

Кабашов В.Ю.

ЗАЩИТА СЕЛЬСКИХ ВОЗДУШНЫХ
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 6–10 кВ
ОТ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРОВОДОВ
ПРИ ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ НАГРУЗКАХ

Монография



ЗДРАВОХРАНЕНИЕ
БАШКОРТОСТАНА
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Уфа – 2010

УДК 621.315
ББК 31.279
К12

Рецензенты:

Зав. кафедрой электроснабжения и электрических машин
Московского государственного агроинженерного университета
им. В.П. Горячкина, доктор технических наук, профессор – *Лецинская Т.Б.*;

профессор кафедры электроснабжения и применения
электрической энергии в сельском хозяйстве
Башкирского государственного аграрного университета,
доктор технических наук – *Андреанова Л.П.*

Кабашов В.Ю.

К12 Защита сельских воздушных линий электропередачи 6–10 кВ
от низкочастотных колебаний проводов при гололедно-ветровых
нагрузках: монография / В.Ю. Кабашов. – Уфа: Изд-во «Здраво-
охранение Башкортостана», 2010. – 168 с.

ISBN 978-5-8372-0206-3

В монографии приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению расстояний между проводами сельских ВЛ 6–10 кВ при разных режимах низкочастотных колебаний (пляске) проводов и параметрах пролета; перемещений проводов при опадении гололедных отложений с учетом их предварительного закручивания, предложены гасители пляски проводов, провод электропередачи новой конструкции, методика расчета времени плавки эксцентричных гололедных отложений, наблюдающихся при пляске проводов, способ и устройства для дистанционного определения пляски проводов и прогнозирования ее возникновения.

Рекомендуется для инженерно-технических и научных работников, занимающихся проектированием и эксплуатацией воздушных линий, а также для студентов и аспирантов электроэнергетических специальностей.

УДК 621.315
ББК 31.279

ISBN 978-5-8372-0206-3

© Кабашов В.Ю., 2010
© ООО «Издательство «Здравоохранение Башкортостана», 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК.	6
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СБЛИЖЕНИЙ ПРОВОДОВ СЕЛЬСКИХ ВЛ 6–10 кВ ПРИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ (ПЛЯСКЕ) В РЕЖИМЕ ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК	16
2.1. Экспериментальное определение амплитуд низкочастотных колебаний проводов.	16
2.2. Определение расстояний между фазными проводами ВЛ 6–10 кВ при пляске	24
ГЛАВА 3. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЗАЩИТЕ СЕЛЬСКИХ ВЛ 6–10 кВ ОТ ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ.	43
3.1. Результаты испытаний известных гасителей пляски проводов на ВЛ 6–10 кВ и оценка их эффективности	43
3.2. Повышение аэродинамической устойчивости провода при ветре и гололеде	56
3.2.1. Гасители, активно воздействующие на процессы гололедообразования и пляски.	56
3.3.2. Аэродинамически стабильный провод и результаты его испытаний	75
3.3. Применение плавки гололеда на проводах линий электропередачи переменным током.	87
3.4. Дистанционное обнаружение пляски проводов и прогнозирование её возникновения на ВЛ 10 кВ.	101
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРОВОДОВ МАЛЫХ СЕЧЕНИЙ ПРИ ОПАДЕНИИ ГОЛОЛЕДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ.	117
4.1. Модель закручивания провода по длине пролета в процессе гололедообразования.	118
4.2. Определение зависимости угла закручивания провода от погонной массы гололедных отложений.	127
4.3. Методика и результаты измерений перемещений проводов при опадении гололедных отложений.	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	145
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	148
ПРИЛОЖЕНИЕ.	163

ВВЕДЕНИЕ

Низкочастотные колебания (пляска) проводов как фактор, снижающий надежность электроснабжения, исследуется давно, однако до настоящего времени эта проблема не получила окончательного решения. Выбор расстояний между проводами на опорах с учетом возможной пляски проводится для ВЛ 35 кВ и выше, несмотря на то, что пляска проводов на ВЛ 6–10 кВ встречается чаще и приводит к массовым отключениям линий из-за опасных сближений, схлестываний, обрывов проводов, ослабления и разрушения их креплений проволочной вязкой, срыва штыревых изоляторов, повреждения железобетонных опор и приставок.

Основным критерием для оценки возможной подверженности ВЛ пляске служат статистические данные, обобщающие опыт эксплуатации электрических сетей. Однако для проведения наблюдений требуется длительный период времени, поэтому изучение проблемы пляски и проверка эффективности различных способов защиты воздушных линий электропередачи от низкочастотных колебаний проводов встречает определенные трудности.

Анализ различных мероприятий по борьбе с пляской проводов с учетом накопленного опыта эксплуатации на экспериментальных участках и действующих воздушных линиях электропередачи [8, 67] показывает, что по многим типам гасителей пляски отсутствуют достоверные данные об их эффективности. По некоторым из них сведения ограничиваются описанием конструкций и принципа действия. Отсутствует единая методика расчета эффективности гасителей пляски проводов. Работоспособность известных гасителей, применяемых на ВЛ 35 кВ и выше, не проверена в условиях пляски на опытных и действующих ВЛ 6–10 кВ с учетом ряда их конструктивных отличий и особенностей гололедообразования на проводах малых сечений.

Особенностью поведения проводов малых сечений в условиях гололедообразования является их значительное закручивание под действием эксцентричной нагрузки односторонних отложений. С учетом закручивания проводов их подскок при опадении гололедных отложений имеет сложную траекторию перемещения провода. Горизонтальные отклонения при таких перемещениях проводов увеличивают вероятность их опасных сближений при несинхронных маятниковых раскачиваниях под действием ветра.

В силу изложенного потребовалось решить ряд задач: определить расстояния между фазными проводами в пролете ВЛ 6–10 кВ, возникающие в процессе пляски при различных ее режимах, параметрах пролета и метеоусловиях, провести исследование перемещений проводов малых сечений при опадении гололедных отложений с учетом их предварительного закручивания; провести испытания известных гасителей пляски в опытных пролетах комплекса экспериментальных линий; разработать эффективные мероприятия по предотвращению пляски или существенному снижению ее интенсивности, включая использование для этих целей плавки гололеда на проводах переменным током.

ГЛАВА 1. ОБЗОР РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

При воздействии гололедно-ветровых нагрузок возникают низкочастотные колебания (пляска) проводов воздушных линий электропередачи, их сближения на опасные в изоляционном отношении расстояния и даже схлестывания, что вызывает массовые и продолжительные отключения сельскохозяйственных потребителей, нанося им значительный экономический ущерб. Подскок проводов при опадении гололедных отложений имеет сложную траекторию их перемещений, при этом горизонтальные отклонения проводов увеличивают вероятность их опасных сближений при несинхронных раскачиваниях под действием ветра. Теоретическому и экспериментальному исследованию взаимных перемещений и сближений проводов и разработке мер по их ограничению посвящено много научных работ. В настоящей главе дан обзор этих работ с систематизацией материала по трем направлениям: наблюдения в производственных и экспериментальных условиях, теоретические исследования, мероприятия по демпфированию низкочастотных колебаний и ограничению опасных сближений проводов воздушных линий электропередачи в гололедно-ветровых режимах.

Значительная часть опасных сближений и схлестываний связана с динамическим поведением проводов при пляске и порывистых ветрах [7, 21, 78, 80, 88, 107]. В работе [78] показано, что по этим причинам в энергосистемах происходит до 50% продолжительности аварийных перерывов электроснабжения.

Пляска проводов как фактор, снижающий надежность работы воздушных линий электропередачи, исследуется давно. Проблема пляски занимает значительное место в работах В. В. Бургсдорфа,

Р. М. Бекметьева, И. И. Власова, Э. С. Глебова, А. Я. Либермана, Е. П. Миронова, Д. С. Савваитова, В. А. Шкапцова, Л. В. Яковлева, а также зарубежных исследователей Дж. Ден-Гартога, В. Даниеля, Ж.-Л. Лильена, Дж. Ратковского, А. Ричардсона, А. Эдвардса.

