аварии, а продолжительность вызванных ими перебоев электроснабжения достигает 60 % от общей длительности всех аварийных отключений за год [3].

На сегодняшний день основным способом диагностики гололёдных отложений остаются визуальные осмотры ВЛЭП, выполняемые оперативным персоналом при объездах линии [30]. Очевидные недостатки данного метода фактически сводят на нет возможность прогнозирования аварий, вызванных оледенением проводов. Между тем, наряду с осуществлением мер по предотвращению дальнейшего роста отложений, при возникновении аварий мониторинг гололёдообразования на всём протяжении линии также позволяет увеличить точность определения мест повреждений (ОМП). Всё это требует внедрения единой информационно-измерительной системы (ИИС), в то время как на текущий момент для осуществления каждой из указанных задач – контроля отложений и ОМП – разрабатываются отдельные узкоспециализированные устройства и системы. При этом даже в условиях их объективной необходимости данные устройства не получили широкого распространения. В отдельных случаях (например, для систем тензометрии гололёдных нагрузок или иных ИИС контактного исполнения) это продиктовано необходимостью реконструкции линий и дороговизной монтажа [51], а в некоторых – в частности, для приборов импульсной рефлектометрии – ограниченной точностью [39, 56] или же сложностью

технической реализации, свойственной, к примеру, системам двустороннего дистанционного ОМП [48].

Таким образом, на современном этапе развития электроэнергетики особую актуальность тематика разработки информационно-измерительной системы для мониторинга гололёдных аварий на ВЛЭП приобретает именно в контексте развёртывания активно-адаптивных электрических сетей.

Степень разработанности темы исследования. Начиная с 30-х гг. XX века в нашей стране и за её пределами проблема диагностики высоковольтных воздушных линий была и остаётся предметом многочисленных исследований. Данной тематике посвящены работы многих поколений отечественных учёных, среди которых следует отметить В.В. Бургсдорфа, А.Ф. Дьякова, Г.Г. Угарова, И.И. Левченко, А.С. Засыпкина, Р.Г. Минуллину, Н.П. Хромова, Б.И. Механошина, В.А. Шкапцова, а также М.П. Розенкнопа, Г.М. Шалыта, А.И. Айзенфельда, Я.Л. Арцишевского, Е.А. Аржанникова, М.Ш. Мисриханова, А.Н. Шилина, А.П. Кузнецова и др. За рубежом весомый вклад в развитие данной отрасли науки и техники внесли James R. Wait, Robert G. Olsen, Tapani O. Seppa, Vincent T. Morgan, Viktor Lovrenčić и др.

Объект исследования. Воздушные линии переменного тока напряжением 35-500 кВ.

Предмет исследования. Методы и средства диагностики гололёдообразования и определения мест повреждений при оледенении на воздушных линиях электропередачи.

Цель работы. Разработка информационно-измерительной системы для бесконтактных измерений гололёдных нагрузок на ВЛЭП и определения вида и мест повреждений, вызванных этими нагрузками, с возможностью технической реализации измерений без изменения конструкции линии.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи исследования:**

1. Анализ существующих методов и средств диагностики оледенения ВЛЭП и аварий, вызванных оледенением, и на основании анализа предложить методы диагностики, не требующие изменения конструкции линии и работающие с нечеткой информацией.
2. Разработка измерительных преобразователей для косвенного контроля гололёдообразования ВЛЭП и их метрологический анализ, позволяющий обоснованно проектировать информационно-измерительную систему.
3. Создание интеллектуальной информационно-измерительной системы с расширенными функциональными возможностями, а именно позволяющей не только определять, но прогнозировать критические нагрузки при оледенении линии и определять координаты их возникновения.

Основные методы исследования. При выполнении исследования использовались методы теории вероятности, метрологии, теоретической электротехники, численные методы решения вычислительных задач, а также методы математического моделирования с проведением компьютерных экспериментов.

Научная новизна работы.

1. Доказана возможность определения веса гололедных отложений путем оптического измерения величины провисания высоковольтного провода или деформации опоры ВЛЭП и вычисления веса по математической модели.
2. Обоснована необходимость коррекции методической погрешности, возникающей при измерении веса отложений по провисанию провода, закреплённого на гибких опорах, и разработана методика коррекции погрешности.
3. Разработана интеллектуальная информационно-измерительная система, содержащая нейроклассификатор и нейролокатор аварий, а также распределённые по линии посты измерений климатических факторов.
4. Выявлено влияние формы рельефа местности на изменение ёмкостной проводимости ВЛЭП по её длине и разработана математическая модель линии, что позволяет повысить достоверность обучающих выборок для нейросети, а,

следовательно, и увеличить точность принятия решений нейросетью при определении места повреждения.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Доказанные функциональные связи веса гололедных отложений с величинами провисания высоковольтного провода или деформации опоры ВЛЭП, подтверждающие возможность технической реализации с помощью ИИС.
2. Методика коррекции методической погрешности, возникающей при измерении веса отложений по провисанию провода, закреплённого на гибких опорах, повышающая измерения.
3. Алгоритм функционирования интеллектуальной системы прогнозирования и диагностики аварий на ВЛЭП при оледенении, включающий применение аппарата искусственных нейронных сетей для обработки информации системы и её «адаптации» к изменению условий внешней среды.
4. Геоинформационный подход к моделированию воздушных линий электропередачи, учитывающий форму рельефа местности при построении модели ВЛЭП для дистанционного определения мест повреждений.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Для различных климатических условий разработано два варианта технической реализации диагностики оледенения по видеофиксации провисания провода: с применением оптической метки и без нее. Разработано устройство измерения прогибов гибкой опоры для контроля гололёдообразования или вертикального смещения точки подвеса высоковольтного провода.
2. Разработан алгоритм функционирования адаптивной информационно-измерительной системы, позволяющий осуществлять диагностирование аварий с более высокой точностью за счёт непрерывного анализа информации о состоянии линии и окружающей среды на различных участках трассы ВЛЭП.
3. Получена математическая модель изменения ёмкостной проводимости воздушной линии вдоль трассы её прохождения с учётом рельефа земной поверхности.

Соответствие паспорту специальности. Указанная область исследования соответствует паспорту специальности 05.11.16 «Информационно-измерительные и управляющие системы» по п. 1 «Научное обоснование перспективных информационно-измерительных и управляющих систем, систем их контроля, испытаний и метрологического обеспечения, повышение эффективности существующих систем» и п. 6 «Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений».

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научных конференциях, проводившихся в Волгоградском государственном техническом университете (Внутривузовские научные конференции 2016-2019 гг., XIX-XXI Региональные конференции молодых исследователей Волгоградской области 2015-2017 гг.), на площадках V и VI Межрегиональных форумов «Энергосбережение и энергоэффективность» (г. Волгоград, 2016-2017 гг.), Международной научно-технической конференции «ПРОМ-ИНЖИНИРИНГ – 2019» (Сочи-Москва-Волгоград-Челябинск, 2019 г.), а также в рамках Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения – 2016» (г. Саратов, СГТУ им. Ю.А. Гагарина, 2016 г.), XII Международной конференции «Прикладная оптика – 2016» (г. Санкт-Петербург, ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», ИТМО, 2016 г.), Международной научно-практической конференции «Вопросы надёжности работы систем электроснабжения в условиях гололёдно-ветровых нагрузок» (г. Уфа, УГАТУ, 2016 г.), V Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии – 2017» (г. Тольятти, ТГУ, 2017 г.).

Проводимое исследование получило поддержку в рамках НИОКР по программам «У.М.Н.И.К.-2016» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, а также фундаментальных научных исследований 2018 года под эгидой РФФИ и Администрации Волгоградской области.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное и основное участие в разработке:

- оптических методов диагностики гололёдообразования по провисанию провода [15, 49, 66, 67] и прогибу гибкой опоры [54];
- способов коррекции погрешности при измерениях провисания провода, закреплённого на гибкой опоре [14];
- метода бесконтактной диагностики гололёдообразования с реализацией косвенного измерения температуры провода [17];
- адаптивной информационно-измерительной системы прогнозирования, распознавания и определения мест неисправностей на ВЛЭП [13, 52];
- геоинформационного подхода к моделированию высоковольтных воздушных линий электропередачи [53];
- экспериментальной установки для исследования деформации ВЛЭП при гололёдообразовании методом видеоизмерений [16].

Публикации. По материалам выполненных исследований опубликовано 19 работ, в том числе 3 статьи в журналах из утверждённого ВАК РФ Перечня рецензируемых научных изданий, 4 статьи, индексируемых наукометрическими базами данных Scopus и Web of Science, а также получено 2 патента на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 142 страницах основного текста, содержит 73 рисунка, 6 таблиц, 91 библиографических наименования.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

1.1 Методы, устройства и системы для контроля гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи

Традиционно при выявлении угрозы оледенения проводов на участках линии, наиболее подверженных метеорологическим воздействиям, выездные бригады оперативно-диспетчерской службы проводят визуальную оценку вида отложений, толщины гололёдных муфт и, в конечном счёте, приблизительно определяют объём намерзаний на проводах. Тем не менее ввиду очевидных недостатков визуальной диагностики ВЛЭП в гололёдоопасный период (низкая точность, труднодоступность большинства участков линий в условиях зимнего бездорожья, небольшая продолжительность светового дня и т.д.), на практике всё чаще прибегают к оснащению воздушных линий *устройствами телеметрии гололёдных нагрузок*, позволяющими в режиме реального времени контролировать формирование гололёдно-изморозевых отложений на проводах [3, 88, 89].

В современных устройствах для мониторинга гололёдообразования используются *гравитационный (тензометрический), локационный и инструментально-параметрический* методы диагностики.

Гравитационный метод диагностики. Гравитационный метод реализуется посредством прямого измерения гололёдной и гололёдно-ветровой нагрузок на провод с последующим сравнением измеренных величин с наперёд заданными значениями пороговых нагрузок.

Известно устройство для измерения отдельно гололёдной, ветровой и гололёдно-ветровой нагрузок с контролем направления ветра на ВЛЭП [58]. Схема устройства изображается на рисунке 1.1, и, как видно, оно содержит три магнитоупругих силоизмерительных датчика 1, 3, 6, каждый из которых подвешен между траверсой П-образной опоры и верхним концом соответствующей гирлянды изоляторов с фазным проводом.

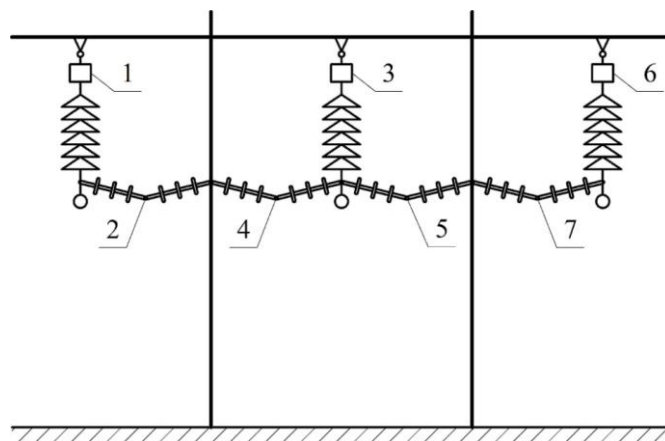


Рисунок 1.1 – Устройство для измерения гололёдной и ветровой нагрузок с контролем направления ветра на воздушных ЛЭП

Нижний конец средней гирлянды изоляторов закреплён с двух сторон горизонтальными шарнирными изоляционными распорками 4, 5 вставляя к обеим стойкам опоры, а концы левой и правой гирлянд изоляторов прикреплены соответственно слева и справа к стойкам опоры такими же изоляционными распорками 2, 7. При ветре слева или справа отклоняется соответственно по ветру левая или правая гирлянда изоляторов с фазным проводом (при этом положение других гирлянд изоляторов практически не изменяется, т.к. ветровая нагрузка уравнивается тяжением соответствующих шарнирно соединённых распорок) и её силоизмерительный датчик измеряет гололёдно-ветровую нагрузку, в то время как средняя гирлянда при любом направлении ветра не отклоняется и её датчик всегда измеряет только гололёдную нагрузку.

По величинам гололёдно-ветровой и гололёдной нагрузок нелинейные преобразователи вычисляют фактическую ветровую нагрузку, которая вместе с фактической гололёдной нагрузкой отображается измерительными приборами.

Недостатком данного устройства является то, что в нём, несмотря на реализованное измерение отдельно фактических гололёдной, ветровой и гололёдно-ветровой нагрузок, автоматическая индикация отложений на проводе промежуточного пролёта по величинам этих нагрузок не

производится из-за отсутствия порогового устройства и формирователя порогов. К иным недостаткам следует отнести и принципиальную невозможность его применения для измерения гололёдной, ветровой и гололёдно-ветровой нагрузок на грозозащитный трос, т.к. в реальных линиях тросов не более двух и их нельзя включить в измерительную схему, требуемую согласно описанию устройства. Кроме того, подобное устройство имеет ограниченную область применения, а именно для диагностики гололёдообразования на фазных проводах промежуточных пролётов одноцепных линий с двухстоечными П-образными опорами.

Разновидностью гравитационного метода диагностики является *аэродинамический способ* обнаружения отложений [61].

Способ заключается в том, что на промежуточном пролёте линии одновременно измеряются относительное направление ветра, скорость ветра и величина фактической ветровой нагрузки на провод с отложениями или без них, после чего по измеренным скорости и относительному направлению ветра рассчитывается величина ожидаемой ветровой нагрузки на провод без отложений и выполняется её сравнение с величиной фактической ветровой нагрузкой. Если фактическая ветровая нагрузка больше ожидаемой, то фиксируется наличие на проводе отложений, если же фактическая и ожидаемая ветровые нагрузки равны, то делается вывод об отсутствии гололёдных отложений.

Устройство, реализующее аэродинамический способ, изображено на рисунке 1.2 и включает в себя измерители направления 1 и скорости ветра 2, а также тензометрические датчики 3, 4, каждый из которых подвешен подвижно между траверсой опоры и верхним концом соответствующей гирлянды изоляторов, при этом нижние концы обеих гирлянд изоляторов соединены между собой шарнирно, образуя V-образную подвеску провода. Помимо этого, устройство содержит четыре канала телепередачи 5, 6, 7 и 8, четыре функциональных преобразователя 9, 10, 12, 13, двухвходовый компаратор 11 и управляемый трёхвходовый компаратор 14.

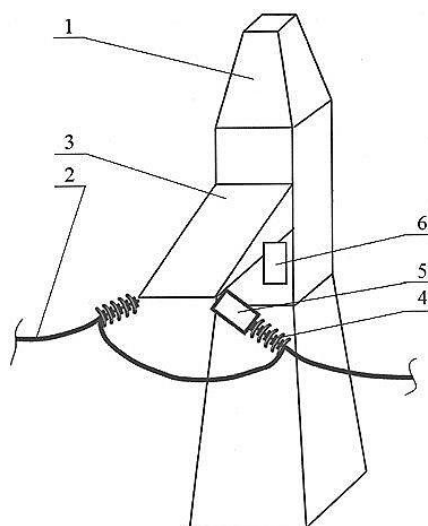


Рисунок 1.3 – Устройство контроля механических нагрузок на протяжённые элементы ВЛЭП

Совместный анализ силовых воздействий, воспринимаемых датчиками 5 и 6, позволяет отдельно вычислить гололёдную и ветровую составляющую нагрузки на провод, используя известные соотношения из теории расчёта механической части ВЛЭП (приведённые, например, в [5]).

Особенностью устройства является то, что датчик механического усилия 5 реализует волоконно-оптический метод тензометрических измерений и представляется собой отрезок оптоволокну с нанесёнными брэгговскими решётками [64]. Подобные датчики находят широкое распространение в системах контроля объектов в тяжёлых условиях эксплуатации (например, на атомных электростанциях) благодаря своей высокой стойкости к агрессивным факторам внешнего воздействия [6]. Следует отметить, что волоконно-оптические датчики деформации (ВОДД) отличаются не только высокой точностью (ввиду помехоустойчивости), но вместе с тем и сложностью исполнения.

Локационный метод диагностики. Локационный метод диагностики заключается в подаче импульсного сигнала в контролируемую линию и определении суммарного времени, затраченного на его распространение вдоль провода в прямом и обратном направлении после отражения от конца линии либо ВЧ-заградителя. Метод позволяет определить наличие

гололёдных образований на проводах ВЛ и их величину путём сравнения времени распространения сигналов (или амплитуд отражённых сигналов) при наличии и при отсутствии гололёдных образований [47].

Гололёдные отложения представляют собой неоднородный диэлектрик, который уменьшает скорость распространения сигнала вдоль линии и вызывает его дополнительное затухание. Затухания обусловлены диэлектрическими потерями энергии электромагнитной волны, которая расходуется на нагрев слоя гололёдного покрытия [37].

Важнейшим преимуществом локационных способов обнаружения гололёда является то, что вся аппаратура может быть расположена на подстанции и отсутствует необходимость в установке на воздушных линиях каких-либо устройств. Кроме того, в настоящее время приборы для локационного зондирования ВЛЭП – *рефлектометры* – всё чаще выпускаются в переносном исполнении (рисунок 1.4), вследствие чего имеют небольшие габариты и массу, а также обладают низкой стоимостью.



Рисунок 1.4 – Современные приборы импульсной рефлектометрии (слева направо): ETDR 10, «Рейс-105М», RIF-9

Недостатком локационного метода является невозможность отличить наличие небольшого по толщине гололёдного образования на большой длине воздушной линии от опасной концентрации льда в её отдельных пролётах. Кроме того, при реализации способа диагностики обледенения по приращению затухания ВЧ зондирующих сигналов, проходящих в проводе ВЛЭП, крайне сложно установить требуемую пороговую величину

приращения, т.к. на приращение затухания, кроме самих отложений на проводе, также влияют неоднородность параметров ВЛЭП и изменение метеоусловий, причём для разных видов отложений при прочих равных условиях затухание может отличаться в несколько раз.

Метод инструментально-параметрической диагностики.

Классическим примером реализации инструментально-параметрической диагностики является широкий класс устройств, представляющих собой закрепляемые на наклонных участках провода подвесные модули (рисунок 1.5), конструкция которых главным образом подразумевает наличие инклинометра (измерителя угла наклона к горизонтали), датчика температуры провода и источника автономного питания [81].

Как отмечается в патентном документе [59] к одному из подобных устройств, инклинометр позволяет контролировать изменение угла наклона корпуса устройства, а следовательно, и данного участка провода по отношению к горизонтали. Таким образом, используя показания инклинометра, можно вычислить фактическое удлинение провода под суммарным воздействием температуры и распределенной весовой нагрузки от гололедных отложений. Знание фактической длины провода в пролете ВЛЭП позволяет также рассчитать стрелу его провисания и, следовательно, габарит до земли или наземных объектов. Затем, используя известную зависимость провода от температуры, по показаниям инклинометра и термодатчика можно выделить вклад, внесенный в удлинение провода увеличением распределенной вертикальной нагрузки, и оценить интенсивность гололёдообразования.

В зависимости от веса обнаруженных гололедных отложений может быть принято решение по их удалению в режиме плавки или решение об увеличении токовой нагрузки для профилактического прогрева проводов.

Общим недостатком устройств данного типа является необходимость сложного монтажа и последующего технического обслуживания, неминуемо сопровождающихся отключением линии, применением подъёмно-

транспортной техники и задействованием высококвалифицированного персонала.

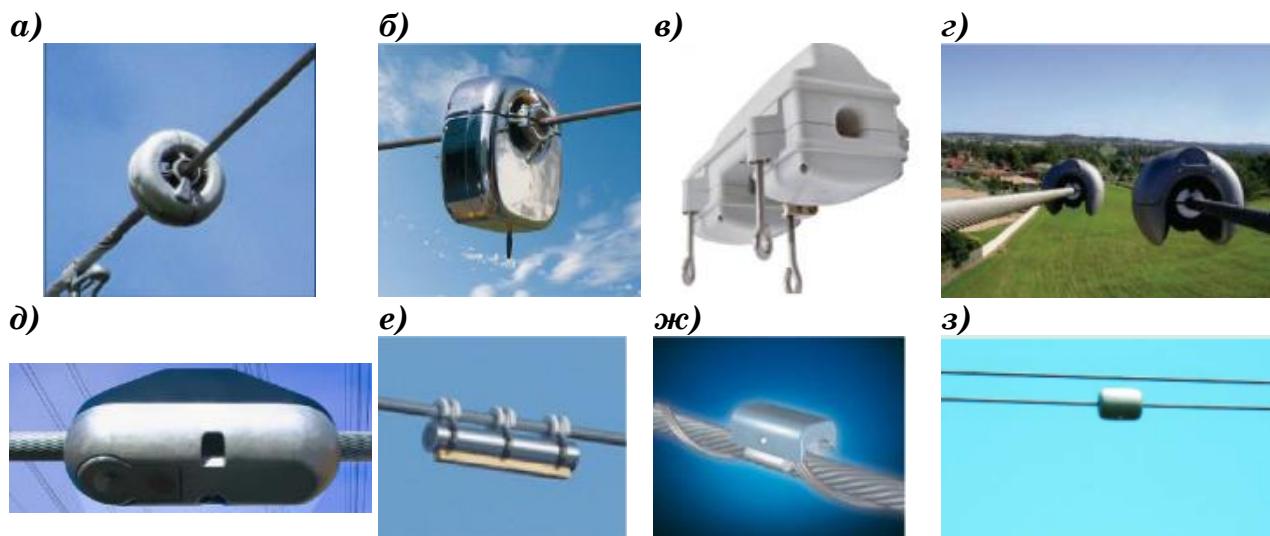


Рисунок 1.5 – Устройства дистанционного контроля состояния проводов ВЛЭП: а – PowerDonut (USi); б – SMT (Arteche); в – FMC-T6 (General Electric); г – OTLM-device (OTLM Company); д – TLM (Lindsey); е – Emo (Micca); ж – Ritherm (RIBE Group); з – TMT (ЗАО «ОПТЭН Лимитед»)

Из приведённой выше информации следует, что величина провисания провода является универсальным детектором состояния линии, т.к. наличие гололёдных отложений или нарушение температурного режима эксплуатации (перегрев) приводят к уменьшению клиренса между проводом и землёй. Таким образом, очевидна идея создания измерительных средств для непосредственного контроля провисания – на конструкции одного из подобных устройств остановимся подробнее, используя описание из соответствующего патентного документа [62].

Провод 1 (рисунок 1.6) воздушной линии подвешивается на опорах 2 с провисом 3 (расстояние L_1). Для измерения температуры и клиренса провода в нижней точке провиса закрепляется подвесной датчик 4, передающий измеренное значение в контрольное устройство 5.

Подвесной датчик 4 и контрольное устройство 5 совместно измеряют расстояние 6 (L_2), для чего по команде контрольного устройства 5 подвесной

датчик 4 излучает ультразвуковой импульс. По времени t_1 между командой контрольного устройства 5 и временем t_2 приёма ультразвукового импульса тем же контрольным устройством 5 вычисляется расстояние 6: $L_2 = C \cdot (t_2 - t_1)$, где C – скорость звука в воздухе.

Однако при наличии бокового ветра провода отклоняются от вертикали, и для определения истинной стрелы провеса провода контрольное устройство 5 снабжается первым 7 и вторым 8 ультразвуковыми передатчиками, разнесёнными по горизонтали поперёк ВЛЭП. По времени распространения ультразвукового импульса от подвесного датчика 4 до каждого приёмопередатчика 7 и 8 вычисляются расстояния 9 и 10. По данным значениям, а также известному расстоянию L_3 между приёмопередатчиками 7 и 8 вычисляются истинное значение 11 провиса провода и отклонение 12 провода по горизонтали поперёк линии.

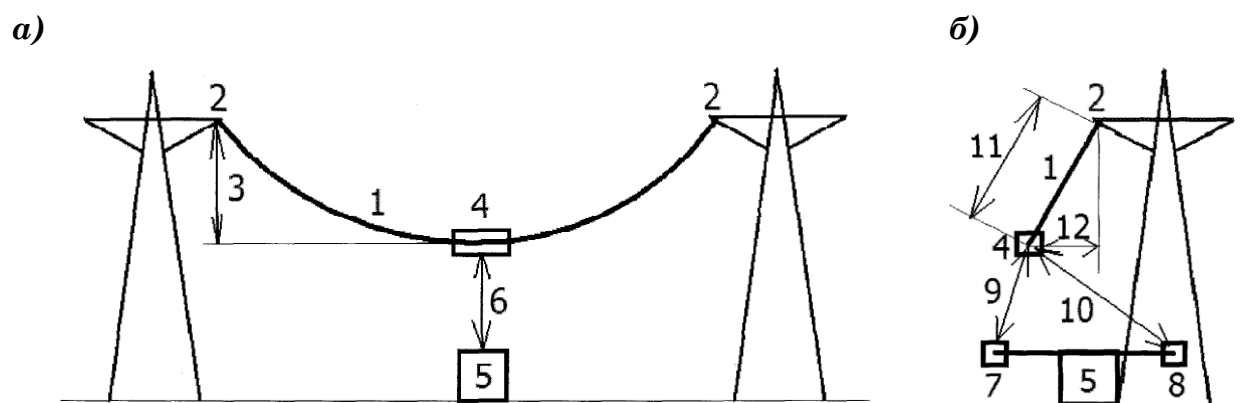


Рисунок 1.6 – Устройство для контроля провиса провода ВЛЭП: а – вид вдоль линии; б – вид в поперечном сечении линии

При описании данного устройства следует упомянуть о том, что скорость звука C в воздухе зависит от многих параметров, например, температуры, влажности, давления воздуха. Задача определения величины скорости звука в текущих условиях решается следующим образом: ультразвуковой импульс передаётся от первого 7 ко второму 8 приёмопередатчикам, и по времени t_3 его прохождения дистанции L_3 вычисляется скорость звука $C = L_3 / t_3$.

Влияние метеорологических условий на точность регистрации провиса провода является недостатком описываемого устройства и следствием ограничений, связанных с физической природой ультразвука (частичное отражение ультразвукового импульса от снежно-ледяных частиц в пространстве между подвесным датчиком температуры и контрольным устройством, зависимость скорости распространения звука от параметров ветрового потока, неоднородного по высоте и на всей дистанции пролёта).

Принципиально иной подход в рамках инструментально-параметрической диагностики оледенения предлагает термодинамический метод, разработанный коллективом учёных КТИ (филиал ВолгГТУ) и СГТУ им. Ю.А. Гагарина под руководством Г.Г. Угарова [3]. Согласно приводимому в [44, 65] описанию, устройство, реализующее данный метод, может иметь как контактное, подразумевающее размещение на проводе, так и бесконтактное исполнение за исключением монтируемого на проводе датчика температуры с соответствующим источником питания. В обоих случаях термодинамический метод позволяет аналитическим путём определить условия для начала образования отложений на проводе, заключающиеся в снижении температуры провода ниже точки росы и точки десублимации, определяемых по влажности и температуре воздуха [65]. В качестве примера приведём выражение для расчёта интенсивности образования гололедных отложений при конденсации на проводе в реальных условиях [44]:

$$V_{\gamma_0=0,9} = K_{\Pi\gamma_0=0,9} \cdot \frac{P_{\text{С.В.}}}{P_0} \cdot (0,6 - 0,4 \cos 2\varphi_B) \left(0,14 \frac{\xi U \cdot 10^{-6}}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)r} + 1 \right) \cdot (\theta_a - v_{\text{пов}}), \quad (1.1)$$

где $K_{\Pi\gamma_0=0,9}$ – вычисленный по результатам эксперимента коэффициент подобия (для сочетания процессов конденсации и десублимации), $[\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{с})]$; $P_{\text{С.В.}}$ – вес отложений на единице длины провода на ветру (вектор скорости ветра перпендикулярен оси провода) $[\text{Н}/\text{м}]$; P_0 – вес

отложений на единице длины обесточенного провода в тех же условиях [Н/м]; q – заряд на единицу длины провода [Кл]; r – приведенный радиус провода [м]; h – высота подвеса провода [м]; ξ – электрическая проницаемость воздуха [о. е.]; U – напряжение линии [В]; θ_a – точка росы [$^{\circ}\text{C}$]; $v_{\text{пов}}$ – текущее значение температуры поверхности провода [$^{\circ}\text{C}$].

Приведённое выше уравнение (1.1) и ему подобные получены авторами эмпирическим путём с использованием лабораторной установки на базе холодильной камеры [44]. Тем не менее метрологические характеристики устройств, функционирующих в рамках заданной математической модели процесса оледенения, практически неизвестны, при том, что сравнение результатов оценки интенсивности гололёдообразования с использованием предлагаемых аналитических выражений и непосредственного мониторинга оледенения с помощью тензодатчика представляет несомненный практический интерес.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день существует большое количество иных устройств для мониторинга гололёдообразования, принцип действия которых основывается на самых разнообразных физических явлениях – начиная от изменения электрической проводимости между датчиком и оледенелым проводом и заканчивая изменением степени поглощения радиоактивного излучения слоем гололёдных изложений [51].

1.2 Методы и средства распознавания аварийных режимов при повреждениях воздушных линий электропередачи

Потребность в идентификации и обнаружении мест повреждений высоковольтных воздушных линий возникла на рубеже XIX-XX вв. в связи с массовой электрификацией территории США, Европы, а позднее СССР. В течение долгого времени, а нередко и поныне для решения данной задачи осуществлялись обходы линии, сопровождающиеся её визуальным осмотром. Несмотря на возможность применения лёгкой авиации, а в дальнейшем и беспилотных летательных аппаратов, подобные меры остаются крайне

ресурсозатратными и не гарантируют получения результатов особенно в условиях плохой видимости при дожде, снегопадах, тумане и т.д. Всё это послужило толчком к появлению специальных измерительных средств, реализующих те или иные методы ОМП. Согласно общепринятой классификации, изложенной в [2, 4, 28, 36], данные методы условно подразделяются на *дистанционные* и *топографические*.

Дистанционные методы. Начало массовому внедрению устройств ОМП в СССР положил выпуск *фиксирующих вольтметров* и *амперметров* конструкции М.П. Розенкнопа [57], заменённых впоследствии аналогичными *омметрами* [4]. Данные приборы обеспечивали измерение и длительное сохранение значений напряжений и токов, сопровождавшихся режимом КЗ на ВЛЭП. Используя показания фиксирующих вольтметров и амперметров, диспетчер электрической сети производил расчёт расстояния от шин одной из подстанций до места аварии, определяя сопротивление петли КЗ [2]. Применение более совершенных фиксирующих омметров не требовало выполнения каких-либо вычислений, при этом шкала прибора изначально градуировалась непосредственно в километрах исходя из удельного сопротивления линии [2].

ОМП при помощи фиксирующих приборов могло производиться путём как односторонних, так и двухсторонних измерений параметров аварийного режима. Размещение устройств на передающей и принимающей подстанциях позволяло исключить влияние переходного сопротивления при замыканиях на землю, «удлиняющего» реальное расстояние до места КЗ, что тем не менее усложняло процедуру ОМП.

К концу 80-х гг. в электрических сетях СССР использовалось более 18 тыс. фиксирующих приборов типа ФИП, ЛИФП, ФИС, МФИ и т.д. Современными представителями данного типа устройств являются изображённые на рисунке 1.7 фиксирующие индикаторы серии ИМФ, «Сириус-2-ОМП», «ТОР-Локатор» и т.д., а также микропроцессорные

терминалы релейной защиты с встроенной функцией ОМП, например, БЭ2704 производства НПП «Экра» и др.



Рисунок 1.7 – Современные фиксирующие индикаторы (слева направо): ИМФ-3Р, «Сириус-2-ОМП», «ТОР 100-ЛОК», БЭ2704 с функцией ОМП

Принципиально иным образом функционируют локационные искатели повреждений – *рефлектометры*. Как и в случае описываемого ранее локационного метода диагностики оледенения, данный способ ОМП основывается на измерении времени пробега искусственно генерируемого электрического зондирующего импульса от места подключения прибора до точки КЗ и обратно (рисунок 1.8) [32, 36]. При этом время пробега Δt зондирующего импульса, скорость его распространения v и искомое расстояние до места аварии l связаны очевидным соотношением [32, 36]:

$$l = \frac{\Delta t \cdot v}{2}.$$

Общим недостатком дистанционных методов ОМП является применение единожды заданных уставок в виде значений погонных параметров ВЛЭП. Несмотря на то, что интерфейс и программное обеспечение, к примеру, современных микропроцессорных индикаторов позволяет учитывать неоднородность линии в виде таблично заданных функций её удельных характеристик, алгоритм функционирования устройств не подразумевает автоматического обновления данных параметров в соответствии с текущими условиями эксплуатации ВЛЭП, например, её нагревом током и солнечной радиацией, увлажнением грунта и увеличением его электрической проводимости и т.д.

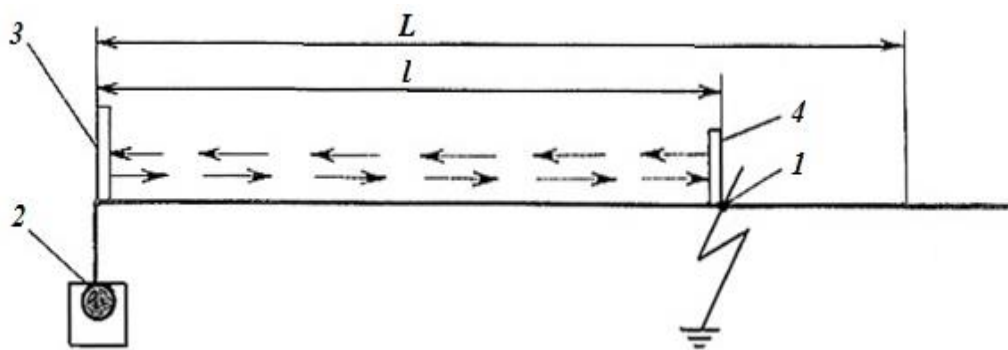


Рисунок 1.8 – Схема прохождения высокочастотного импульса при локационном методе ОМП: 1 – место повреждения, 2 – локационный искатель, 3 – зондирующий импульс, 4 – отражённый импульс, L – общая длина линии, l – расстояние до места повреждения

В силу всего перечисленного по причине высокой погрешности при ОМП на сегодняшний день дистанционные искатели могут использоваться для указания только предполагаемой зоны повреждения, в пределах которой необходимо проведение непосредственного поиска места неисправности. В этом случае осуществление визуальных осмотров ВЛЭП упрощается при одновременном наличии на линии топографических средств ОМП.

Топографические методы. Принадлежащие к данному классу устройства позволяют ориентироваться на местности и определять направление движения к месту повреждения [28, 77, 78, 80].

К числу производившихся в СССР топографических указателей следует отнести многочисленные модификации приборов следующих типов:

- указатель повреждённого участка (УПУ) – устройство, принцип действия которого основан на использовании датчика магнитного поля для бесконтактного измерения тока, протекающего по фазным проводам, а также элемента отбора напряжения (дополнительного изолятора, подвешенного на проводе, или 4-го провода в одном из пролётов) для автоматического возврата указателя в исходное состояние при восстановлении электроснабжения [28];

– указатель короткого замыкания (УКЗ) – устройство, снабжённое магнитными датчиками, элементом отбора напряжения и флажковым электромеханическим индикатором [28];

– указатель повреждённой гирлянды (УПГ) – устройство, предназначенное для определения места перекрытия гирлянды изоляторов при КЗ и содержащее проволочный реагирующий элемент для сброса на землю сигнальных флажков [28].

На сегодняшний день подавляющее большинство топографических средств ОМП представляют собой выполненные на современной элементной базе указатели, функционально близкие к устройствам УПУ и УКЗ, снабжённые тем не менее высокоэффективными световыми индикаторами (на базе сверхярких LED-элементов или ксеноновых ламп), а также обладающие возможностью трансляции полученной информации по каналам GSM-связи непосредственно на рабочие станции диспетчерского пункта или АСУТП энергопредприятия [86, 87].

Новейшие топографические указатели получили широкое распространение за рубежом, при этом их производство налажено на многочисленных предприятиях в США (Texas Instruments, Thomas&Betts), Европе (ABB, Sicame Group, Horstmann GmbH), Китае (Chaobo Electric) и Южной Корее (Electric Machinery Technology). Номенклатура данных устройств, как правило, включает в себя модели двух исполнений: монтируемых на провода (рисунок 1.9, а) или линейную опору (рисунок 1.9, б).

Конструкцию указателей первого типа рассмотрим на примере изображённого на рисунке 1.10, а индикатора аварий, разработанного компанией Texas Instruments (США). Как видно из рисунка 1.10, б, устройство включает в себя датчик тока (Current Transducer), выдающий аналоговый сигнал напряжения, пропорциональный току, протекающему по проводу. Данный сигнал усиливается и отфильтровывается операционным усилителем (OpAmp), после чего подвергается дискретизации при помощи аналого-цифрового преобразователя (ADC) микроконтроллера (MCU). Далее

выполняется анализ данных из цифрового потока от АЦП. При этом, как показано на схеме, выход операционного усилителя также соединён с компаратором (Comparator), устанавливающим флаг прерывания для центрального процессора (CPU) микроконтроллера в случае, если уровень входного сигнала превышает заданный порог. Помимо прочего, устройство содержит датчик температуры (Temperature Sensor), также выдающий сигнал напряжения, измеряемый посредством АЦП микроконтроллера для контроля перегрузки ВЛЭП по пропускной способности. Данный топографический указатель поддерживает технологию беспроводной передачи данных на частоте до 1 ГГц при помощи соответствующего трансивера (Sub 1 GHz Transceiver), обладает интерфейсом RS485 (RS485 Driver) для подключения к проводным линиями связи, а также содержит светодиодный индикатор (LED Driver), загорающийся при возникновении аварии на ВЛЭП. Электропитание устройства гарантирует наличие аккумуляторной батареи (Storage Battery), подзарядка которой осуществляется от солнечной панели (Solar Panel), а также путём отбора мощности от линии посредством трансформатора тока [91].

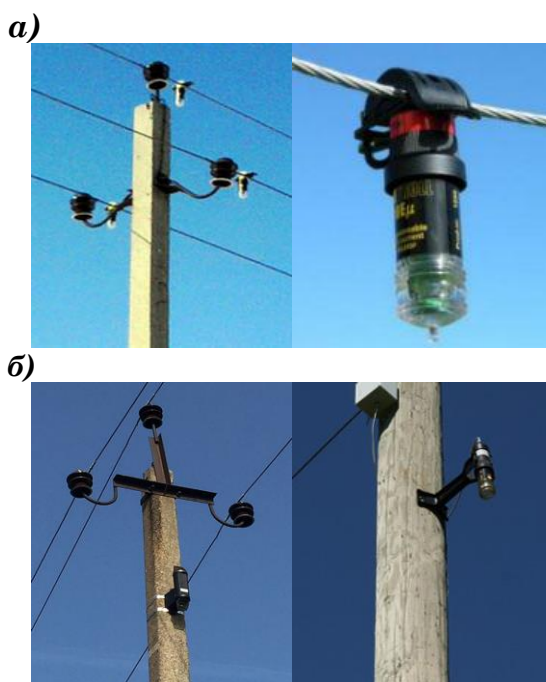


Рисунок 1.9 – Топографические указатели Linetroll (Sicame Group), монтируемые на проводах (а) и опоре ВЛЭП (б)

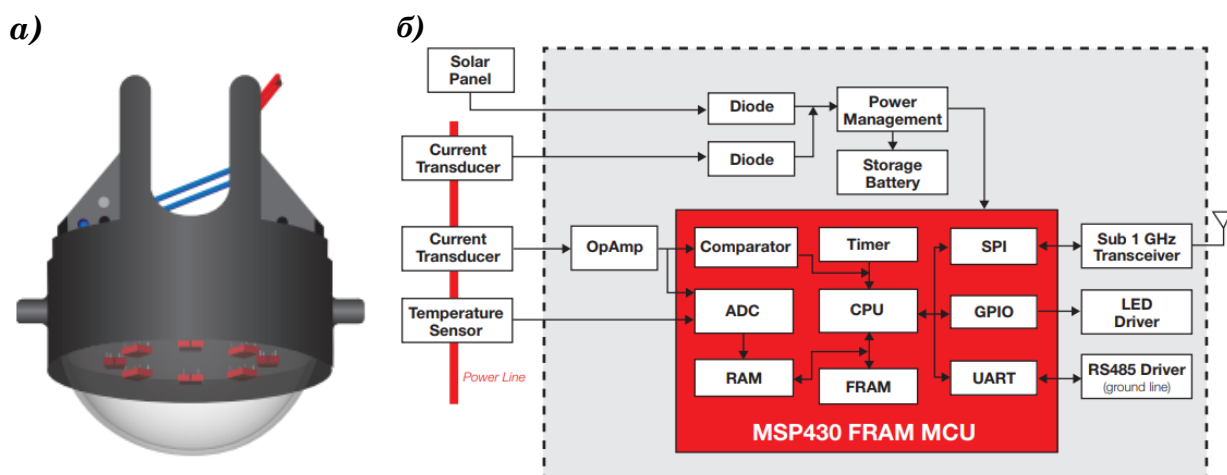


Рисунок 1.10 – Внешний вид (а) и функциональная схема (б) устанавливаемого на проводе индикатора Texas Instruments

К топографическим средствам второго типа, подразумевающим размещение на опоре ВЛЭП без контакта с проводами, относится, к примеру, устройство ИКЗ-1 (рисунок 1.11, а) производства компании «Антракс». Как отмечается в [69], прототипом ИКЗ-1 послужила разработка проф-в ВолгГТУ А.Н. Шилина и В.С. Лукьянова [68]. Из приведённой на рисунке 1.11, б схемы видно, что данное устройство включает в себя средство 1 снятия первичной информации, закреплённое на линейной опоре 2 и состоящее из трёх датчиков 3, 4, 5 электрического поля (конденсаторов) и трёх датчиков 6, 7, 8 магнитного поля (катушек индуктивности с сердечниками), соединённых с усилителями 9, 10, 11, 12, 13, 14 соответственно. Также устройство содержит средства 15, 16, 17 фильтрации сигналов, поступающих от датчиков 3, 4, 5, при этом каждое средство фильтрации выполнено в виде полосового фильтра, настроенного на промышленную частоту 50 Гц. В качестве блока обработки информации 18 используется микроконтроллер, а устройство передачи данных выполнено в виде радиомодуля стандарта GSM/GPRS. Указатель ИКЗ также содержит блок синхронизации временной шкалы 28 посредством спутниковой навигационной системы, датчики температуры 29 и влажности воздуха 30, соединённые с микроконтроллером. Устройство снабжается светодиодной индикацией или цветными флажками, а его электропитание осуществляется посредством автономного блока 24,

включающего в себя аккумуляторную батарею 25 и солнечную панель 26, подключаемые к стабилизатору напряжения 27 [67].