Особое внимание в работах этих авторов уделено наблюдениям за пляской проводов ВЛ 110 кВ и выше, так как считалось, что повторяемость пляски на линиях с проводами большого диаметра значительно выше, чем на линиях относительно низкого класса напряжения с проводами малого диаметра [8, 13, 22, 54]. Однако опыт эксплуатации в электросетевых предприятиях Башкирской энергосистемы приводит к противоположному выводу: пляска проводов ВЛ 6–10 кВ наблюдается чаще, чем в сетях 35–110 кВ, и практически распространена по всей территории Башкирии [80, 88, 92]. Так, за период с 1967 по 1971 гг. из-за пляски проводов ежегодно повреждалось 12...38% общего числа ВЛ 6–10 кВ [80]. Эти разногласия могут быть устранены только на основе результатов наблюдений за процессом гололедообразования в естественных условиях одновременно на проводах разного диаметра.

Исследования пляски проводов ВЛ 6–10 кВ выполнены в работах Ф. Х. Усманова и Ю. Ж. Байрамгулова [4, 5, 80, 82, 83, 87, 88, 92]. В них приведен анализ повреждаемости элементов пролета ВЛ при пляске, выполнены наблюдения за пляской проводов малых сечений в полевых условиях с фиксированием ее основных параметров и сопутствующих метеорологических условий, определены усилия, действующие на элементы пролета в процессе пляски. Результаты исследований показали необходимость координации расстояний между проводами ВЛ 10 кВ по условиям их опасных сближений при пляске.

Определяющим параметром пляски при оценке возможных сближений проводов является ее амплитуда. В большинстве ра-

бот, выполненных на основе наблюдений, приводится лишь величина двойной амплитуды (размаха) пляски проводов, которая на ВЛ 6–10 кВ достигает 2...3 м [57, 80], на ВЛ 35 кВ – 4 м [57], на ВЛ 110–330 кВ – 6 м [8, 30, 51, 78], на ВЛ 500 кВ – 7 м [24], а в отдельных случаях 10 м [16, 57]. Однако данные приведены без соотношения к стрелам провеса проводов, что затрудняет оценку возможности их опасного сближения.

Амплитуда пляски проводов изменяется в широких пределах. Отношение амплитуды пляски к стреле провеса проводов находится в пределах 0,1...1,0 [113], однако в работе [83] приводится другой диапазон: 0,1...0,4. Существенное различие в приведенных данных объясняется тем, что амплитуда пляски является случайной величиной и зависит от многих независимых факторов: аэродинамических характеристик профиля провода с гололедом, скорости и направления ветра, механических параметров провода в пролете. Поэтому возникла необходимость в проведении измерений амплитуд пляски проводов на ВЛ 6–10 кВ в полевых условиях и определении закона распределения вероятностей полученных опытных данных.

Сближение проводов при сбросе гололедных отложений изучено недостаточно. Имеются теоретические и экспериментальные исследования подскока проводов в вертикальной плоскости при сбросе грузов, имитирующих гололедную нагрузку, применительно к ВЛ 35–220 кВ [11, 18, 33, 50, 70, 108, 115]. В ряде работ [1, 19, 31, 101, 111] указывается на возможность опасных сближений между проводом, нагруженным гололедом и проводом, освобожденным от него.

Особенностью поведения проводов ВЛ 6–10 кВ является их значительное закручивание под действием эксцентричной нагрузки, возникающей при образовании одностороннего гололеда. При опадении гололедных отложений возникающие упругие силы сопротивления крутящему моменту приводят к сложным формам перемещения про-

вода. На сложную форму перемещения проводов указывали О. Г. Вексельман [17] и А. А. Глазунов [23]. Горизонтальные отклонения проводов при таких перемещениях увеличивают вероятность их опасных сближений. Однако, в научных работах отсутствуют данные о величине и характере перемещения (подскока) проводов при сбросе гололеда в пролетах ВЛ 6–10 кВ. Поэтому потребовалось изучение различных видов отложений на проводах малых сечений в естественных условиях гололедообразования, влияния их параметров на величину закручивания проводов, проведение экспериментальных исследований перемещений провода при сбросе гололедных отложений с учетом его предварительного закручивания.

В работах [1, 2, 57, 109] для выбора схемы расположения проводов и грозозащитных тросов на ВЛ 35–500 кВ предлагается определять расстояния между ними по условиям пляски. Принимается, что в расчетном режиме перемещение провода при пляске происходит по эллиптической кривой и остается в пределах эллипса, который располагается перпендикулярно к оси линии электропередачи. Его большая ось несколько отклонена от вертикали и соответствует наибольшему размаху колебаний провода.

В результате графического построения эллипсов с учетом изоляционных промежутков между ними или расчетов по приближенным формулам определяются вертикальные расстояния и горизонтальные смещения между проводами при их расположении на опоре ВЛ. Однако отсутствие аналитической связи между взаимными перемещениями проводов ограничивает применение этого метода расчета для теоретических исследований сближений проводов при пляске.

Пляска проводов малых сечений согласно данным, представленным в работах [80, 83, 92], происходит в вертикальной плоскости, в основном, с двумя полуволнами в пролете. При существующих

схемах расположения фазных проводов на опоре ВЛ 6–10 кВ опасные в изоляционном отношении расстояния могут возникнуть между верхним проводом при его отклонении под действием ветра и нижним проводом при его пляске. Этот расчетный режим наиболее характерен при эксплуатации таких воздушных линий электропередачи.

Расстояния между проводами на опорах ВЛ 6–10 кВ до сих пор принимаются без проверки их по условиям пляски. Поэтому возникла необходимость в составлении модели сближения проводов в расчетном режиме пляски при разных значениях амплитуды, скорости ветра, стрел провеса проводов и степени их разрегулировки.

Частые аварийные отключения воздушных линий электропередачи, возникающие в динамических режимах при воздействии ветра и гололеда, выдвигают задачу по демпфированию колебаний проводов и ограничению их опасных сближений на первый план.

Для борьбы с пляской проводов в нашей стране и за рубежом разработано большое число различных способов и устройств. Несмотря на это, эта важная проблема на сегодня остается до конца не решенной. По многим типам гасителей отсутствуют надежные данные об их эффективности. Что касается ВЛ 6–10 кВ, то вопросам повышения их надежности в режимах пляски проводов до последнего времени внимания вообще не уделялось. Многие известные гасители, применяемые на ВЛ 35 кВ и выше, для ВЛ 10 кВ оказались малоперспективными [85]. Классификация устройств для гашения пляски проводов по принципу действия и их описание представлены в ряде работ [8, 24, 29, 58, 67]. Остановимся на известных разработках с позиции их значимости и возможности использования на ВЛ 6–10 кВ.

Наибольшее распространение в СССР среди известных гасителей получили разработанные во ВНИИЭ аэродинамические стабилизаторы [14, 15, 16, 58, 116]. Они выполнены в виде узких длинных пластин, жестко прикрепленных снизу к проводу в плоскости его

провисания на части длины пролета. Придавая проводу при образовании гололеда более устойчивую аэродинамическую форму, стабилизаторы компенсируют вызывающие пляску подъемные силы.

Однако испытания аэродинамических стабилизаторов в полевых условиях позволили выявить их недостаточную эффективность для ВЛ 6–10 кВ [85]. Под действием односторонних гололедных отложений провода малых сечений существенно закручиваются и пластина стабилизатора отклоняется от вертикального положения (до 40...80°), что, в ряде случаев, способствует возникновению пляски проводов. В работах [8, 51, 58] отмечалось, что отклонение пластин стабилизатора при их установке или в процессе эксплуатации ВЛ способствует возникновению колебаний проводов даже при отсутствии гололеда. Так, на ВЛ 110 и 500 кВ Куйбышевэнерго и Донбассэнерго аэродинамические стабилизаторы после двухлетней эксплуатации были демонтированы из-за отсутствия положительного эффекта. Поэтому возникла необходимость в усовершенствовании конструкции аэродинамического стабилизатора (авторское свидетельство № 746799) [122] и создании новых гасителей пляски, лишенных рассмотренных выше недостатков (авторское свидетельство № 936148) [127].

В последние годы в России проблема защиты от пляски проводов решается только применительно к ВЛ 110–500 кВ. Фирма ОРГРЭС разработала и выпускает новые совмещенные гасители пляски и вибрации одиночных проводов, гасители пляски для расщепленной фазы, ограничители гололедообразования и колебаний проводов, выполненные в виде грузов различной формы, эксцентрично установленных на концах гибких элементов (тросов), жестко закрепленных на проводе, при этом гибкие элементы расположены параллельно проводу [52, 104, 105]. На основе исследований, проведенных во ВНИИЭ [71, 100], разработан метод гаше-

ния пляски проводов на ВЛ 330–500 кВ, основанный на комбинированном использовании эксцентричных грузов и широко применяемых за рубежом расстраивающих маятников [96, 112]. Разработанные устройства и метод гашения пляски проводов прошли проверку работоспособности на ВЛ 110 кВ Удмуртэнерго [100] и ВЛ 220 кВ Таймырэнерго [105]. Однако, их использование на ВЛ 6–10 кВ из-за отсутствия результатов полевых испытаний пока не представляется возможным.

В США широкое распространение получили устанавливаемые на проводах ВЛ спиральные демпферы пляски – спойлеры [32, 76, 114], выполненные из прутка диэлектрического материала в виде плотного двойного повива вокруг провода с большим шагом и с жестко закрепленными концами. Зона охвата провода спойлерами составляет 20...25% длины пролета. Изменение профиля провода с установленным на нем спойлером и гололедным отложением нарушает регулярность сил аэродинамического воздействия, распределенных по длине провода.

Однако, ограничение зоны охвата спойлерами провода по его длине снижает эффективность подавления пляски. Для устранения этого недостатка разработан новый провод линии электропередачи, в котором повышение аэродинамической устойчивости при воздействии ветра и гололеда достигается за счет изменения его конструкции: одна проволока внешнего повива имеет больший диаметр, чем остальные (авторское свидетельство № 714509) [121]. Аэродинамически стабильный провод на базе провода АС-70/11 был изготовлен в заводских условиях. С целью оценки эффективности демпфирования пляски проводов возникла необходимость в проведении сравнительных испытаний аэродинамически стабильного провода и спойлера в натуральных пролетах ВЛ 10 кВ в гололедно-ветровых режимах.

Эффективным средством борьбы с пляской проводов является плавка образовавшегося гололеда электрическим током [1, 8, 16, 24, 58, 64]. При этом подъемная сила исчезает и колебания проводов прекращаются. Этот способ был разработан во ВНИИЭ, но долгое время оставался без внимания со стороны энергосистем страны. Опыт применения плавок гололеда на ВЛ 500 кВ [16, 24] доказал эффективность подавления пляски проводов. В последние годы плавка гололеда для предотвращения пляски проводов широко используется на ВЛ ряда энергосистем: Киевэнерго, Мосэнерго, Днепрэнерго, Харьковэнерго, Башкирэнерго, Донбассэнерго, ПО Дальние электропередачи [58].

Продолжительность плавки гололеда определяется в зависимости от величины тока, метеоусловий во время плавки, структуры и размеров отложений на проводе [55, 64, 74], при этом в расчетах форма гололеда принимается цилиндрической. Пляска проводов ВЛ 6–10 кВ наблюдается, в большинстве случаев, при малых эксцентричных гололедных отложениях, имеющих со стороны провода, противоположной гололедонесущему потоку, тонкую стенку, при расплавлении которой происходит их опадение. Такие отложения по форме и внутреннему расположению провода существенно отличаются от цилиндрического гололеда. Не учет этих особенностей приводит к завышенному времени плавки, что подтверждается данными, приведенными в работе [16]. Поэтому сведения о величине стенки проплавления эксцентричных гололедных отложений в зависимости от их геометрических размеров, полученные на основе наблюдений в естественных условиях, позволят разработать и экспериментально проверить методику расчета времени плавки гололеда с целью предотвращения пляски проводов ВЛ 6–10 кВ.

Эффективность борьбы с пляской проводов путем применения плавки гололеда определяется, в первую очередь, своевременным

получением информации о ее возникновении на отдельных участках ВЛ. Однако проблеме создания информационной системы обнаружения пляски проводов для проведения плавки гололеда в России и за рубежом внимания практически не уделяется.

В настоящее время в МЭС Юга, а также в ряде энергосистем юга России: Ставропольэнерго, Ростовэнерго, Кубаньэнерго находятся в опытно-промышленной эксплуатации информационные системы контроля гололедообразования на воздушных линиях электропередачи [55, 56], включающие датчики гололедной нагрузки типа ДМС. Однако они не позволяют фиксировать возникновение пляски проводов. В Германии [110] сделана попытка создания системы дальнего обнаружения пляски проводов ВЛ 110 кВ и выше, позволяющая прогнозировать 90% случаев низкочастотных колебаний. Имеются сведения о способах обнаружения пляски проводов путем установки вблизи проводов специальных антенн [138], индукционных преобразователей тока [118], механических контактных устройств непосредственно на проводе [126]. Однако они не позволяют определить все необходимые параметры пляски проводов (амплитуду, частоту, число полуволн в пролете), представляющие важную информацию для принятия диспетчером решения о необходимости и очередности проведения плавки гололеда на проводах воздушных линий электропередачи. Поэтому для эффективного использования плавки гололедных отложений возникла необходимость в разработке новых, лишенных указанных выше недостатков, способов и датчиков обнаружения пляски проводов, а с целью прогнозирования ее возникновения – устройств для контроля начала гололедообразования (авторские свидетельства №№ 1330687, 1436166, 1476560, 1479997, патент РФ № 2017297) [132, 134, 135, 136, 137].

Изменение взаимного расположения проводов и увеличение расстояний между ними, как средство устранения опасных сближений проводов при ветре и гололеде [1, 7, 8, 44], требует опор повышенной прочности с удлиненными траверсами и связано с увеличением капиталовложений, трудозатрат, расхода металла. В этом направлении заслуживают внимания мероприятия, разработанные в Башкирской энергосистеме [82, 84, 88]. На применяемых конструкциях железобетонных и деревянных опор ВЛ 6–10 кВ увеличены в 1,2...1,5 раза вертикальные расстояния между проводами при сохранении существующих горизонтальных смещений. Одновременно применено повышенное тяжение проводов, равное 0,6 сопротивления временному разрыву $\sigma_{вр}$ в режиме максимальных нагрузок. Однако, в ряде случаев (длинные пролеты при переходах и пересечениях, недостаточные запасы по габариту) эти меры не обеспечивают полной защиты от опасных сближений проводов при воздействии гололедно-ветровых нагрузок [82].

Таким образом, на основе анализа обзора отечественных и зарубежных научных работ возникла необходимость в проведении теоретических и экспериментальных исследований взаимных перемещений проводов, вызывающих их сближения при низкочастотных колебаниях (пляске) и опадении гололедных отложений, применительно к сельским ВЛ 6–10 кВ, разработке эффективных устройств для демпфирования колебаний и ограничения сближений проводов в условиях воздействия гололедно-ветровых нагрузок.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СБЛИЖЕНИЙ ПРОВОДОВ СЕЛЬСКИХ ВЛ 6–10 кВ ПРИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ (ПЛЯСКЕ) В РЕЖИМЕ ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

2.1. Экспериментальное определение амплитуд низкочастотных колебаний проводов

Пляска проводов представляет собой автоколебательный процесс, который возбуждается и поддерживается аэродинамическими силами, возникающими при обтекании воздушным потоком проводов, покрытых гололедом. В работах [8, 13, 22, 54] отмечается, что подверженность пляске линий с проводами большого диаметра и линий сверхвысокого напряжения с пучками проводов в фазе значительно выше, чем линий относительно низкого класса напряжения с проводами малого диаметра. Однако, опыт эксплуатации в сетевых предприятиях Башкирской энергосистемы приводит к противоположному выводу: пляска проводов в сельских сетях 6–10 кВ более часто повторяется и более широко распространена, чем в сетях 35–500 кВ [80, 88, 92]. В отдельные гололедные сезоны явление пляски охватывает почти всю территорию Башкирии. За период с 1967 по 1971 гг. из-за пляски проводов ежегодно повреждалось 12...38% общего числа ВЛ 6–10 кВ. На комплексе экспериментальных линий [44] в гололедные сезоны 1973–1976 гг. зафиксировано 210 случаев пляски проводов ВЛ 10 кВ [83]. Следует отметить, что пляска проводов ВЛ 35 кВ и выше распространена лишь на 40% территории республики [88].