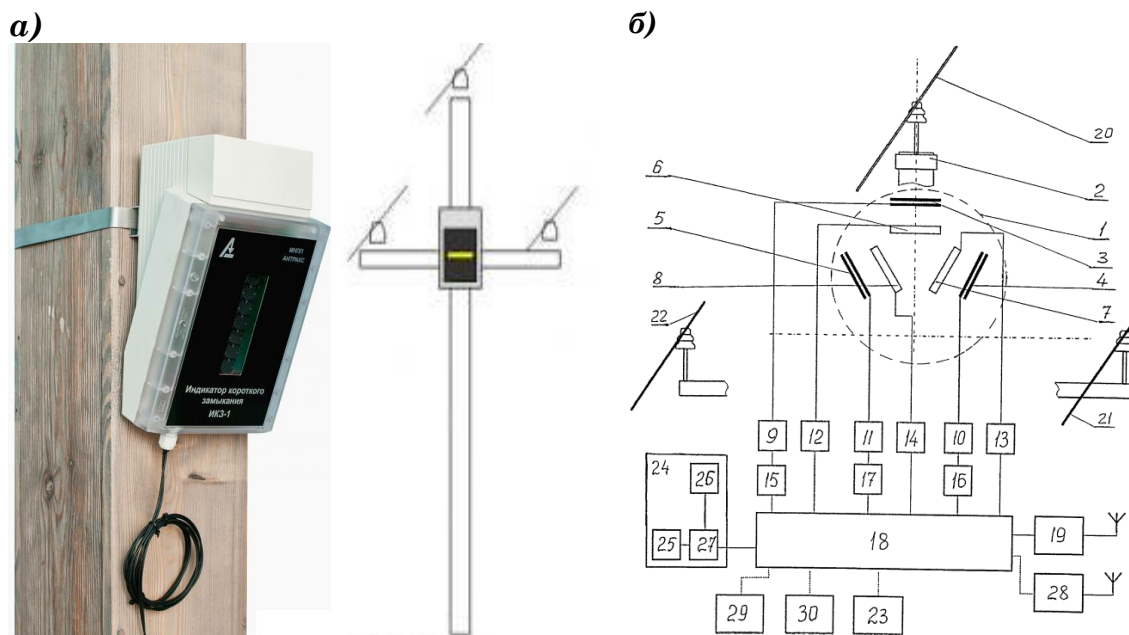


Рисунок 1.11 – Внешний вид (а) и структурная схема (б) устанавливаемого на опоре индикатора ИКЗ-1

Недостатком топографических указателей первого типа (монтируемых непосредственно на проводах ВЛЭП) является сложность их монтажа и последующего обслуживания – так, несмотря на возможность установки данных указателей на линии 6-10 кВ без снятия напряжения при помощи изолирующей штанги (см. рисунок 1.12), монтаж и обслуживание указателей на проводах ВЛЭП 35 кВ и выше требуют наличия специального инструмента и невозможны без временного отключения линии.

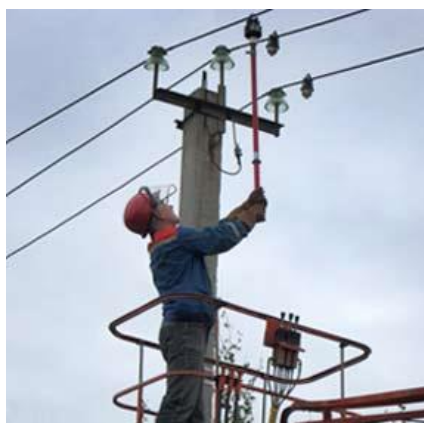


Рисунок 1.12 – Монтаж топографических индикаторов на провода ВЛЭП 10 кВ

Как признают сами производители аналогичных ИКЗ топографических средств второго типа, например, компания Sicame, данные индикаторы имеют некоторые ограничения на места установки: так, если рядом находится параллельная либо ответвленная линия, или сама линия является двухцепной, то опорные индикаторы использовать нельзя – опоры для них должны быть как можно более «чистыми» [70].

Выводы по главе 1

1. На сегодняшний день контроль гололёдообразования на ВЛЭП практически не автоматизирован и осуществляется посредством исключительно визуальных осмотров линий. Это объясняется тем, что к измерительным устройствам данного назначения предъявляются по сути взаимоисключающие требования, а именно высокой точности измерений вкупе с минимальным вмешательством в конструкцию ВЛЭП при монтаже. Кроме того, устройства диагностики оледенения являются узкоспециализированными измерительными средствами и их применение ограничивается единственным сезонным промежутком. В связи с этим более перспективным выглядит переход от концепции устройства для контроля гололёдообразования к измерительному комплексу с функцией мониторинга оледенения.

2. Исходя из методики применения и результатов срабатывания, все производившиеся ранее и современные средства ОМП разделяются на дистанционные и топографические. Ограниченная точность дистанционных указателей продиктована отсутствием возможности для автоматического изменения их параметров функционирования в соответствии с текущим состоянием линии. Более того, как отмечается в [32], в качестве исходных вычислительных данных нередко задаются справочные значения характеристик ВЛЭП, несмотря на то, что параметры даже исправной линии, находящейся в долговременной эксплуатации, могут в значительной мере изменяться по мере накопления дефектов, износа, усталостных повреждений,

строительства параллельных или пересекающихся линий и т.д. Всё это позволяет прийти к выводу о том, что дистанционные искатели определяют лишь предполагаемую зону места повреждения, в то время как точность ОМП топографическими средствами напрямую зависит от их количества и частоты размещения на линии. Так, например, в [28] предлагается установка топографических указателей на каждой опоре ВЛЭП, что несомненно приведёт к удорожанию и усложнению технической эксплуатации данной измерительной системы.

3. Исходя из анализа публикаций, посвящённых тематике исследования, следует, что задачи диагностики гололёдообразования и определения мест повреждений на ВЛЭП рассматриваются изолированно, несмотря на их однозначную взаимосвязь. Вероятность возникновения аварий на различных участках ВЛЭП определяется распределением климатического воздействия по трассе линии, следовательно, контроль гололёдно-ветровых нагрузок на всём протяжении ВЛЭП позволяет спрогнозировать не только аварии, но и возможные места повреждения, что сократит процедуру ОМП. Иными словами, объединение средств мониторинга климатического воздействия и ОМП делает возможным построение адаптивной информационно-измерительной системы для прогнозирования и высокоточного определения мест неисправностей на ВЛЭП.

2 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ: КОНТРОЛЬ ГОЛОЛЁДНО-ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА ЛИНИИ

2.1 Диагностика оледенения по провисанию провода

Недостатки тензометрических и других информационно-измерительных систем аналогичного назначения привели к их относительно малому распространению несмотря на объективную потребность в автоматизации мониторинга ВЛЭП. Сложность реализации непосредственного измерения веса отложений вкупе с низкой точностью методов косвенного анализа оледенения свидетельствуют о необходимости применения принципиально иных решений, использующихся зачастую в других областях техники.

Так, одна из перспективных методик контроля деформации крупногабаритных механических систем основывается на технологии компьютерного зрения, подразумевающей выполнение измерений посредством видеокамеры [55]. Предлагаемая информационно-измерительная система реализует аналогичный принцип для контроля провисания линейного провода, что поясняется при помощи рисунков 2.1, 2.2.

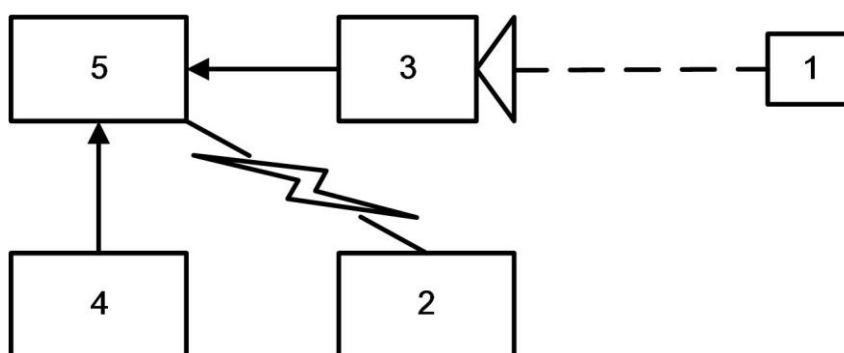


Рисунок 2.1 – Структурная схема измерительного поста

В состав элементов измерительного поста, устанавливаемых на проводе, входят оптическая метка 1, закрепляемая на удалении от опоры и являющаяся маркером положения провода, и подвесной датчик температуры 2, регистрирующий изменение температуры провода, выполненный с

возможностью беспроводной передачи данных и монтируемый вблизи опоры. На опоре устанавливается видеокамера 3, ориентированная на оптическую метку 1 и фиксирующая её пространственные координаты, с инфракрасным прожектором, обеспечивающим всепогодность видеофиксации при любом уровне естественного освещения, и устройством стабилизации, устраняющим горизонтальные девиации видеокамеры 3. На опоре также монтируется метеостанция 4, регистрирующая параметры текущей метеообстановки. Видеокамера 3 и метеостанция 4 соединены с блоком обработки информации 5, выполненным с возможностью приёма данных с подвесного датчика температуры 2, а также доступа к беспроводным каналам связи и осуществляющим сбор информации, вычисление величины провиса провода путём дискретизации видеосигнала и идентификации оптической мишени на сохраняемых изображениях, а также передачу данных, аккумулированных измерительным постом, посредством соответствующего канала связи.

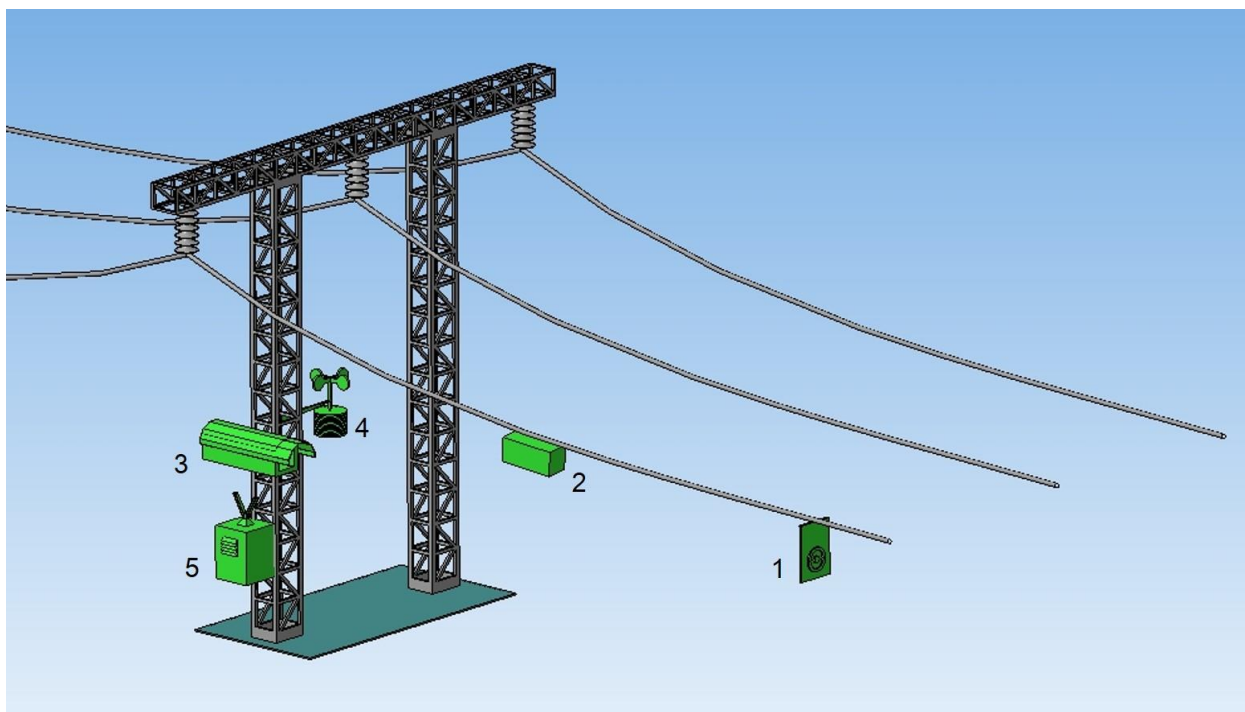


Рисунок 2.2 – Размещение элементов измерительного поста на линии

Как показано на рисунке 2.3, оптическая метка может быть выполнена в виде маячка-фликера с кольцом светоотражающей ленты.

Конструкция подвешного датчика температуры (рисунок 2.4) подразумевает установку в едином корпусе 1 соответствующего чувствительного элемента 2, микроконтроллера 3, Wi-Fi (Zig-Bee)-модема 4, а также устройств отбора мощности 5 и заряда 6 аккумуляторной батареи 7.



Рисунок 2.3 – Оптическая метка положения провода

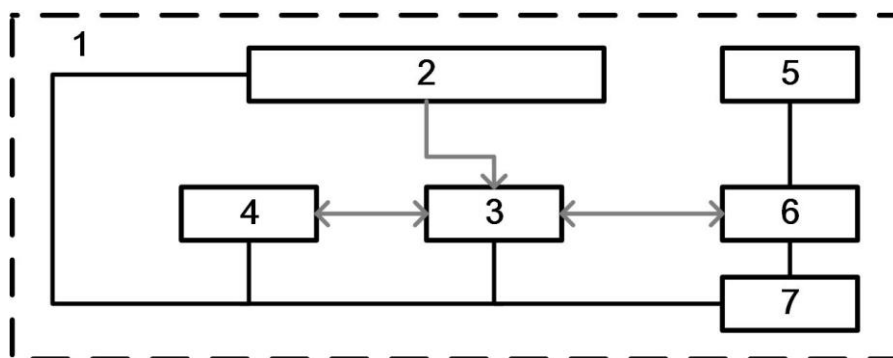


Рисунок 2.4 – Датчик температуры провода

Для обеспечения функционального предназначения ИИС (рисунок 2.5) содержит измерительные посты, посредством сотовых сетей GSM передающие информацию о текущих условиях эксплуатации ВЛЭП на диспетчерский центр управления для расчётов режима плавки отложений, прогнозирования гололёдообразования и т.д. Полученная информация в дальнейшем может транслироваться в интрасеть предприятия, обеспечивая удалённый доступ к данным на всех уровнях управления. Таким образом, как видно из рисунка 2.5, эксплуатация ИИС подразумевает широкую интеграцию её ресурсов во внутреннюю информационную среду энергокомпании – оператора электрической сети.

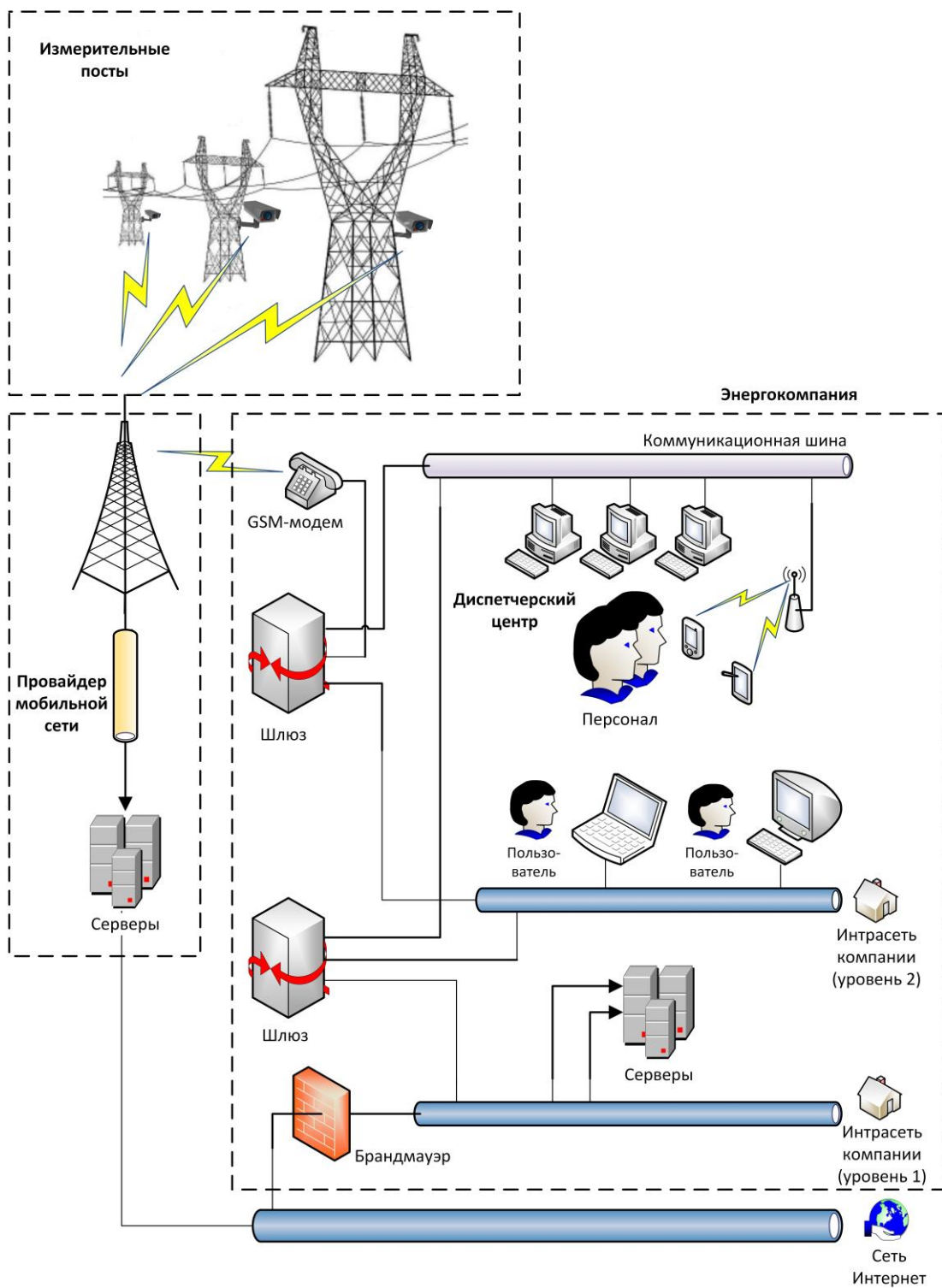


Рисунок 2.5 – Схема функционирования информационно-измерительной системы

2.1.1 Моделирование напряжённо-деформированного состояния провода

Для линии, проходящей по равнинной местности, режим работы провода в пролёте в текущих условиях нагружения описывает уравнение состояния провода [23]:

$$\frac{\sigma}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma \cdot l}{2\sigma} = \frac{\sigma_{\text{и}}}{\gamma_{\text{и}}} \operatorname{sh} \frac{\gamma_{\text{и}} \cdot l}{2\sigma_{\text{и}}} \left[1 + \frac{\sigma - \sigma_{\text{и}}}{E} + \alpha(t - t_{\text{и}}) \right], \quad (2.1)$$

где σ , γ , t – механическое напряжение в материале провода в его низшей точке провисания [Н/мм²], удельная нагрузка [Н/(м·мм²)] и температура провода [°C] соответственно в рассчитываемом режиме; $\sigma_{\text{и}}$, $\gamma_{\text{и}}$, $t_{\text{и}}$ – аналогично механическое напряжение в материале провода, удельная нагрузка и температура провода соответственно в исходных условиях; E , α – модуль упругости [Н/мм²] и температурный коэффициент линейного удлинения [град⁻¹] материала провода соответственно; l – длина пролёта, м.

В случае размещения линейных опор в местах с сильно пересечённым профилем (рисунок 2.6) уравнение (2.1) примет вид [23]:

$$\sqrt{h^2 + \frac{4\sigma^2}{\gamma^2} \operatorname{sh}^2 \frac{\gamma \cdot l}{2\sigma}} = \sqrt{h^2 + \frac{4\sigma_{\text{и}}^2}{\gamma_{\text{и}}^2} \operatorname{sh}^2 \frac{\gamma_{\text{и}} \cdot l}{2\sigma_{\text{и}}}} \left[1 + \frac{\sigma - \sigma_{\text{и}}}{E \cos \theta} + \alpha(t - t_{\text{и}}) \right], \quad (2.2)$$

где h – разность высот точек подвеса провода на опорах A и B , м; θ – угол наклона прямой, соединяющей точки подвеса, град.

Применяемое в совокупности с (2.1) (при $h=0$) и (2.2) выражение для расчёта стрелы провеса провода f_1 на удалении l_1 от начала пролёта выглядит следующим образом [23]:

$$f_1 = \frac{\sigma}{\gamma} \left[\operatorname{ch} \frac{\gamma \cdot l_1}{\sigma} - \operatorname{ch} \frac{\gamma(l_1 - l_0)}{\sigma} \right] - \frac{h \cdot l_1}{l}, \quad (2.3)$$

где l_0 – точка низшего провисания провода, м.

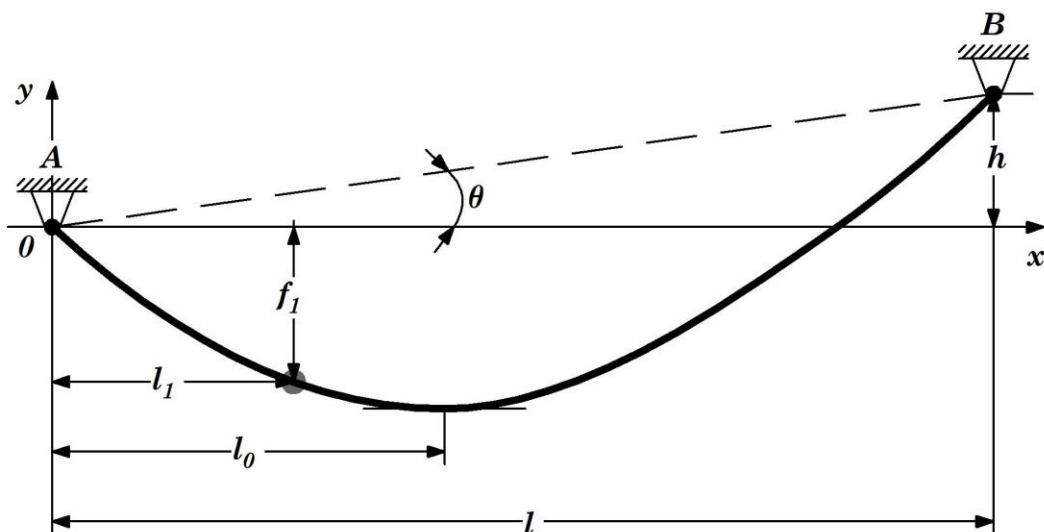


Рисунок 2.6 – Пролёт с разной высотой точек подвеса провода

Уравнения (2.1) и (2.2) даже при использовании совместно с (2.3) остаются трансцендентными – ни одна из величин, будь то удельная нагрузка на провод γ или механическое напряжение σ в его материале не могут быть напрямую выражены друг через друга. Кроме того, применение (2.1)-(2.3) требует точного вычисления гиперболических функций, что вкупе с указанными ограничениями затрудняет использование выражений, известных из теории расчёта проводов и тросов (основы которой изложены, например, в [9, 23] и др.), на практике, а именно, делает невозможным непосредственный расчёт величины гололёдной массы на проводе по значению вертикальной координаты оптической метки.

С учётом всего вышеизложенного для реализации предлагаемого метода диагностики разработана *численная модель напряжённо-деформированного состояния провода*.

Натянутый в пролёте провод представим в виде совокупности прямолинейных стержней с шарнирными соединениями (рисунок 2.7), которые обозначим точками C_i , где $i=0\dots n$. При таком разбиении шарниры C_0 , C_n совпадают с точками подвеса проводов на опорах A и B пролёта соответственно (см. рисунок 2.6). Введём систему координат, совмещая её начало с точкой C_0 . Проекцию i -го стержня на ось абсцисс обозначим Δx_i , на ось ординат – Δy_i .

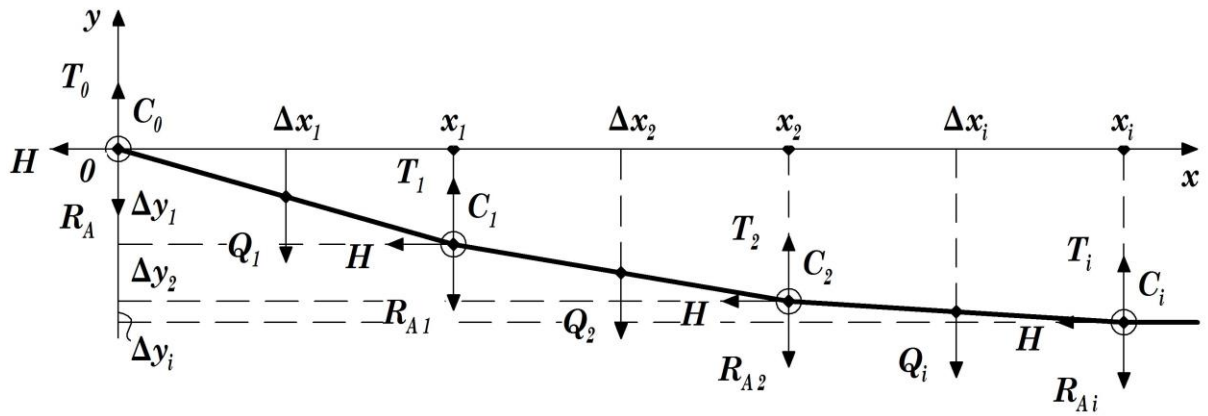


Рисунок 2.7 – Разбиение провода на конечные элементы и характер приложения сил

К каждому i -му стержню приложена сила Q_i , равная по величине собственному весу провода и весу гололёдной муфты на участке, заключённом между точками с координатами $(x_i ; y_i)$ и $(x_{i-1} ; y_{i-1})$. Длина данного участка L_i будет отличаться, благодаря чему возможна замена равномерно распределённой по длине провода нагрузки множеством сосредоточенных сил Q_i , величина которых изменяется в силу изменения L_i , но приложенных через равные промежутки $0,5\Delta x_i$ (считая, что сила действует в середине стержня).

Из основ механики воздушных линий электропередачи известно, что в оценочных расчётах, например, на этапе проектирования ВЛЭП при расчёте проводов на механическую прочность, для описания кривой провисания провода $y(x)$ в пролётах длиной до 800 м может быть использовано уравнение параболы [9, 23]. Ввиду специфики алгоритма измерений для описания формы провисания провода будем использовать уравнение параболы, проходящей через точки с координатами $(0 ; 0)$, $(l_1 ; -f_1)$, (l, h) (см. рисунок 2.6):

$$y(x) = \frac{h \cdot l_1 + f_1 \cdot l}{l \cdot l_1 (l - l_1)} x^2 - \frac{f_1 \cdot l^2 + h \cdot l_1^2}{l \cdot l_1 (l - l_1)} x, \quad (2.6)$$

где l_1 – расстояние, на котором подвешена оптическая метка, от начала пролёта, м; f_1 – стрела провеса провода в точке крепления оптической метки 1 [м], фиксируемая ВКУ.

Рассмотрим подробнее возможность замены точного уравнения провисания провода (цепной линии) [23, 35]

$$y_{cep}(x) = h_0 + a \left(\operatorname{ch} \left(\frac{x - l_0}{a} \right) - 1 \right),$$

где h_0 – величина низшего провисания провода (габарит), м; a – параметр, определяющий форму кривой; на уравнение параболы

$$y_{par}(x) = \frac{r_2}{r_1} x^2 - \frac{r_3}{r_1} x + h_A,$$

где h_A – высота подвеса провода над землёй в точке А [м], а

$$r_1 = l \cdot l_1 (l - l_1),$$

$$r_2 = h \cdot l_1 + f_1 \cdot l,$$

$$r_3 = f_1 \cdot l^2 + h \cdot l_1^2,$$

применительно к реализации измерительного алгоритма, подразумевающего наличие более высоких требований к точности вычислений. В качестве примера рассмотрим провисание провода, подвешенного в пролёте длиной $l=200$ м в точках А ($h_A=15$ м) и В ($h_B=18,43$ м), при этом габарит провода $h_0=6$ м зафиксирован на расстоянии $l_0=92$ м, а стрела провеса провода $f_1=8,23$ м определяется исходя из положения оптической метки, удалённой от ВКУ на $l_1=65$ м.

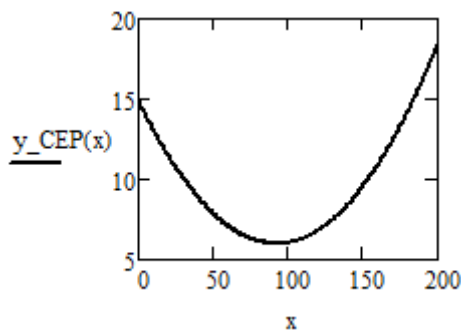
Выполним разбиение изображённых на рисунке 2.8 цепной линии и параболы на $n=1000$ точек и вычислим максимальное и среднее значения относительной погрешности

$$\delta y_i = \left| \frac{y_{par}(x_i) - y_{cep}(x_i)}{y_{cep}(x_i)} \right| \cdot 100,$$

где $i = \overline{1, n}$.

а) $h_0 = 6 \quad \text{м}$
 $x_0 = 92 \quad \text{м}$
 $a = 471.8$

$$y_{\text{CEP}}(x) := h_0 + a \cdot \left(\cosh\left(\frac{x - x_0}{a}\right) - 1 \right)$$



б) $r_1 = 1.755 \times 10^6$
 $r_2 = 1.867 \times 10^3$
 $r_3 = 3.435 \times 10^5$
 $y_{\text{PAR}}(x) := \frac{r_2}{r_1} \cdot x^2 - \frac{r_3}{r_1} \cdot x + h_0$

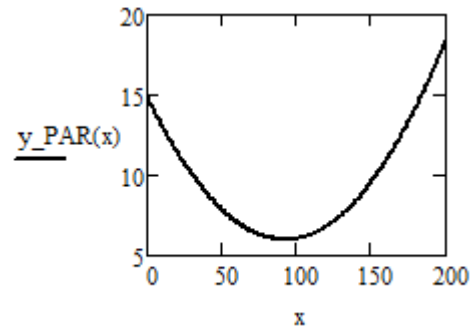


Рисунок 2.8 – Кривая провисания провода, аппроксимированная цепной линией (а) и параболой (б)

В силу того, что при вычислении веса гололёдных отложений по величине отклонения оптической метки параметры h_0 и a неизвестны, применение уравнения цепной линии практически невозможно, однако, как показали результаты сравнения двух моделей провисания, в этом также и нет необходимости, т.к. средняя величина погрешности при аппроксимации кривой провисания параболой составляет $3,86 \cdot 10^{-14} \%$, а максимальная – не более $0,12 \%$. Добавим, что погрешность вычисления длины провода в пролёте также невелика – $8,69 \cdot 10^{-4} \%$. Полученные значения погрешностей свидетельствуют о целесообразности применения выражения (2.6) для определения распределённой по длине провода весовой нагрузки.

С учётом (2.6) и введённых ранее обозначений r_1 - r_3 , используя формулу

$$L_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} ,$$

длину L_i каждого участка провода находим как

$$L_i = \frac{r_1}{4r_2} \left(\frac{1}{r_1^2} \left[(2r_2x_i - r_3) \sqrt{r_1^2 + (2r_2x_i - r_3)^2} - (2r_2x_{i-1} - r_3) \sqrt{r_1^2 + (2r_2x_{i-1} - r_3)^2} \right] + \ln \frac{2r_2x_i - r_3 + \sqrt{r_1^2 + (2r_2x_i - r_3)^2}}{2r_2x_{i-1} - r_3 + \sqrt{r_1^2 + (2r_2x_{i-1} - r_3)^2}} \right). \quad (2.7)$$

Тогда величина силы Q_i , действующая на каждый i -й стержень, составит

$$Q_i = (G_{\text{пр}} + G_{\text{гм}}) L_i, \quad (2.8)$$

где $G_{\text{пр}}$, $G_{\text{гм}}$ – удельный вес провода и погонный вес гололёдной муфты соответственно, Н/м.

Вертикальная составляющая тяжения провода T_0 (для упрощения обозначения вертикальной составляющей величины тяжения индекс «у» может быть опущен) в шарнире C_0 равна взятой с противоположным знаком реакции опоры R_A в точке A :

$$T_0 = -R_A. \quad (2.9)$$

Для расчёта реакции опоры R_A каждую силу Q_i , приложенную в середине i -го стержня распределим между точками подвеса провода A и B обратно пропорционально расстоянию по оси абсцисс от середины стержня до соответствующей опоры, тогда каждая i -я составляющая R_{Ai} составит

$$R_{Ai} = Q_i \frac{x_{i-1} + 0,5x_i}{l}. \quad (2.10)$$

С учётом разности высот между точками подвеса провода A и B (см. рисунок 2.6), просуммировав составляющие R_{Ai} по всем стержням, можем найти полную реакцию опоры в точке A :

$$R_A = \sum_{i=1}^n R_{Ai} - \Delta R, \quad (2.11)$$

где

$$\Delta R = H \cdot \operatorname{tg} \theta = H \frac{h}{l}. \quad (2.12)$$

Постоянная H в формуле (2.12) имеет простой физический смысл – она равна проекции тяжения провода на ось Ox , т.е. на прямую, перпендикулярную силам (см. рисунок 2.7). Во всех точках провода, находящегося в равновесии под действием параллельных сил, проекция тяжения на направление, перпендикулярное силам, есть величина постоянная [35].

При известном значении вертикальной составляющей тяжения его горизонтальная составляющая определяется как

$$H = T_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.13)$$

где α – угол наклона касательной [рад] к кривой провисания провода в точке его подвеса на опоре A . Тогда, исходя из геометрического смысла производной, с учётом (2.6) будет справедливо выражение

$$\operatorname{tg} \alpha = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = -\frac{r_3}{r_1},$$

используя которое в совокупности с (2.9), (2.11)-(2.13), можем найти H как

$$H = \frac{l \cdot r_1}{h \cdot r_1 + l \cdot r_3} \sum_{i=1}^n R_{Ai}. \quad (2.14)$$

Величины механического напряжения σ в материале провода в его нижней точке провисания и горизонтальной составляющей тяжения H связаны между собой соотношением [23]:

$$\sigma = \frac{H}{S}, \quad (2.15)$$

где S – площадь поперечного сечения провода, мм².

Объединяя (2.8), (2.10) и (2.14) с (2.15), получим:

$$\sigma = \frac{r_1(G_{\text{пр}} + G_{\text{гм}})}{S(h \cdot r_1 + l \cdot r_3)} \sum_{i=1}^n L_i(x_{i-1} + 0,5x_i). \quad (2.16)$$

Рассмотрим два состояния натянутого в пролёте провода: исходное (калибровочное), для которого известны напряжение в низшей точке $\sigma_{\text{и}}$, удельная нагрузка $\gamma_{\text{и}}$ и температура нагрева $t_{\text{и}}$, и расчётное (новое), для которого значения параметров, аналогичных перечисленным выше, неизвестны (за исключением температуры провода t). Длина провода в обоих состояниях соответственно равна $L_{\text{и}}$ и L . Последние при учёте упругих и температурных деформаций образуют зависимость [23]:

$$L = L_{\text{и}}(1 + \Delta\epsilon_y + \Delta\epsilon_t), \quad (2.17)$$

где $\Delta\epsilon_y$ – приращение упругих деформаций; $\Delta\epsilon_t$ – приращение температурных деформаций.

Входящие в состав (2.17) величины $\Delta\epsilon_y$, $\Delta\epsilon_t$ вычисляются следующим образом:

– приращение упругих деформаций [23]:

$$\Delta\epsilon_y = \frac{\sigma'_{\text{и}} - \sigma'_{\text{р}}}{E}, \quad (2.18)$$

где σ' – механическое напряжение в середине провода в заданном режиме, при этом для пролёта с разной высотой точек подвеса величины σ и σ' связаны между собой соотношением [23]:

$$\sigma' = \frac{\sigma}{\cos\theta}. \quad (2.19)$$

– приращение температурных деформаций [23]:

$$\Delta \varepsilon_t = \alpha(t - t_n). \quad (2.20)$$

Подставляя (2.20) и (2.18) в совокупности с (2.19) в (2.17) и выражая из полученного уравнения величину σ , находим:

$$\sigma = \sigma_n + E \cos \theta \left(\frac{L}{L_n} - \alpha(t - t_n) - 1 \right). \quad (2.21)$$

Приравнявая правые части выражений (2.16) и (2.21), а также принимая во внимание очевидное равенство

$$\cos \theta = \frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}},$$

получим формулу для расчёта удельного веса гололёдной муфты:

$$G_{\text{гм}} = u \left[\sigma_n + \frac{E \cdot l}{\sqrt{l^2 + h^2}} \left(\frac{L}{L_n} - \alpha(t - t_n) - 1 \right) \right] - G_{\text{пр}}, \quad (2.22)$$

где

$$u = \frac{S(h \cdot r_1 + l \cdot r_3)}{r_1} \left[\sum_{i=1}^n L_i (x_{i-1} + 0,5x_i) \right]^{-1},$$

а длина провода в текущем L и исходном L_n режимах вычисляется по (2.7) при $x_{i-1}=0$, $x_i=l$ с учётом f_1 и f_{1n} соответственно.

Применение найденных соотношений для вычисления веса гололёдных отложений на проводе проиллюстрируем наглядным примером. Пусть измерительный пост системы диагностики состояния ВЛЭП используется для мониторинга оледенения провода АС-150/24 ($S=173,1 \text{ мм}^2$, $E=8,25 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2$, $\alpha=19,2 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, $G_{\text{пр}}=5,87 \text{ Н/м}$), размещаемого в пролёте длиной $l=200 \text{ м}$. Стрела провисания провода, фиксируемая ВКУ по изменению положения оптической метки, подвешенной на удалении $l_1=65 \text{ м}$ от начала

пролёта, $f_1=7,3$ м. Текущая температура провода, регистрируемая подвесным МИТП, $t=-11$ °С. Будем считать, что в исходном режиме (при отсутствии гололёда) механическое напряжение в материале провода $\sigma_{и}=25,86$ Н/мм², температура провода $t_{и}=-5$ °С, стрела провисания в точке подвеса оптической метки $f_{и}=5,75$ м.

Для определения оптимального числа разбиений провода обратимся к рисунку 2.9, иллюстрирующему изменение $\Delta G_{гм}$ результата расчёта веса гололёда с увеличением количества n участков, на которые делится провод, при моделировании его напряжённо-деформированного состояния.

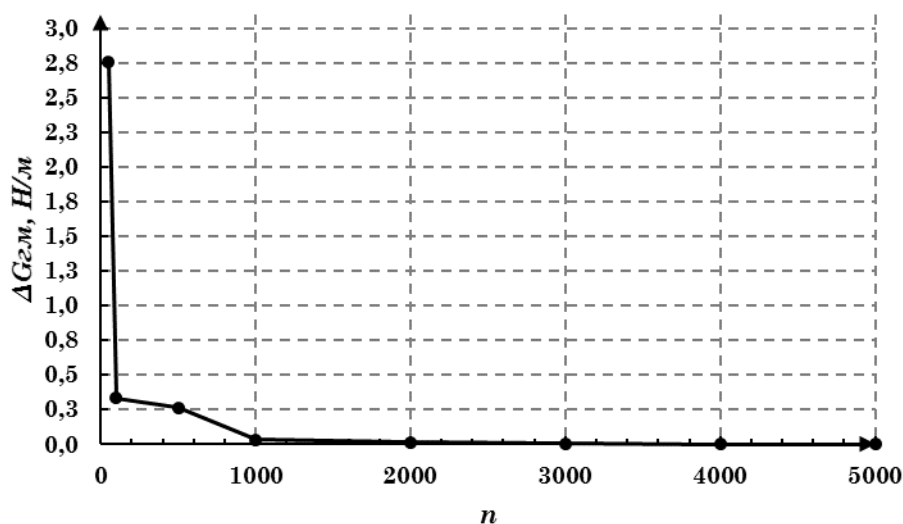


Рисунок 2.9 – Зависимость изменения результата расчёта при пересчёте с увеличением числа разбиений провода

Как видно из представленной зависимости, для пролёта заданной длины и указанных условий нагружения оптимальным является разбиение провода на $n=1000$ элементов.