Изучение особенностей сельских сетей 6–10 кВ позволило установить присущие линиям данного класса отличия и специфичность возникновения и протекания в них явления пляски проводов.

Визуально-инструментальные наблюдения, выполненные в полевых условиях, показали, что пляска возникает чаще при односторонних гололедных отложениях, покрывающих лишь наветренную поверхность провода [83, 94]. Поэтому нами были определены форма и размеры односторонних гололедных отложений на проводах разного диаметра после окончания процесса гололедообразования (табл. 2.1). На проводах с малым диаметром форма поперечного сечения провода с гололедом более существенно (чем на проводах большого диаметра) отличается от круглой формы, так как с увеличением диаметра провода стенка гололедного отложения уменьшается. Для количественной оценки отличия формы сечения провода с гололедом от круглой введем показатель формы гололедного отложения на проводе:

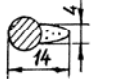
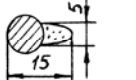
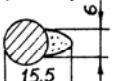
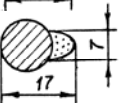
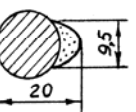
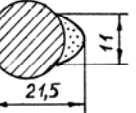
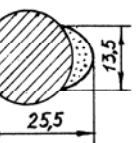
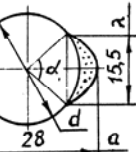
$$K_{\phi} = 1 - \frac{c}{a}, \quad (2.1)$$

где a , c – внешние размеры гололедного отложения, мм.

Согласно нашим наблюдениям и данным, представленным в работах [34, 83, 85], для рассмотренных случаев пляски проводов показатель формы гололедных отложений составляет 0,28...0,53. Анализ данных таблицы 2.1 показывает, что односторонние гололедные отложения на проводах АС-25/4,2; АС-35/6,2; АС-50/8,0; и АС-70/11,0 создают аэродинамически неустойчивые профили провода с гололедом в отличие от проводов большего диаметра, применяемых на ВЛ 35 кВ и выше. Этим и объясняется высокая распространенность и повторяемость пляски проводов на ВЛ 6–10 кВ.

Таблица 2.1

ПАРАМЕТРЫ ГОЛОЛЕДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
НА ПРОВОДАХ РАЗНОГО ДИАМЕТРА

№ пп	Форма и размеры гололедного отложения на проводе, мм	Марка провода/сечение стали, мм ²	Диаметр провода d , мм	Погонная масса гололеда, $\times 10^{-3}$ кг/м	Показатель формы гололедного отложения на проводе
1		АС-25/4,2	6,9	17,0	0,51
2		АС-35/6,2	8,4	19,7	0,44
3		АС-50/8,0	9,6	21,2	0,38
4		АС-70/11	11,4	23,0	0,33
5		АС-120/19	15,2	27,1	0,24
6		АС-150/24	17,1	28,7	0,20
7		АС-240/32	21,6	31,2	0,15
8		АС-300/66	24,5	32,4	0,13

С увеличением диаметра провода погонная масса гололедного отложения увеличивается, что подтверждается результатами исследований, выполненных в работе [62]. Площадь поперечного сечения односторонних гололедных отложений на проводах разного диаметра (табл. 2.1, п. 8) определялась по предложенной нами формуле:

$$S_{\Gamma} = \frac{2}{3} \cdot \lambda \cdot \left[a - \frac{d}{2} \left(1 + \cos \frac{\alpha}{2} \right) \right] - \frac{d^2}{8} \cdot (\alpha - \sin \alpha), \quad (2.2)$$

где $\frac{\alpha}{2} = \arcsin \frac{\lambda}{d}$;

λ – ширина полосы, из которой все капли мороси, тумана или дождя оседают на проводе [62].

При определении погонной массы гололедных отложений на проводах разного диаметра измеренная плотность гололеда составляла 0,9 г/см³.

При жестком креплении проводов малых сечений к штыревым изоляторам наряду с основными волнами пляски, вызванными аэродинамическими силами, имеют место волны, отраженные от концов закрепления провода, которые, накладываясь на основные, существенно усложняют форму и процесс протекания пляски.

Сравнительно малые длины пролетов ВЛ 6–10 кВ создают условия для возникновения наиболее опасных видов пляски с меньшим числом полуволн в пролете и амплитудами пляски, соизмеримыми со стрелами провеса проводов.

Опыт эксплуатации линий, расположенных в районах с интенсивной пляской, а также наблюдения за такими колебаниями в специальных опытных пролетах показали, что возникновение этого процесса является случайным событием, а амплитуда пляски проводов – случайной величиной, зависящей от многих независимо действующих

щих случайных факторов: формы и размеров гололедных отложений, скорости и направления ветра, стрелы провеса проводов, длины пролета и других. Для замены всего массива случайных значений амплитуды пляски проводов несколькими параметрами, необходимо установить закон распределения этих величин с использованием теории вероятностей и математической статистики.

Для решения поставленной задачи были систематизированы и обработаны 150 случаев пляски проводов, зафиксированных на комплексе экспериментальных линий и ВЛ 6–10 кВ электросетевых предприятий Башкирской энергосистемы в 1972–1981 гг. [35].

Пляска проводов наблюдалась в вертикальной плоскости при наличии гололедных отложений на проводах (наибольший диаметр достигал 12...30 мм, наименьший – 8...18 мм) и скорости ветра 5...16 м/с. Так как пляске подвергались провода, имевшие разные стрелы провеса, то в дальнейшем целесообразно оперировать относительной величиной x , равной отношению размаха колебаний (двойной амплитуды) к стреле провеса, т. е. $x = 2A_m/f$.

Весь диапазон рассчитанных значений x разделим на следующие интервалы (разряды): 0,1...0,2; 0,2...0,3; 0,3...0,4; 0,4...0,5; 0,5...0,6; 0,6...0,7. На основании рассчитанного количества значений m_i , приходящегося на каждый разряд, и соответствующих им частот $P_i^* = m_i/n$ (n – общее число наблюдений), составим следующий статистический ряд:

I_i	0,1...0,2	0,2...0,3	0,3...0,4	0,4...0,5	0,5...0,6	0,6...0,7
m_i	8	38	58	34	9	3
P_i^*	0,053	0,253	0,387	0,227	0,060	0,020

На рисунке 2.1а полученный статистический ряд оформлен графически в виде гистограммы. На этом же рисунке построен приближенный график плотности распределения случайной величины x путем соединения середин прямоугольников гистограммы, при этом площадь каждого прямоугольника равна частоте данного разряда.

Из рисунка 2.1а видно, что выравнивание статистического ряда можно выполнить с помощью нормального закона [20]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (2.3)$$

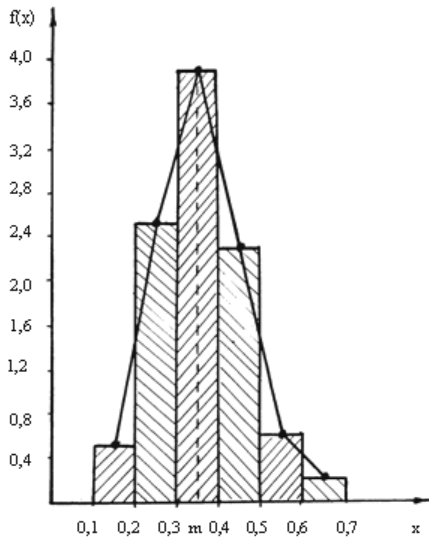
где m – математическое ожидание величины x ;

σ – среднеквадратическое отклонение величины x .

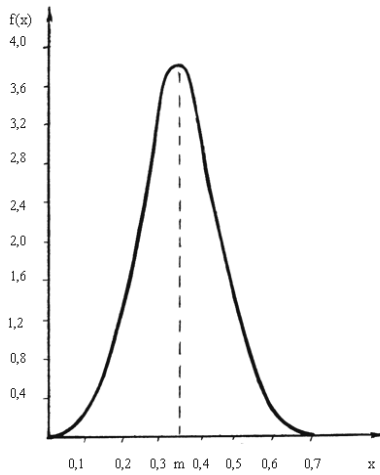
Задача выравнивания переходит в задачу рационального выбора параметров m и σ в выражении (2.3). Последние выберем таким образом, чтобы математическое ожидание m_x и дисперсия D_x теоретического распределения совпадали с соответствующими статистическими характеристиками m_x^* и D_x^* . Приняв за представителя каждого разряда \tilde{x}_i его середину, вычислим приближенно среднее статистическое величины x [20]:

$$m_x^* = \sum_{i=1}^k \tilde{x}_i \cdot p_i^*, \quad (2.4)$$

где k – число разрядов.



a



б

Рис. 2.1. Гистограмма (а) и плотность распределения (б) случайной величины x

Пользуясь выражением дисперсии через второй начальный момент, получим:

$$D_x^* = \alpha_2^* - (m_x^*)^2, \quad (2.5)$$

где $\alpha_2^* = \sum_{i=1}^k \tilde{x}_i^2 \cdot p_i^*$.

Подставив в формулы (2.4), (2.5) численные значения величин из статистического ряда, получим: $m_x^* = 0,355$, $D_x^* = 0,011$.

С учетом того, что $m = m_x^*$ и $\sigma^2 = D_x^*$, определим параметры нормального закона:

$$m = 0,355, \sigma = 0,105.$$

Таким образом, плотность вероятности нормального распределения случайной величины x определится следующим выражением:

$$f(x) = 3,79 \cdot e^{-\frac{(x-0,355)^2}{0,022}} \quad (2.6)$$

На рисунке 2.1б на основе расчетов $f(x)$ по формуле (2.6) на границах разрядов построена выравнивающая гистограмму кривая распределения.

Проверка, выполненная нами [35] по «критерию χ^2 » Пирсона [26] подтвердила согласование полученных экспериментальных данных с гипотезой о том, что случайная величина x , представляющая отношение двойной амплитуды пляски провода к стреле провеса, распределена по нормальному закону.

Вероятность того, что величина x находится в интервале (x_1, x_2) , определяется равенством:

$$P(x_1 < x < x_2) = 3,79 \cdot \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(x-0,355)^2}{0,022}} dx = \Phi^*\left(\frac{x_2-0,355}{0,105}\right) - \Phi^*\left(\frac{x_1-0,355}{0,105}\right), \quad (2.7)$$

где $\Phi^*(x)$ – функция распределения нормального закона.

Полученные результаты позволяют вычислить вероятность появления пляски проводов с определенной амплитудой при фиксированной стреле их провеса, а также определить с требуемой вероятностью диапазон возможных амплитуд пляски проводов. Так, к примеру, отношение размаха колебаний к стреле провеса с учетом формулы (2.7) находится в пределах 0,04...0,67 с вероятностью 0,997, в пределах 0,145...0,565 – с вероятностью 0,954, в пределах 0,2...0,5 – с вероятностью 0,846 и т. д.

При пляске проводов направление ветрового потока к оси пролета изменялось в широком диапазоне, при этом, как показали расчеты, в 80 случаях (из 150) нормальная к оси пролета составляющая скорости ветрового потока составляла 5...10 м/с, в 48 случаях – 11...12 м/с, в 22 случаях – 13...15 м/с.

2.2. Определение расстояний между фазными проводами ВЛ 6–10 кВ при пляске

Опасные сближения и схлестывания проводов ВЛ 6–10 кВ при гололедно-ветровых воздействиях могут происходить одновременно при двух формах перемещения проводов в полете: маятниковых несинхронных колебаниях под действием ветра и низкочастотных автоколебаниях типа пляски при наличии на проводах малых гололедных отложений. Поскольку на практике эти процессы возникают и прекращаются внезапно при изменении скорости

и направления ветра, размеров и форм гололедных отложений, а также в сложных погодных условиях, то истинную причину опасных сближений и схлестываний проводов установить трудно. Во многих случаях пляска проводов рассматривается при анализе аварийных отключений ВЛ как предполагаемая причина отключения из-за опасных сближений проводов, исходя из наличия на момент отключения условий для ее возникновения: ветра и гололеда.

С целью определения возможных расстояний между фазными проводами при пляске, оценки их опасности с изоляционной точки зрения при различных метеоусловиях и параметрах пролета ВЛ 6–10 кВ, разработана математическая модель взаимных сближений проводов по длине пролета, возникающих в процессе пляски.

В работах отечественных и зарубежных исследователей [1, 2, 57, 109] определены расстояния между проводами и тросами на опорах ВЛ 35–500 кВ по условиям пляски проводов. В расчетном режиме пляска принималась с максимально установившейся амплитудой и перемещением проводов по эллиптической кривой, расположенной перпендикулярно к оси ВЛ с наклоненной к вертикали большой осью.

Явление пляски проводов в сельских сетях напряжением 6–10 кВ принципиально отличается от пляски проводов ВЛ 35–500 кВ. Согласно нашим наблюдениям, проведенным в полевых условиях, и данным, представленным в работах [80, 83, 92], пляска проводов малых сечений происходит в вертикальной плоскости, в основном с двумя полуволнами, при этом в пролете одновременно колебались один или два провода. Поэтому при составлении модели взаимных сближений проводов малых сечений при пляске рассмотрим наиболее опасный случай (рис. 2.2): в пролете ВЛ имеет место пляска нижнего провода (со стрелой провеса f_2) в вертикальной плоскости с двумя полуволнами, амплитудой A_m , при этом верхний провод (со стре-

лой провеса f_1) отклоняется под действием ветрового потока на угол φ . Взаимное расположение проводов на опоре ВЛ определяется величиной горизонтального смещения $a/2$ и вертикального – b .

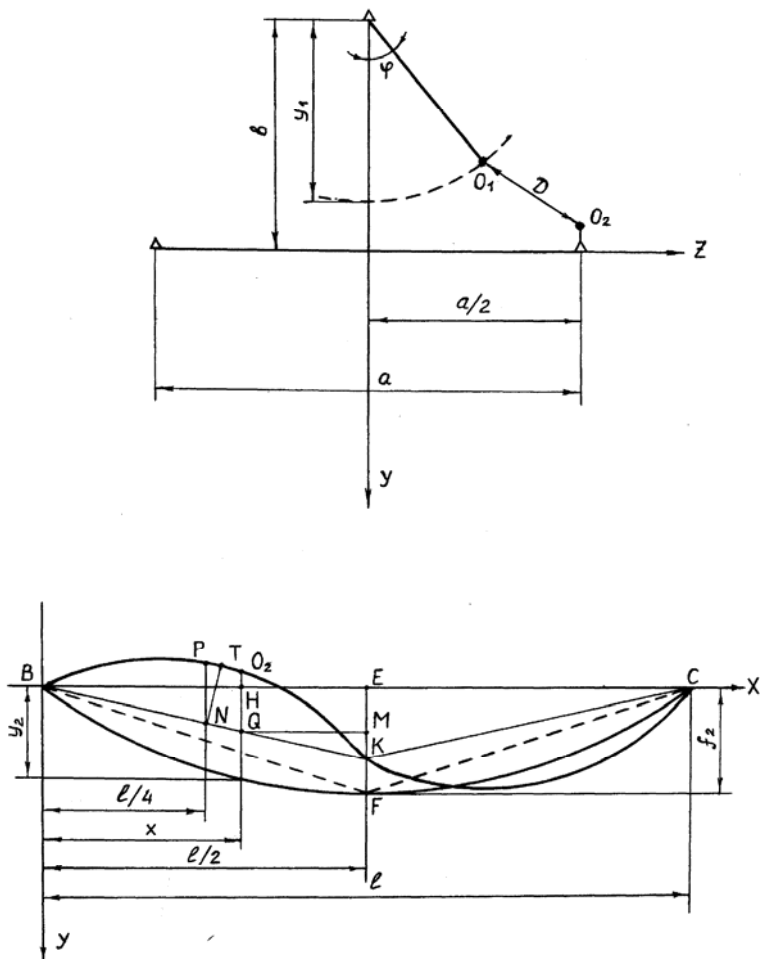


Рис. 2.2. К определению расстояний между проводами при пляске

Провес провода y в любой точке x пролета длиной l при одинаковой высоте подвеса рассчитывается по формуле [73]:

$$y = \frac{4 \cdot f \cdot x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right), \quad (2.8)$$