Диагностика оледенения проводов по их провисанию в точке крепления оптической метки требует точной характеристики профиля местности, а также данных о высоте подвеса проводов в пролёте в случае применения опор разного типа или наличия повышающих вставок. Это подтверждается приведённом на рисунке 2.10 графиком зависимости погрешности $\delta G_{гм}$, возникающей при неучёте величины h в соответствующих

расчётах. Как видно, для пролёта длиной $l=200$ м, расположенном на местности с углом уклона поверхности $\theta=2,8^\circ$ ($h=10$ м), это приводит к погрешности 53,99 % при задании $h=0$.

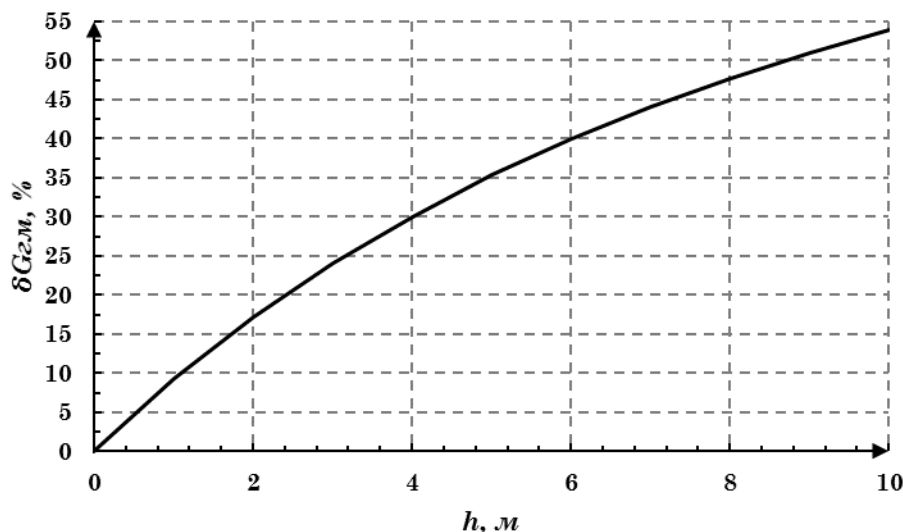


Рисунок 2.10 – Зависимость погрешности расчёта гололёдной массы при неучёте разности высот точек подвеса провода

Определение погонного веса отложений делает возможным вычисление эквивалентной толщины стенки гололёдной муфты b :

$$b = -\frac{d}{2} + \frac{\sqrt{(\rho \pi d \cdot 10^{-5})^2 + 4\rho \pi G_{zm} \cdot 10^{-5}}}{2\rho \pi \cdot 10^{-5}}, \quad (2.23)$$

где d – диаметр провода, мм; ρ – плотность гололёдных отложений эквивалентной цилиндрической формы, принимаемая равной 900 кг/м^3 .

Используя предлагаемый алгоритм вычислений и (2.23), получим зависимости толщины стенки гололёдной муфты от величины провисания провода в точке крепления оптической метки. Графики данных зависимостей для нескольких типов проводов (АС-70/11, АС-95/16, АС-120/19, АС-150/24 в порядке увеличения собственного удельного веса $G_{пр}$) изображены на рисунке 2.11 и иллюстрируют ожидаемое увеличение провисания провода при нарастании гололёдной массы.

Предлагаемый алгоритм вычисления параметров весового нагружения провода в напряжённо-деформированном состоянии может использоваться при реализации диагностики ВЛЭП посредством мониторинга линейного клиренса с применением любых технических средств, включая беспилотных летательных аппаратов.

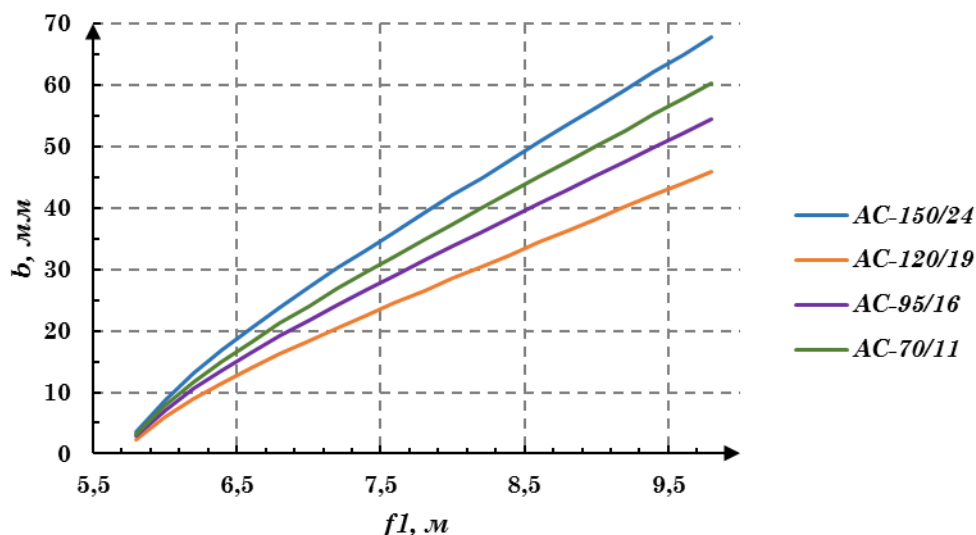


Рисунок 2.11 – Зависимость толщины стенки гололёда от величины провисания провода

2.1.2 Выбор компонентов видеоконтрольного устройства и оценка влияния метеоусловий на эффективность его функционирования

Рассмотрим методику выбора компонентов видеоконтрольного устройства (ВКУ) для мониторинга провисания проводов ВЛЭП.

Одним из важнейших элементов ВКУ является объектив видеокамеры, от фокусного расстояния которого зависят углы обзора видеокамеры по горизонтали и вертикали, а также детализация изображения оптической метки, размещаемой на проводе.

Требуемый угол обзора видеокамеры по горизонтали определим исходя из величины наибольшего отклонения оледенелого провода под действием ветра.

Как отмечается в [1], для оценки максимального отклонения провода в период гололёдообразования в качестве исходных обычно принимаются

следующие сочетания климатических условий: температура воздуха $t=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, скоростной напор ветра равен $0,25Q_{\text{норм}}$, провода покрыты гололёдной муфтой толщиной $b_{\text{норм}}$ (где $Q_{\text{норм}}$, $b_{\text{норм}}$ – соответственно нормативные значения ветрового давления и толщины стенки гололёда для заданной местности – параметры, вероятность не превышения которых составляет 0,96 [70]).

Величина отклонения провода x в горизонтальной проекции на удалении l_1 от начала пролёта (в точке крепления оптической метки) длиной l (рисунок 2.12) вычисляется следующим образом [1]:

$$x = \frac{l_1(l-l_1)\gamma_5}{2\sigma_7}, \quad (2.24)$$

где γ_5 – удельная нагрузка от давления ветра, действующего перпендикулярно проводу, при наличии гололёда; σ_7 – механическое напряжение в материале провода при совместном действии давления ветра и веса оледенелого провода.

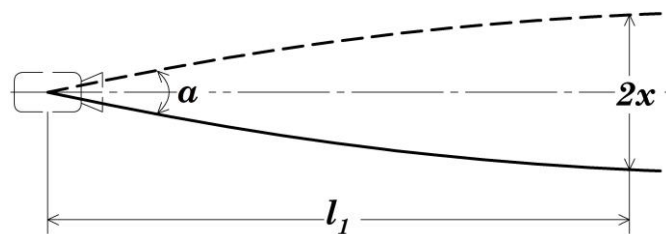


Рисунок 2.12 – Расчёт угла обзора видеокамеры по горизонтали

С учётом (2.24) требуемый угол обзора видеокамеры по горизонтали α составит

$$\alpha = 2 \cdot \arctg\left(\frac{x}{l_1}\right). \quad (2.25)$$

Необходимый угол обзора видеокамеры по вертикали β (рисунок 2.13) определим, исходя из следующих условий: на удалении l_1 от начала пролёта наименьшее значение стрелы провеса провода $f_{\min}$ соответствует режиму без

гололёда ($b=0$) и температуре $t=t_{\min}$, наибольшее значение провисания $f_{\max}$ наблюдается при наличии отложений ($b=b_{\text{норм}}$) и температуре $t=0$ °С.

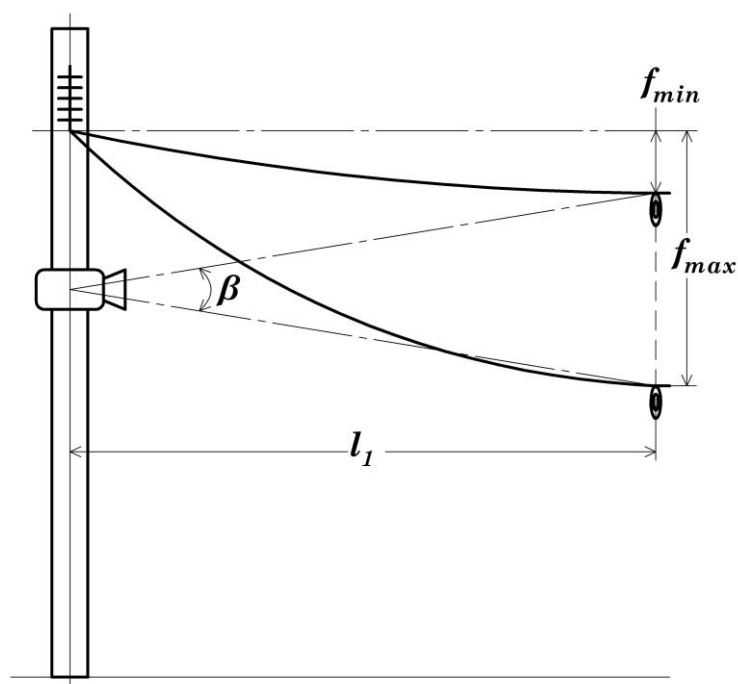


Рисунок 2.13 – Расчёт угла обзора видеокамеры по вертикали

Расчётная стрела провеса провода f_p в каждом из рассматриваемых режимов находится по формуле [1]:

$$f_p = \frac{l_1(l-l_1)\gamma_p}{2\sigma_p}, \quad (2.26)$$

где γ_p – удельная нагрузка на провод в заданном режиме, σ_p – соответствующее механическое напряжение в материале провода.

В силу того, что размах перемещения провода в точке крепления оптической метки $y = f_{\max} - f_{\min}$, требуемый угол обзора видеокамеры по вертикали β составит

$$\beta = 2 \cdot \arctg\left(\frac{y}{2l_1}\right). \quad (2.27)$$

В качестве примера рассмотрим монтаж видеоконтрольного устройства на воздушной ЛЭП, характеризующейся следующими параметрами: провод АС-150/24 (диаметром $d=17,1$ мм), $l=200$ м, $Q_{\text{норм}}=500$ Па (II район по ветру),

$b_{\text{норм}}=25$ мм (IV район по гололёду), $t_{\text{min}}=-40$ °С. Оптическая метка размещается на расстоянии $l_1=65$ м от начала пролёта.

В данном случае, используя соотношения (2.25)-(2.27), получим $\alpha=3,33^\circ$, $\beta=1,71^\circ$, при этом отклонение провода в горизонтальной проекции и размах перемещения провода в вертикальной составят $x=1,89$ м и $y=1,94$ м соответственно.

Исходя из перечня стандартных объективов для видеокамер с наиболее распространённым форматом матрицы $1/3''$ [73], оптимальным выглядит объектив с фокусным расстоянием $F=75$ мм и соответствующими углами обзора по горизонтали $3,7^\circ$ и по вертикали $2,8^\circ$ (например, MDL-55825D).

Для оценки возможности применения объектива по критерию детализации положения оптической метки на видеокадре определим величину необходимой чувствительности ВКУ, а именно минимальное изменение толщины гололёдной муфты, которое должно регистрироваться устройством.

Измерительная информация, получаемая в ходе мониторинга гололёдообразования, используется для расчёта времени плавки отложений τ заданным током I в длительном режиме. Определим погрешность $\delta\tau$ данного расчёта в случае не учёта изменения толщины гололёдной муфты на величину Δb .

Продолжительность процесса плавки гололёда вычисляется по формуле [7]:

$$\tau = \frac{1}{I^2 R_0 - \frac{\Delta t}{R_{T0} + R_{T1}}} \cdot \left[10\rho db + \frac{0,045\rho D\Delta t}{R_{T0} + R_{T1}} \left(R_{T1} + 0,22 \frac{R_{T0}}{\lg \frac{D}{d}} \right) \right], \quad (2.28)$$

где R_0 – электрическое сопротивление 1 м провода при 0 °С; R_{T0} , R_{T1} – тепловое сопротивление муфты отложений соответственно при переходе от внутренней к наружной поверхности и с наружной поверхности в окружающую среду; ρ – объёмный вес отложений (для гололёда $\rho=0,9$ г/см³);

Δt – разность между температурой провода и воздуха; D – внешний диаметр оледенелого провода.

Используя соотношение (2.28) для расчёта погрешности $\delta\tau = 100(\tau - \tau_{\text{и}}) / \tau_{\text{и}}$ (где $\tau_{\text{и}}$ – истинное значение времени плавки гололёда толщиной $b=10$ мм на проводе АС-150/24 током $I=400$ А при $\Delta t=10$ °С), получим зависимость $\delta\tau(\Delta b)$, графическое изображение которой приведено на рисунке 2.14.

Из анализа данной зависимости следует, что при вычислении времени плавки отложений не учёт изменения толщины гололёда уже на 1 мм приводит к погрешности расчёта 9,57 %.

Отметим, что величина чувствительности ε провисания воздушного провода к изменению толщины гололёдной муфты ($\varepsilon = \Delta b / \Delta f$) является непостоянной. Используя уравнение состояния провода [1] и формулу (2.26), получим зависимость чувствительности провисания от толщины стенки отложений (рисунок 2.15).

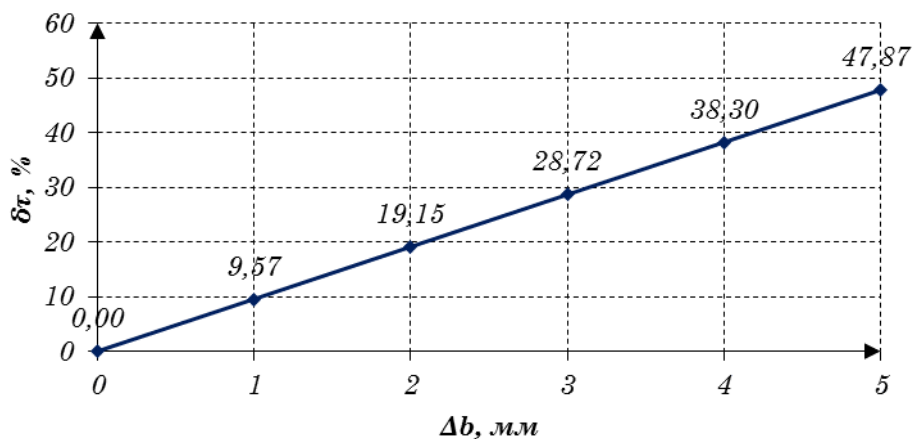


Рисунок 2.14 – Зависимость относительной погрешности времени плавки отложений, вызванной отклонением толщины гололёдной муфты на Δb

Как видно из рисунка 2.15, с ростом оледенения провода чувствительность метода к изменению толщины гололёдной муфты на 1 мм снижается.

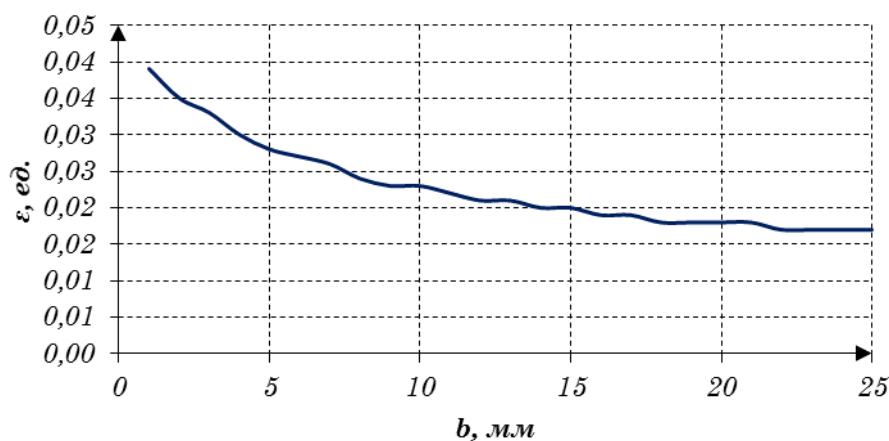


Рисунок 2.15 – Зависимость чувствительности провисания от толщины стенки отложений

Из проведённых расчётов следует, что при увеличении толщины отложений с 24 до 25 мм изменение стрелы провеса провода Δf составит 59 мм. Соответствующее перемещение изображения оптической метки Δh (в пикс.) на видеокадре может быть вычислено с помощью уравнения, полученного из формулы тонкой собирающей линзы:

$$\Delta h = \frac{1}{h} \cdot \frac{F \cdot \Delta f}{l_1 \cdot 10^3 - F} \cdot 10^{-3}, \quad (2.29)$$

где F – фокусное расстояние объектива; h – физический размер пикселя ПЗС-матрицы; l_1 – расстояние, на котором крепится оптическая метка, от начала пролёта.

Таким образом, с учётом (2.29) при использовании объектива MDL-55825D с фокусным расстоянием $F=75$ мм в совокупности с чёрно-белой камерой видеонаблюдения АСМ-5001 разрешением 640x480 пикс (размер пикселя $h=7,5$ нм) смещение провода на $\Delta f=59$ мм вызовет отклонение изображения оптической метки, расположенной на удалении $l_1=65$ м от начала пролёта, на $\Delta h=9$ пикс, что обеспечит однозначную фиксацию утолщения гололёдной муфты на $\Delta b=1$ мм.

Для оценки возможности функционирования видеоконтрольного устройства в сложных погодных условиях рассмотрим влияние зашумления

видеокадра (при наличии снежно-ледяных частиц в пространстве видеонаблюдения) на процесс регистрации положения оптической метки.

Распознавание изображения оптической метки на видеокадрах может осуществляться посредством корреляционно-экстремального алгоритма [10], подразумевающего вычисление нормированной взаимной корреляционной функции (НВКФ) $R_{X,X0}$ анализируемого видеокадра X и эталонного изображения $X0$ оптической метки. Если размер исследуемого видеокадра N х M , а размер эталона n х m , то размер соответствующей корреляционной матрицы составит $(N-n-1)$ х $(M-m+1)$.

Значение НВКФ при сравнении текущего фрагмента X' видеокадра X с шаблоном $X0$ рассчитывается следующим образом [10]:

$$R_{X,X0}(i,j) = \frac{1}{(n+1)(m+1)} \frac{\sum_{k=i}^{i+n} \sum_{p=j}^{j+m} [(X_{k,p} - MX') (X0_{k-i,p-j} - MX0)]}{\sqrt{DX' \cdot DX0}},$$

где M – обозначение математического ожидания значений яркости пикселей;
 D – обозначение дисперсии.

Идеальное совпадение исследуемого фрагмента и эталонного изображения будет иметь место при значении корреляции 1, полному различию будет соответствовать -1, а значение 0 засвидетельствует отсутствие корреляции между двумя изображениями. После вычисления НВКФ производится поиск максимального значения, отвечающего наиболее вероятному положению оптической метки в области видеокадра.

Пример анализируемого видеокадра, содержащего изображение оптической метки, и соответствующий график НВКФ приводятся на рисунке 2.16.

Для оценки ослабления оптического сигнала в атмосфере при неблагоприятных погодных условиях введено понятие метеорологической дальности видимости (*Meteorological Optical Range – MOR*) – дальности видимости абсолютно чёрного тела достаточных угловых размеров, проектирующегося на фон безоблачного неба у горизонта днём [20].

Отношение сигнал/шум (*Signal-to-Noise Ratio* – *SNR*) связано с величиной *MOR* следующим соотношением [34]:

$$SNR(\text{дБ}) = \frac{17}{MOR} \cdot l, \quad (2.30)$$

где l – расстояние от объекта до приёмника оптического излучения.

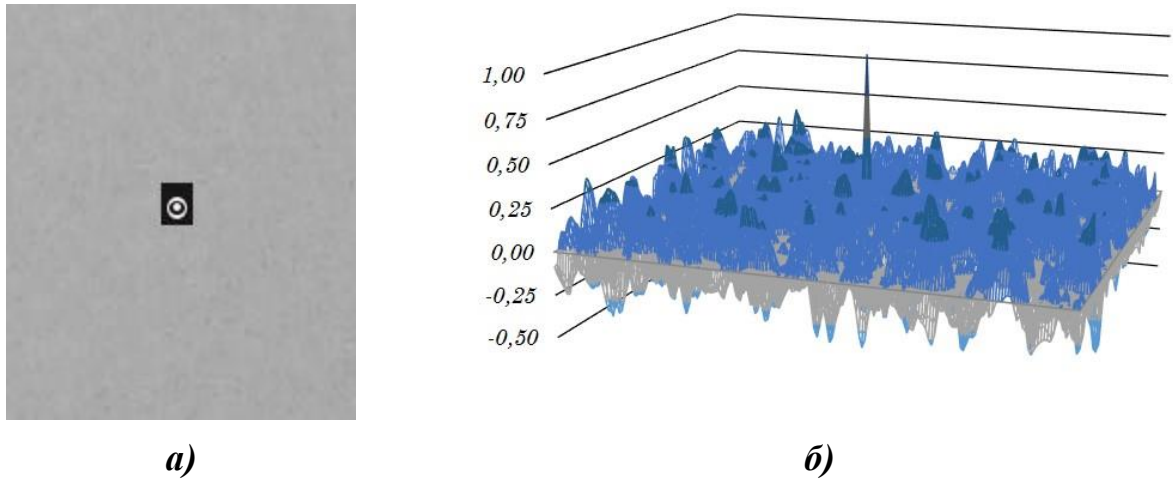


Рисунок 2.16 – Распознавание оптической метки: а – исходный видеокادر; б – график корреляционной функции

Согласно приведённым в [20] результатам метеорологических исследований, в случае густого снегопада интенсивностью 3 мм/ч $MOR=450$ м, тогда при подвесе оптической метки на расстоянии $l_1=65$ м от видеокамеры с учётом (2.30) отношение сигнал/шум составит 2,46 дБ или при соответствующем пересчёте $SNR(\text{ед.}) = 10^{\frac{SNR(\text{дБ})}{10}} = 10^{\frac{2,46}{10}} = 1,76$.

Мерой шума на изображении является стандартное отклонение σ , показывающее, насколько выбранные пиксели отличаются от средней величины яркости M . Стандартное отклонение σ вычисляется по формуле [43]

$$\sigma = \frac{M}{SNR(\text{ед.})}. \quad (2.31)$$

В силу приведённого выше определения *MOR* из [20] будем считать, что в момент метеоисследований небо имеет цвет SkyBlue (RGB 135, 206,

235), тогда $M = (135 + 206 + 235) / 3 = 192$. С учётом данного значения M , используя (2.60), получим $\sigma = 109$.

Для имитации искажения изображения шумом, характеризующимся величиной $\sigma = 109$, может применяться программный пакет ImageJ. С помощью данного пакета получено три изображения, отличающихся яркостью фона 55, 70, 85 % (рисунок 2.17).

Несмотря на очевидное снижение пикового значения НВКФ при зашумлении исходного видеокadra, возможность устойчивой работы системы видеонаблюдения в сложных метеоусловиях (при сильном снегопаде) подтверждается значительным отклонением экстремума НВКФ $R_{\max}$ от величины математического ожидания MR прочих элементов корреляционной матрицы (см. таблицу 2.1).

Функционирование видеоконтрольного устройства при любом уровне естественного освещения возможно при наличии инфракрасного прожектора, эффективность работы которого при неблагоприятных погодных условиях также снижается. Проверим возможность стабильной работы видеокамеры АСМ-5001 с ПЗС-матрицей светочувствительностью $E_{\min} = 0,1$ лк в комплекте с инфракрасным прожектором с дальностью подсветки $l = 80$ м (например, VIDEOTEC IRN30H8A).

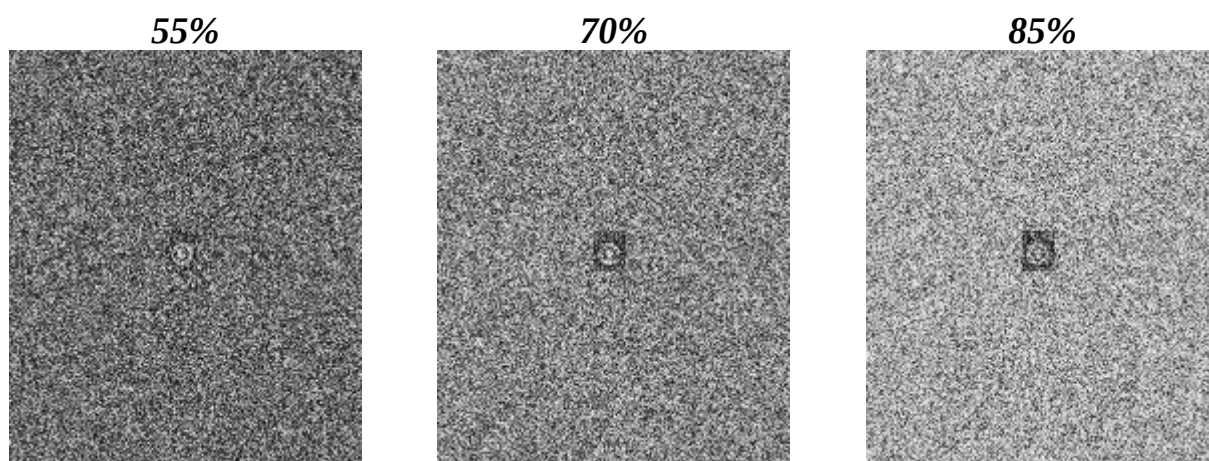


Рисунок 2.17 – Пример видеоизображений при густом снегопаде

Таблица 2.1 – Корреляционный анализ видеокадров

Яркость фона, %	Шум на изображении σ	Координаты оптической метки, пикс.	Мат. ожидание MR элементов корр. матрицы	Пиковое значение НВКФ $R_{\max}$
85	109	99; 85	$-9,722 \cdot 10^{-5}$	0,484
70	109	99; 85	$-1,849 \cdot 10^{-4}$	0,582
55	109	99; 85	$4,941 \cdot 10^{-5}$	0,540

Показатель дальности подсветки указывает на возможность инфракрасного прожектора создавать освещённость $E=2$ лк (для камеры с чувствительностью не хуже 0,1 лк) на плоскости, перпендикулярной к оси излучателя и удалённой от него на расстояние l [29], следовательно, сила света I инфракрасного прожектора, вычисляемая по формуле

$$I = E \cdot l^2,$$

составит $I = 0,1 \cdot 80^2 = 12800$ кд.

При наличии взвешенных в воздухе снежных частиц, существенно превышающих длину волны излучения, потери на рассеяние не зависят от длины волны, следовательно, применим закон Кошмидера [76], согласно которому метеорологическая дальность видимости определяется выражением

$$MOR = \frac{3}{a},$$

где a – коэффициент потерь на рассеяние. Таким образом, в случае густого снегопада интенсивностью 3 мм/ч $a = 3 / 450 = 6,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$. Тогда согласно закону Алларда [76]

$$E = \frac{I}{l_1^2} \cdot \exp(-a \cdot l_1)$$

при неблагоприятных погодных условиях (густом снегопаде) и размещении оптической метки на удалении $l_1=65$ м от начала пролёта уровень освещённости, создаваемый инфракрасным прожектором, составит $E = (12800 / 65^2) \cdot \exp(-6,67 \cdot 10^{-3} \cdot 65) = 1,96$ лк, что превышает порог $E_{\min}$

более чем в 19 раз и гарантирует стабильное качество изображения, выдаваемого видеокамерой, а также свидетельствует об исключении влияния внешних искажающих факторов на точность регистрации пространственных координат оптической метки.

Полученные результаты доказывают возможность практического использования видеоконтрольного устройства, выполненного на базе стандартного оборудования, для мониторинга гололёдообразования на проводах воздушных линий электропередачи при любых погодных условиях.

2.1.3 Диагностика оледенения по провисанию провода бесконтактным методом

Несмотря на преимущества размещения элементов измерительного поста по рисунку 2.2 перед тензометрическими датчиками, необходимость монтажа датчика температуры и оптической метки непосредственно на высоковольтном проводе ВЛЭП требует отключения линии или организации работ под напряжением как при монтаже, так и дальнейшем обслуживании системы в ходе её эксплуатации.

Рассмотрим возможность диагностики оледенения по провисанию провода с реализацией исключительно бесконтактных измерений. В этом случае конструкция измерительного поста (рисунки 2.18, 2.19) будет аналогична изображённой на рисунке 2.1 за исключением того, что ВКУ 1 фиксируется низшая точка провисания провода, свободного от крепления каких-либо элементов, при этом наряду с метеостанцией 2 на опоре также располагается датчик магнитного поля (ДМП) 3. Таким образом, вместе с компонентами 1, 2, 3, соединёнными с блоком обработки и передачи информации 4, все элементы поста монтируются лишь на опоре ВЛЭП (см. рисунок 2.19).

Как видно, отличиями данной модификации метода от описываемой ранее являются распознавание низшей точки провисания провода, не

оснащённого оптической меткой, а также расчёт механической нагрузки без непосредственного измерения температуры провода.

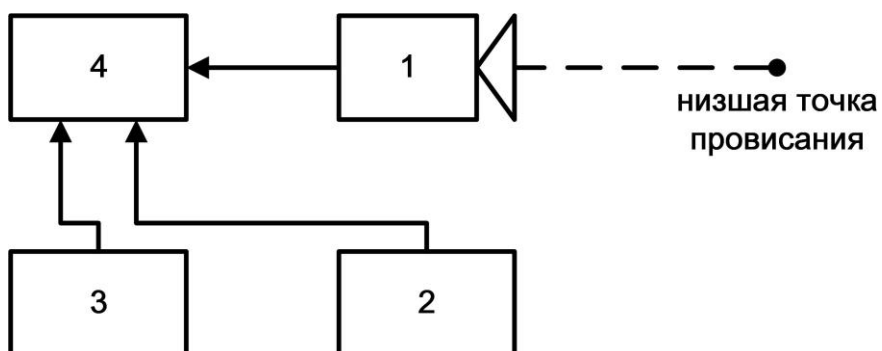


Рисунок 2.18 – Структурная схема измерительного поста для бесконтактной диагностики оледенения

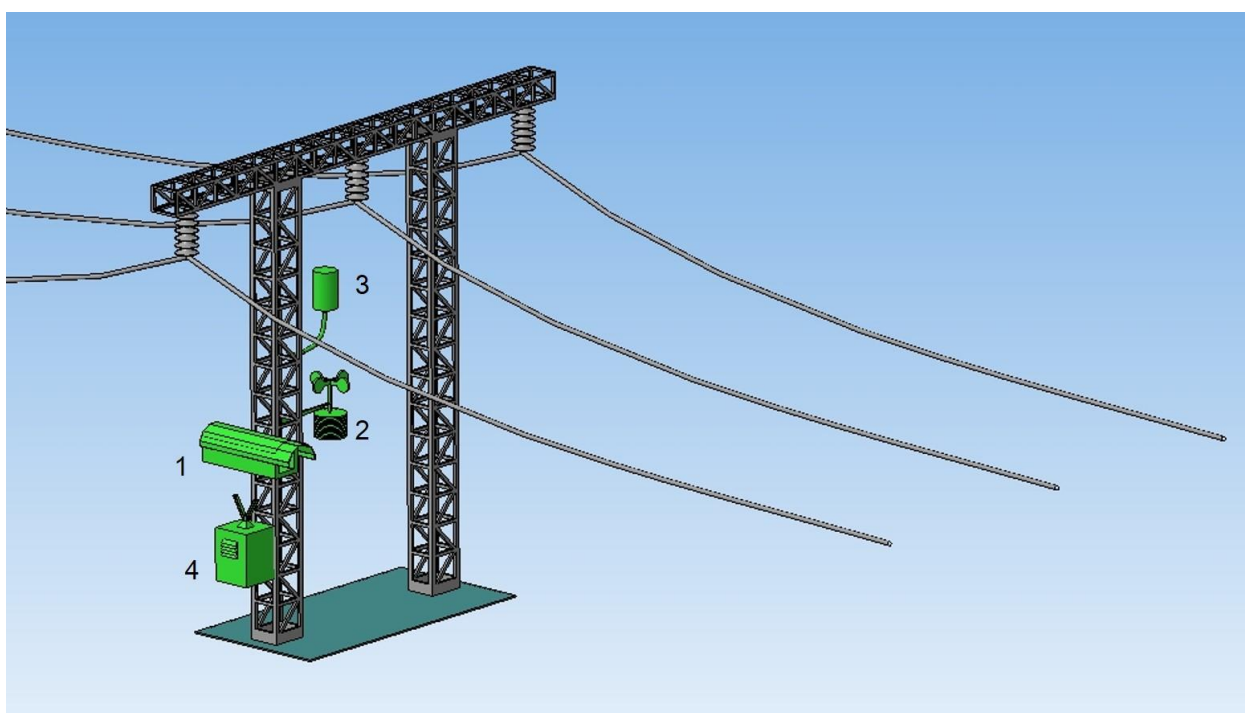


Рисунок 2.19 – Размещение элементов измерительного поста на линии

Распознавание низшей точки провисания подразумевает анализ содержимого видеокadra с целью поиска на нём изображения провода, а именно выделения участков с наборами точек, координаты которых задаются уравнением непрерывной линии. Эта процедура может включать в себя следующую последовательность действий:

- 1) приведение исходного изображения (видеокадра) к бинарному виду, т.е. состоящему из точек только двух цветов: цвета фона и цвета объектов;
- 2) очистка от шума;
- 3) выделение связных областей, т.е. наборов точек на изображении, в котором любые две точки соединены друг с другом через последовательность соседей;
- 4) удаление случайных областей и выявление искомой непрерывной связной области (линии провисающего провода) для нахождения точки экстремума.

Расчёт механической нагрузки без измерения температуры провода требует оценки влияния различных видов отложений (гололёда, а также снежно-изморозевой смеси), покрывающих провод, на его температурное поле. Выполним расчёт температуры провода в предположении об отсутствии отложений с учётом величины протекающего по линии тока, температуры окружающей среды, а также условий обдува провода – скорости и направления ветра.

Контроль за изменением магнитного поля ВЛЭП позволяет определять протекающий по линии ток без контакта с проводами [78, 86, 87]. В настоящее время этот метод используется при функционировании устанавливаемых на опорах ЛЭП индикаторов коротких замыканий LineTroll 3100, ИКЗ-1 и др., что свидетельствует о возможности выполнения ДМП 3 на базе ферромагнитных сердечников с обмотками аналогично перечисленным устройствам. При этом, как следует из публикаций Олсена [84], фазный ток, например, для линии, выполненной на опорах с горизонтальным расположением проводов, находится следующим образом:

$$I = \frac{2\pi H_y}{\frac{\sqrt{3}H_x}{x} \left(\frac{1}{H_y} - \frac{\sqrt{3}H_x}{x(H_y^2 + 3H_x^2)} \right)},$$

где H_x, H_y – соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие магнитного поля, (А/м); x – расстояние между фазными проводами (м). Тогда выделяемый при протекании электрического тока тепловой поток q (Вт/м²) через поверхность провода длиной 1 м составит

$$q = \frac{I^2 R}{S},$$

а объёмная плотность тепловыделения Q (Вт/м³)

$$Q = \frac{I^2 R}{V},$$

где R – активное сопротивление провода (Ом); S, V – площадь поверхности теплообмена (м²) и объём рассматриваемого участка провода (м³) соответственно, вычисляемые исходя из предположения о цилиндрической форме провода:

$$S = \pi \cdot d_{\text{пр.э}} \cdot 10^{-3},$$

$$V = \frac{\pi}{4} d_{\text{пр.э}}^2 \cdot 10^{-6},$$

где $d_{\text{пр.э}}$ – эквивалентный диаметр провода, учитывающий увеличение поверхности теплообмена за счёт витой структуры сталеалюминиевого провода (мм). Для расчёта данной величины используется соотношение из [71]:

$$d_{\text{пр.э}} = n_{\text{пров}} d_{\text{пров}} \left(1 - \frac{2 \arcsin \sqrt{1 - 0,25 \left(\frac{d_{\text{пров}}}{d_{\text{пр}} - d_{\text{пров}}} \right)^2}}{360} \right),$$

где $n_{\text{пров}}$ – число проволок в наружном повиве провода; $d_{\text{пров}}, d_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки и провода соответственно (мм).

В случае оледенелой или снежно-изморозевой поверхности проводника его теплообмену с окружающей средой предшествует теплопроводность в отложениях. Процесс переноса теплоты между поверхностью провода и

воздухом является результатом т.н. сложного теплообмена, а именно совокупного действия конвективного теплообмена и теплового излучения [83, 85].

Основной количественной характеристикой сложного теплообмена является коэффициент теплоотдачи α (Вт/(м²·°C)) [71]:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l,$$

где α_k – учитывает действие конвекции, а α_l – действие теплового излучения.

Для провода, свободного от отложений, коэффициент теплоотдачи конвекцией может быть найден как [71]

$$\alpha_k = \frac{\lambda_v \cdot Nu}{d_{\text{пр.э}}} 10^3, \quad (2.32)$$

где λ_v – коэффициент теплопроводности воздуха (Вт/(м·°C)); Nu – критерий Нуссельта, вычисляемый для случая вынужденной конвекции по формуле [71]

$$Nu = 0,218 k_\psi Re_\psi^{0,6},$$

где k_ψ – коэффициент зависимости теплоотдачи при конвективном теплообмене от угла атаки ветра ψ_v , определяемый по таблице, приводимой в [71]; Re_ψ – эквивалентный критерий Рейнольдса, учитывающий совместное действие свободной и вынужденной конвекции, при наличии ветра равный [71]

$$Re_\psi = \sqrt{Re^2 + 0,5Gr},$$

где Re – критерий Рейнольдса; Gr – критерий Грасгофа. Данные величины определяются с помощью следующих выражений [71]:

$$Re = \frac{v \cdot d_{\text{пр.э}}}{\nu_v}, \quad (2.33)$$

где v – скорость ветра (м/с); ν_v – кинематический коэффициент вязкости воздуха (м²/с);

$$Gr = \frac{g \beta_v d_{\text{пр.э}}^3 (t_{\text{пр}} - t_v)}{\nu_v^2}, \quad (2.34)$$

где g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$); $t_{\text{пр}}$ – температура поверхности провода ($^{\circ}\text{C}$); $t_{\text{в}}$ – температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$); $\beta_{\text{в}}$ – температурный коэффициент объёмного расширения воздуха ($1/^{\circ}\text{C}$), который находится как [71]

$$\beta_{\text{в}} = \frac{1}{t_{\text{в}} + 273},$$

при этом значения параметров воздуха $\lambda_{\text{в}}$ и $\nu_{\text{в}}$ в реальном диапазоне температур с достаточной точностью могут быть представлены в виде аналитических зависимостей [71]

$$\lambda_{\text{в}} = 2,44 \cdot 10^{-2} \sqrt{1 + 0,0069 t_{\text{в}}},$$

$$\nu_{\text{в}} = 13,28 \cdot 10^{-6} (1 + 0,0069 t_{\text{в}}).$$

Коэффициент теплоотдачи излучением вычисляется по формуле [71]:

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{5,67 \varepsilon_{\text{и}}}{t_{\text{пр}} - t_{\text{в}}} \left[\left(\frac{273 + t_{\text{пр}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.35)$$

где $\varepsilon_{\text{и}}$ – постоянная излучения, принимаемая равной 0,6 для проводов, не покрытых отложениями и находящихся в эксплуатации более двух лет.

Используя метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в среде Elcut, выполним расчёт температурного поля провода, свободного от отложений, а также покрытого ледяной и снежно-изморозевой оболочкой цилиндрической формы толщиной b (мм), при этом наличие отложений требует учитывать утолщение проводника на $2b$ в (2.32), (2.34), а при вычислении коэффициента теплоотдачи излучением по формуле (2.35) увеличение $\varepsilon_{\text{и}}$ до 0,97 для оледенелой поверхности проводника и 0,80 для снежно-изморозевой. Заметим, что в силу наличия в (2.34), (2.35) величины $t_{\text{пр}}$ расчёт температурного поля провода будем осуществлять итерационно. В качестве примера зададим следующие исходные параметры: провод АС-150/24, III район по гололёду, II район по ветру, длина пролёта линии 240 м, температура воздуха -30°C , ток нагрузки 150 А, скорость и угол атаки ветра 5 м/с и 90° соответственно.

Результаты расчёта приведены в таблице 2.2. Как видно из полученных данных, утолщение ледяной оболочки вплоть до 50 мм практически не приводит к изменению температуры провода, в то время как нарастание снежно-изморозевых отложений способствует нагреву провода на 4,06 °С. Это объясняется меньшей более чем в 4,8 раз теплопроводностью снега и изморози (0,465 Вт/(м·°С) для снежно-изморозевой смеси и 2,25 Вт/(м·°С) для льда), что приводит к ухудшению условий охлаждения провода и его нагреву.

Используя стандартную методику расчёта, основанную на решении уравнения состояния провода (изложенную, например, в [9]), вычислим механическое напряжение σ (Н/мм²) в материале провода и дадим оценку погрешности $\delta\sigma$, возникающей в связи с тем, что при отсутствии датчика температуры видеокамерой 1 фиксируется истинное значение провисания провода $f_{г-в}$, однако при расчёте σ используется вычисленное значение температуры провода в предположении об отсутствии отложений.