где l – длина пролета;

x – текущая координата вдоль пролета.

Угол отклонения верхнего провода с гололедом под действием ветра определяется, как известно, давлением ветра, весом провода и весом гололедных отложений.

В работах [12, 27, 60] величину ветровой нагрузки предлагается определять по формуле:

$$P = c_x \cdot \frac{V^2}{16} \cdot S, \quad (2.9)$$

где c_x – коэффициент лобового сопротивления;

V – скорость воздушного потока, м/с;

S – площадь диаметрального сечения провода с гололедом, м².

Согласно Правил устройства электроустановок (ПУЭ) [69] для всех проводов, покрытых гололедом, $c_x = 1,2$.

Вес гололедного отложения на проводе длиной 1 м в даН определяется следующим образом [10, 55]:

$$G_r = \pi \cdot b_r \cdot (d + b_r) \cdot \gamma \cdot 10^{-3}, \quad (2.10)$$

где d – расчетный диаметр провода, мм;

b_r – толщина (стенка) гололедного отложения цилиндрической формы, мм;

γ – плотность гололедного отложения, г/см³.

Как показали наши наблюдения [94] пляска проводов ВЛ 6–10 кВ возникает при наличии двух видов односторонних гололедных отложений: покрывающих лишь некоторую часть периметра сечения провода (в начале гололедообразования) и эксцентричных, полностью охватывающих провод. Поэтому для определения веса гололеда целесообразно использовать величину приведенной стенки таких отложений b_{rn} , определяемую из условия равенства площадей гололедных отложений эксцентричной и цилиндрической форм. В большинстве случаев пляски проводов малых сечений с размерами гололедных отложений от $(13...15) \times 8$ мм до $(24...25) \times 18$ мм приведенная стенка составляет 1...6 мм.

С учетом формул (2.9) и (2.10) угол φ отклонения провода с гололедом под действием ветра определим следующим образом:

$$\varphi = \arctg \frac{0,075 \cdot V^2 \cdot (d + 2 \cdot b_{rn}) \cdot 10^{-3}}{\gamma \cdot \pi \cdot b_{rn} \cdot (d + b_{rn}) \cdot 10^{-3} + G_n}, \quad (2.11)$$

где G_n – погонный вес провода.

Пляска проводов ВЛ 6–10 кВ согласно наших наблюдений происходит по форме близкой к синусоидальной с амплитудой A_m относительно оси, представляющей ломаную линию (рис. 2.2), соединяющую точки крепления провода B , C и нижнюю точку провеса провода F . С увеличением амплитуды пляски провода происходит подъем узловой точки F , например в точку K на величину h . В работе [6] на основе экспериментов определена зависимость величины подъема h узловой точки провода от амплитуды колебаний A_m .

$$h = -3,122 \cdot f + 11,334 \cdot A_m + 0,212. \quad (2.12)$$

Для пролета длиной 50 м со стрелами провеса 0,7...1,2 м $\angle EBF$ из $\triangle EBF$ составит $1^\circ 36' \dots 2^\circ 45'$. При подъеме узловой точки F провода $\angle EBF$ будет иметь еще меньшие значения, например при $h = 0,25$ м $\angle EBK$ составит $1^\circ 02' \dots 2^\circ 11'$. Так как $\angle PNT = \angle EBK$, то с учетом его малости $PN = TN$ и амплитуда A_m будет определяться отрезком PN .

Уравнение движения провода при вертикальных колебаниях типа пляски и расположении начала координат у одной из опор имеет вид [8]:

$$A = A_m \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{l} \cdot \cos \frac{m \cdot \pi \cdot a_B}{l} \cdot t, \quad (2.13)$$

где A – координата вертикальных перемещений точки провода на расстоянии x от начала координат;

A_m – амплитуда колебаний в пучности;

m – число полуволн в пролете;

a_B – скорость распространения бегущей волны;

t – время.

Для вертикальных колебаний при крайних положениях провода будем иметь

$$\cos \frac{m \cdot \pi \cdot a_B}{l} \cdot t = 1,$$

тогда при $m = 2$ форма движения провода описывается уравнением

$$A = A_m \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l}. \quad (2.14)$$

Из подобия $\triangle EBK$ и $\triangle HBQ$ (рис. 2.2) определим EM

$$EM = HQ = \frac{(f_2 - h) \cdot 2 \cdot x}{l}. \quad (2.15)$$

Определим координаты точек O_1 и O_2 , в общем случае, на расстоянии x от опоры (точка B):

$$O_1 [y_1 \cdot \sin \varphi; \quad -b + y_1 \cdot \cos \varphi], \quad (2.16)$$

$$O_2 \left[a/2; \quad \frac{(f_2 - h) \cdot 2 \cdot x}{l} - A_m \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l} \right]. \quad (2.17)$$

Согласно разработанной модели расстояние D между проводами со стрелами провеса f_1 и f_2 определим следующим образом:

$$D = \left\{ \left[\frac{a}{2} - y_1 \cdot \sin \varphi \right]^2 + \left[\frac{(f_2 - h) \cdot 2 \cdot x}{l} - A_m \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l} + b - y_1 \cdot \cos \varphi \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (2.18)$$

или, в конечном виде с учетом возможной разрегулировки стрел провеса проводов δ_f [44] и формулы (2.12):

$$D = \left\{ \left[\frac{a}{2} - \frac{4 \cdot f'_1 \cdot x}{l} \left(1 - \frac{x}{l} \right) \cdot \sin \varphi \right]^2 + \left[\frac{(4,122 \cdot f'_2 - 11,334 \cdot A_m - 0,212) \cdot 2x}{l} - \right. \right. \\ \left. \left. - A_m \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{l} + b - \frac{4 \cdot f'_1 \cdot x}{l} \cdot \left(1 - \frac{x}{l} \right) \cdot \cos \varphi \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad (2.19)$$

где $f'_1 = f_1 \cdot (1 + \delta_{f_1})$;

$f'_2 = f_2 \cdot (1 + \delta_{f_2})$.

Для выполнения численных расчетов разработанной математической модели выбираем диапазон изменения амплитудных значений пляски проводов, верхний предел которого составляет $0,335 \cdot f_2$ (раздел 2.1), а нижний предел определяется из выражения (2.12) при $h = 0$, т. е.

$$0,275 \cdot f_2 - 0,019 \leq A_m \leq 0,335 \cdot f_2. \quad (2.20)$$

Как уже отмечалось в разделе 2.1, при пляске проводов направление ветрового потока к оси пролета изменяется в широком диапазоне. В 80 случаях (из 150 наблюдений) пляска возникала при нормальной к оси пролета составляющей скорости ветрового потока 5...10 м/с, в 48 случаях – при 11...12 м/с, в 22 случаях – при 13...15 м/с. Поэтому для расчета расстояний между проводами при пляске принимаем скорость ветрового потока в пределах 10...15 м/с.