Таблица 2.2 – Нагрев провода в различных условиях гололёдообразования

Толщина оболочки отложений, мм	Температура провода, °С	
	лёд	снег и изморозь
0	-27,14	
5	-27,52	-26,35
10	-27,69	-25,71
15	-27,77	-25,19
20	-27,81	-24,75
25	-27,83	-24,38
30	-27,84	-24,06
35	-27,84	-23,76
40	-27,83	-23,54
45	-27,82	-23,31
50	-27,81	-23,08

Из приведённых в таблице 2.3 результатов следует, что, осуществляя бесконтактное измерение протекающего по линии тока (при помощи ДМП 3), а также метеопараметров (посредством МС 2), выполняя расчёт температуры провода в предположении об отсутствии отложений и вводя

поправку на 20 %-ю погрешность, возможно корректное вычисление механического напряжения без использования накладного датчика температуры провода.

Таблица 2.3 – Характеристика погрешности расчёта механического напряжения, вызванной неучётом снежно-изморозевых отложений при оценке температуры провода

Толщина оболочки отложений, мм	Погрешность расчёта механического напряжения, %
5	19,90
10	20,67
15	21,26
20	21,73
25	22,09
30	22,35
35	22,58
40	22,67
45	22,76
50	22,83

Заметим, что принятое допущение о цилиндрической форме отложений более всего характерно для тяжёлых условий гололёдообразования: так, при формировании отложений несимметричной формы создаваемый крутящий момент вращает провод, что приводит с течением времени к более равномерному нарастанию отложений по всей его поверхности и приближению формы отложений к цилиндрической [30]. Тем не менее оценим достоверность предлагаемой методики, выполнив расчёт температуры провода, покрытого отложениями несимметричной формы.

С этой целью приведём формулы (2.32)-(2.34) к более общему виду, а именно, оперируя величиной гидравлического диаметра D_r [38]:

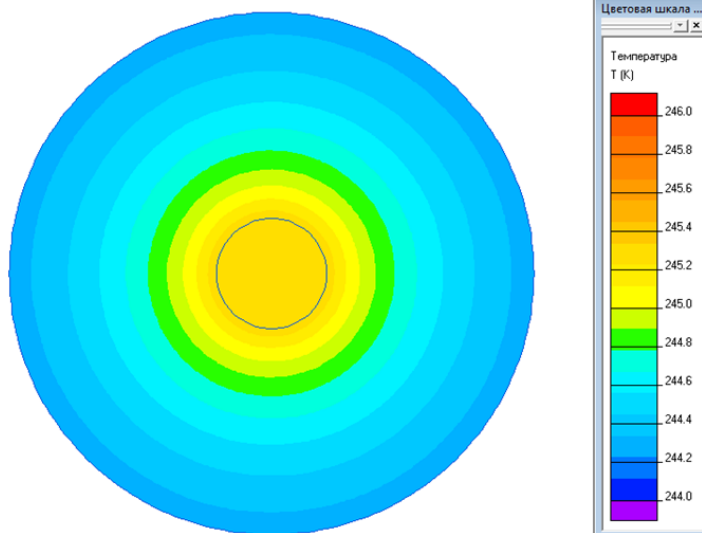
$$D_r = \frac{4A}{P},$$

где A – площадь поперечного сечения потока жидкости/газа; P – «смоченный» периметр поперечного сечения потока. Очевидно, что

записанные для частного случая (с учётом цилиндрической формы тела) выражения (2.32)-(2.34) предполагают равенство $D_r = d_{пр.э}$ ($D_z = d_{пр.э} + 2b$).

Рисунки 2.20, 2.21 содержат графическое изображение распределения температуры в поперечном сечении провода, покрытого отложениями несимметричной формы ($A=1894,18 \text{ мм}^2$, $P=148,21 \text{ мм}$, $D_r = 51,12 \text{ мм}$) (а) и эквивалентной по весу цилиндрической муфтой (б).

а)



б)

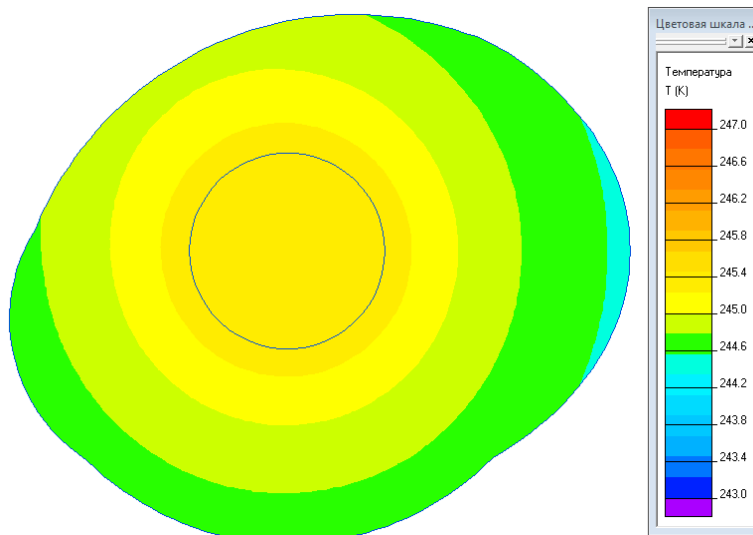


Рисунок 2.20 – Двумерное стационарное поле температур в поперечном сечении провода, покрытого гололёдными отложениями симметричной (а) и несимметричной формы (б) равного веса

Результаты вычислений свидетельствуют о том, что при наличии несимметричных гололёдных отложений температура провода достигает значения

-27,76 °С, эквивалентной цилиндрической формы (толщиной 32,02 мм) – -27,84 °С, а при полном отсутствии отложений (см. таблицу 2.2) – -27,14 °С. Полученная разница величиной менее 1 °С доказывает целесообразность косвенного расчёта температуры провода без учёта гололёдной муфты.

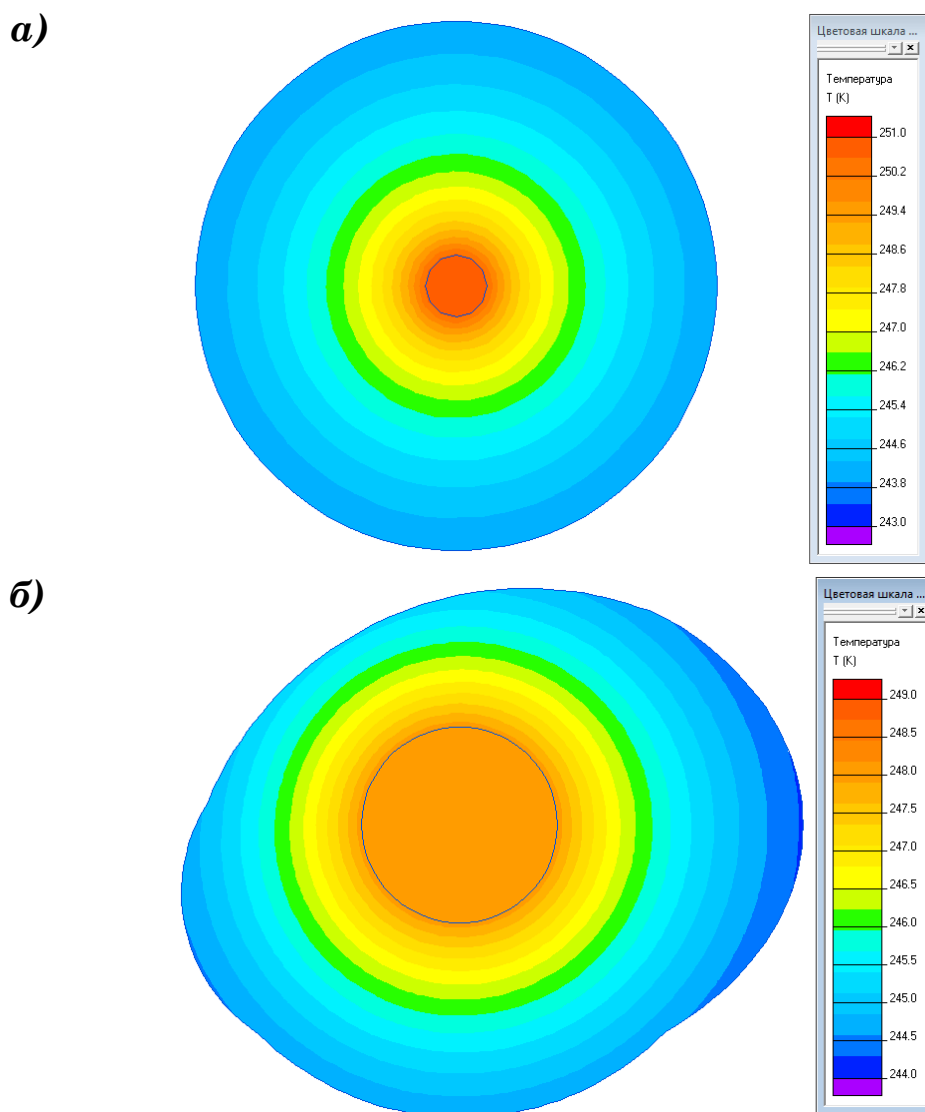


Рисунок 2.21 – Двумерное стационарное поле температур в поперечном сечении провода, покрытого снежно-изморозевыми отложениями симметричной (а) и несимметричной формы (б) равного веса

Температура провода, покрытого снежно-изморозевыми отложениями той же несимметричной формы, составляет -25,11 °С, что практически соответствует значению, полученному для цилиндрической оболочки толщиной 15 мм (см. таблицу 2.2) – что подтверждает необходимость

коррекции 20 %-й погрешности при вычислении механического напряжения в предположении об отсутствии отложений.

С учётом всего вышесказанного следует, что необходимость введения 20 %-й поправки зависит от типа отложений, а именно требуется лишь при наличии снежно-изморозевых оболочек.

Надёжное определение вида формирующихся отложений выполняется с помощью термодинамического метода, согласно которому одновременно измеряют температуру и относительную влажность воздуха вблизи провода, а также температуру его поверхности [65]. Полученные данные используются для расчёта точки росы t_a (°C) [65]

$$t_a = \frac{243,12 \left(\ln(RH) + \frac{17,62t_B}{243,12 + t_B} \right)}{17,62 - \left(\ln(RH) + \frac{17,62t_B}{243,12 + t_B} \right)}$$

и точки десублимации t_i (°C) [65]

$$t_i = \frac{272,16 \left(\ln(RH) + \frac{22,46t_B}{272,62 + t_B} \right)}{22,46 - \left(\ln(RH) + \frac{22,46t_B}{272,62 + t_B} \right)},$$

где RH – относительная влажность воздуха. После этого значения t_a и t_i сравниваются с температурой поверхности провода $t_{пр}$. Анализ соотношения этих величин между собой позволяет однозначно диагностировать формирование ледяных, снежно-изморозевых или сложных отложений [65]:

- если температура поверхности провода больше точки десублимации, но меньше либо равна точке росы, то принимается решение об образовании гололедных отложений;
- если температура поверхности провода больше точки росы, но меньше либо равна точке десублимации, то принимается решение об образовании изморозевых отложений;

- если температура поверхности провода меньше точки росы и точки десублимации, то принимается решение об образовании сложных отложений.

В связи с этим отметим, что в момент начала нарастания снежно-изморозевой муфты действительная температура поверхности провода отличается не более чем на 1-2 °С (см. таблицу 2.2) от значения, вычисленного в предположении об отсутствии отложений. Данное отклонение сравнимо с погрешностью датчиков температуры, что свидетельствует о возможности распознавания нарастания снега и изморози термодинамическим методом без применения контактных (накладных) датчиков, определяя температуру провода расчётным путём, а влажность и температуру воздуха при помощи МС 2.

Таким образом, в качестве МС 2 должна использоваться автоматическая метеостанция, позволяющая регистрировать скорость и направление ветра, влажность и температуру окружающей среды, а также передавать измеренные данные, используя стандартные интерфейсы связи, например, RS-232 или RS-485.

Найденные значения провисания провода и механического напряжения в его материале позволяют рассчитать удельный вес отложений, а также эквивалентную толщину стенки гололёдной муфты, используя ранее выведенные соотношения (2.22) и (2.23) соответственно.

2.2 Диагностика оледенения по прогибу опоры

Из материалов, приведённых в [54], следует, что наличие гололёдно-ветровых нагрузок приводит значительному прогибу «гибких» (многогранных стальных и композитных) опор. Таким образом, в случае выполнения линии на «гибких» опорах с несимметричным расположением фаз мониторинг гололёдообразования (измерения толщины гололёдной муфты b на проводе) может осуществляться с помощью непосредственного измерения величины прогиба f опоры и скорости ветра v (рисунок 2.22).

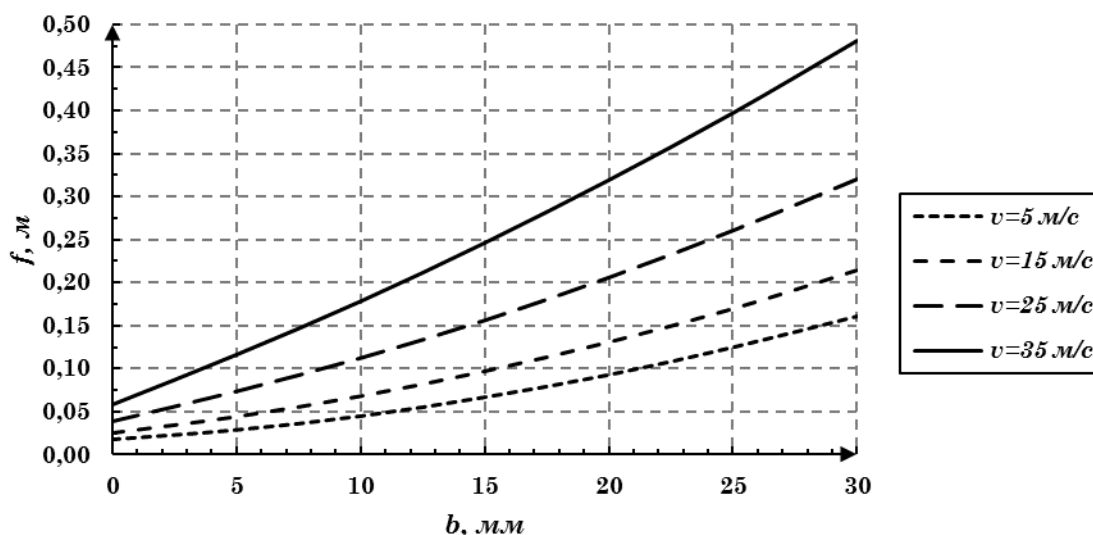


Рисунок 2.22 – Зависимость прогибов опоры ПМ110-1 от толщины гололёдной муфты при изменении скорости ветра

Реализация измерительного гололёдного поста (рисунок 2.23), принцип функционирования которого основывается на применении самой линейной опоры в качестве чувствительного к деформации элемента требует наличия точечный источник света (ТИС) 1, закреплённого на вершине опоры и снабжённого защитным экраном, а также видеоконтрольное устройство 2 с длиннофокусным объективом, устанавливаемое у основания стойки. Кроме того, в состав измерительного поста входят датчик ветрового давления (анеморумбометр) 3 и блок обработки информации (компьютер) 4, на вход которого поступают сигналы с каждого из элементов 2, 3.

Для дополнительного устранения бликов и шумовых засветок возможно введение в оптический канал наблюдения перед длиннофокусным объективом согласованного спектрального фильтра.

Как видно из рисунка 2.23, смещение ТИС 1 относительно оптической вертикальной оси, регистрируемое ВКУ 2, зависит от прогиба опоры, величина которого определяется гололёдно-ветровой нагрузкой на провода и ветровым давлением на тело опоры.

Процесс диагностики оледенения ВЛЭП по прогибу опоры состоит из следующих операций.

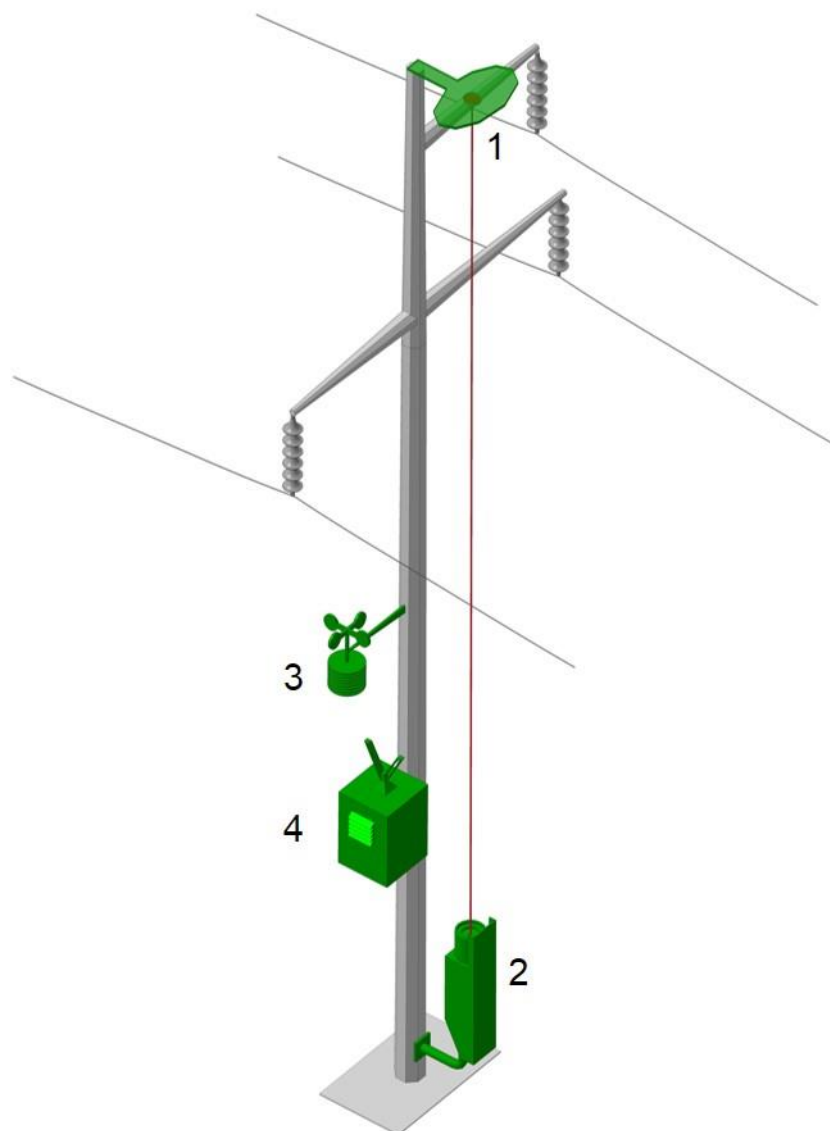


Рисунок 2.23 – Пост измерения гололёдных нагрузок по прогибу опоры

Шаг 1. Обработка информации о засветке ПЗС-матрицы от точечного источника света. На данном этапе осуществляется поиск области изображения (стоп-кадра), в которой находится пятно засветки, после чего определяются координаты центра тяжести пятна засветки и величина его смещения относительно начала координат.

Определение координат светового пятна осуществляется путём поиска и распознавания на стоп-кадрах фрагмента, соответствующего шаблонному (эталонному) изображению ТИС (отражающего его размер, форму, закон распределения яркости). Для решения данной задачи, как упоминалось в [54], может быть использован корреляционно-экстремальный алгоритм.

Далее точное вычисление смещения ТИС осуществляется путём субпиксельного измерения внутри зоны A'' – найденной ранее области исходного изображения A , содержащей пятно засветки. Координаты центра тяжести пятна (x''_c, y''_c) (рисунок 2.24) в системе матрицы A'' вычисляются следующим образом [63]:

$$x''_c = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (A''_{ij} \cdot i)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m A''_{ij}},$$

$$y''_c = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (A''_{ij} \cdot j)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m A''_{ij}},$$

где A''_{ij} – элемент матрицы A'' , учитывающий градацию яркости; i, j – индексы номера строки и столбца в матрице A соответственно.

Пересчёт координат центра тяжести светового пятна в систему координат видеокадра A осуществляется по формулам:

$$x_c = x'' + x''_c,$$

$$y_c = y'' + y''_c,$$

где x'', y'' – координаты первого элемента зоны анализируемого изображения A , которая содержит пятно засветки.

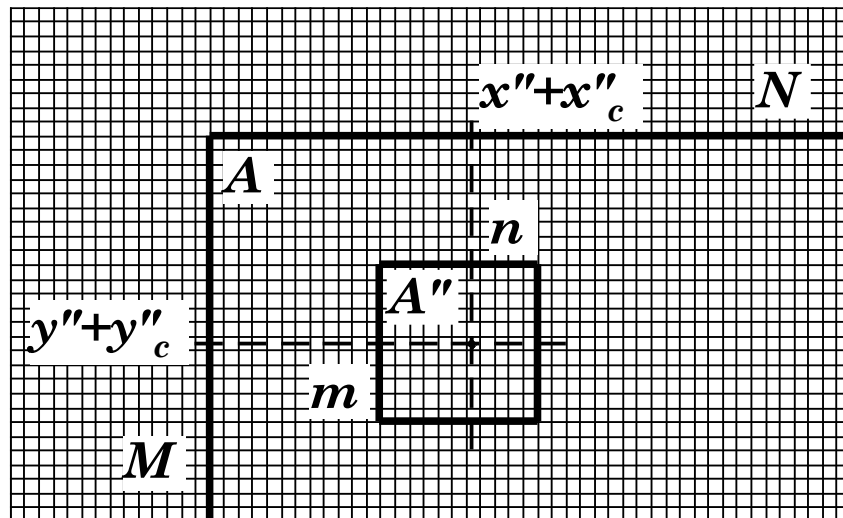


Рисунок 2.24 – К расчёту координат центра тяжести светового пятна

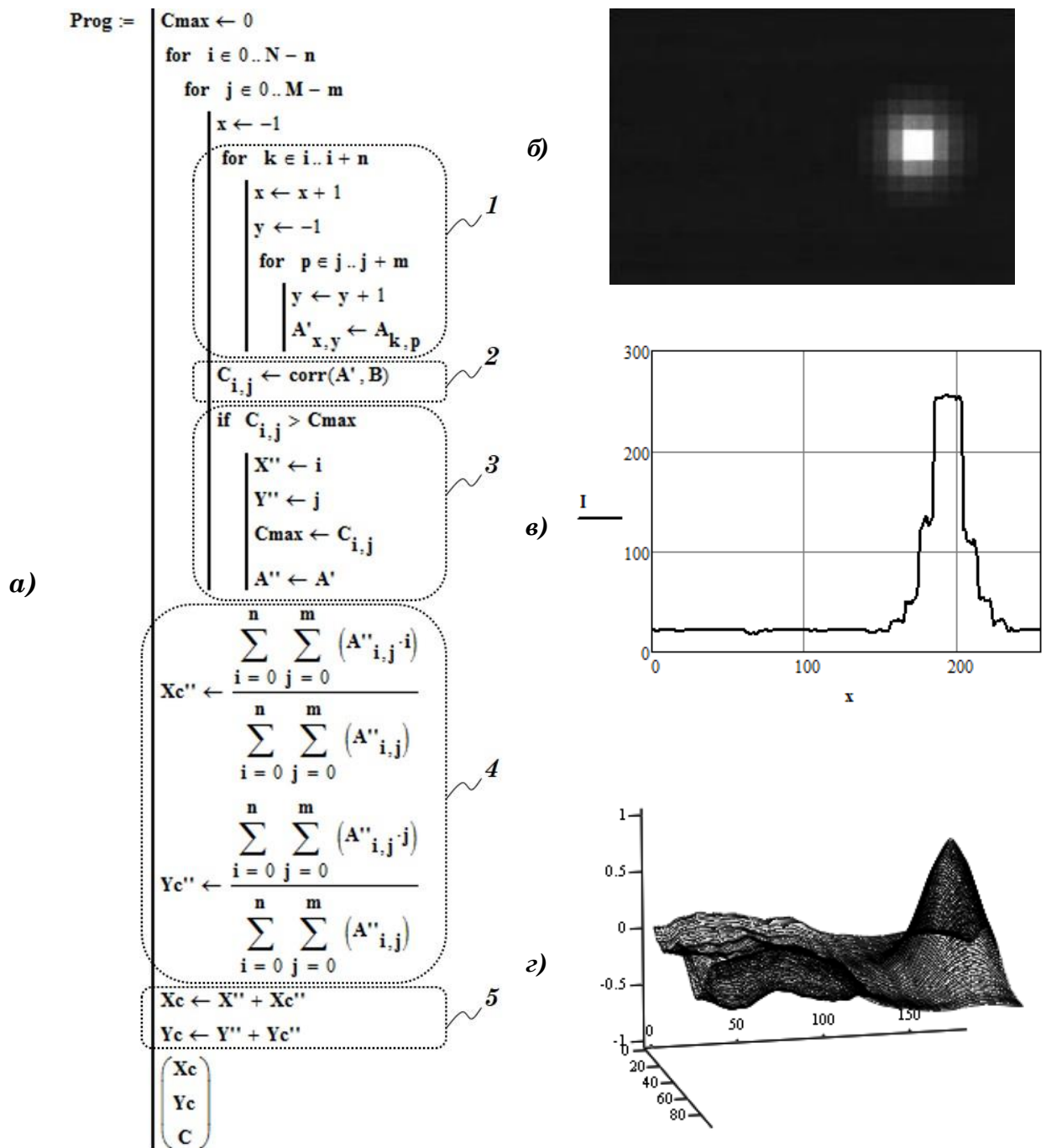


Рисунок 2.25 – Пример использования алгоритма корреляционного совмещения

В качестве примера реализуем корреляционно-экстремальный алгоритм в Mathcad. Приведённый на рисунке 2.25, а листинг программного кода содержит следующие блоки: 1 – захват в исходном изображении A области A' размером $n \times m$; 2 – вычисление нормированной кросс-корреляции текущего фрагмента A' и шаблона B при помощи встроенной функции *corr*; 3 – поиск пикового значения нормированной взаимной корреляционной

функции (НВКФ) и выделение фрагмента A'' , соответствующего экстремуму НВКФ; 4, 5 – расчёт координат центра тяжести светового пятна в системе матриц A'' и A соответственно. Рисунок 2.25, б содержит изображение светового пятна на стоп-кадре; рисунок 2.25, в – профиль яркости $I(x)$ тестового кадра вдоль его горизонтальной оси симметрии; рисунок 2.25, г – графическое отображение поверхности, образованной НВКФ и демонстрирующей обнаружение изображения ТИС на видеокадре при достижении наивысшей корреляции.

С учётом полученных значений x_c, y_c величина смещения ТИС (прогиба вершины опоры f) будет определяться как

$$f = \sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2},$$

где x_0, y_0 – координаты центра видеокадра.

Шаг 2. Определение гололёдной нагрузки на провод (толщины гололёдной муфты b) по значениям прогиба опоры и параметрам ветрового давления (скорости v и направления φ ветра). Как показано в [54], аналитического решения уравнения упругого изгиба опоры, выполненной с полый стойкой переменного сечения, не существует. Таким образом, непосредственное нахождение толщины гололёдной муфты b , исходя из величины прогиба опоры z и ветрового давления w , также невозможно. Следовательно, определение величины b по найденным z (с помощью видеорегистрации отклонения ТИС) и $w = v^2 \cdot \cos \varphi / 1,6$ (посредством измеренных с помощью метеостанции скорости v и направления φ ветра) может осуществляться исключительно итерационно путём подбора искомого значения с заданной точностью (например, до 0,001 мм). Тем не менее, выполнение итерационного решения в процессе функционирования гололёдного поста является достаточно ресурсоёмкой задачей, влияющей на быстродействие блока обработки информации (компьютера). В связи с этим наиболее оптимальным выглядит размещение в памяти управляющей программы компьютера расчётных таблиц, состоящих из предварительно

вычисленных (с высокой точностью) значений b при определённых z и w , заданных на равномерной сетке с шагом

$$z_k - z_{k-1} = z_{k-1} - z_{k-2} = \dots = z_i - z_{i-1} = \dots = z_1 - z_0 = \Delta_z = \text{const}$$

и

$$w_k - w_{k-1} = w_{k-1} - w_{k-2} = \dots = w_i - w_{i-1} = \dots = w_1 - w_0 = \Delta_w = \text{const}$$

соответственно.

В таком случае зависимость между толщиной гололёдной муфты на проводе и величинами прогиба опоры и ветрового давления будет отражаться функцией $b(z, w)$, задаваемой в виде таблицы

$$\left. \begin{array}{ccccc} (z_0, w_0), & (z_1, w_0), & \dots, & (z_{k-1}, w_0), & (z_k, w_0) \\ (z_0, w_1), & (z_1, w_1), & \dots, & (z_{k-1}, w_1), & (z_k, w_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (z_0, w_{m-1}), & (z_1, w_{m-1}), & \dots, & (z_{k-1}, w_{m-1}), & (z_k, w_{m-1}) \\ (z_0, w_m), & (z_1, w_m), & \dots, & (z_{k-1}, w_m), & (z_k, w_m) \end{array} \right\},$$

состоящей из $k \times m$ узлов $b_{ij} = b(z_i, w_j)$. Тогда вычисление толщины гололёдной муфты при текущих значениях прогиба z опоры и ветрового давления w сводится к двумерной лагранжевой интерполяции по значениям b_{ij} в окрестности размером $u \times n$ узлов таблицы с целью нахождения искомого значения $b(z, w)$ по формуле, аналогичной приводимой в [22]:

$$b(z, w) = \sum_{i=x-u}^x \sum_{j=y-n}^y b_{ij} \prod_{\substack{p=0 \\ p \neq i}}^x \prod_{\substack{q=0 \\ q \neq j}}^y \frac{(z - z_i)(w - w_j)}{(z_p - z_i)(w_q - w_j)},$$

где

$$x = \left\lfloor \frac{z}{\Delta_z} \right\rfloor, \quad y = \left\lfloor \frac{w}{\Delta_w} \right\rfloor,$$

при этом очевидно, что в случае интерполяции по всем узлам сетки $x = u = k$ и $y = n = m$ соответственно.

Эмпирическое подтверждение возможности диагностирования гололёдных нагрузок на линию по прогибу её опор было получено с помощью экспериментальной установки (ЭУ), схема которой приведена на рисунке 2.26.

ЭУ установка включает в себя жёсткую металло-деревянную платформу 1, на которой располагаются две вспомогательных гибких, выполненных из поливинилхлорида и алюминия опоры 2, а также опора 3, отличающаяся тем, что снабжена точечным источником света (ТИС) 4 (в виде светодиода с драйвером питания) и экраном 5. Излучение ТИС регистрируется аналоговой камерой видеонаблюдения 6, установленной у основания опоры 3. Передача аналогового видеосигнала от камеры выполняется в формате PAL, при этом оцифровывание и ввод в память компьютера 7 осуществляется с помощью платы видеозахвата (фрейм-граббера).

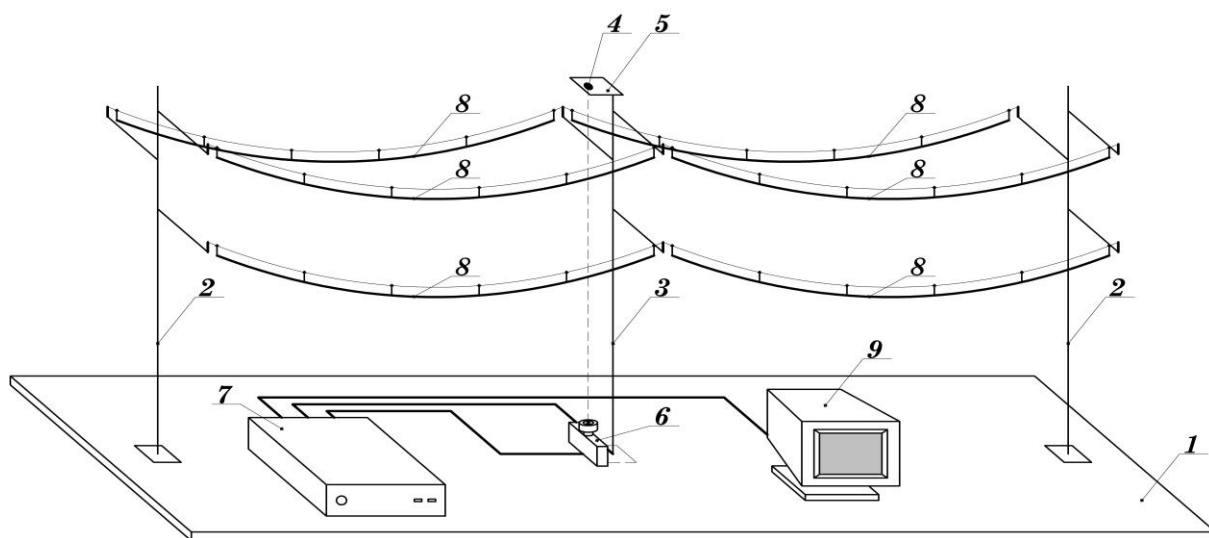


Рисунок 2.26 – Схема ЭУ по исследованию деформации гибких опор ВЛЭП

Подвешиваемые к проводам грузы 8 (реализованные в виде изогнутых в форме параболы стальных проволок) имитируют распределённую гололёдную нагрузку. Наличие на проводах дополнительного веса приводит к изгибу опоры и отклонению ТИС. Фиксируемое видеокамерой 6 перемещение ТИС 4 транслируется на монохромный монитор видеонаблюдения 9.

Внешний вид экспериментальной установки, блока обработки информации, а также изображение ТИС на экране монитора приведены на рисунке 2.27.

Математическая модель изгиба выполненной из поливинилхлорида опоры реализуется в программном обеспечении ЭУ. Данная модель была получена следующим образом.

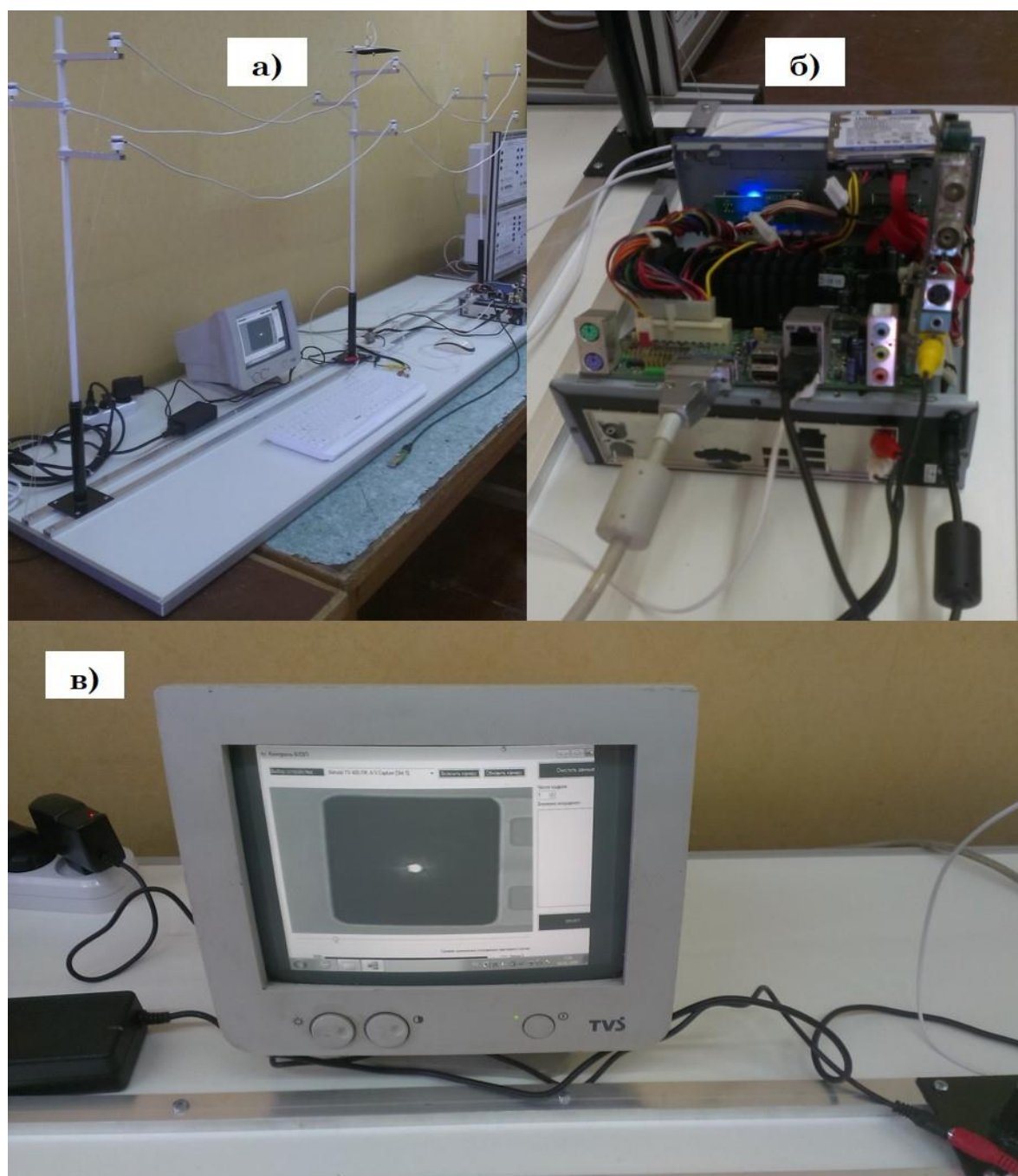


Рисунок 2.27 – Экспериментальная установка: внешний вид (а), блок обработки информации – компьютер с фрейм-граббером (б), монохромный монитор с изображением ТИС на экране (в)

Опора ЭУ (рисунок 2.28, а) представляет собой гибкий консольный стержень высотой h и жёсткостью поперечного сечения на изгиб EJ (где E – модуль упругости материала стержня, Па; J – геометрический момент инерции поперечного сечения стержня), нагруженный тремя идентичными силами G , имеющими не меняющийся в процессе деформации эксцентриситет $a_1=a_2=a_3=a$ и приложенными на высотах h_1, h_2, h_3 .

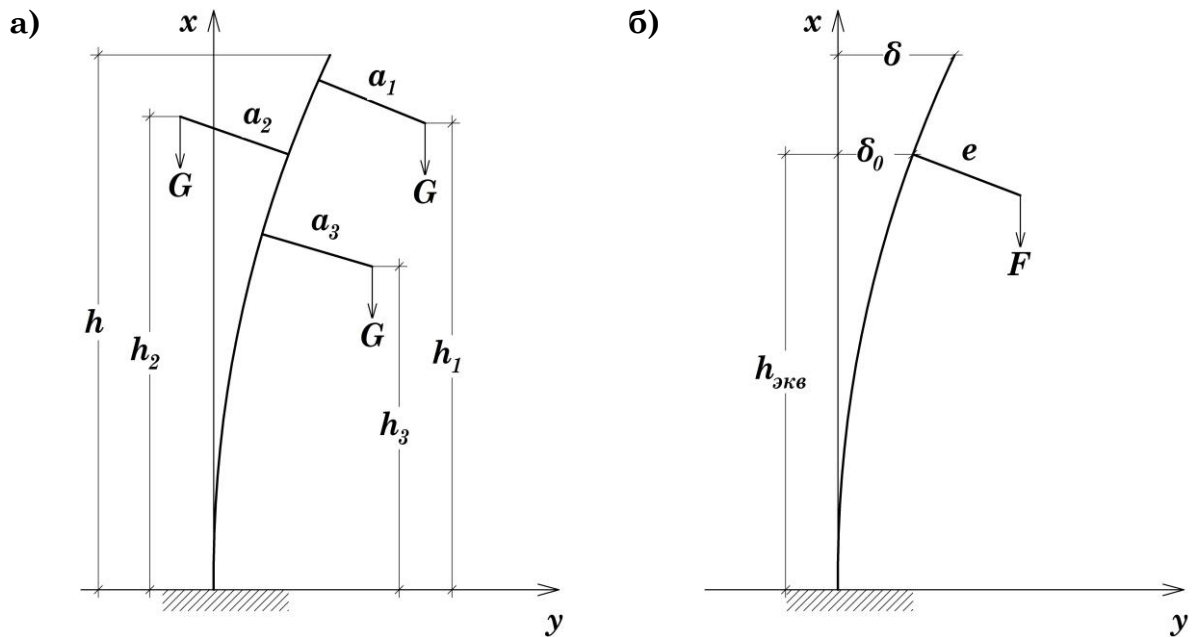


Рисунок 2.28 – Продольный изгиб гибкой опоры ЭУ

Заменим систему параллельных сил G равнодействующей $F=3G$ (рисунок 2.28, б), при этом высота точки приложения эквивалентной силы исходя из теоремы Вариньона будет определяться как

$$h_{\text{экв}} = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3}, \quad (2.36)$$

а эксцентриситет

$$e = \frac{a_1 - a_2 + a_3}{3}. \quad (2.37)$$

Обозначим через δ перемещение верхнего конца стержня (отклонение ТИС), а δ_0 – на уровне $h_{\text{экв}}$. Выражение для изгибающего момента в произвольном сечении стержня запишется в виде

$$M = F(\delta + e - \delta_0),$$

а дифференциальное уравнение прогибов стержня

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{F}{EJ}(\delta + e - \delta_0), \quad (2.38)$$

при этом геометрический момент инерции поперечного сечения стержня

$$J = \frac{1}{12}(\beta \cdot \alpha^3 - (\beta - \tau)(\alpha - \tau)^3),$$

где α, β – стороны прямоугольника в поперечном сечении опоры ЭУ, м; τ – толщина стенки опоры, м.

Введя обозначение $n^2 = F/EJ$, уравнение (2.38) можем представить в виде неоднородного дифференциального уравнения следующего вида [31]:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + n^2 y = n^2(\delta_0 + e). \quad (2.39)$$

Решение уравнения (2.39) записывается в виде суммы общего и частного решений:

$$y(x) = A \sin nx + B \cos nx + \delta_0 + e,$$

где A, B – постоянные, определяемые исходя из граничных условий $x=0, y=0$; $x=h_{\text{экв}}, y=\delta_0$. Используя данные граничные условия, находим

$$A=0, B = -(\delta_0 + e) = -\frac{e}{\cos nh_{\text{экв}}}.$$

Таким образом, с учётом равенств (2.36), (2.37) получим уравнение прогибов опоры экспериментальной установки:

$$y(x) = \frac{a_1 - a_2 + a_3}{3 \cos \left[\frac{1}{3} \sqrt{\frac{3G}{EJ}} (h_1 + h_2 + h_3) \right]} \left[1 - \cos \left(\sqrt{\frac{3G}{EJ}} x \right) \right]. \quad (2.40)$$

Линия прогибов опоры ЭУ в ходе эксперимента в момент приложения к проводам нагрузки $G=0,179$ Н изображена на рисунке 2.29.

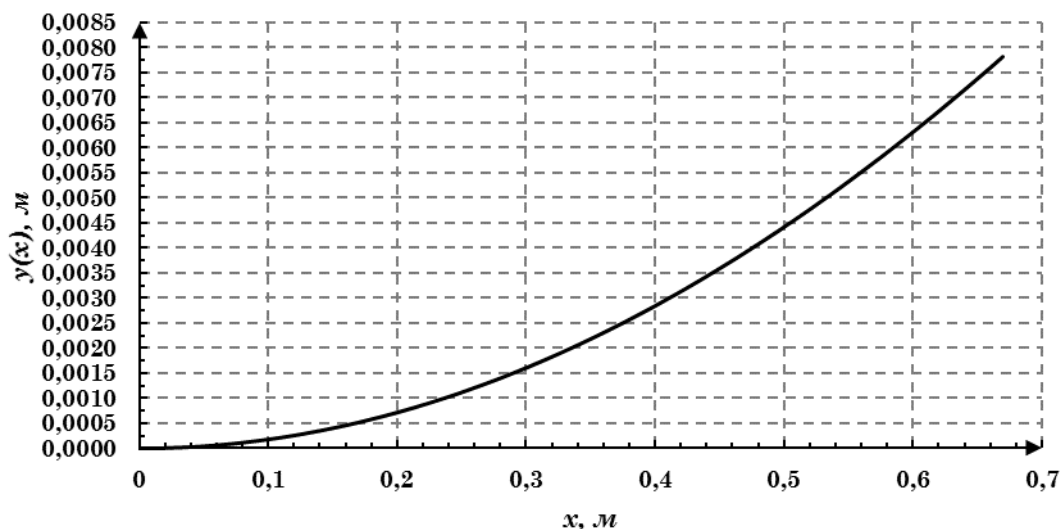


Рисунок 2.29 – График прогибов опоры ЭУ

Очевидно, что при $y=\delta$ и $x=h$ аналитическое решение уравнения (2.40) относительно искомого параметра G (веса, прикладываемого к каждому проводу ЭУ) практически невозможно. В связи с этим в программе ЭУ поиск значения G , соответствующего отклонению ТИС δ , осуществляется посредством итерационного приближения с задаваемой пользователем точностью Δ .

Отметим, что величина смещения ТИС определяется по завершении процесса успокоения опоры после её нагружения. Расчёт режима нагружения опоры ведётся с учётом собственного веса провода.

В результате проведённого опыта было установлено, что прикладываемая к каждому проводу нагрузка $G=0,179$ Н вызывает смещение ТИС $\delta=8$ мм. Найденное программно значение веса составило $G'=0,162$ Н, что соответствует погрешности 9,72 %. Данная погрешность связана с трудно учитываемым наличием продольных рёбер жёсткости в гибких опорах (изготовленных из кабель-каналов малого сечения), отличным от нулевого веса траверс, а также приводимым в справочниках ориентировочным значением модуля упругости поливинилхлорида.

Резюмируя всё вышесказанное, стоит отметить, что диагностика оледенения по прогибу опоры выгодно отличается тем, что подразумевает:

- полностью бесконтактные измерения;
- отсутствие подвешенного датчика температуры и оптической метки, закрепляемых на проводе;
- упрощённый монтаж компонентов измерительного поста, т.к. все его элементы размещаются на опоре.

Наряду с перечисленным данная методика по сравнению с диагностикой оледенения по провисанию провода имеет и ряд недостатков, к которым можно отнести:

- ограниченную применимость: пролёт ВЛЭП с одностоечными одноцепными «гибкими» опорами с несимметричным расположением фаз;
- необходимость очистки/обдува поверхности корпуса вертикально ориентированного видеоконтрольного устройства;
- более низкую точность измерений вследствие неравномерности распределения гололёда по фазам.

Выводы по главе 2

1. Очевидным проявлением гололёдообразования на ВЛЭП является увеличение провисания её проводов. Высокоточная видеофиксация положения оптической метки, закрепляемой на проводе, делает возможным мониторинг гололёдных отложений без применения тензометрических датчиков. Численная модель напряжённо-деформированного состояния провода предполагает её непосредственную алгоритмизацию с учётом предоставляемых измерительной системой исходных данных – координат провисания провода в точке, удалённой на известное расстояние от начала пролёта, а также температуры нагрева проводника. Полученный вычислительный алгоритм позволяет учитывать распределение веса отложений по длине провода в пролёте, а также разность высот точек

подвеса провода, например, в случае сложного рельефа местности или применения опор разной высоты.

2. Проведена оценка помехоустойчивости оптического канала измерений, в результате чего получено доказательство устойчивого функционирования системы видеофиксации положения провода при использовании стандартных CCTV-компонентов (ПЗС- или КМОП-камеры видеонаблюдения и прожектора подсветки) в сложных метеорологических условиях.

3. Из анализа искажения температурного поля провода гололёдными и снежно-изморозевыми отложениями следует, что возможно косвенное измерение температуры провода без применения соответствующего датчика. При этом отказ от установки оптической метки взамен более сложного алгоритма обработки видеоданных позволяет оставлять линейный провод «чистым», размещая всё измерительное оборудование на опоре ВЛЭП и реализуя тем самым исключительно бесконтактный мониторинг отложений.

4. Реализация бесконтактной (не требующей размещения каких-либо элементов на поверхности высоковольтного провода) измерительной системы для мониторинга отложений возможна посредством использования в качестве чувствительного к оледенению элемента самой опоры ВЛЭП. Прогибы опор, выполненных на «гибких» (композитных или стальных многогранных) стойках, позволяют судить о величине отложений на проводах путём точной видеофиксации перемещения вершины опоры, маркируемой соответствующим точечным световым индикатором.

3 АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПРОВОДАХ ЛИНИИ

3.1 Отклонение физико-механических характеристик провода

Одним из основных факторов, влияющих на точность выполняемых в ходе диагностики оледенения измерений, является отклонение значений физико-механических характеристик провода от нормативных. Так, как показано выше, вес гололёда согласно формуле (2.22) можно представить в виде функции двух переменных $G_{\text{ГМ}}=F(E, \alpha)$. Значения модуля упругости E и температурного коэффициента линейного удлинения α не являются постоянными ввиду деградации материала провода при его старении, коррозии, возникновения поверхностных дефектов (обрывов и расплетений проволок проводящего повива) и наличия остаточных деформаций, вызванных многочисленными циклами нагружения-разгружения провода при его долговременной эксплуатации – всё перечисленное вкуче приводит к уменьшению величины E и увеличению α [23].

Для оценки погрешности $\Delta G_{\text{ГМ}}$, вызванной отклонениями величин E, α от номинальных значений $E_{\text{НОМ}}, \alpha_{\text{НОМ}}$ используем стандартное выражение:

$$\Delta G_{\text{ГМ}} = \frac{\partial F}{\partial E} \Delta E + \frac{\partial F}{\partial \alpha} \Delta \alpha, \quad (3.1)$$

где $\Delta E = E_{\text{НОМ}} - E$, $\Delta \alpha = \alpha - \alpha_{\text{НОМ}}$.

В силу того, что

$$\frac{\partial F}{\partial E} = \frac{u \cdot l (L/L_{\text{и}} - \alpha_{\text{НОМ}} (t - t_{\text{и}}) - 1)}{\sqrt{l^2 + h^2}}, \quad \frac{\partial F}{\partial \alpha} = - \frac{u \cdot l \cdot E_{\text{НОМ}} (t - t_{\text{и}})}{\sqrt{l^2 + h^2}},$$

с учётом (3.1) находим

$$\Delta G_{\text{ГМ}} = \frac{u \cdot l}{\sqrt{l^2 + h^2}} \left[\Delta E (L/L_{\text{и}} - 1) - (t - t_{\text{и}}) (\alpha_{\text{НОМ}} \Delta E + E_{\text{НОМ}} \Delta \alpha) \right]. \quad (3.2)$$

Используя (3.2) и соотношение

$$\delta G_{\text{эм}} = \frac{\Delta G_{\text{ГМ}}}{G_{\text{ГМ}}} 100,$$

можем оценить относительную погрешность измерения веса гололёдных отложений, которая при $\Delta E/E_{\text{ном}}=10\%$, $\Delta\alpha/\alpha_{\text{ном}}=5\%$ для линии с известными параметрами (взятыми из приводимого в п. 2.1.1 примера) составит 10,3 %. Полученный результат свидетельствует о необходимости коррекции заданных характеристик проводов при использовании измерительной системы на линиях, находящихся в долговременной эксплуатации в том числе в условиях затяжного оледенения и длительного периода сброса гололёда.

Коррекция значения модуля упругости E может быть выполнена при условии сброса гололёдных отложений ($t > 0^\circ\text{C}$), а также равенства текущей температуры провода t и его температуры $t_{\text{и}}$ в момент предыдущей калибровки, т.е. при $\Delta t=0^\circ\text{C}$ и отсутствии приращения температурных деформаций ($\Delta\epsilon_t=0$). Тогда в соответствии с (2.17), а также в силу того, что деградация материала провода приводит к его растяжению, текущее значение длины провода в пролёте L_{true} (рассчитываемое по (2.7) на основе регистрируемого провиса провода) соотносится с предыдущим зафиксированным значением $L_{\text{err}}=L_{\text{и}}$ как

$$L_{\text{true}} = L_{\text{err}} (1 + \Delta\epsilon_y), \quad (3.3)$$

где приращение упругих деформаций

$$\Delta\epsilon_y = \frac{\sqrt{l^2 + h^2}}{l^2} \left(\frac{\sigma_{\text{err}}}{E_{\text{err}}} - \frac{\sigma_{\text{true}}}{E_{\text{true}}} \right) \quad (3.4)$$

с учётом (2.18), (2.19).

Таким образом, принимая во внимание выражение (2.16) и условие $G_{\text{ГМ}}=0$, объединяя (3.4) с (3.3), получим:

$$E_{true} = \frac{\sqrt{l^2 + h^2} G_{np}}{u \cdot l \left(1 + \frac{\sqrt{l^2 + h^2}}{l} \cdot \frac{\sigma_{err}}{E_{err}} - \frac{L_{true}}{L_{err}} \right)}. \quad (3.5)$$

Коррекция значения температурного коэффициента линейного удлинения α выполняется аналогичным образом: так, в силу отсутствия гололёдных отложений является справедливым равенство

$$L_{true} = L_{err} (1 + \Delta \varepsilon_t), \quad (3.6)$$

где приращение температурных деформаций

$$\Delta \varepsilon_t = \alpha_{true} t_{true} - \alpha_{err} t_{err}, \quad (3.7)$$

откуда, объединяя (3.7) с (3.6), можем выразить параметр α_{true} :

$$\alpha_{true} = \frac{1}{t_{true}} \left(\frac{L_{true}}{L_{err}} + \alpha_{err} t_{err} - 1 \right), \quad (3.8)$$

где t_{true} , t_{err} – температура провода при текущей и предыдущей калибровках соответственно.

Заметим, что получаемые с применением уравнений (3.5), (3.8) данные в рамках выполняемой с заданной дискретностью коррекции физико-механических характеристик провода также могут являться одним из формальных критериев оценки технического состояния ВЛЭП.

3.2 Прогиб стоек «гибких» опор

На сегодняшний день согласно предписаниям Федеральной сетевой компании [74] для строительства новых и модернизации существующих ВЛЭП рекомендуется использовать современную номенклатуру линейных опор, включающую в себя, в первую очередь, многогранные стальные и композитные опоры. Помимо целого ряда преимуществ (высокая механическая прочность, долговечность, простота монтажа и т.д.), опоры

данного типа обладают повышенной гибкостью по сравнению с классическими конструкциями стальных и железобетонных опор [40].

Нетрудно убедиться, что прогиб гибкой стойки опоры под действием ветра и соответствующий поворот траверсы на некоторый угол θ приводит к искажению фиксируемого ВКУ (рисунок 3.1) значения провисания f , т.к.

$$f_{err} = f \pm \Delta H, \quad (3.9)$$

где ΔH – изменение высоты подвеса провода при изгибе опоры, м.

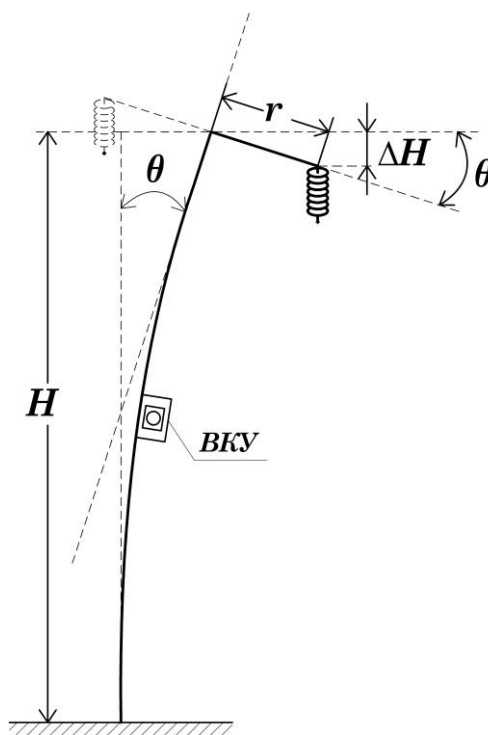


Рисунок 3.1 – Смещение точки подвеса провода при деформации опоры

Как видно, в данном случае увеличение или уменьшение стрелы провеса до значения f_{err} не связано с возрастанием гололёдной массы и объясняется лишь прогибом опоры, являющимся, таким образом, источником методической погрешности.

Для оценки влияния прогибов на величину погрешности видеоизмерений необходимо получить уравнение упругой линии стойки, находящейся под воздействием горизонтальных (ветровых) и вертикальных (весовых) нагрузок.

Рассмотрим опору с треугольным расположением фаз и тросостойкой (рисунок 3.2, а). Выполним расчёт с учётом распределённой ветровой нагрузки на опору, для чего представим её стойку в виде совокупности из n цилиндров (рисунок 3.2, б) высотой

$$\Delta h = \frac{H}{n},$$

где H – высота надземной части опоры, м.

Ввиду того, что промежуточная опора имеет стойку конической формы, диаметр $d(x)$ её сечения определяется функцией

$$d(x) = d_1 \frac{x}{H} + d_0 \left(1 - \frac{x}{H} \right), \quad (3.10)$$

где d_0 – диаметр стойки у основания её надземной части, м; d_1 – диаметр стойки у её вершины, м.

По аналогии с известными, например, из [41] выражениями нагрузка от давления ветра $P_{опi}$, сосредоточенная в середине каждого i -го цилиндра (рисунок 3.2, б) на уровне $x = i \cdot \Delta h - 0,5\Delta h$, составит:

$$P_{опi} = \alpha \cdot W \cdot d(i \cdot \Delta h - 0,5\Delta h) \cdot \Delta h, \quad (3.11)$$

где α – коэффициент неравномерности скоростного напора ветра, вычисляемый по формуле, полученной посредством аппроксимации табличных данных, приводимых в [41]:

$$\alpha = -1,121 \cdot 10^{-6} W^3 + 3,108 \cdot 10^{-4} W^2 - 2,854 \cdot 10^{-2} W + 1,566, \quad (3.12)$$

при этом входящая в (3.11), (3.12) переменная W – величина ветрового давления, Па [9]:

$$W = \frac{v^2}{1,6},$$

где v – скорость ветра, м/с.

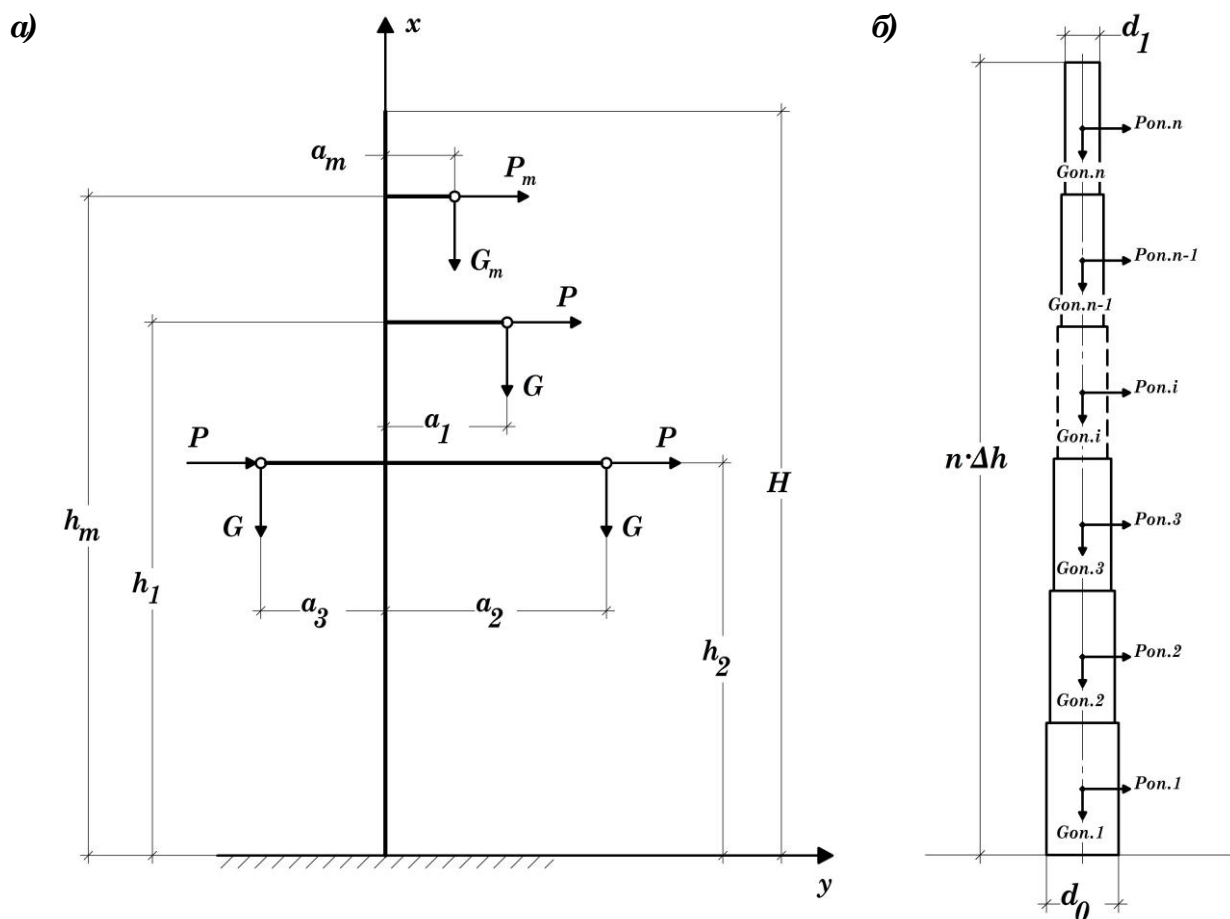


Рисунок 3.2 – Схема деформации одностоечной опоры сосредоточенным (а) и распределённым (б) воздействием

Горизонтальную силу P , вызванную ветровым воздействием на провод, можем найти следующим образом [9]:

$$P = \alpha \cdot C_x \cdot W \cdot (d + 2b) \cdot l \cdot 10^{-3}, \quad (3.13)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления, принимаемый равным 1,8 для проводов и тросов, покрытых гололёдом [3]; d – диаметр провода, мм; b – толщина стенки гололёдной муфты, мм; l – длина пролёта, м.

Вертикальную весовую нагрузку на провод G определим как

$$G = (G_{\text{пр}} + G_{\text{гм}}) \cdot l, \quad (3.14)$$

где $G_{\text{пр}}$, $G_{\text{гм}}$ – удельный вес провода и погонный вес гололёдной муфты соответственно, Н/м.

Для расчёта ветровой P_T и весовой G_T нагрузок на грозозащитный трос используются выражения, аналогичные (3.13), (3.14).

С учётом изображённой на рисунке 3.2 схемы деформации одностоечной опоры можем записать уравнение изгибающего момента в произвольном сечении x опоры:

$$M(x) = P(h_1 + 2h_2 - 3x) + G(a_1 + a_2 - a_3) + P_T(h_T - x) + G_T a_T + \sum_{i=1}^n [P_{опi}(i \cdot \Delta h - x)] \quad (3.15)$$

Сечение полый многогранной опоры представляет собой N -гранное кольцо шириной $d(x)$ и толщиной δ , геометрический момент инерции которого вычисляется при помощи формулы [75]

$$J(x) = \frac{N}{24} \cdot \delta \cdot (d(x) - \delta)^3 \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{N} \cdot \left(\operatorname{tg}^2 \frac{\pi}{N} + 3 \right). \quad (3.16)$$

Уравнение упругой линии стойки (выражаясь в терминах строительной механики – консольной балки) представляет собой выражение [12]

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{E \cdot J(x)}, \quad (3.17)$$

где E – модуль упругости материала опоры, Па.

Поиск аналитического решения $y(x)$ ввиду сложности уравнений (3.15), (3.16) и переменного сечения стойки опоры по (3.10) практически невозможен, в связи с чем обоснованным выглядит использование численных методов решения, наиболее распространённым из которых является метод Рунге-Кутты 4-го порядка [8].

Таким образом, задача сводится к поиску приближённых значений $y_i \approx y(x_i)$ на сетке $\{x_i\} \in [0, H]$, где $i = \overline{0, m}$, с учётом начальных условий $y(0)=0, y'(0)=0$.

Применение вычислительной техники позволяет компенсировать ограниченную точность численных методов более частым разбиением сетки решения (к примеру, задавая $m=1000$).

Кроме того, следует принимать во внимание наличие продольного изгиба от веса опоры, распределённого по её высоте, в связи с чем значение прогиба в точке $x=x_i$ с учётом найденного значения отклонения y_{0i} от действия изгибающего момента, вычисляемого по (3.15), будет определяться по формуле [12]:

$$y_i = \frac{y_{0i}}{1 - \frac{G_{\text{прив}}}{P_{\text{э}i}}}, \quad (3.18)$$

где $G_{\text{прив}}$ – приведённая к отметке верхнего сечения стойки сосредоточенная вертикальная сила, значение которой по аналогии с выражениями из [25], можем найти следующим образом:

$$G_{\text{прив}} = \sum_{i=1}^n G_{\text{оп}i} \frac{y_{1i}}{y_{1n}} \frac{h_T}{h_i}, \quad (3.19)$$

где $G_{\text{оп}i}$ – i -я вертикальная нагрузка, приложенная на высоте $h_i = i\Delta h - 0,5\Delta h$, Н; y_{1i} – прогиб стойки на отметке h_i от приложения единичной горизонтальной силы на отметке h_T , м; y_{1n} – прогиб стойки на отметке h_T от приложения единичной горизонтальной силы на этой же отметке, м; h_T – высота расположения грозозащитного троса (отметка верхнего сечения стойки), м. При этом считая, что суммарный вес опоры $G_{\text{оп.сум}}$ распределяется по её высоте равномерно, т.е.

$$G_{\text{оп}i} = \frac{G_{\text{оп.сум}}}{n},$$

выражение (3.19) можем записать в виде

$$G_{\text{прив}} = \frac{G_{\text{оп.сум}}}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_{1i}}{y_{1n}} \frac{h_{\text{т}}}{i\Delta h - 0,5\Delta h}. \quad (3.20)$$

Входящая в (3.18) величина $P_{\text{э}i}$ – эйлерова сила, вычисляемая по формуле [12]:

$$P_{\text{э}i} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J(x_i)}{(\mu \cdot x_i)^2}, \quad (3.21)$$

где μ – коэффициент приведения длины, зависящий от типа опорных закреплений балки (т.к. один конец балки глухо закреплён, а другой свободен, $\mu=2$).

Прогиб опоры $y_1(x)$ от приложения единичной горизонтальной силы может быть найден посредством решения уравнения (3.17), записанного в виде

$$\frac{d^2 y_1}{dx^2} = \frac{24H^3(i\Delta h - 0,5h - x)}{EN\delta(d_1x + d_0(H - x) - \delta H)^3 \operatorname{tg}(\pi/N)(\operatorname{tg}^2(\pi/N) + 3)}$$

с учётом (3.16). Найденное аналитическое решение данного уравнения выглядит следующим образом:

$$y_1(x) = \frac{A}{u_2^2} \left[\frac{u_1}{2(x \cdot u_2 + u_3)} + \frac{1}{u_2} \left(\frac{u_3}{x \cdot u_2 + u_3} + \lg(x \cdot u_2 + u_3) \right) \right] + C_1 x + C_2, \quad (3.22)$$

где

$$A = \frac{24H^3}{E \cdot N \cdot \delta \cdot \operatorname{tg}(\pi/N)(\operatorname{tg}^2(\pi/N) + 3)},$$

$$u_1 = i\Delta h - 0,5\Delta h, \quad u_2 = d_1 - d_0, \quad u_3 = H(d_0 - \delta),$$

$$C_1 = \frac{A}{2} \frac{u_1 u_2 - u_3}{(u_2 u_3)^2}, \quad C_2 = -A \left(\frac{u_1}{2u_3 u_2^2} + \frac{3H + 2 \lg u_3}{2u_2^3} \right).$$

Заметим, что выражения (3.16) наряду с (3.22) с достаточной точностью применимы и для расчёта композитных опор круглого сечения, например, при $N=100$ и более.

Возникновение прогибов опоры под внешним воздействием приводит к смещению точек приложения вертикальных нагрузок (рисунок 3.3) и появлению дополнительного изгибающего момента [26]:

$$\Delta M = G[y(h_1) + 2y(h_2)] + G_T \cdot y(h_T) + \sum_{i=1}^n G_{\text{оп}i} \cdot y(i\Delta h - 0,5\Delta h). \quad (3.23)$$

Таким образом, решение уравнения (3.16) с учётом (3.15), а также последующий пересчёт по (3.18), используя (3.19)-(3.22), позволяет получить лишь первое приближение к изгибу опоры. В дальнейшем решение уравнения (3.16) с поправкой на изменение изгибающего момента по (3.23) необходимо повторять вплоть до достижения заранее заданной точности ε . Как показали вычисления, выполненные в среде Mathcad, итерационный процесс расчёта прогибов опоры является быстро сходящимся: так, для достижения точности $\varepsilon=0,001$ м достаточно 5 итераций.

На рисунке 3.4 изображены графики прогибов многогранной опоры ПМ110-1 ($E=200$ ГПа) и композитной опоры ПК110-1 ($E=25$ ГПа) по высоте при наличии на проводе АС-150/24 гололёдной муфты толщиной 30 мм (V район по гололёду), равномерно распределённой по пролёту длиной 200 м, и ветровом давлении 800 Па (IV район по ветру).

Угол поворота траверсы θ (рисунок 3.1) при изгибе опоры равен углу наклона касательной к линии прогиба стойки, проведённой в точке крепления траверсы к опоре. При этом, как оговаривалось ранее, в силу крайне малого шага разбиения сетки решения ($\Delta x = H / m$ при $m \geq 1000$) с достаточной точностью можно утверждать, что

$$\text{tg}\theta = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y_m}{\Delta x} \approx \frac{\Delta y_m}{\Delta h}, \quad (3.24)$$

где $\Delta y_m = y_m - y_{m-1}$.

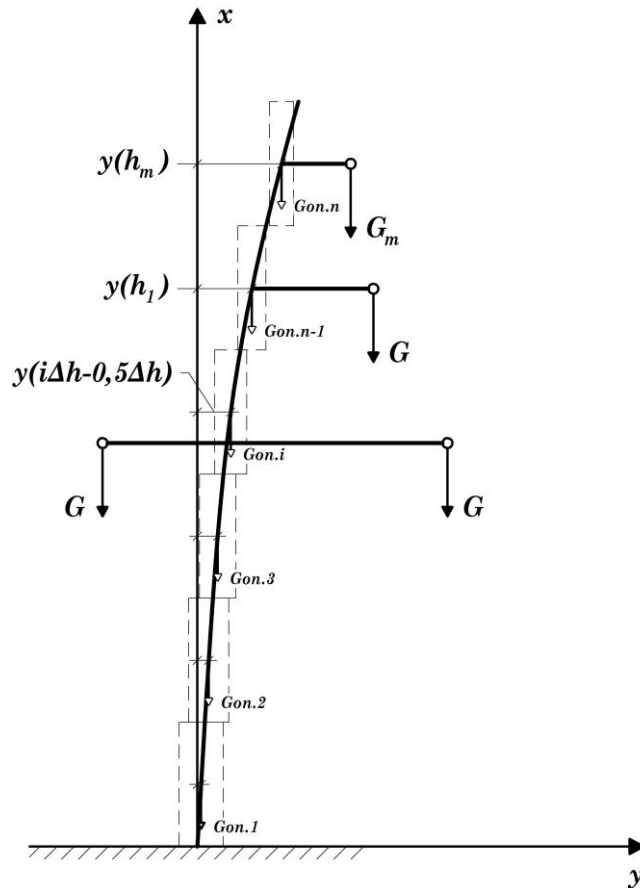


Рисунок 3.3 – Смещение точек приложения весовых нагрузок при изгибе опоры

Таким образом, с учётом (3.24) изменение стрелы провеса при повороте траверсы составит

$$\Delta H = r \frac{\Delta y_m}{\Delta h}, \quad (3.25)$$

где r – вылет провода, м (равный длине траверс a_1, a_2, a_3).

Выбирая в качестве исходных данные, приводимые в примере из п. 2.1.1, используя (3.24), (3.25) и (3.9), получим, что при организации мониторинга оледенения по фазе С (провод которой подвешивается на низшем ярусе опоры и с наименьшим вылетом) прогиб многогранной опоры приводит к искажению стрелы провеса провода на 1,11 %, а композитной – 4,73 %. Выполняя расчёты оледенения провода по (2.22), (2.23) с учётом искажённого значения провисания, можем прийти к заключению о том, что

прогиб многогранной опоры приводит к погрешности вычисления гололёдной массы $\delta G_{\text{ГМ}}=6,88\%$, а толщины стенки гололёдной муфты $\delta b=4,41\%$, при этом для заведомо более гибкой композитной опоры аналогичные показатели составят 28,05 % и 19,02 % соответственно.

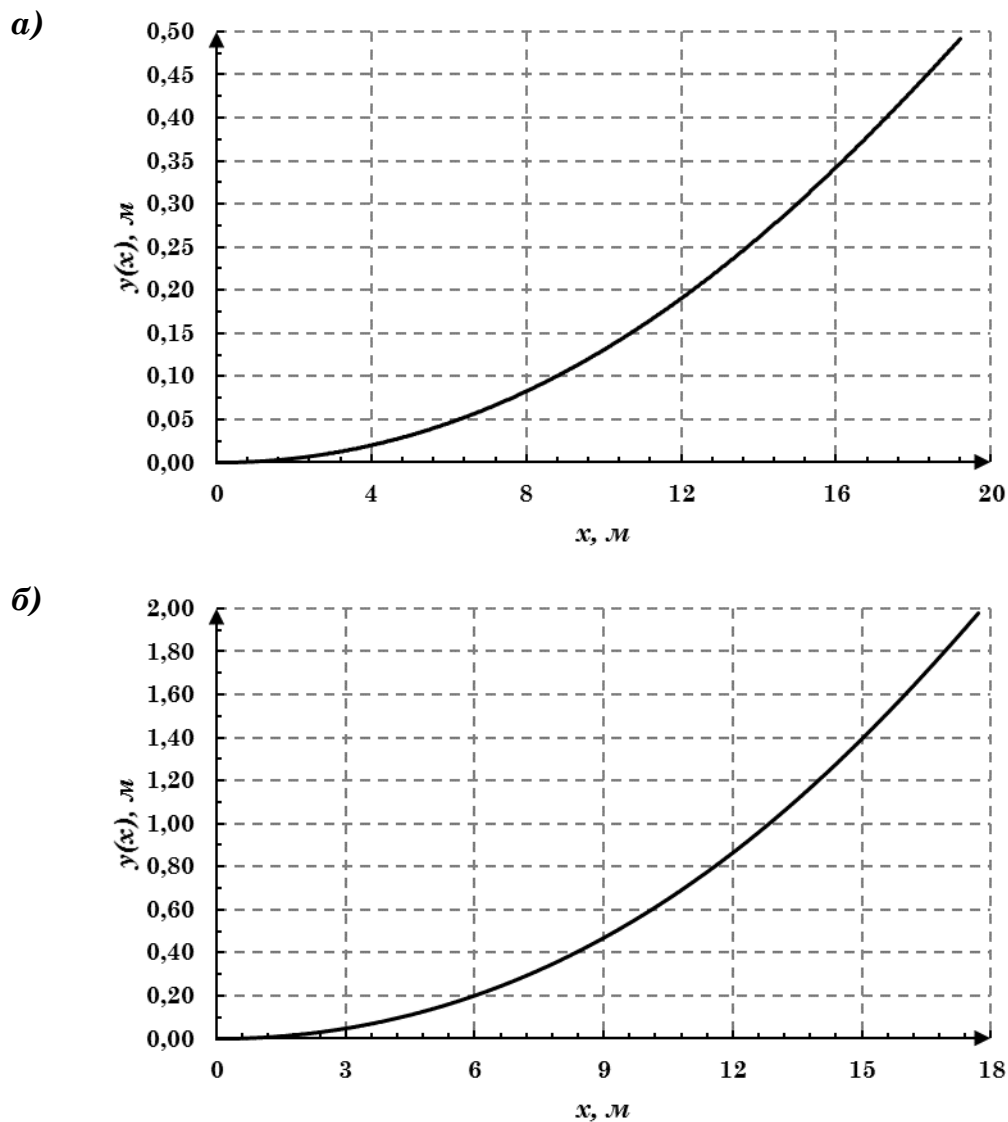


Рисунок 3.4 – График прогибов гибкой опоры: ПМ110-1 (а), ПК110-1 (б)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при диагностике оледенения проводов, подвешенных к гибким опорам, параметры их прогиба (угол поворота траверсы θ , расположенной на высоте h , или соответствующее отклонение $z = y(h)$ от нормали к основанию опоры) под действием ветра и гололёда также должны измеряться с целью коррекции величины фиксируемого ВКУ провисания провода.

Варьируя значения действующих на опору механических нагрузок, были получены графические зависимости величины смещения ΔH точки подвеса провода от величин θ и z (рисунки 3.5, 3.6 соответственно).

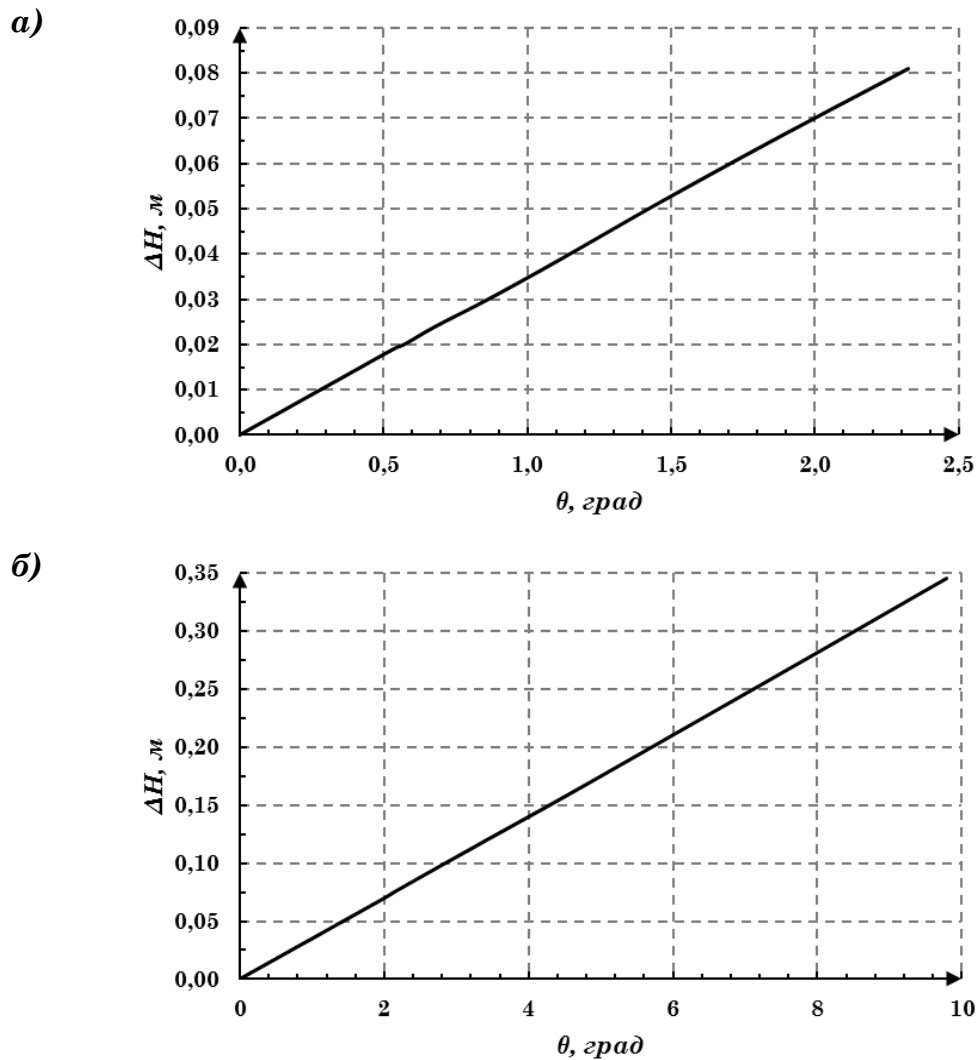


Рисунок 3.5 – Зависимость смещения точки подвеса провода от угла поворота траверсы: ПМ110-1 (а), ПК110-1 (б)

Данные зависимости с высокой степенью точности (коэффициент достоверности $R^2=0,999$) аппроксимируются полиномами 2-й (зависимость смещения точки подвеса провода от угла поворота траверсы) и 4-й (зависимость смещения точки подвеса провода от величины прогиба) степеней:

– для многогранной опоры

$$\Delta H(\theta) = -1,381 \cdot 10^{-4} \theta^2 + 3,525 \cdot 10^{-2} \theta - 3,289 \cdot 10^{-5}, \quad (3.26)$$

$$\Delta H(z) = -8,351z^4 + 5,730z^3 - 1,373z^2 + 3,929 \cdot 10^{-1}z + 4,084 \cdot 10^{-5}, \quad (3.27)$$

– для композитной опоры

$$\Delta H(\theta) = 5,039 \cdot 10^{-5}\theta^2 + 3,475 \cdot 10^{-2}\theta + 1,745 \cdot 10^{-4}, \quad (3.28)$$

$$\Delta H(z) = -2,146 \cdot 10^{-1}z^4 + 5,325 \cdot 10^{-1}z^3 - 4,504 \cdot 10^{-1}z^2 + 4,585 \cdot 10^{-1}z + 1,825 \cdot 10^{-4}. \quad (3.29)$$

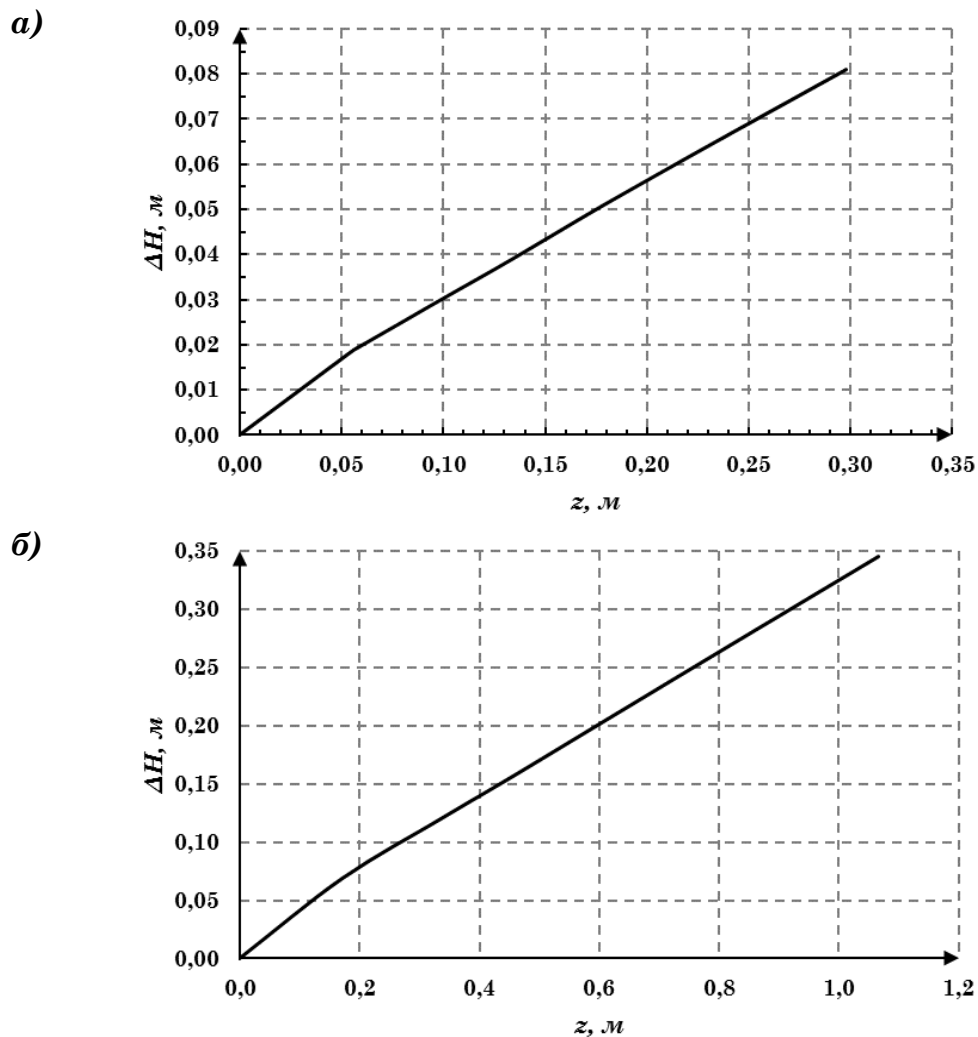


Рисунок 3.6 – Зависимость смещения точки подвеса провода от величины прогиба: ПМ110-1 (а), ПК110-1 (б)

Таким образом, указанные выше выражения (3.26), (3.28), а также (3.27), (3.29) делают возможным выполнение расчёта смещения точки подвеса провода двумя методами: регистрируя данные об угле поворота траверсы или измеряя прогиб опоры.