Для ВЛ 6–10 кВ с длиной пролета 50 м выбираем значения стрел провеса проводов с учетом Руководящих материалов по проектированию электроснабжения сельского хозяйства [73]: 0,7...1,2 м.

Для провода АС-35/6,2 расчетный диаметр составляет 8,4 мм, погонная масса – 0,149 кг/м.

Предварительные расчеты угла отклонения покрытого гололедом провода под действием ветра со скоростью 10 м/с показали, что при величине приведенной стенки $b_{гп}$ цилиндрического гололедного отложения 1...2,5 мм угол отклонения максимальный и его значение можно считать постоянным (изменение угла не превышает 0,7%). С увеличением стенки гололедного отложения от 3 до 6 мм угол отклонения уменьшается, при этом изменение величины угла составляет 1,7...12,2%. Поэтому с учетом рассмотрения наиболее опасных режимов разработанной модели сближения проводов при пляске принимаем $b_{гп} = 2,5$ мм.

При двухполуволновой пляске нижнего провода наибольшее вертикальное отклонение будет возникать в зоне 1/4 и 3/4 длины

пролета. В силу симметричности кривой провеса верхнего провода расчеты возможных расстояний между проводами при их колебаниях целесообразно выполнить для значений текущей координаты x в зоне $1/4$ – $1/2$ длины пролета, при этом соблюдается условие равенства расчетных расстояний и для значений x в зоне $1/2$ – $3/4$ длины пролета, симметричных относительно его середины.

На основе полученной формулы (2.19) были выполнены на ПК расчеты расстояний между проводами, возникающих при пляске, для типовых конструкций пролета с треугольным расположением проводов на железобетонных опорах типа СНВ_с-2,7 ($a = 1,2$ м, $b = 0,92$ м) [59] и крюковым расположением на деревянных опорах типа Пб-2, П10-1Д (горизонтальное смещение составляет 0,66 м, вертикальное – 0,75 м) [77].

С учетом выполненных расчетов получены зависимости наименьших расстояний между проводами от амплитуды пляски при разных стрелах провеса и скоростях ветра для треугольного (рис. 2.3) и крюкового (рис. 2.4) расположения проводов на опоре. Уменьшение расстояний между проводами до опасных в электрическом отношении возникает уже при скорости ветра 10 м/с и стрелах провеса 1,1 м и более. При скоростях ветра более 10 м/с наблюдается явная тенденция возникновения при крюковом расположении проводов их опасных сближений при меньших стрелах провеса и амплитудах пляски по сравнению с треугольным расположением проводов. Так, при $V = 12$ м/с и стрелах провеса 0,9 м опасные сближения проводов при их треугольном расположении имеют место при амплитудах пляски 0,293 м и более, а при крюковом – 0,284 м и более. При $V = 15$ м/с опасные сближения проводов при их треугольном расположении возникают при стрелах провеса 0,9 м и более, а при крюковом – 0,8 м и более. Полученные данные позволяют сделать вывод о большей подверженности проводов ВЛ 6–10 кВ опасным сближениям при их крюковом расположении по сравнению с треугольным, что подтверждается результатами выполненного анализа аварийных отключений ВЛ 6–10 кВ в Башкирской энергосистеме [84].

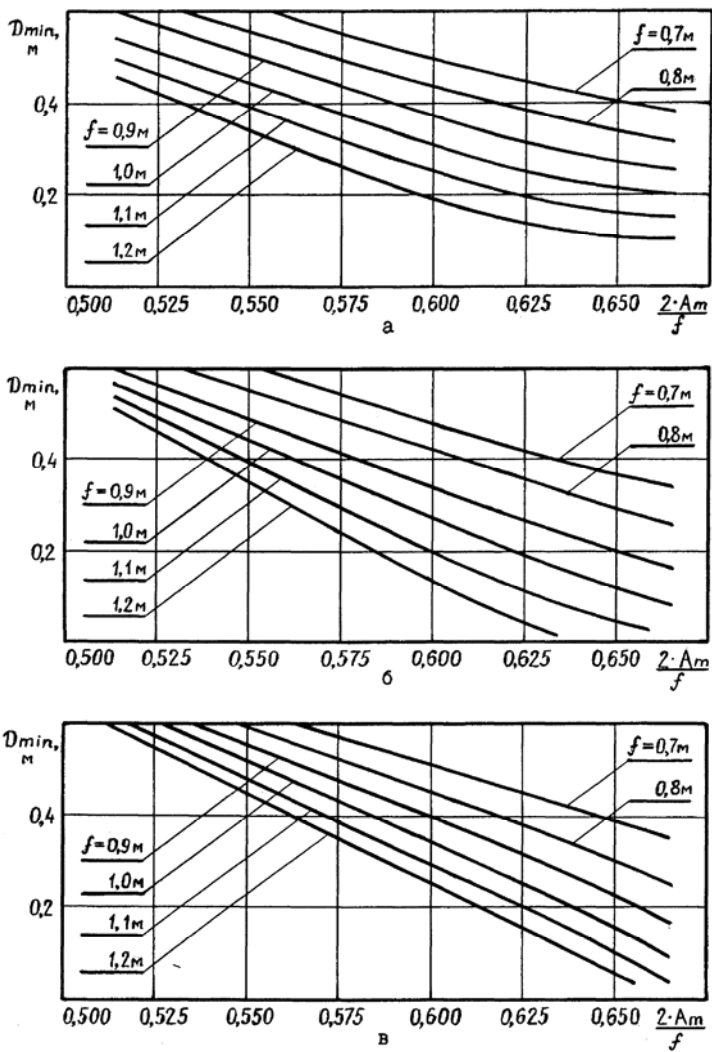


Рис. 2.3. Зависимость наименьших расстояний между проводами от амплитуды пляски при разных стрелах провеса и скоростях ветра:
 а – $V = 10$ м/с; б – $V = 12$ м/с; в – $V = 15$ м/с
 (при треугольном расположении проводов)

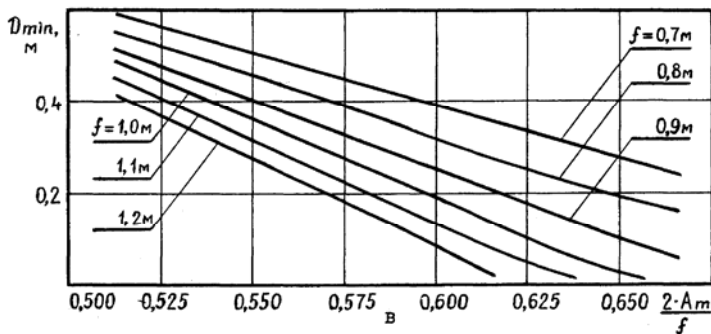
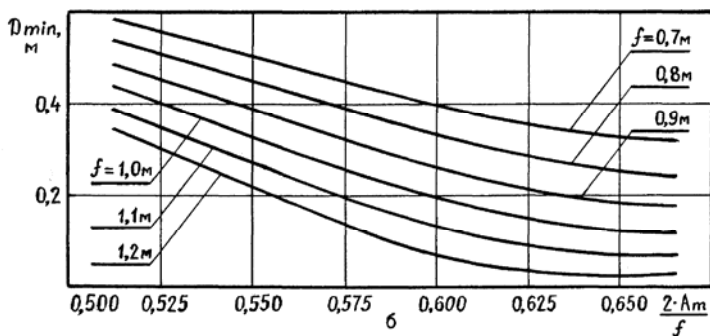
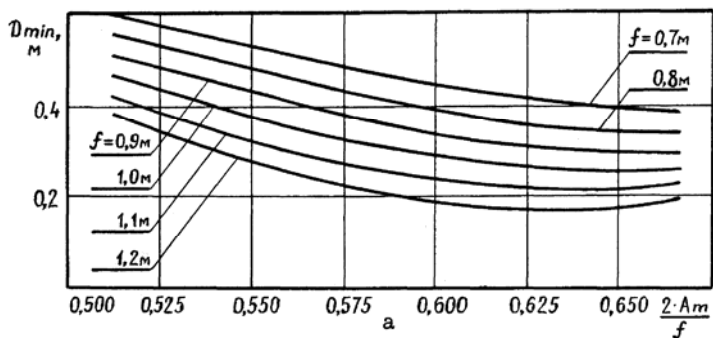