Согласно первому способу, в качестве датчика текущего наклона траверсы предлагается использовать цифровой инклинометр (разрешением $0,001^\circ$), устанавливаемый в точке крепления траверсы к опоре (рисунок 3.7).

Измерение прогиба опоры (рисунок 3.8) может осуществляться посредством размещения на опоре визирной цели 1 в виде точечного источника света (ТИС), а также вспомогательного ВКУ 2, монтируемого у основания опоры для мониторинга отклонения ТИС при её прогибе.

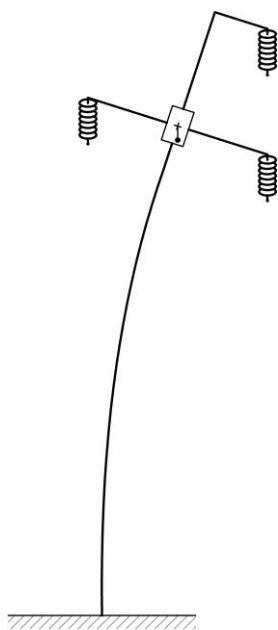


Рисунок 3.7 – Устройство для контроля поворота траверсы гибкой опоры

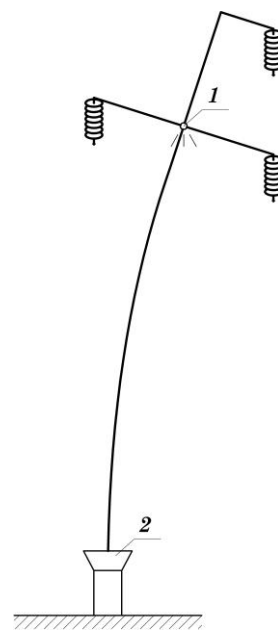


Рисунок 3.8 – Устройство для контроля прогибов гибкой опоры

Выводы по главе 3

1. Отклонение значений модуля упругости и коэффициента удлинения провода способно привести к существенной погрешности при измерениях веса гололёдно-изморозевых отложений исходя из клиренса промежуточного пролёта. Повторяющиеся циклы нагружения (формирования муфт отложений) и разгрузки (как долговременного в процессе таяния, так и быстротечного при сбросе гололёда) приводят к постепенному накоплению остаточных деформаций и, как следствие, деградации материала провода, девиации его характеристик. В связи с этим

требуется коррекция указанных параметров в соответствии с предложенным вычислительным алгоритмом.

2. Выполняемая с заданной дискретностью процедура коррекции физико-механических характеристик провода может являться одним из формальных критериев оценки технического состояния ВЛЭП.

3. Помимо изменения физико-механических характеристик материала провода при его деградации, основным источником погрешности видеоизмерений являются прогибы «гибких» (композитных или стальных многогранных) опор. Для коррекции данной погрешности могут использоваться вспомогательные средства измерений, такие как дополнительная видеокамера вкупе с точечным источником света у вершины опоры или инклинометр, закрепляемый на теле опоры.

4 ДИАГНОСТИКА ГОЛОЛЁДНЫХ АВАРИЙ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

4.1 Нейрокомпьютерная система прогнозирования и диагностики коротких замыканий

Как отмечалось в главе 1, мониторинг гололёдных отложений на проводах высоковольтных линий в совокупности с оперативной диагностикой аварийных режимов – обрывов проводов и последующим коротким замыканием – являются взаимосвязанными задачами на пути повышения надёжности электропередачи. Это объясняется не только очевидно более высоким уровнем аварийных отключений в гололёдный период, но и тем, что реальная воздушная линия отличается неравномерностью распределения своих параметров вдоль длины, а также изменчивостью их значений – как реакции на изменение геоклиматических условий и режима электропередачи. Иными словами, состояние ВЛЭП как объекта не является статическим, особенно в промежутки времени, сопровождающихся интенсивным, динамически изменяющимся климатическим воздействием. В связи с этим применение единожды заданных или задаваемых со значительной дискретностью по времени (например, величиной в несколько месяцев) параметров математической модели ВЛЭП является тем источником погрешности, который свойственен большинству из существующих устройств ОМП (см. главу 1).

Таким образом, более точная диагностика аварийных режимов требует размещения на линии датчиков метеорологических условий (толщины гололёдной муфты b , проводимости грунта γ), температуры t и провисания f провода с целью обновления математической модели ВЛЭП в режиме реального времени. Следуя этому условию, можно прийти к выводу о необходимости рассмотрения информационно-измерительной системы как совокупности находящихся в непрерывном синергетическом взаимодействии устройств (подсистем), предназначенных для контроля климатического

воздействия и диагностики аварийных режимов. При этом устройство распознавания коротких замыканий, являющееся компонентом подобной системы, должно поддерживать постоянную и своевременную «самонастройку» параметров своей работы (сообразно поступающей информации о текущем состоянии линии), т.е. являться адаптивным.

Для решения данной задачи органичным выглядит применение аппарата *искусственных нейронных сетей (ИНС)*. Как отмечает С. Хайкин в своих фундаментальных работах, посвящённых теории ИНС, нейросеть представляет собой «машину», моделирующую способ обработки мозгом какой-либо конкретной задачи [46]. Подобная сеть может реализовываться на аппаратном уровне – посредством специальных электронных компонентов, но чаще всего моделируется программой, написанной для ЭВМ. Для того, чтобы добиться высокой производительности, нейронные сети используют множество взаимосвязей между элементарными ячейками вычислений – *формальными нейронами*. Таким образом, как пишет С. Хайкин в [46], можно дать следующее определение нейронных сетей, выступающих в роли адаптивной машины: «Нейронная сеть – это громадный распределённый процессор, состоящий из элементарных единиц обработки информации, накапливающих экспериментальные знания и предоставляющие их для последующей обработки. Нейронная сеть сходна с биологическим мозгом с двух точек зрения – так, знания поступают в нейронную сеть из окружающей среды и используются в процессе обучения, при этом для накопления знаний применяются связи между нейронами, называемые *синаптическими весами*».

Как видно из рисунка 4.1, формальный нейрон состоит из взвешенного сумматора Σ и нелинейного элемента F . Нейрон оперирует множеством входных сигналов $x_1, x_2, \dots, x_n$, в совокупности составляющих вектор X . Каждый сигнал умножается на соответствующий синаптический вес $w_1, w_2, \dots, w_n$ (множество которых обозначается вектором W) и поступает на суммирующий блок Σ . Суммирующий блок складывает взвешенные входы алгебраически, создавая выход, сдвинутый на величину смещения w_0

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0,$$

который подаётся на вход блока, реализующего активационную функцию нейрона $F(S)$ с целью получения сигнала-отклика Y в виде результата отображения входной информации в выходную.

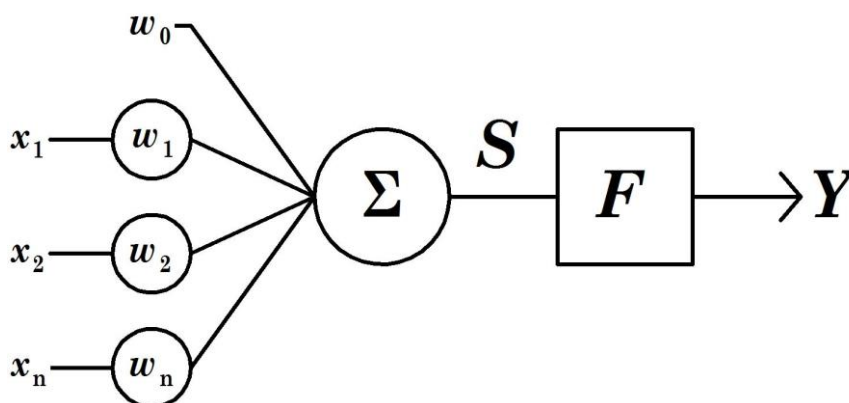


Рисунок 4.1 – Формальный нейрон

Очевидно, что свои уникальные возможности, такие как

- нелинейная аппроксимация многомерных функций,
- поиск закономерностей в исходных массивах данных,
- распознавание образов и т.д.

искусственные нейронные сети черпают из способности *обобщать*, т.е. получать обоснованный результат на основании данных, которые не встречались в процессе обучения. Как отмечается в [46], одной из популярных парадигм обучения ИНС является *обучение с учителем*. Этот процесс подразумевает изменение синаптических весов на основе набора маркированных учебных примеров («учебника»). Каждый пример состоит из набора X входных сигналов и соответствующего ему желаемого отклика Y . Поочерёдное рассмотрение каждого обучающего примера приводит к тому, что нейронная сеть модифицирует синаптические веса для минимизации расхождения между желаемым выходным и формируемым сетью сигналами. Следовательно, нейронная сеть с помощью обучающих примеров учится

правильному составлению таблицы соответствий вход-выход для конкретной задачи [46].

С учётом всего вышесказанного можно полагать, что использование ИНС позволит создать устройство, выполняющее непрерывный анализ данных о текущем состоянии линии с целью обучения максимально корректной на данный промежуток времени реакции на входные образы.

Синергетическое взаимодействие устройств, составляющих информационно-измерительную систему, отражает её структурная схема, изображённая на рисунке 4.2.

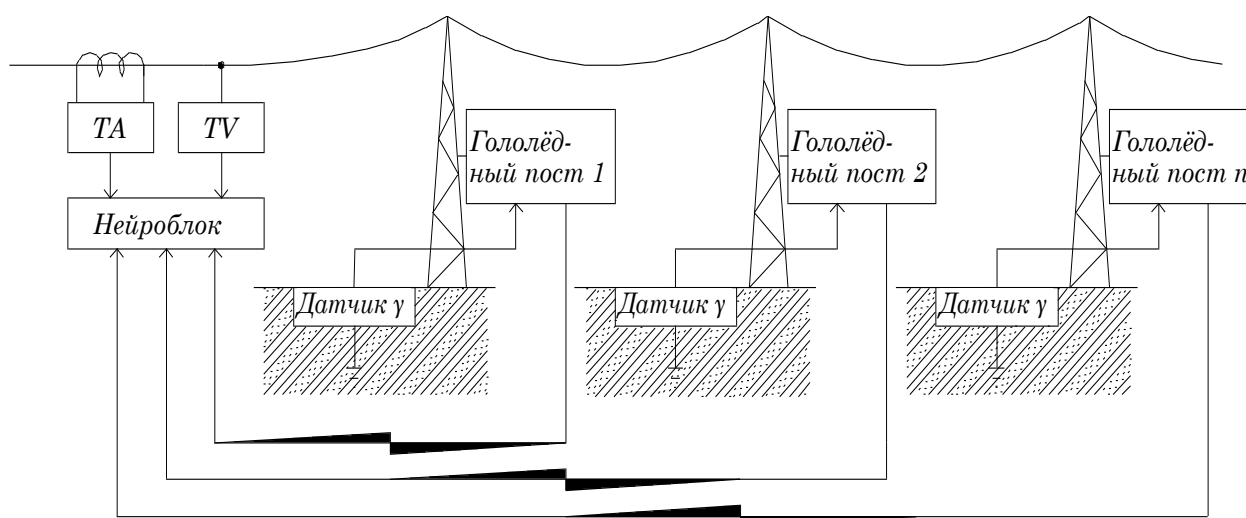


Рисунок 4.2 – Структурная схема информационно-измерительной системы

Как показано на данном рисунке, предлагаемая ИИС включает в себя совокупность элементов, необходимых для сбора информации о текущем состоянии линии (n гололёдных постов с возможностью измерения температуры t и провисания f провода, дополненные датчиками проводимости грунта γ), а также нейроблок обработки информации, подключаемый к измерительным цепям трансформаторов ТА и ТВ совместно с устройствами релейной защиты.

Главные функциональные части, составляющие структуру адаптивного устройства диагностики коротких замыканий, приведены на рисунке 4.3. На выходе измерительной преобразовательной части 1 и коммуникационного модуля 2 по совокупности соответственно входных токов $i(t)$, напряжений

$u(t)$, а также данных с измерительных постов, располагаемых на линии, формируется массив информации, характеризующий текущий режим работы электрической сети. Блок интеллектуального анализа данных 3 включает в себя модули подготовки исходных данных 4 и эмуляции нейронной сети 5, при этом 4 выполняет формирование обучающей выборки, содержащей актуальную информацию о состоянии линии, и переобучение нейронной сети. Блок ввода-вывода 6 осуществляет приём сигналов 3 и выдачу результатов анализа входных данных оператору сети, а источник оперативного тока 7 обеспечивает питание всех компонентов устройства.

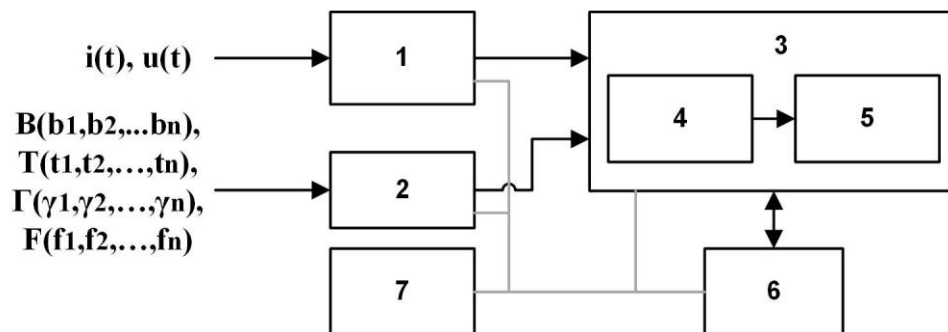


Рисунок 4.3 – Нейроблок обработки информации

Эмуляция среды нейрокомпьютера может осуществляться посредством ЭВМ с загруженной на исполнение управляющей программой. Структурно модуль эмуляции нейронной сети включает в себя два элемента, а именно нейросеть-классификатор и нейросеть-локатор.

Нейросеть-классификатор. Назначением нейронного классификатора аварий является выдача правильного заключения о принадлежности входного образа (вектора данных) к тому или иному классу (виду аварии). При этом вектор входных данных должен содержать 7 элементов: $U_A/U_{\text{ном}}$, $U_B/U_{\text{ном}}$, $U_C/U_{\text{ном}}$, $I_A/I_{\text{ном}}$, $I_B/I_{\text{ном}}$, $I_C/I_{\text{ном}}$, I_0 , где U_A , U_B , U_C , I_A , I_B , I_C – действующие значения напряжений и токов соответствующих фаз; $U_{\text{ном}}$, $I_{\text{ном}}$ – значения напряжения и тока линии до аварии; I_0 – логическая переменная, отражающая наличие ($I_0=1$) или отсутствие ($I_0=0$) тока нулевой последовательности. В силу того, что линии электропередачи напряжением

110 кВ и выше выполняются с эффективно заземленной нейтралью, присутствие в токах составляющих нулевой последовательности является индикатором замкнутого контура через землю, а их отсутствие – исключительно металлического характера короткого замыкания. Кодирование выходной информации о типе повреждения требует четырёх узлов (0000 – нет аварии, 0001 – однофазное замыкание A -> G, 0010 – B -> G, 0011 – C -> G, 0100 – A -> B, ..., 1011 – A -> B -> C -> G).

В ходе исследования данные для «учебных» и «тренировочных» выборок формировались посредством имитации КЗ (на расстоянии 10, 70, 130, 190, 250 км от источника питания) в Simulink-модели электрической сети напряжением 110 кВ (рисунок 4.4) и записи соответствующих осциллограмм (рисунок 4.5).

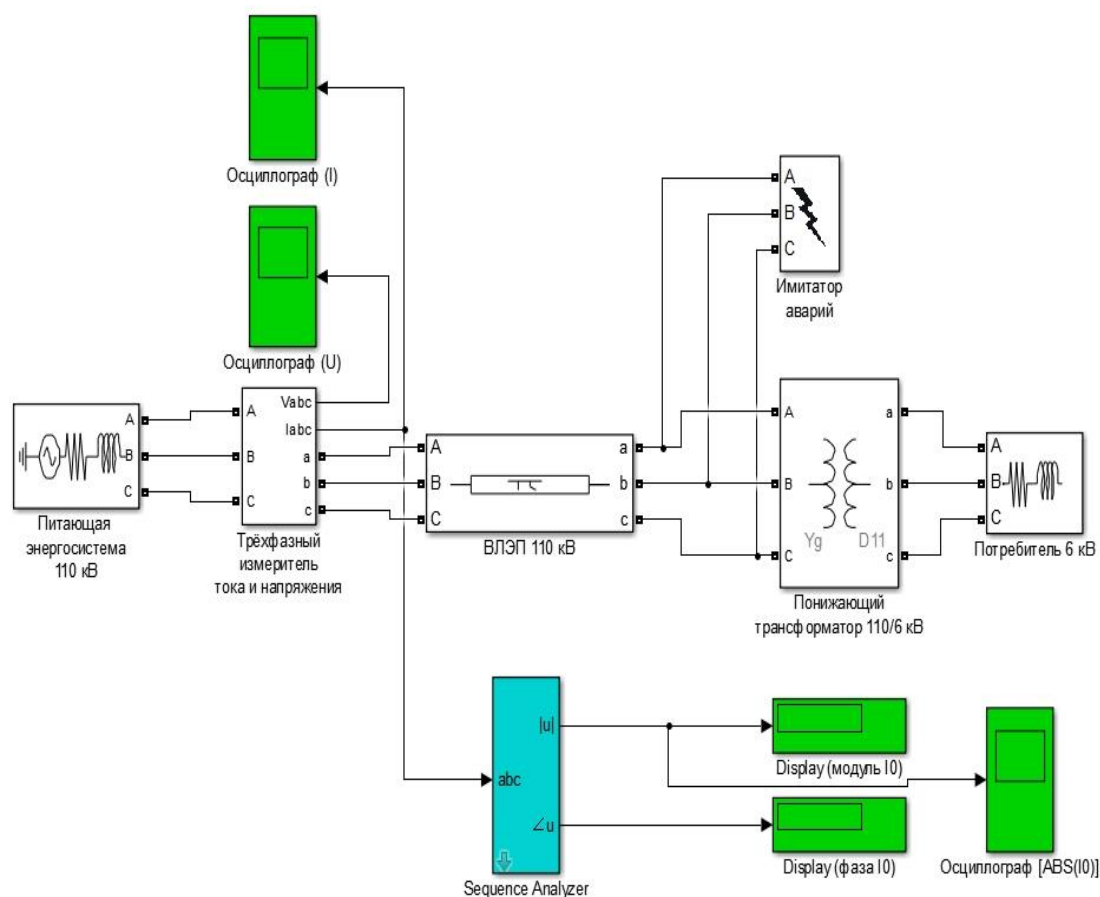


Рисунок 4.4 – Модель распределительной электрической сети 110 кВ

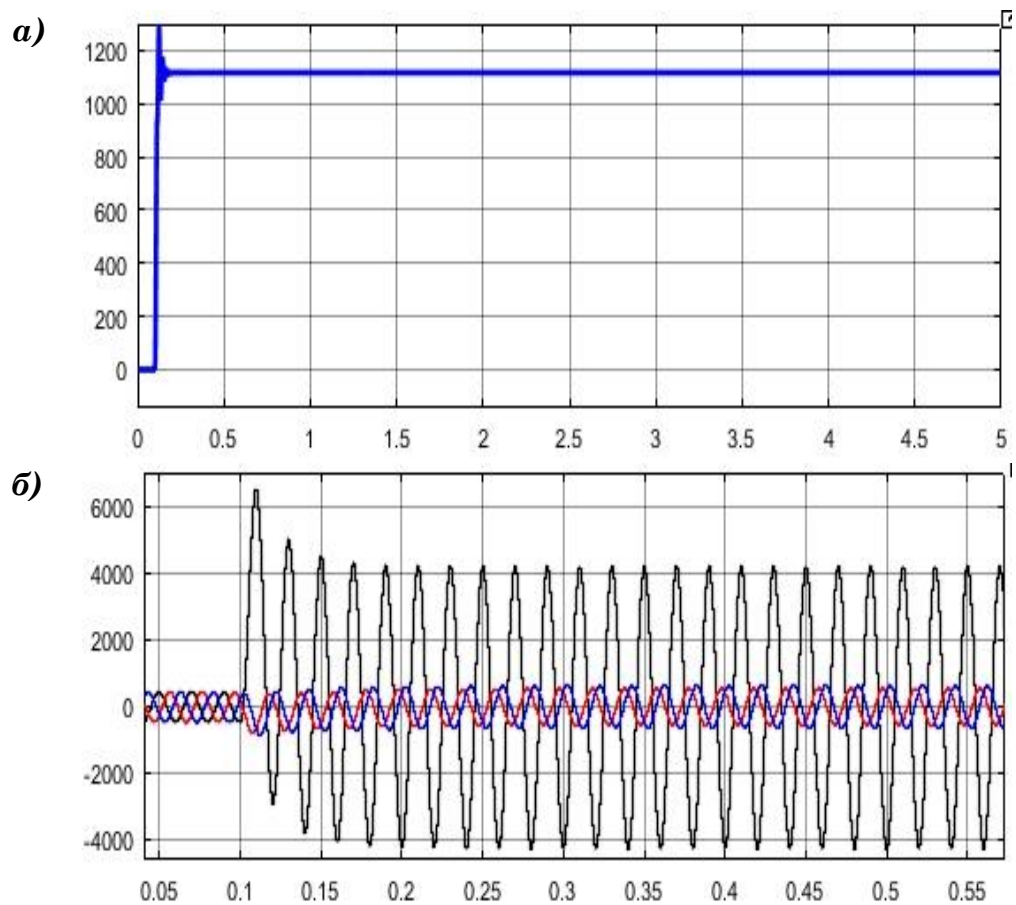


Рисунок 4.5 – Осцилограммы однофазного КЗ: тока I_0 (а), фазных токов (б)

«Учебник» для нейросети-классификатора может иметь приведённый в таблице 4.1 вид.

Таблица 4.1 – Учебная выборка данных для классификации типа аварий

Входной вектор							Выходной вектор				Тип КЗ
$\frac{U_A}{U_{\text{ном}}}$	$\frac{U_B}{U_{\text{ном}}}$	$\frac{U_C}{U_{\text{ном}}}$	$\frac{I_A}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{I_B}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{I_C}{I_{\text{ном}}}$	I_0	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	
0,990	0,990	0,990	1,011	1,011	1,011	0	0	0	0	0	-
0,275	0,965	0,954	10,709	1,388	1,607	1	0	0	0	1	А-Г
0,431	0,963	0,956	8,632	1,422	1,615	1	0	0	0	1	
0,532	0,963	0,959	7,279	1,439	1,606	1	0	0	0	1	
0,603	0,963	0,962	6,325	1,418	1,562	1	0	0	0	1	
0,656	0,964	0,965	5,610	1,401	1,526	1	0	0	0	1	
0,954	0,75	0,965	1,607	10,709	1,388	1	0	0	1	0	В-Г
0,956	0,431	0,963	1,615	8,632	1,422	1	0	0	1	0	
0,959	0,532	0,963	1,606	7,279	1,439	1	0	0	1	0	
0,962	0,603	0,963	1,562	6,325	1,418	1	0	0	1	0	
0,965	0,656	0,964	1,526	5,610	1,401	1	0	0	1	0	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Количество нейронов в n скрытых слоях сети (рисунок 4.6) определяется в соответствии с правилом «пирамиды» следующим образом [82]:

$$N_i = N_{\text{вых}} \cdot s^{i-1}, i = \overline{1, n},$$

где

$$s = \sqrt[n]{\frac{N_{\text{вх}}}{N_{\text{вых}}}}.$$

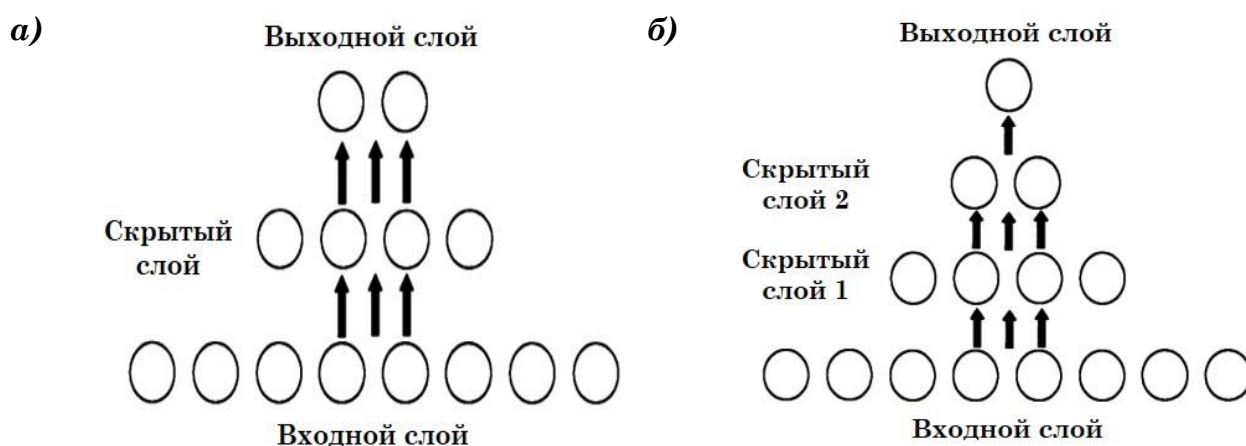


Рисунок 4.6 – Структура многослойной нейронной сети: трёхслойный персептрон (а), четырёхслойный персептрон (б)

С учётом данного эмпирического правила многослойный нейронный классификатор (рисунок 4.7) может иметь структуру 7-6-5-4 (2 скрытых слоя с 6-ю и 5-ю нейронами соответственно) или 7-5-4, при этом нейросеть с большим количеством слоёв обладает лучшей скоростью обучения (262 эпохи против 360).

Нейросеть-локатор. Функционирование нейронного локатора аварий требует обновления обучающей выборки (отвечающей текущему, фиксируемому датчиками состоянию линии) и переобучения. Отметим, что количество примеров, обучающих сеть распознаванию аварий на различных участках линии, должно иметь неравномерное распределение по её длине: так, число примеров, характеризующих аварии на участке линии с наиболее

интенсивным гололёдообразованием должно превышать количество примеров для участка с наименьшей вероятностью повреждения.

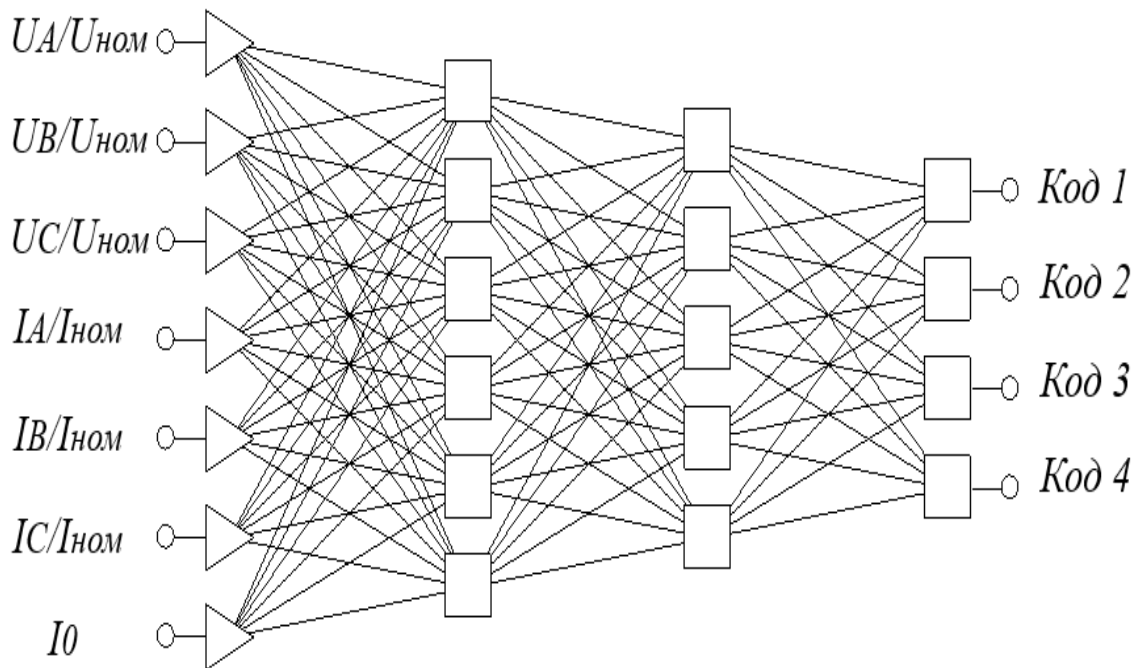


Рисунок 4.7 – Нейронный классификатор повреждений

Вероятность повреждения воздушной линии представляет собой вероятность того, что скорость ветра превысит некоторое критическое значение v_{max} , при котором механическое напряжение σ_{max} , соответствующее удельной нагрузке γ_{max} на провод при текущей толщине гололёдной муфты b

$$\gamma_{max} = \frac{v_{max}^2 \cdot C_x (d + 2b)}{1,6F} \sin \bar{\varphi},$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления провода, покрытого гололёдом, d – диаметр провода, $\bar{\varphi}$ – среднее за текущий период времени значение угла между направлением ветра и осью ВЛЭП, превысит предел прочности на растяжение.

Как известно из [18], в теории метеорологии вероятность того, что скорость ветра превысит некоторое значение v_{max} , определяется в соответствии с двухпараметрическим распределением Вейбулла:

$$P(v_{max}) = e^{-\left(\frac{v_{max}}{\beta}\right)^{\alpha}}, \quad (4.1)$$

где α и β – параметры функции распределения, при этом α вычисляется посредством эмпирической формулы Л.Б. Гарцмана [18]

$$\alpha = C_v^{-1,069}, \quad (4.2)$$

где C_v – коэффициент вариации скоростей ветра, а для нахождения β применяется уравнение [18]

$$\beta = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}, \quad (4.3)$$

где $\bar{v}$ – средняя скорость ветра за рассматриваемый период времени, $\Gamma(1+1/\alpha)$ – значение гамма-функции.

Таким образом, выражения (4.1)-(4.3) позволяют рассчитать вероятность обрыва провода P_i на каждом i -м участке линии, заключённом между измерительными постами (см. рисунок 4.2), с учётом текущих параметров климатического воздействия, а именно ветрового давления и толщины гололёдной муфты.

Подбор наиболее рациональной корреляционной зависимости между вероятностью аварии P_i и количеством примеров k_i , «обучающих» нейросеть нахождению места повреждения на i -м участке линии ($i = \overline{1, n}$), может осуществляться эмпирически путём выбора полуширины c колокола гауссианы $g(P)$ следующим образом:

$$k_i = \frac{K \cdot g(P_i)}{\sum_{j=1}^n g(P_j)}, \quad (4.4)$$

при этом K – общее количество «обучающих» примеров, а

$$g(P_i) = a \cdot e^{-\frac{(P_i - P_{max})^2}{2c^2}}, \quad (4.5)$$

или, объединяя (4.4) и (4.5),

$$k_i = \frac{K \cdot e^{-\frac{(P_i - P_{max})^2}{2c^2}}}{\sum_{j=1}^n e^{-\frac{(P_j - P_{max})^2}{2c^2}}}, \quad (4.6)$$

где P_{max} – максимально зафиксированная вероятность повреждения линии.

Удобство применения функции Гаусса для оценки распределения обучающих примеров по участкам воздушной линии с учётом вероятности их повреждаемости проиллюстрируем наглядным примером.

Пусть для «обучения» нейросети определению мест повреждений на ВЛЭП формируется «учебник» из 40 обучающих примеров, при этом согласно текущим данным, поступающим от измерительных постов, вероятность аварий, исходя из зонирования линии на 6 участков, составляет соответственно 15, 26, 40, 75, 34 и 28 % соответственно. Тогда, как видно из графиков, приведённых на рисунке 4.8, при $c = 38$ количество «обучающих» примеров, приходящихся на каждый участок ВЛЭП, практически прямо пропорционально вероятности аварии, при $c = 26$ данная зависимость близка к квадратичной, а при $c = 1000$ ($c \rightarrow \infty$) количество примеров инвариантно вероятности повреждения.

Следовательно, применение уравнения (4.6) путём вариации переменной c позволяет задавать любой характер корреляции между вероятностью аварии и количеством примеров в «учебнике» нейросети, включая полную инвариантность данных величин.

Таблица 4.2 – Параметры «обучаемости» многослойной нейросети различной структуры

Кол-во скрытых слоёв	Структура	Кол-во эпох «обучения»
0	6-1	∞
1	6-3-1	1865
2	6-3-2-1	1593
3	6-4-3-2-1	138
4	6-5-4-3-2-1	428

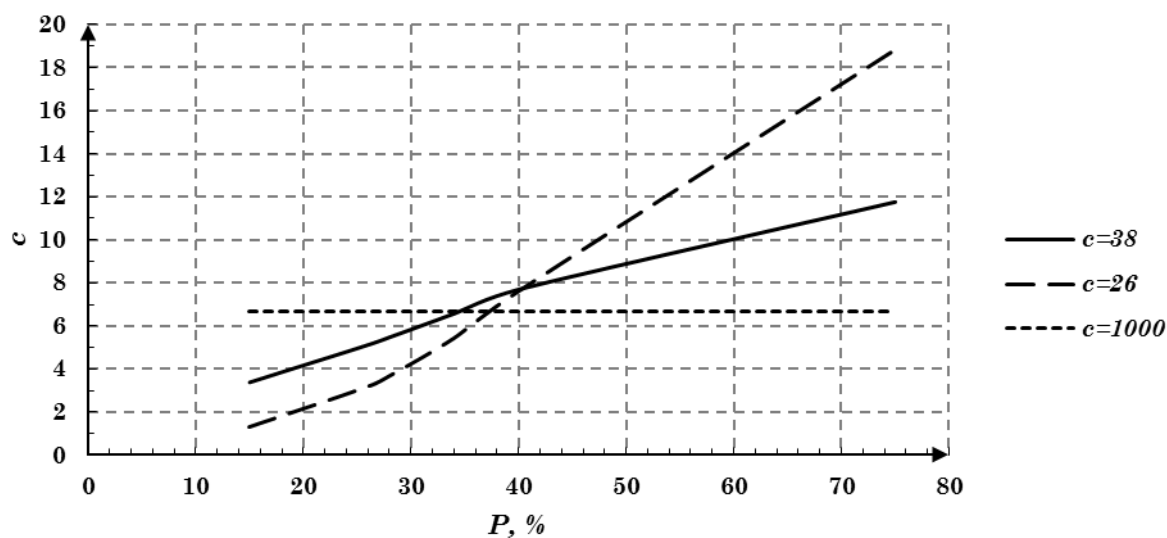


Рисунок 4.8 – Зависимость количества «обучающих» примеров от вероятности повреждения соответствующего участка сети

Как видно из таблицы 4.2, оптимальная структура нейросети-локатора (рисунок 4.9) отображается формулой 6-4-3-2-1 (6 входных узлов $U_A/U_{ном}$, $U_B/U_{ном}$, $U_C/U_{ном}$, $I_A/I_{ном}$, $I_B/I_{ном}$, $I_C/I_{ном}$, 3 скрытых слоя и нейрон выходного слоя, указывающий дистанцию L до места аварии).

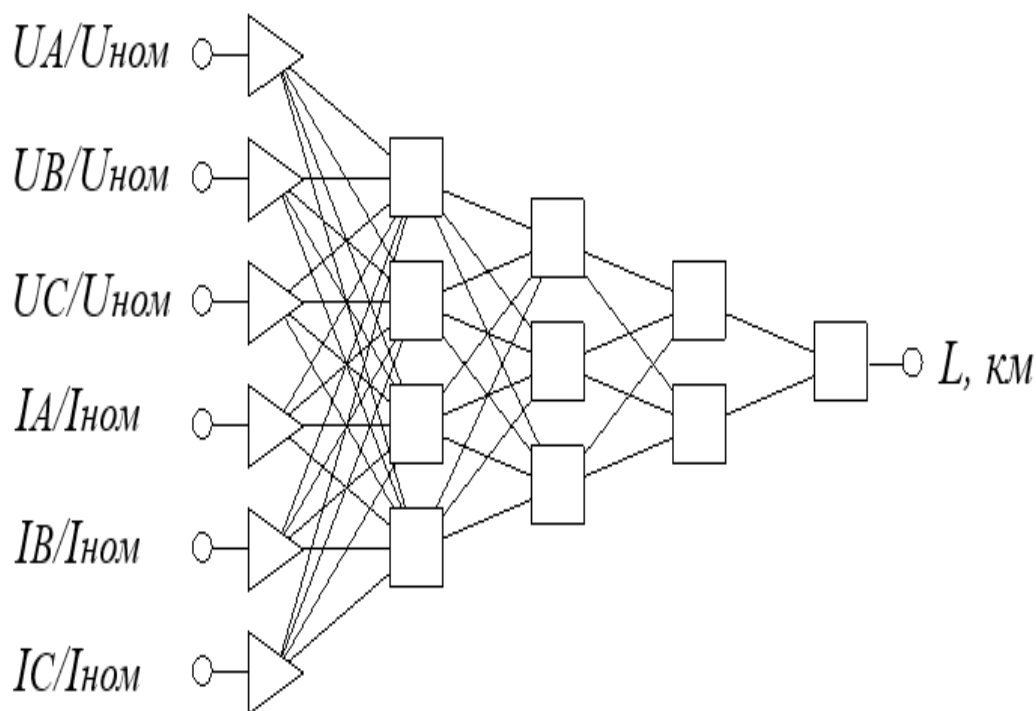


Рисунок 4.9 – Нейронный локатор повреждений

Изменяя параметр c от 20 до 250 и варьируя тем самым количество обучающих примеров, приходящихся на каждый из 6 участков линии, была получена изображённая на рисунке 4.10 зависимость погрешности «обучения» нейролокатора ΔL_{min} , ΔL_{max} при нахождении расстояния до места повреждения соответственно в зонах с наименьшим и наибольшим риском аварии.

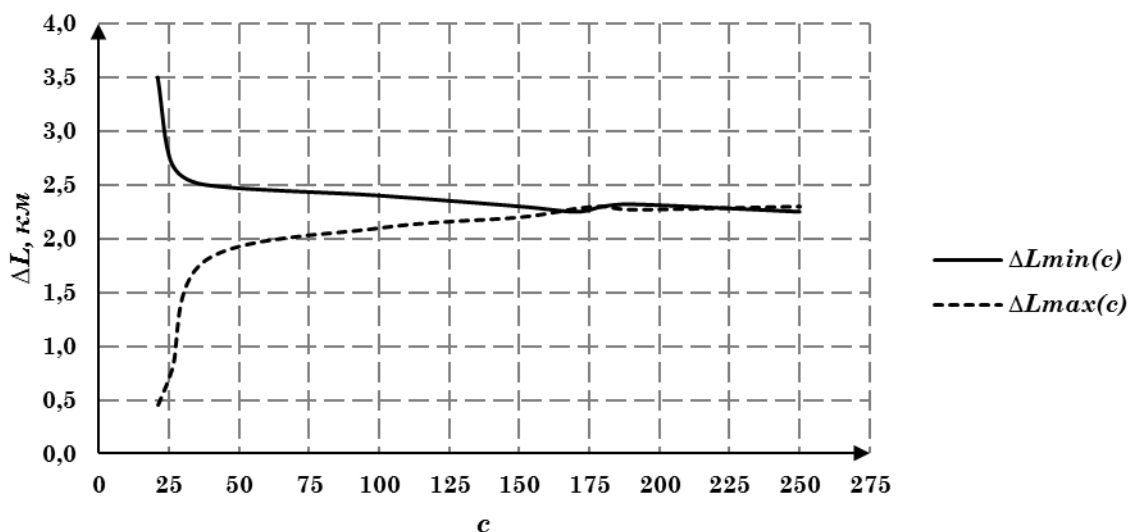


Рисунок 4.10 – Влияние параметра c гауссианы на точность «обучения» нейролокатора аварий

Из приведённых на рисунке 4.10 графиков следует, что с учётом указанных выше вероятностей повреждаемости (15, 26, 40, 75, 34 и 28 %) наиболее оптимальным является значение $c = 26$, что соответствует 2, 4, 9, 13, 7 и 5 «обучающим» примерам при $\Delta L_{min} = 2,70$ км и $\Delta L_{max} = 0,78$ км.

Алгоритм функционирования нейроблока адаптивной информационно-измерительной системы, состоящий из нейронного классификатора (НКА) и локатора (НЛА) аварий, задаётся блок-схемой, изображённой на рисунке 4.11. Из анализа данного алгоритма следует, что «адаптивность» предлагаемой ИИС достигается посредством обновления с заданной дискретностью по времени «учебника» нейросети на основе данных о климатическом воздействии, поступающих с измерительных постов. Таким образом достигается «переобучение» уже «натренированного» ранее НЛА с

учётom более актуальной на текущий момент математической модели ВЛЭП. Предварительное выявление вида аварии посредством НКА позволяет задавать весовые коэффициенты НЛА, полученные при его «обучении» определению места повреждения конкретного типа.

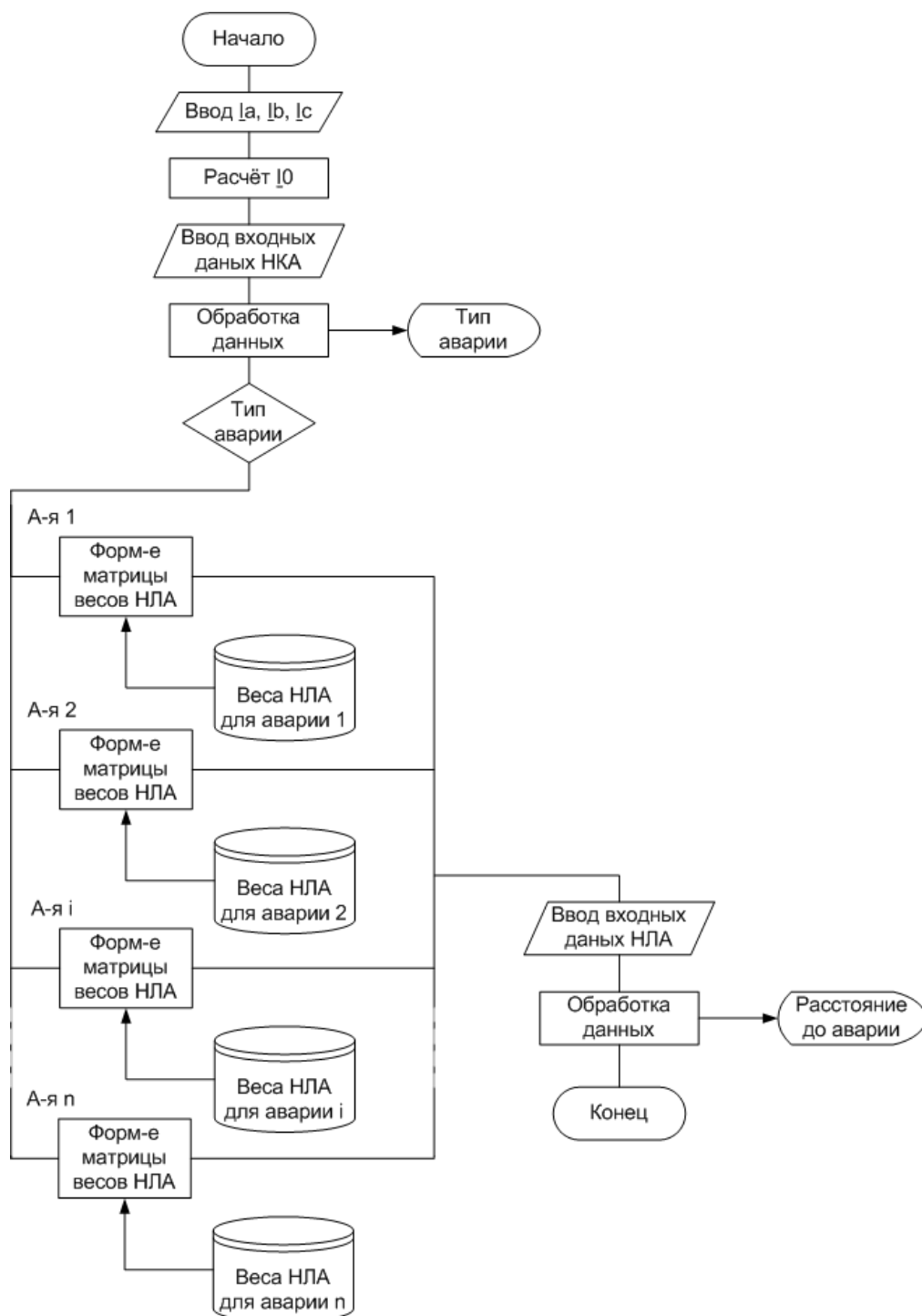


Рисунок 4.11 – Алгоритм функционирования адаптивной информационно-измерительной системы

4.2 Особенности применения гололёдных постов бесконтактного исполнения

Рассмотрим электроснабжение потребителя, выполняемое при помощи воздушной линии электропередачи длиной 250 км. Согласно рисунку 4.12, контроль гололёдообразования на данной ВЛЭП осуществляется посредством установки через каждые $x = 50$ км автоматических гололёдных постов бесконтактного исполнения (см. рисунки 2.18, 2.19). Как упоминалось ранее в п. 2.1.3, их функционирование требует измерения токовой нагрузки, для чего предусматривается установка датчиков магнитного поля (ДМП). *Это позволяет использовать данные устройства в качестве сигнализаторов аварийных режимов, ограничивая тем самым зону ОМП конкретным x -километровым участком. Следовательно, применение гололёдных постов бесконтактного исполнения совместно с нейролокатором повреждений делает возможным выделение аварийной зоны и соответствующее «дообучение» нейросети для более точного ОМП.*

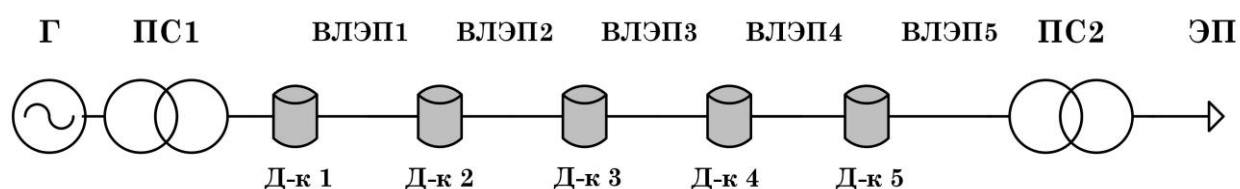


Рисунок 4.12 – Размещение измерительных постов с ДМП на ВЛЭП

Ток короткого замыкания на линии приводит к быстрому увеличению магнитной индукции B , на которое реагирует ДМП. Таким образом, детектирование аварийного режима сопровождается анализом уровня dB/dt .

Величина магнитной индукции в заданной точке пространства описывается суммой трёх членов, вызванных токами I_i в каждом i -м фазном проводе [90]:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^3 \frac{I_i}{r_i}, \quad (4.7)$$

где μ_0 – магнитная постоянная ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); r_i – расстояние между i -м проводом и чувствительным элементом (рисунок 4.13).

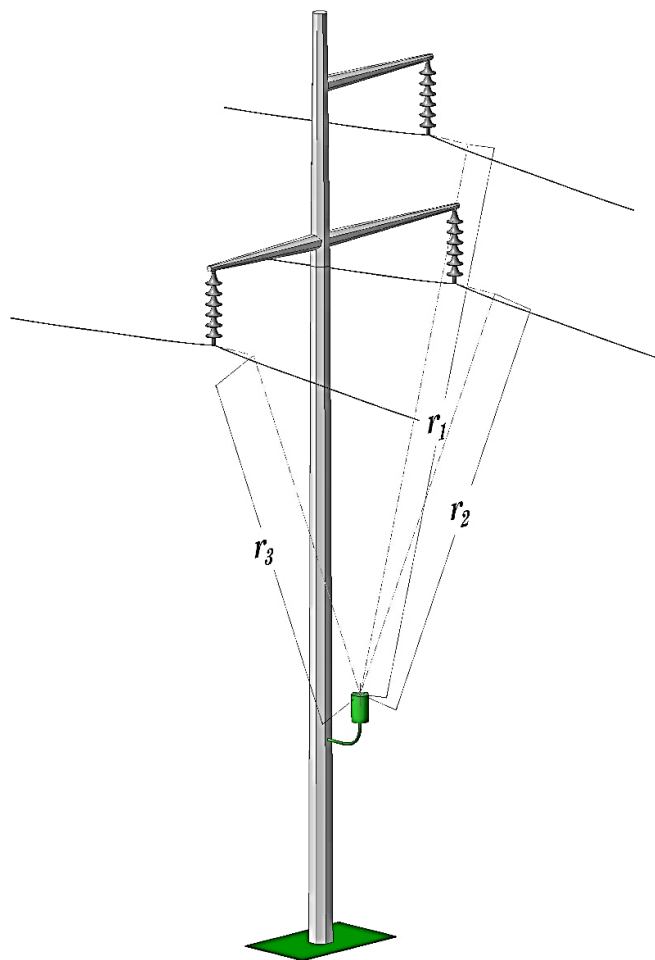


Рисунок 4.13 – Датчик магнитного поля на стойке линейной опоры

Изменение величины B по датчикам, расположенным на различных участках линии, проиллюстрируем примером. Для этого произведём расчёт в Simulink комплексным методом (задавая режим Phasor simulation в блоке Powergui), моделируя короткие замыкания в системе электроснабжения, изображённой на рисунке 4.12. Как видно из рисунка 4.14, в процессе расчёта будем перемещать короткозамыкатель по участкам 1-5 линии, имитируя замыкание фаз А-В.

Полученные значения токов в каждой фазе при замыканиях на участках 1 и 3 сведём в таблицу 4.3.

Используя формулу (4.7), найдём значения магнитной индукции, регистрируемые датчиками, размещённых на опорах ПМ110-1

($r_1 = 12,38 \text{ м}$, $r_2 = 8,95 \text{ м}$, $r_3 = 8,17 \text{ м}$) на каждом участке линии и сравним их между собой (см. рисунок 4.15).

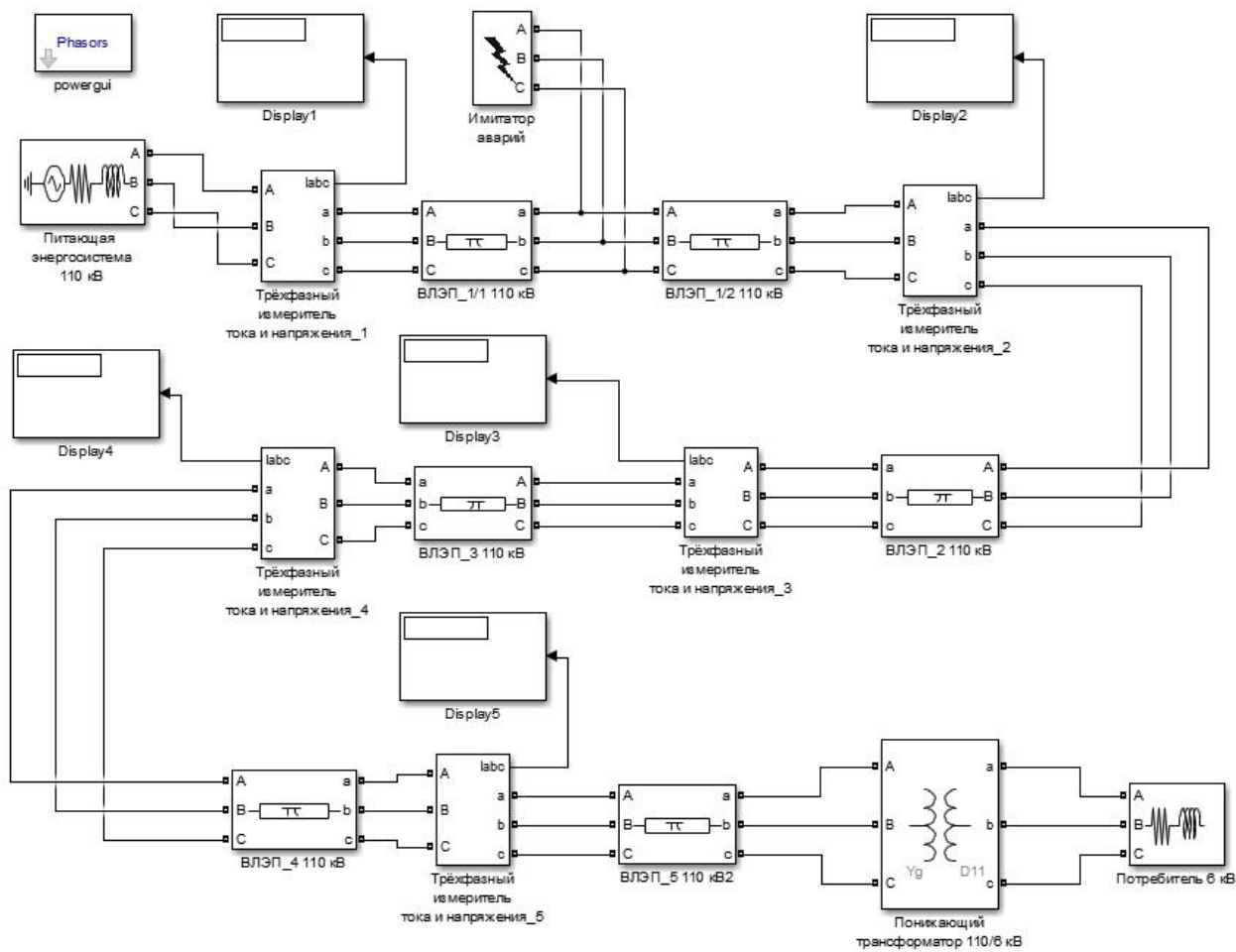


Рисунок 4.14 – Модель системы электроснабжения в Simulink с имитацией повреждения на участке 1

Таблица 4.3 – Токи короткого замыкания на участках линии

Датчик	Токи короткого замыкания, А			Аварийный участок
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	
1	2100-j2423	-2270+j2216	170+j206	1
2	-92-j107	-92-j107	183+j213	
3	-98-j110	-98-j110	195+j220	
4	-103-j113	-103-j113	206+j227	
5	-108-j117	-108-j117	217+j233	
1	1077-j1083	-1272+j859	195+j224	3
2	1074-j1093	-1281+j862	207+j231	
3	1072-j1096	-1285+j862	213+j235	
4	-112-j121	-112-j121	225+j241	
5	-115-j122	-115-j122	230+j244	

Изображённые на рисунке 4.15 диаграммы наглядным образом демонстрируют превышение показаний датчиков 1 (а) и 3 (б) при авариях, что и позволяет выделять соответствующие участки для дальнейшего точного определения места аварии.

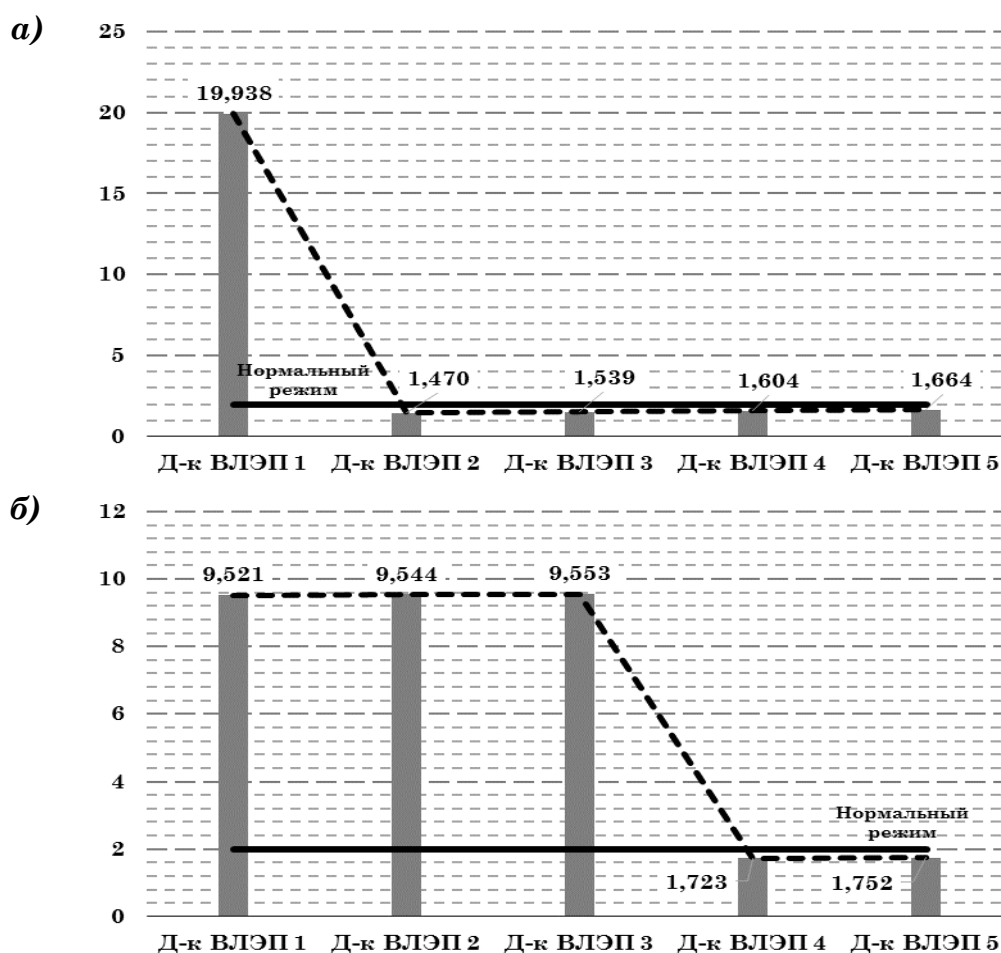


Рисунок 4.15 – Уровни магнитной индукции B (мкТл), регистрируемые ДМП до и после повреждённого участка линии

4.3 Математическое моделирование воздушной линии электропередачи для диагностики коротких замыканий

Точность вычисления токов короткого замыкания при формировании «учебников» для нейроклассификатора и нейролокатора аварий непосредственным образом определяется степенью соответствия математической модели анализируемой ВЛЭП. Обратим внимание на ряд

допущений, имеющих место при построении математической модели линии электропередачи.

Прежде всего, при определении продольных R , X и поперечных B_c , G параметров ВЛЭП (рисунок 4.16) используются т.н. «погонные» параметры, т.е. отнесённые к 1 км линии значения активного сопротивления R_0 , индуктивности L_0 , активной проводимости G_0 и ёмкости C_0 [33]. В связи с этим не учитывается неоднородность параметров ВЛЭП, что имеет место ввиду непостоянных по длине линий геоклиматических условий.

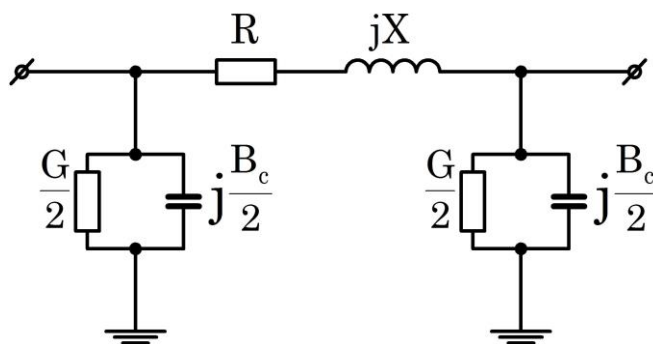


Рисунок 4.16 – П-образная (π-модель) схема замещения воздушной линии

Изменчивость геоклиматических условий вдоль трассы линии приводит к тому, что:

- вычисление поперечных параметров ВЛЭП – ёмкостной и активной проводимостей – выполняется приблизительно, а именно без привязки к рельефу местности, по которой проходит заданная линия. Между тем расчёт токов короткого замыкания подразумевает учёт поперечных параметров ВЛЭП напряжением 110-220 кВ длиной более 200 км [25].

- при моделировании ВЛЭП игнорируется удлинение проводов вследствие механической (при оледенении) или температурной деформаций. Такие параметры, как длина линии и длина провода линии считаются идентичными, вследствие чего расчёт токов короткого замыкания и осуществляется исходя из погонных (удельных) параметров линии.

Перечисленные допущения, имеющие место при осуществлении инженерных расчётов, приводят к снижению качества «учебников» для

искусственной нейронной сети и, как следствие, точности нейро-ОМП. В связи с этим рассмотрим методики уточнения имитационной модели ВЛЭП с учётом неоднородности её параметров, вызванных различной формой рельефа местности и неравномерным распределением атмосферных осадков по линии, а также дадим оценку влияния указанных факторов.

Проанализируем наличие различных сочетаний диэлектрических слоёв на поверхности токоведущей части провода.

Провод – гололёд. Как отмечается в [47], физически оледенение провода ВЛЭП означает наличие ёмкости цилиндрического конденсатора – ледяной оболочки и ёмкости между гололёдной муфтой и землёй, в результате чего суммарная удельная ёмкость линии может быть вычислена по формуле:

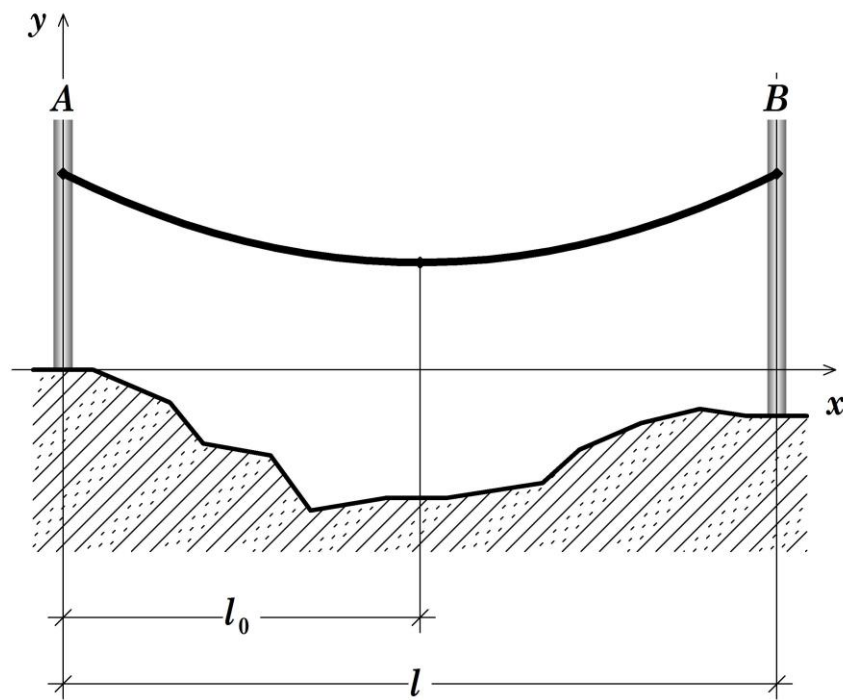
$$C_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_{\text{л}}}{\varepsilon_{\text{л}} \cdot \ln\left(\frac{h \cdot 10^3}{R + b} - 1\right) + \varepsilon \cdot \ln\left(1 + \frac{b}{R}\right)}, \quad (4.8)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная, численно равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды (для воздуха $\varepsilon=1$); $\varepsilon_{\text{л}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость льда ($\varepsilon_{\text{л}}=3,17$); h – высота подвеса провода, м; R – радиус провода, свободного от гололёда, мм; b – толщина гололёдной муфты, мм.

Из вида уравнения (4.8) сразу следует, что провод считается прямолинейным, а проводящая поверхность – ровной, в результате чего расстояние h между проводом и землёй принимается постоянным – что свидетельствует о приближённом характере формулы (4.8).

Рассмотрим вывод более точного выражения, учитывающего провисание утяжелённого гололёдными отложениями провода и произвольную форму рельефа местности (рисунок 4.17, а). Пример расстановки опор реальной ЛЭП 220 кВ, трасса которой проходит по пересечённой местности, изображён на рисунке 4.17, б.

а)



б)

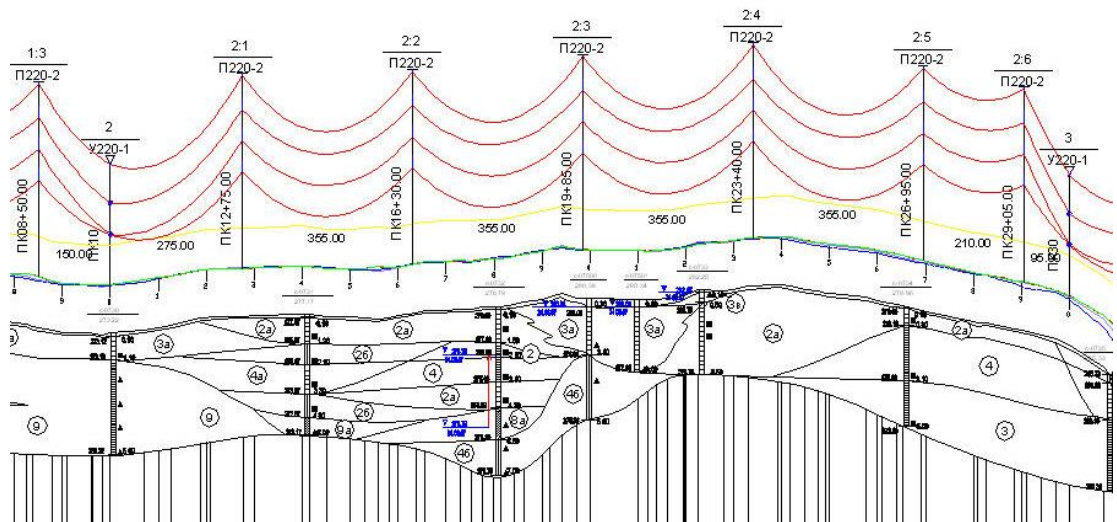
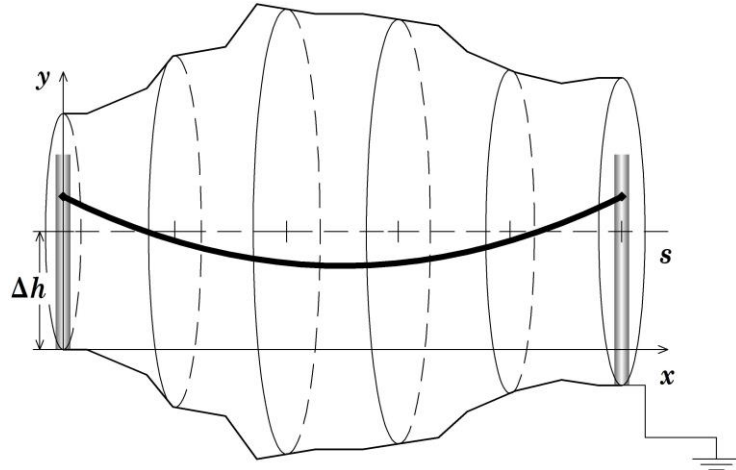


Рисунок 4.17 – Продольный профиль по пролёту ЛЭП (а) и по трассе реальной линии (б)

Окружим анализируемый пролёт заземлённой оболочкой, образованной вращением плоской кривой, повторяющей форму рельефа поверхности, вокруг оси v , параллельной оси абсцисс и удалённой от неё на расстояние Δh (рисунок 4.18, а).

Выполним разбиение данной воображаемой оболочки на n участков с шагом $\Delta l = l/n$ (где l – длина пролёта), при этом провисающий провод заменим совокупностью из n цилиндров длиной Δl и радиусом R или $R+b$ в случае оледенения (рисунок 4.18, б).

a)



б)

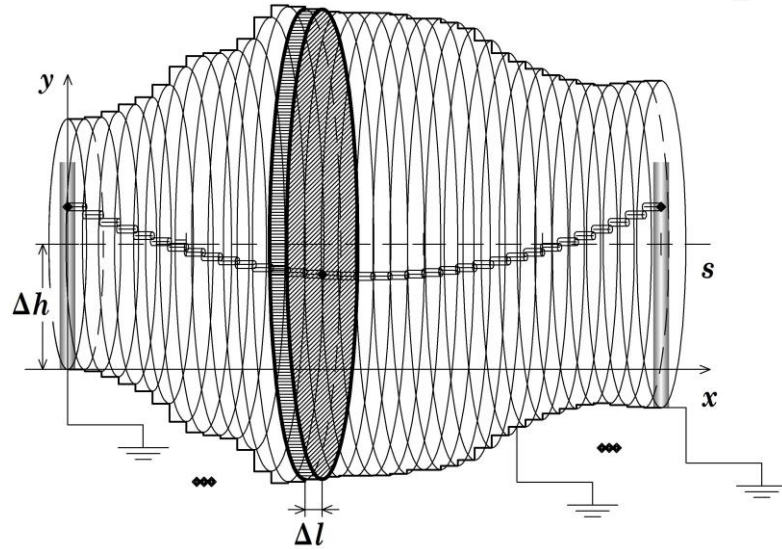


Рисунок 4.18 – Пролёт ВЛЭП, заключённый в оболочку вращения (а), дискретная модель провисающего провода и окружающей оболочки вращения (б)

Ёмкость между двумя i -ми цилиндрами ($i = \overline{1, n}$) – цилиндром, образующем внешнюю оболочку, и конечным элементом провода – вычисляется по формуле, аналогичной приводимому в [42] выражению, а именно

$$C_i = 2\pi\epsilon_0\epsilon\Delta l \left[\operatorname{arch} \left(-\frac{D_i^2 - R_i'^2 - R^2}{2R_i'R} \right) \right]^{-1}, \quad (4.9)$$

где R_i' – радиус i -го цилиндра оболочки, а величина D_i (рисунок 4.19) определяется как

$$D_i = |R_i' - h_i|,$$

где h_i – высота расположения i -го элемента провода над землёй, полагая, что $h_i - R \approx h_i$ в силу малости R (т.к. $h_i \gg R$).

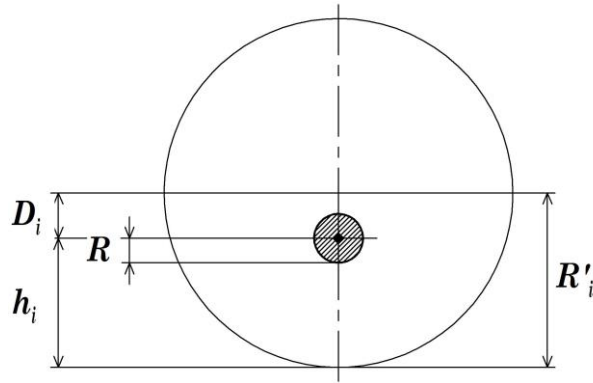


Рисунок 4.19 – К оценке ёмкости между элементарными цилиндрами

Устремим величину Δh (см. рисунок 4.18, б) и вместе с тем радиус R_i' каждого элементарного цилиндра оболочки к бесконечности. Также примем во внимание параллельное соединение ёмкостей между конечными элементами, в результате чего получим с учётом (4.9) выражение для расчёта ёмкости между провисающим проводом и проводящей поверхностью любой формы:

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon\Delta l \sum_{i=1}^n \left(\operatorname{arch} \frac{h_i}{R} \right)^{-1}. \quad (4.10)$$

В случае нарастания ледяной массы вокруг провода, что соответствует образованию цилиндрического «гололёдного» конденсатора, для отдельного пролёта линии формула (4.10) примет следующий вид:

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon\epsilon_{\text{л}} \int_0^l \left[\epsilon_{\text{л}} \cdot \operatorname{arch} \frac{h(x)}{R+b} + \epsilon \cdot \ln \left(1 + \frac{b}{R} \right) \right]^{-1} dx, \quad (4.11)$$

где высота провода над поверхностью земли $h(x)=y(x)-g(x)$, при этом $y(x)$ – уравнение кривой провисания провода; $g(x)$ – уравнение, характеризующее форму продольного профиля рельефа местности на данном пролёте.

Тогда полная ёмкость линии составит

$$C_{\text{ВЛЭП}} = \sum_{k=1}^N C_k, \quad (4.12)$$

где N – количество пролётов ВЛЭП.

Сравним полученные выражения с уравнением (4.8) с целью получения количественной оценки влияния рельефа местности и формы провисающего провода, удовлетворяющей уравнению цепной линии:

$$y(x) = h_0 + a \left(\operatorname{ch} \frac{x - l_0}{a} - 1 \right), \quad (4.13)$$

где a – параметр, определяющий форму кривой; h_0, l_0 – координаты низшей точки провисания провода, при этом для выражения (4.8) $h_0 = h$.

Как показали расчёты, считая уравнение (4.12) эталонным по отношению к (4.8), в случае ровной поверхности влияние провисания провода при заданных исходных данных (высота подвеса провода на обеих опорах $H=14,5$ м, $h_0=6$ м, длина пролёта $l=240$ м, точка экстремума $l_0=0,5l$, число участков разбиения $n=1000$) приводит к погрешности δC , равной 19,57 %.

Рассмотрим криволинейную поверхность: пусть из данных трассировочных работ следует, что форма рельефа поверхности (рисунок 4.20) на территории рассматриваемого пролёта с достаточной степенью точности задаётся рядом Фурье вида

$$\begin{aligned} g(x) = & 7695,525 \cos(0,0393x) - 12587,996 \sin(0,0393x) - \\ & - 4855,330 \cos(0,0131x) + 23463,621 \sin(0,0131x) - \\ & - 3206,094 \cos(0,0654x) + 3246,261 \sin(0,0654x) - \\ & - 36,304 \cos(0,1047x) - 53,301 \sin(0,1047x) + \dots \end{aligned}, \quad (3.14)$$

при этом согласно рисунку 4.17, а опора B выполнена на повышающей подставке ($l_0=0,5l$). Тогда, если каждый из пролётов ВЛЭП характеризуется идентичными уравнениями (3.13), (3.14) и толщина гололёдной муфты постоянна на всём протяжении линии ($b(s)=50$ мм), применение погонного значения (4.8) приведёт к погрешности δC , равной 24,37 %.

Влияние числа разбиений n на результаты расчётов отражает диаграмма, изображённая на рисунке 4.21. Как видно из представленной зависимости, оптимальным является разбиение провода на $n=1000$ элементов.

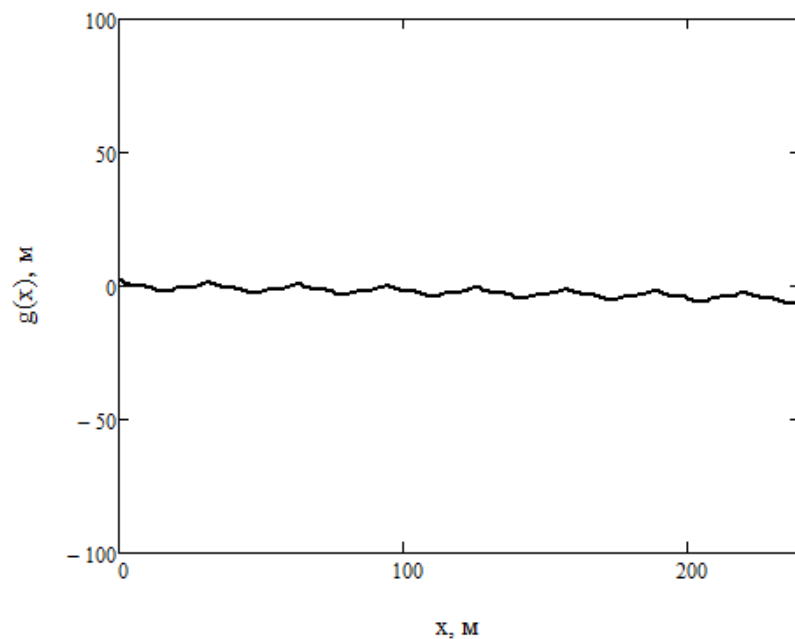


Рисунок 4.20 – Продольный профиль по участку пролёта

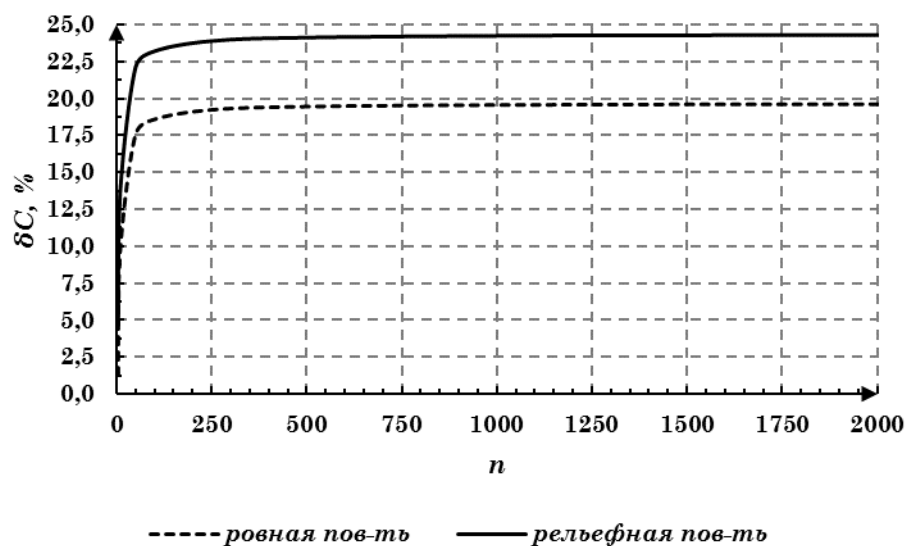


Рисунок 4.21 – Зависимость изменения результата расчёта при пересчёте с увеличением частоты разбиения

Используя предлагаемую методику, но считая провод повсюду не провисающим и прямолинейным ($\nu(x)=\text{const}$) и учитывая лишь форму рельефа местности, задаваемой на всей линии уравнением $g(x) \cdot 10^{-3}$ ($x = \overline{0, s}$, км), можно прийти к выводу, что значение ёмкости линии будет отличаться более чем на 13 % по отношению к значению, вычисленного для идеально ровной поверхности.

Отметим, что в рассматриваемых случаях уравнением $g(x)$ с точки зрения геоморфологии задавался равнинный тип рельефа с небольшими колебаниями высот. Очевидно, что наличие сильно пересечённого рельефа местности приведёт к ещё большим погрешностям уравнения (4.8).

Провод – изоляция – гололёд. Вычисление ёмкости на участке линии с защищённым проводом – ВЛЭП(з) – длиной l при оледенении может проводиться по формуле, аналогичной (4.11), но полученной исходя из выражения для ёмкости двухслойного цилиндрического конденсатора:

$$C = 2\pi\epsilon_0 \int_0^l \left(\epsilon_{\text{и}}^{-1} \ln \left(1 + \frac{\Delta}{R} \right) + \epsilon_{\text{л}}^{-1} \ln \left(1 + \frac{b}{R + \Delta} \right) + \epsilon^{-1} \operatorname{arch} \frac{h(x)}{R + b + \Delta} \right)^{-1},$$

где $\epsilon_{\text{и}}$, Δ – диэлектрическая проницаемость и толщина изоляции провода (мм) соответственно.

При этом активная проводимость провода в изоляции, покрытого равномерным слоем отложений рассчитывается по формуле

$$G_{\text{и-г}} = \omega \cdot C_{\text{и-г}} \cdot \operatorname{tg} \delta_{\text{экв}}, \quad (4.15)$$

где $C_{\text{и-г}}$ – ёмкость двухслойного конденсатора изоляция-гололёд:

$$C_{\text{и-г}} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\frac{1}{\epsilon_{\text{и}}} \ln \left(1 + \frac{\Delta}{R} \right) + \frac{1}{\epsilon_{\text{л}}} \ln \left(1 + \frac{b}{R + \Delta} \right)}, \quad (4.16)$$

а $\operatorname{tg} \delta_{\text{экв}}$ – тангенс угла диэлектрических потерь сложной (комбинированной) оболочки, образованной слоем изоляции и гололёдной муфтой:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{экв}} = \frac{\epsilon_{\text{л}} \cdot S_{\text{г}} \cdot \operatorname{tg} \delta_{\text{л}} + \epsilon_{\text{и}} \cdot S_{\text{и}} \cdot \operatorname{tg} \delta_{\text{и}}}{\epsilon_{\text{л}} \cdot S_{\text{г}} + \epsilon_{\text{и}} \cdot S_{\text{и}}}, \quad (4.17)$$

где $S_{\text{г}}$, $S_{\text{и}}$ – площадь сечения гололёдной муфты и слоя изоляции соответственно, мм².

Провод – изоляция – водяная плёнка. Выпадение дождевых осадков приводит к образованию на поверхности провода тонкой водяной плёнки и, соответственно, изменению его активной проводимости.

Опираясь на статистические данные, приводимые в ГОСТ Р 53613-2009 «Воздействие природных внешних условий на технические изделия», можно

полагать, что зависимость типичного диаметра капель дождя от его интенсивности описывается уравнением полиномиальной регрессии вида

$$d(\lambda) = 1,476\lambda^4 - 3,896\lambda^3 + 0,284\lambda^2 + 6,149\lambda + 0,112,$$

где d – диаметр капли дождя, мм; λ – интенсивность выпадения осадков, мм/мин.

Используя описываемую в [79] методику расчёта, можем определить, что при выпадении капель диаметром $d=4,13$ мм, что соответствует дождю интенсивностью $\lambda=1$ мм/мин, на самонесущем изолированном проводе (СИП) диаметром 31,2 мм (включая слой изоляции толщиной $\Delta_{\text{и}}=8$ мм) образуется водяная плёнка толщиной $\Delta_{\text{в}}=8,516$ нм.

В данном случае расчёт активной проводимости провода выполняется по формулам, идентичным (4.15)-(4.17), с заменой $\epsilon_{\text{л}}$, $\text{tg}\delta_{\text{л}}$, b и $S_{\text{г}}$ на аналогичные показатели $\epsilon_{\text{в}}$, $\text{tg}\delta_{\text{в}}$, $\Delta_{\text{в}}$ и $S_{\text{в}}$. Проведённые вычисления показали, что на частоте 1 кГц появление водяной плёнки увеличивает проводимость линии в 1,53 раза, а на частоте 1 МГц – более чем в 88 раз (!). Следует заметить, что эти результаты получены также с учётом изменения диэлектрических характеристик воды и материала изоляции проводов СИП – сшитого полиэтилена – при увеличении частоты сигнала (на основе данных, приводимых в [11, 26]). Полученные результаты свидетельствуют о возможности значительных колебаний активной проводимости линии вдоль её длины при неравномерном выпадении осадков вдоль трассы линии.

Таким образом, применение погонных характеристик линии является допущением, пригодном для осуществления большинства задач инженерного анализа. Однако данное упрощение при реализации алгоритмов информационно-измерительных систем способствует накоплению погрешностей.

В отношении алгоритма обработки данных ИИС желательным является возможность учёта провисания проводов ВЛЭП и необходимостью учёта формы рельефа местности. Обновление функций $y(x)$ провисания линии может осуществляться на основе показаний распределённых по трассе линии датчиков гололёда и температуры. Эти параметры непосредственным

образом определяют механическое напряжение и удельные нагрузки на провод, которые в свою очередь определяют его форму:

$$y(x) = H - \frac{\sigma}{\gamma} \left[\operatorname{ch} \frac{\gamma \cdot l_0}{\sigma} - \operatorname{ch} \frac{\gamma(x - l_0)}{\sigma} \right],$$

где H – высота подвеса провода, м; σ – механическое напряжение в материале провода, Н/мм²; γ – удельная нагрузка на провод, Н/(м·мм²); l_0 – абсцисса низшей точки провиса, м.

Загружаемые в память блока обработки информации ИИС функции $g(x)$ рельефа местности задаются на основе данных, которые снимаются при тахеометрическом ходе по трассе линии на этапе её проектирования, а именно в ходе подготовки к расстановке опор [21].

4.4 Влияние рельефа местности и удлинения провода на точность нейролокации

Рельеф местности. Как отмечалось в п. 4.3, даже в упрощённом случае – считая, что провод воздушной линии на всём протяжении её трассы не провисает и прямолинеен – учёт формы рельефа местности, причём с небольшими колебаниями высот, способен привести к разнице при расчёте ёмкости ВЛЭП на 13 % (а с учётом провисания более 24 %). В связи с этим возникает необходимость в оценке влияния данной погрешности на работу нейролокатора аварий, а именно, выяснения погрешности локации в результате обучения нейрокомпьютера данными, полученными при неучёте математической моделью ВЛЭП отклонения ёмкости.

Создадим контрольную выборку данных посредством компьютерного эксперимента в среде Simulink. Для этого зададимся уравнениями поверхности, аналогичными исходному $g(x) \cdot 10^{-3}$ ($x = \overline{0, s}$, км), но обеспечивающими отклонение ёмкости линии вплоть до 13 %. После чего, вычислив отклонения ёмкостей прямой и нулевой последовательностей для

каждого из уравнений поверхности на расстояниях от 40 до 240 км, будем поочерёдно эмулировать однофазное замыкание провода на данных участках.

Контрольную выборку соответствующих действующих значений U_A , U_B , U_C , I_A , I_B , I_C , зафиксированных трёхфазным измерителем тока и напряжения в момент аварии, подадим на вход нейролокатора и проанализируем полученные результаты.

Как видно из приведённого на рисунке 4.22 графика, в данном случае обучение нейροкомпьютера значениями, не отражающими отклонение ёмкости линии из-за рельефа местности, способно привести к ощутимой разнице в определении места замыкания при авариях на расстоянии, начиная от 80 км (в случае 13 % на удалении 240 км – более 8 км). При этом зависимость между данной величиной (Δx , км) и отклонением ёмкости (δC , %) близка к прямой пропорциональности, что видно, проводя сечение полученной поверхности на рисунке 4.22 в произвольной плоскости xOz .

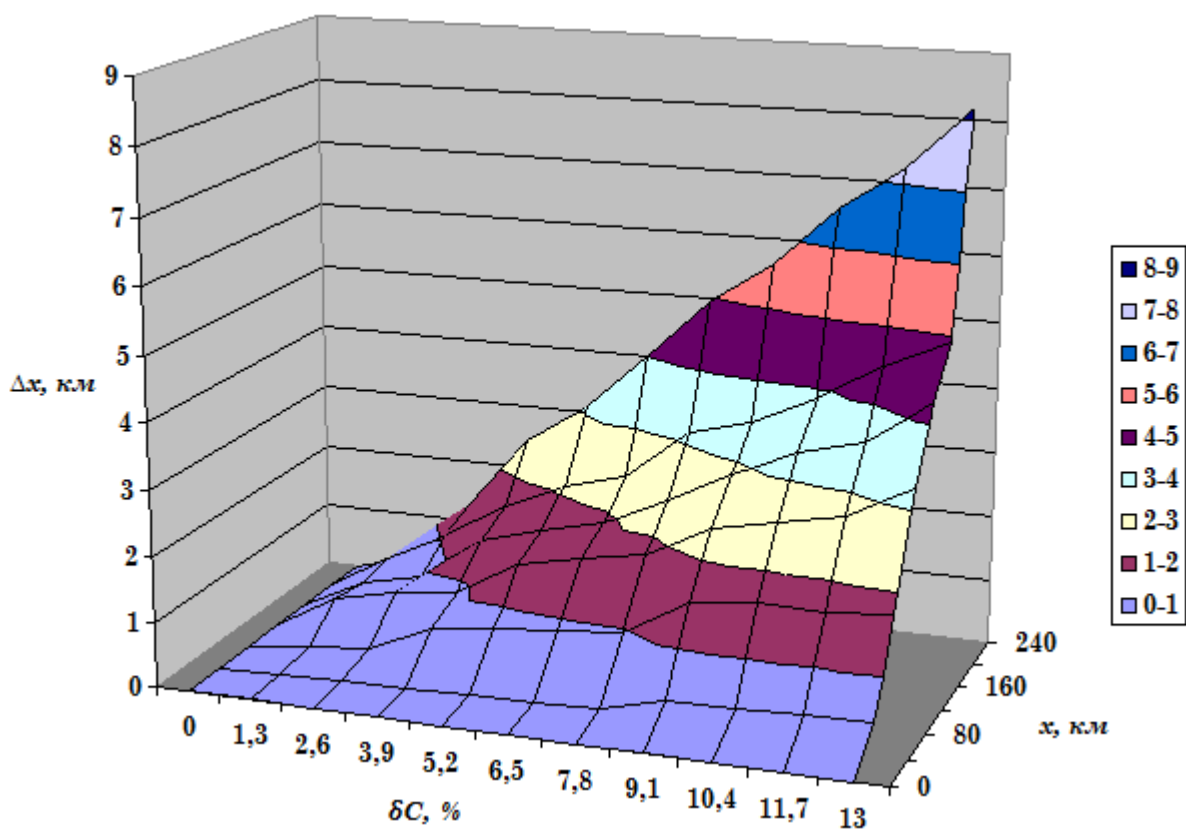


Рисунок 4.22 – Изменение показаний нейролокатора при отклонении ёмкости линии

Удлинение провода. Следует отметить, что результатом обнаружения места аварии с помощью любого дистанционного метода в строгом понимании является не дистанция, но длина линейного провода до неисправности. В силу провисания провода данные величины не идентичны, при этом их отличие также непостоянно ввиду изменения длины провода при колебаниях температуры и механической нагрузки (оледенения или таяния отложений). Оценим абсолютную погрешность (в км), возникающую при неучёте удлинения провода, при этом рассмотрим более сложный случай, а именно принимая во внимание форму рельефа местности.

Пусть воздушная линия состоит из промежуточных пролётов длиной $l_x = 240$ м, выполненных на одинаковых опорах высотой $h_{оп}$ и рельефом, задаваемом уравнением $g(x)$ (4.14), при этом будем считать, что форма провисающего провода описывается параболическим законом вида

$$y(x) = a_1 \cdot x^2 + a_2 \cdot x + a_3. \quad (4.18)$$

Определим длину провода в изображённом на рисунке 4.23 пролёте.

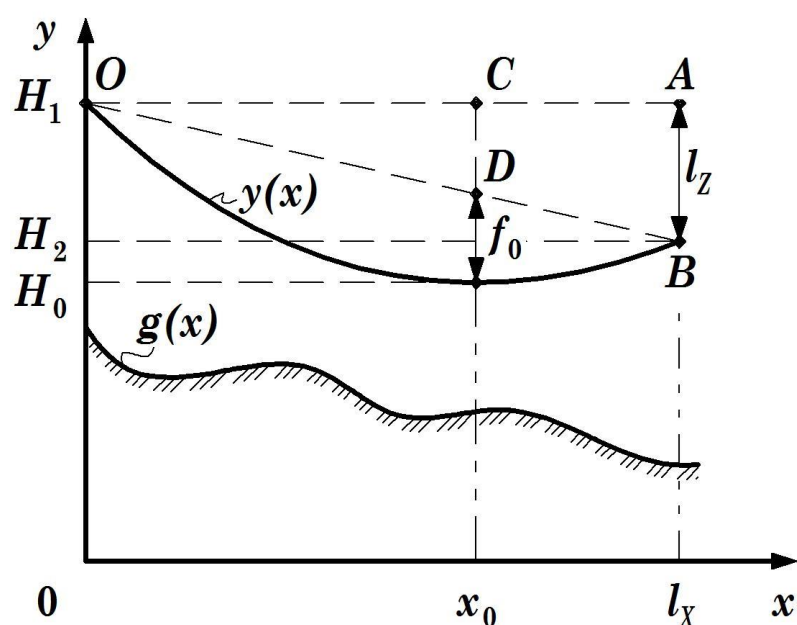


Рисунок 4.23 – Продольный профиль по расчётному пролёту

Абсцисса низшей точки провисания провода вычисляется следующим образом [23]:

$$x_0 = \frac{l_x}{2} + \frac{\sigma}{\gamma} \operatorname{arsh} \frac{\gamma l_z}{2\sigma \operatorname{sh} \frac{\gamma l_x}{2\sigma}}, \quad (4.19)$$

где

$$l_z = |g(0) - g(l_x)|.$$

Используя (4.19), можем определить стрелу провеса провода в пролёте с разной высотой точек подвеса проводника [23]:

$$f_0 = \frac{\sigma}{\gamma} \left(\operatorname{ch} \frac{\gamma x_0}{\sigma} - 1 \right) - \frac{x_0 l_z}{l_x}.$$

Из анализа рисунка 4.23 следует, что $\triangle OAB \square \triangle OCD$ (по двум углам), следовательно

$$\frac{x_0}{l_x} = \frac{CD}{l_z},$$

откуда

$$CD = \frac{x_0 l_z}{l_x},$$

тогда ордината точки низшего провисания провода будет находиться как

$$H_0 = H_1 - CD - f_0, \quad (4.20)$$

где H_1, H_2 – ординаты точек подвеса провода на опорах:

$$\begin{cases} H_1 = g(0) + h_{\text{оп}}, \\ H_2 = g(l_x) + h_{\text{оп}}. \end{cases} \quad (4.21)$$

Итак, с учётом (4.19)-(4.21) имеем координаты трёх точек $(0; H_1)$, $(x_0; H_0)$, $(l_x; H_2)$, принадлежащих кривой $y(x)$. Тогда, записывая соответствующую систему уравнений

$$\begin{cases} a_3 = H_1, \\ a_1 x_0^2 + a_2 x_0 + a_3 = H_0, \\ a_1 l_x^2 + a_2 l_x + a_3 = H_2 \end{cases}$$

и решая её относительно неизвестных, получим выражения для расчёта коэффициентов a_1 и a_2 уравнения (4.18):

$$a_1 = \frac{(H_0 - H_1)(x_0^2(l_x - x_0) - l_x^2) - x_0^2(H_2 - H_1)}{l_x x_0^2(l_x - x_0)},$$

$$a_2 = \frac{l_x^2(H_0 - H_1) - x_0^2(H_2 - H_1)}{l_x x_0(l_x - x_0)}.$$

Используя данные выражения, по известной формуле можем вычислить длину провода:

$$L = \int_0^{l_x} \sqrt{1 + (2a_1x + a_2)} dx.$$

Применяя описанную методику, определим разность между длиной провода АС-120/19 (при изменении его температуры от 0 до -30 °С, а также толщины гололёдной муфты от 0 до 60 мм) и дистанцией до места замыкания, составляющей от 80 до 240 км. При этом координаты низшей точки провисания будем рассчитывать, исходя из точного уравнения состояния провода (2.2), решение которого осуществим методом итерационного приближения.

Как видно из приведённых на рисунке 4.24 графиков зависимостей $\Delta x(b)$, увеличение расстояния до места аварии приводит к накоплению погрешности, превышающей 3 км при дистанции 240 км с учётом заданного рельефа. Таким образом, в случае превышения результатом нейролокации аварии заранее определённого порога (для текущих условий, например, 160 км) требуется коррекция данного значения на удлинение провода. Эта процедура может осуществляться посредством суммирования длин пролётов до достижения равенства между соответствующей суммарной длиной провода в них и значением нейролокации. Очевидно, что исходными данными для этого расчёта будут являться информация о расстановке опор ВЛЭП на местности и текущие значения оледенения и температуры провода.

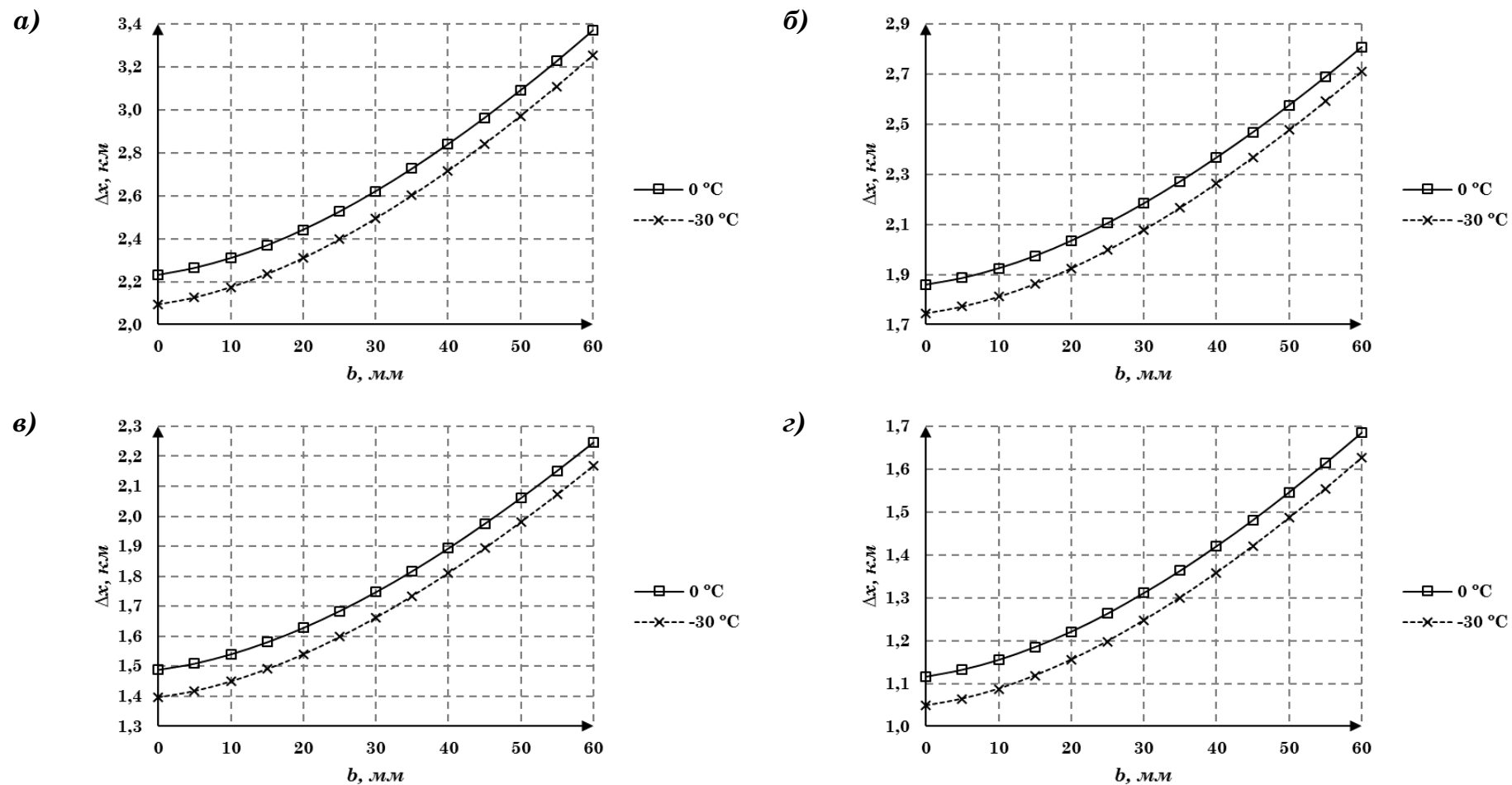


Рисунок 4.24 – Удлинение провода при оледенении и изменении его температуры: на дистанции 240 км (а), 200 км (б), 160 км (в), 120 км (г)

Выводы по главе 4

1. Воздушная линия электропередачи не является статическим объектом и для мониторинга её состояния необходима адаптивная информационно-измерительная система. Подобная ИИС подразумевает возможность «обучения» наиболее корректному функционированию в соответствии с текущими условиями эксплуатации ВЛЭП, неодинаковыми по её длине. Таким образом, наиболее целесообразной структурой адаптивной ИИС является совокупность нейроблока обработки информации, аккумулятивной распределёнными по трассе линии измерительными постами.

2. Получено наглядное подтверждение влияния рельефа местности на поперечные параметры ВЛЭП. Так, прохождение трассы линии по участкам равнинной местности с небольшими колебаниями высот и уклонами до 5 % приводит к отклонению ёмкостной проводимости на 13 % (а с учётом провисания проводов в пролётах – более 24 %) по сравнению с линией, выполненной на идеально ровной поверхности. Очевидно, что наличие пересечённого рельефа приведёт к увеличению погрешности при расчётах токов короткого замыкания, ухудшению качества обучающих данных для нейрокомпьютера и снижению точности нейролокации. Таким образом, наличие цифровой модели участков рельефа, покрываемых линией, является необходимым, а учёт провисания проводов – желательным условием при построении математической модели ВЛЭП.

3. Применение погонных параметров линии является недопустимым в контексте формирования точных вычислительных алгоритмов упрощением. Зависимость между суммарными характеристиками ВЛЭП и её длиной отличается от линейной ввиду формы рельефа местности, структуры почвы и неоднородного распределения по трассе воздействия внешней среды (нагрева солнечной радиацией, увлажнения грунта и т.д.).

4. Результатом функционирования дистанционных средств ОМП является значение длины линейного провода, но не расстояния до места аварии. Пересчёт длины провода в расстояние до неисправности невозможен без информации о рельефе местности и текущем распределении нагрева и гололёдообразования по участкам линии, т.к. именно эти факторы определяют удлинение провода в пролётах ВЛЭП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе проведённого анализа существующих методов диагностики гололёдообразования выявлено, что для контроля положения крупногабаритных элементов ВЛЭП (опор и проводов) целесообразно использование бесконтактных оптических методов, что позволяет создать интеллектуальную информационно-измерительную систему для мониторинга оледенения линии без изменения её конструкции.

2. Получены вычислительные алгоритмы диагностики гололёдообразования по провисанию проводов и деформации опор, что позволяет сравнительно просто, не вмешиваясь в конструкцию линии, проводить измерения механических нагрузок.

3. Разработан алгоритм косвенного бесконтактного определения температуры провода, покрытого отложениями различных видов, без установки датчика температуры на проводах линии.

4. Доказано, что определение механического напряжения в материале провода с учётом значения температуры, не учитывающего влияние снежно-изморозевых отложений на режим теплообмена с окружающей средой, приводит к средней погрешности расчёта 20 %, практически не изменяющейся для отложений любого веса и формы.

5. Экспериментально обоснована возможность видеоизмерений в условиях густого снегопада при использовании прожектора, дальность подсветки которого превышает в 1,2 раза расстояние от начала пролёта до точки, координаты которой фиксируются видеокамерой с ПЗС/КМОП-матрицей широкого применения.

6. Разработан новый метод дистанционного ОМП с применением искусственной нейронной сети, обучаемой при помощи примеров, учитывающих информацию о реальной линии, что позволяет повысить достоверность результатов мониторинга.

7. Разработана методика вычисления параметров воздушной линии с учётом рельефа земной поверхности, что позволяет улучшить качество обучающих примеров для нейросети и, соответственно, уменьшить погрешность мониторинга гололёдных аварий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электрические сети энергоёмких предприятий [Текст] / П.И. Анастасиев [и др.]. – М.: Энергия, 1971. – 344 с.
2. Арцишевский, Я.Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с заземленной нейтралью [Текст]: учеб. пособ. / Я.Л. Арцишевский. – М.: Высшая школа, 1988. – 94 с.
3. Мониторинг воздушных линий электропередачи, эксплуатируемых в экстремальных метеоусловиях [Текст] / В.Я. Башкевич [и др.]. – Саратов: СГТУ, 2013 с. – 244 с.
4. Беляков, Ю.С. Актуальные вопросы определения мест повреждения воздушных линий электропередачи [Текст] / Ю.С. Беляков. – М.: Энергопрогресс, 2010. – 76 с.
5. Бошнякович, А.Д. Механический расчёт проводов и тросов линий электропередачи [Текст] / А.Д. Бошнякович. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 254 с.
6. Буймистряк, Г. Я. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий / Г. Я. Буймистряк // Control Engineering Россия. – 2013. – № 3. – С. 34-40.
7. Бургсдорф, В.В. Расчёт тока и времени плавления гололёда на линиях электропередачи [Текст] / В.В. Бургсдорф // Электричество. – 1946. – № 2. – С. 69-72.
8. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов [Текст]: учеб. для вузов / В.М. Вержбицкий. – М.: Высшая школа, 2009. – 840 с.
9. Глазунов, А.А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. В 2 т. Т. 1. Работа и расчёт проводов и тросов [Текст] / А.А. Глазунов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 192 с.
10. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

11. Гороновский, И.Т. Краткий справочник по химии [Текст] / И.Т. Гороновский, Ю.П. Назаренко, Е.Ф. Некряч. – Киев: Наукова думка, 1987. – 830 с.
12. Дарков, А.В. Сопротивление материалов: учеб. для втузов [Текст] / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. – М.: Высшая школа, 1975. – 645 с.
13. Дементьев, С.С. Диагностика состояния воздушных линий электропередачи с применением нейрокомпьютера [Текст] / С.С. Дементьев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2017. – № 2 (19). – С. 21-26.
14. Дементьев, С.С. Оценка погрешности видеоизмерений при диагностике оледенения ЛЭП оптическим методом [Текст] / С.С. Дементьев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2017. – № 2 (19). – С. 27-31.
15. Дементьев, С.С. «Умные» опоры ЛЭП: концепция, техническая реализация, перспективы [Электронный ресурс] / С.С. Дементьев // Энергосбережению и энергоэффективности – энергию молодых! : сб. докл. и выступл. молодёжного энергофорума (г. Волгоград, 25-27 апреля 2017 г.) / редкол.: Л.Ю. Богачкова [и др.] ; Гос. бюджетное учреждение Волгоградской области «Волгоградский центр энергоэффективности». - Волгоград, 2017. - С. 44-49. – Режим доступа : <http://www.volgoizdat.ru/elektronnaya-biblioteka>.
16. Дементьев, С.С. Оптический метод диагностики оледенения воздушных ЛЭП на гибких опорах [Текст] / С.С. Дементьев, О.А. Колганов // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2018. – № 2 (23). – С. 14-19.
17. Дементьев, С.С. Устройство бесконтактной диагностики гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи [Электронный ресурс] / С.С. Дементьев, А.Н. Шилин // Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты: сб. материалов VIII междунар. науч.-практ. конф. (19 сентября 2018 г.) / ООО «Западно-

Сибирский научный центр». – Кемерово, 2018. – Т. II. – С. 80-84. – 1 электрон. опт. диск (DVD-диск).

18. Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчёта [Текст]: учеб. пособ. / Г.В. Дерюгина [и др.]. – М.: МЭИ, 2012. – 260 с.

19. Дубровин, И. Износ электросетевой инфраструктуры в России. Масштабы и перспективы [Электронный ресурс] / И. Дубровин // Информационное агентство REGNUM. – Режим доступа: <https://regnum.ru/news/2348996.html>. – (Дата обращения: 31.03.2019).

20. Зверева, С.В. В мире солнечного света [Текст] / С.В. Зверева. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 160 с.

21. Инженерно-геодезические работы для проектирования и строительства энергетических объектов [Текст] / А.А. Карлсон [и др.]. – М.: Недра, 1986. – 349 с.

22. Калиткин, Н.Н. Численные методы [Текст] / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

23. Кесельман, Л.М. Основы механики воздушных линий электропередачи [Текст] / Л.М. Кесельман. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 352 с.

24. Кобец, Б.Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID [Текст] / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова. – М.: Энергия, 2010. – 208 с.

25. Коровин, Ю.В. Расчёт токов короткого замыкания в электрических системах [Текст]: учеб. пособ. / Ю.В. Коровин, Е.И. Пахомов, К.Е. Горшков. – Челябинск: ЮУрГУ, 2011. – 114 с.

26. Короткевич, М.А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть [Текст] / М.А. Короткевич. – Минск: Высшая школа, 2010. – 574 с.

27. Крыжановский, В.К. Технические свойства полимерных материалов [Текст]: учеб.-справ. пособ. / В.К. Крыжановский [и др.]. – СПб.: Профессия, 2003. – 240 с.

28. Кузнецов, А.П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи [Текст] / А.П. Кузнецов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 94 с.
29. Кухаренко, М. Встроенная подсветка в камерах СВН [Электронный ресурс] / М. Кухаренко // Современные системы безопасности и видеонаблюдения. – Режим доступа: <http://roscam-ufa.ru/stati-2/2013-06-30/vstroennaya-podsvetka-v-kamerakh-svn>. – (Дата обращения: 21.07.2017).
30. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололёдных районах [Текст] / И.И. Левченко [и др.]. – М.: МЭИ, 2007. – 448 с.
31. Лукьянов, А.М. Расчёт сжатых стержней на устойчивость и продольно-поперечный изгиб [Текст]: метод. указания / А.М. Лукьянов, М.А. Лукьянов, А.И. Марасанов. – М.: МИИТ, 2012. – 48 с.
32. Мандрыкин, С.А. Эксплуатация и ремонт электрооборудования станций и сетей [Текст] / С.А. Мандрыкин, А.А. Филатов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 344 с.
33. Марголин, Н.Ф. Сопротивления воздушных линий передачи [Текст] / Н.Ф. Марголин. – М.: Объединённое научно-техническое издательство, 1937. – 62 с.
34. Медвед, Д.Б. Влияние погодных условий на беспроводную оптическую связь [Текст] / Д.Б. Медвед // Вестник связи. – 2001. – №4. – С. 154-157.
35. Меркин, Д.Р. Введение в механику гибкой нити [Текст] / Д.Р. Меркин. – М.: Наука, 1980. – 240 с.
36. Минуллин, Р.Г. Методы и аппаратура определения мест повреждений в электросетях [Текст] / Р.Г. Минуллин. – Казань: Энергопрогресс, 2002. – 152 с.
37. Минуллин, Р.Г. Обнаружение гололёдных образований на линиях электропередачи локационным зондированием [Текст] / Р.Г. Минуллин, Д.Ф. Губаев. – Казань: КГЭУ, 2010. – 208 с.
38. Михеев, М.А. Основы теплопередачи [Текст] / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – 2-е изд., стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

39. Нгуен, Т.Ф. Информационно-измерительная система распознавания аварийных режимов воздушных линий электропередачи [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Т.Ф. Нгуен. – Волгоград, 2015. – 118 с.
40. Репин, А.И. Промежуточные опоры из композиционных материалов для ВЛ 110-220 кВ [Текст] / А.И. Репин, О.А. Савотин, А.И. Павлов // Энергия единой сети. – № 2 (13). – С. 52-59.
41. Савицкий, Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения [Текст] / Г.А. Савицкий. – М.: Стройиздат, 1972. – 110 с.
42. Смайт, В. Электростатика и электродинамика [Текст]: пер. с англ. / В. Смайт. – М.: Издательство иностранной литературы, 1954. – 604 с.
43. Степунин, А.С. Отношение сигнал/шум [Электронный ресурс] / А.С. Степунин // Инфракрасная подсветка и инфракрасные прожекторы для систем теле- и видеонаблюдения. – Режим доступа: <http://www.stepunin.ru/OSS.rtf>. – (Дата обращения: 16.07.2017).
44. Титов, Д.Е. Мониторинг интенсивности гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи и в контактных сетях [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Д.Е. Титов. – Саратов, 2014. – 150 с.
45. Справочник по проектированию электрических сетей [Текст] / под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.
46. Хайкин, С. Нейронные сети. Полный курс [Текст]: пер. с англ. / С. Хайкин. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
47. Хакимзянов, Э.Ф. Математическая модель задержки и затухания высокочастотных сигналов в линиях электропередачи с гололёдными образованиями [Текст] / Э.Ф. Хакимзянов, Р.Г. Минуллин, Р.Г. Мустафин // Энергетика Татарстана. – 2011. – № 2. – С. 24-28.
48. Шилин, А.А. Информационно-измерительная система контроля аварийных режимов воздушных линий электропередачи [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Шилин. – Волгоград, 2012. – 121 с.
49. Шилин, А.А. Устройство видеоизмерения линейного габарита для оценки интенсивности оледенения ЛЭП [Текст] / А.А. Шилин, С.С.

Дементьев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19, № 11-12. – С. 135-141.

50. Шилин, А.А. «Умные» опоры воздушных линий электропередачи / А.А. Шилин, Н.С. Артюшенко, С.С. Дементьев // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодёжи : матер. III российской молодёжной науч. школы-конф. (21-23 окт. 2015 г.) / Нац. исслед. Томский политехн. ун-т. - Томск, 2015. - С. 235-239.

51. Приборы контроля и диагностики в электроэнергетике [Текст]: учеб. пособ. / А.Н. Шилин [и др.]. – Волгоград: ВолгГТУ, 2017. – 131 с.

52. Шилин, А.Н. Диагностика коротких замыканий на воздушных линиях электропередачи с применением искусственной нейронной сети [Текст] / А.Н. Шилин, С.С. Дементьев // Электротехнические комплексы и системы: материалы Международной научно-практической конференции (24 октября 2018 г.) / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2018. – С. 252-255.

53. Шилин, А.Н. Моделирование сопротивления воздушных линий электропередачи [Текст] / А.Н. Шилин, С.С. Дементьев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 5-11.

54. Шилин, А.Н. Оптический метод регистрации прогибов линейной опоры для диагностики состояния ЛЭП [Текст] / А.Н. Шилин, С.С. Дементьев // Известия вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 6. – С. 490-497.

55. Шилин, А.Н. Оптико-электронный прибор контроля оболочек вращения с улучшенными метрологическими характеристиками [Текст] / А.Н. Шилин, Д.Г. Сницарук // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2017. – № 9. – С. 14-19.

56. Шилин, А.Н. Расчёт погрешностей рефлектометров для мониторинга линий электропередачи [Текст] / А.Н. Шилин, А.А. Шилин, Н.С. Артюшенко // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 9. – С. 52-59.

57. А. с. 122543 СССР, МКИ G 01 R 29/00. Способ измерения кратковременных изменений электрических величин [Текст] / М.П.

Розенкноп (СССР). – № 612499/24; заявл. 26.11.1958; опубл. 03.09.1959, Бюл. № 18. – 2 с.: ил.

58. Пат. 2212744 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для измерения гололёдной и ветровой нагрузок с контролем направления ветра на воздушных линиях электропередачи [Текст] / И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, Е.В. Рябуха; Новочеркасский политехнический университет. – 2003.

59. Пат. 2222858 Российская Федерация, Н 02 J 13/00. Устройство для дистанционного контроля состояния провода воздушной линии электропередачи (варианты) [Текст] / Б.И. Механошин, В.А. Шкапцов; Механошин Б.И., Шкапцов В.А. – 2004.

60. Пат. 2273932 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16, Н 04 В 3/54. Устройство телеизмерения гололёдной, ветровой и гололёдно-ветровой нагрузок на провод промежуточного пролёта воздушной линии электропередачи с индикацией относительного направления ветра [Текст] / В.Я. Башкевич, М.П. Гапоненков, С.В. Аверьянов, В.И. Золотарёв, Г.Г. Угаров; Башкевич В.Я., Гапоненков М.П., Аверьянов С.В., Золотарёв В.И., Угаров Г.Г. – 2006.

61. Пат. 2273933 Российская Федерация, Н 02 G 7/16, Н 04 В 03/54, G 08 C 19/02. Аэродинамический способ обнаружения отложений на проводе промежуточного пролёта воздушной линии электропередачи и устройство для его осуществления [Текст] / В.Я. Башкевич; Башкевич В.Я. – 2006.

62. Пат. 2494511 Российская Федерация, МПК Н 02 G 07/16. Способ контроля провиса провода линии электропередачи [Текст] / Р.Г. Мустафин; КГЭУ. – 2012.

63. Пат. 2506536 Российская Федерация, G 01 В 11/03. Способ субпиксельного контроля и слежения за перемещением удалённого объекта [Текст] / А.П. Брюховецкий, Ю.Н. Бугаев, А.В. Суетенко, В.И. Третьяков, М.О. Усс; ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ». – 2014.

64. Пат. 2533178 Российская Федерация, МПК Н 02 J 13/00, Н 02 G 7/04. Система контроля механических нагрузок на протяжённые элементы воздушной линии электропередачи [Текст] / К.Б. Механошин, О.И. Богданова, С.В. Черчик; Общество с ограниченной ответственностью «ОПТЭН». – 2014.
65. Пат. 2554718 Российская Федерация, МПК Н 02 G 07/16. Способ обнаружения гололёдных, изморозевых и сложных отложений на проводе и устройство для его осуществления [Текст] / Д.Е. Титов, С.А. Петренко, Г.Г. Угаров; Титов Д.Е. – 2015.
66. Пат. 2658344 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16 Система контроля гололёдных нагрузок на провода воздушных линий электропередачи / А.Н. Шилин, А.А. Шилин, С.С. Дементьев; Дементьев С.С. – 2018.
67. Пат. 2677498 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/08, G 01 C 11/02 Устройство для контроля состояния воздушных линий электропередачи / А.Н. Шилин, А.А. Шилин, С.С. Дементьев; ВолгГТУ. – 2019.
68. П. м. 100632 РФ, МПК G 01 R 31/08. Устройство для определения местоположения и вида повреждения на воздушной линии электропередачи / А.А. Шилин, А.Н. Шилин, В.С. Лукьянов; ГОУ ВПО ВолгГТУ. – 2010.
69. П. м. 126144 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/08. Устройство для определения местоположения и вида повреждений воздушной линии электропередачи (варианты) / А.А. Кучерявенков, А.С. Карташов; Кучерявенков А.А. – 2013.
70. Индикаторы обнаружения мест повреждения линий электропередачи Nortroll [Электронный ресурс] // ООО «СИКАМ» (SICAME-Россия). – Режим доступа: <http://sicame.ru/images/NORTROLL.pdf>. – (Дата обращения: 05.04.2019).
71. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий [Электронный ресурс]: СТО 56947007-29.240.55.143-2013. – Введ. 2013-02-13. – Режим доступа: <http://www.fsk->

ees.ru/upload/docs/sto_56947007-29.240.55.143-2013.pdf. – (Дата обращения: 06.10.2018).

72. Методические указания по определению климатических нагрузок на ВЛ с учётом её длины [Электронный ресурс]: СТО 56947007-29.240.057-2010 / разраб. Филиалом ОАО «НТЦ электроэнергетики» – ВНИИЭ. – Введ. 2010-09-08. – Режим доступа: <http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.057-2010.pdf>. – (Дата обращения: 10.12.2016).

73. Определение фокусного расстояния объектива [Электронный ресурс] // Нева Электроникс. – Режим доступа: http://www.n-el.ru/stati/kak_rasschitat_fokusnoe_rasstoianie_obektiva.html. – (Дата обращения: 10.12.2016).

74. Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе [Электронный ресурс] // Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы. – Режим доступа: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ETP_FSK_EES_2014_02_06.pdf. – (Дата обращения: 28.10.2017).

75. Руководство по проектированию многогранных опор и фундаментов к ним для ВЛ напряжением 110-500 кВ [Электронный ресурс] // Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы – Режим доступа: <http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.55.054-2010.pdf>. – (Дата обращения: 30.05.2017).

76. Bennett, A. Introduction to atmospheric visibility estimation [Электронный ресурс] / A. Bennett // Bristol industrial and research associates limited. – Режим доступа: http://www.biral.com/wp-content/uploads/2015/02/Introduction_to_visibility-v2-2.pdf. – (Дата обращения: 21.07.2017).

77. Dube, M. Non-Invasive Detection of Faults in Power Lines / M. Dube, N. Cagnon, A. Hainese. – Worcester: WPI, 2008. – 69 p.

78. Huang, Qi. A novel approach for fault location of overhead transmission line with noncontact magnetic-field measurement [Текст] / Qi Huang, Wei Zhen, P. W. T. Pong // IEEE Transactions on power delivery. – 2014. – Vol. 27, No. 3 – P. 1186-1195.

79. Jafar, F. Liquid film falling on horizontal circular cylinders [Текст] / F. Jafar, G. Thorpe, O.F. Turan // 16th Australasian Fluid Mechanics Conference (2-7 December 2007) / The University of Queensland. – Brisbane, Australia, 2007. – P. 1193-1200.
80. Kabalci E. A Measurement and power line communication system design for renewable smart grids [Текст] / E. Kabalci, Y. Kabalci // Measurement science review. – 2013. – Vol. 13, No 5. – P. 248-252.
81. Lovrenčić, V. The contribution of conductor temperature and sag monitoring to increased ampacities of overhead lines (OHLs) [Текст] / V. Lovrenčić, M. Gabrovšek, M. Kovač, N. Gubelj, Z. Šojat, Z. Klobas // PERIODICA POLYTECHNICA. Electrical engineering and computer science. – 2015. – Vol. 59, No. 3. – P. 70-77.
82. Masters, T. Practical neural network recipes in C++ [Текст] / T. Masters. – Boston: Academic Press Inc, 1993. – 494 p.
83. Morgan, V.T. Thermal behaviour of electrical conductors: steady, dynamic and fault-current ratings [Текст] / V.T. Morgan. – New-York: Research Studies Press, 1991. – 741 p.
84. Olsen, R.G. Magnetic fields from electric power lines: theory and comparison to measurements [Текст] / R.G. Olsen, M. Frazier, R. Baishiki // IEEE Transactions on power delivery. – 1988. – Vol. 59, No. 3. – P. 2127-2136.
85. Seppa, T.O. Accurate ampacity determination: temperature-sag model for operational real time ratings [Текст] / T.O. Seppa // IEEE Transactions on power delivery. – 1995. – Vol. 10, No. 3. – P. 1460-1470.
86. Sun, X. Non-contact operation-state monitoring technology based on magnetic field sensing for overhead high-voltage transmission line [Текст] / X. Sun, Q. Huang, Y. Hou, L. Jiang, P. W. T. Pong // IEEE Transactions on power delivery. – 2013 – Vol. 28, No. 4. – P. 2145-2153.
87. Tian, S. A new magnetic field measurement based method to detect faulty line and fault location for single phase to ground fault occurred in distribution network [Текст] / S. Tian [et al.] // Power System Protection and Control. – 2016. – Vol. 44. – P. 61-67.
88. Tomaszewski, M. The study of weather conditions favourable to the accretion of icing that pose a threat to transmission power lines [Текст] / M.

Tomaszewski [et al.] // International Journal of Critical Infrastructure Protection. – 2019. – Vol. 25. – P. 139-151.

89. Wachal, R. A computer vision early-warning ice detection system for the Smart Grid [Текст] / R. Wachal [et al.] // IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (Orlando, FL, May 07-10, 2012). – Orlando, 2012. – 1-6 pp.

90. Wait, J.R. On the image representation of the quasi-static fields of a line current source above the ground [Текст] / J.R. Wait, K.P. Spies // Canadian journal of physics. – 1969. – Vol. 47. – P. 2731-2733.

91. Zhang, Z. Smart fault indicators with ultra-low power microcontrollers [Электронный ресурс] / Z. Zhaohong, P. Chung // Texas Instruments. – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/wp/slay050/slay050.pdf>. – (Дата обращения: 05.04.2019).