Рис. 2.4. Зависимость наименьших расстояний между проводами от амплитуды пляски при разных стрелах провеса и скоростях ветра:
 а – $V = 10$ м/с; б – $V = 12$ м/с; в – $V = 15$ м/с
 (при крюковом расположении проводов)

На величину сближения проводов оказывает влияние возникающая на практике разрегулировка их стрел провеса [44]. Для исследования этого фактора были выполнены расчеты и определены наименьшие расстояния между проводами при пляске для стрел провеса 0,7; 0,8; 0,9 м при наличии разрегулировки отдельно верхнего (рис. 2.5) и нижнего (рис. 2.6) проводов, при этом коэффициент разрегулировки стрел провеса δ_f изменялся в пределах 0,1...0,4; скорость ветра составляла 12 м/с. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о существенном влиянии на величину сближения проводов разрегулировки стрелы провеса f_1 верхнего провода по сравнению с разрегулировкой стрелы провеса f_2 нижнего провода. Так, при стрелах провеса нижнего провода 0,7 и 0,8 м их разрегулировка в указанном диапазоне не вызывает опасных сближений проводов при пляске. В то же время в этих условиях для стрел провеса верхнего провода 0,7 и 0,8 м опасные сближения проводов возникают при коэффициентах разрегулировки 0,2 и 0,1 соответственно. С увеличением коэффициента разрегулировки стрелы провеса верхнего провода δ_{f1} опасные сближения возникают при меньших амплитудах пляски нижнего провода A_m : для $f_1 = 0,8$ м при $\delta_{f1} = 0,1$ $A_m = 0,26$ м, а при $\delta_{f1} = 0,4$ $A_m = 0,23$ м.

Таким образом, разработанная модель сближения проводов при пляске и анализ ее параметров позволяют сделать вывод, что при существующих конструкциях ВЛ 6–10 кВ и скорости ветра 10...15 м/с пляска приводит к опасным сближениям фазных проводов в зоне 1/4–1/2 длины пролета, вызывая аварийные отключения воздушных линий электропередачи и нарушение электроснабжения сельскохозяйственных потребителей.

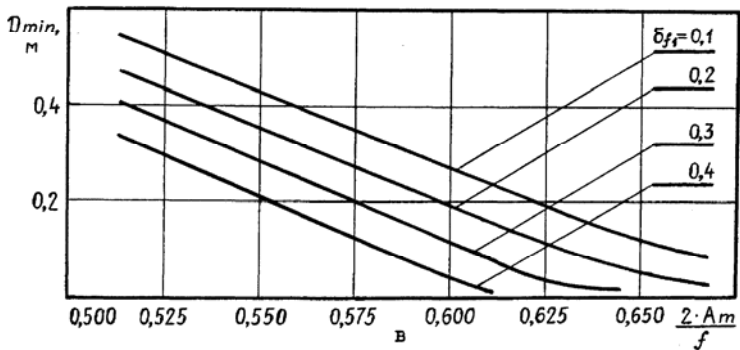
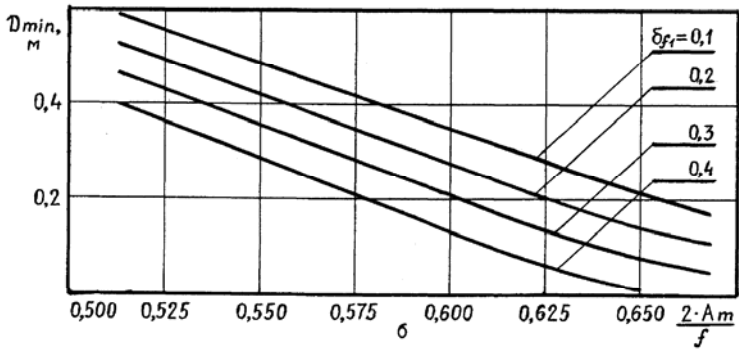
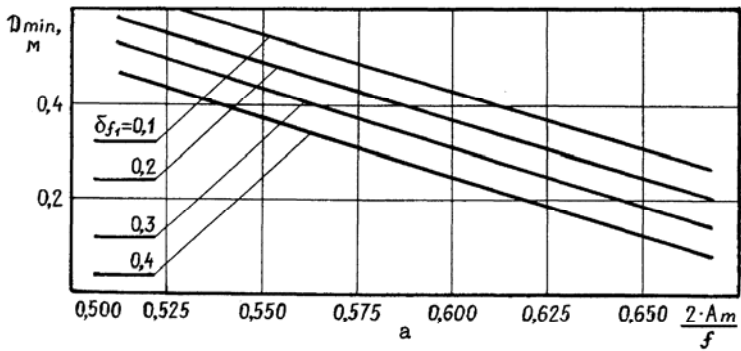


Рис. 2.5 Зависимость наименьших расстояний между проводами от амплитуды пляски при разрегулировке верхнего провода со стрелами провеса f_1 : а – 0,7 м; б – 0,8 м; в – 0,9 м

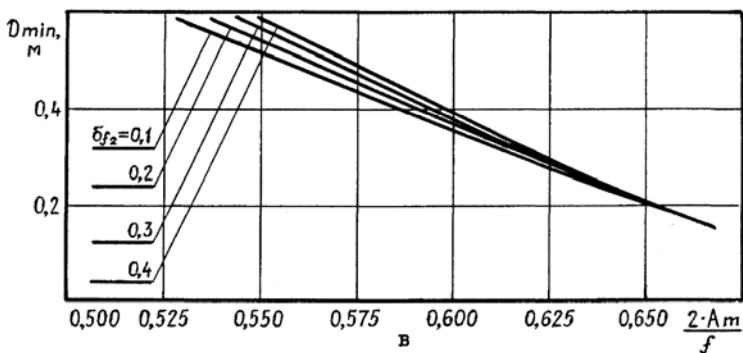
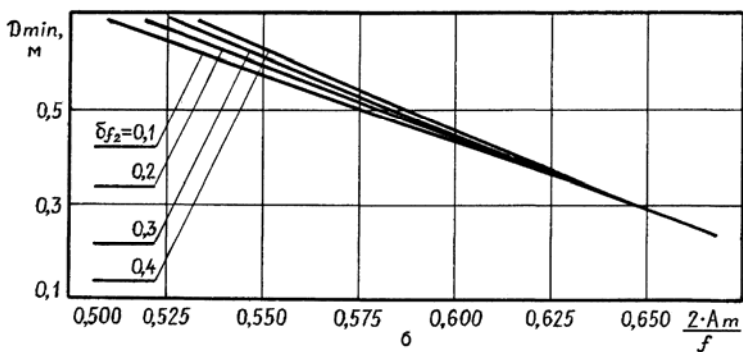
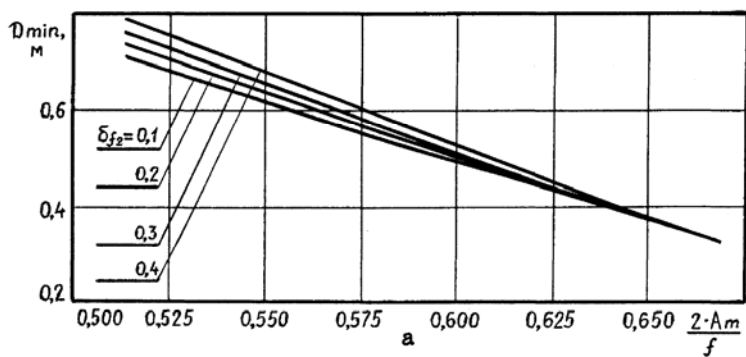


Рис. 2.6 Зависимость наименьших расстояний между проводами от амплитуды пляски при разрегулировке нижнего провода со стрелами провеса f_2 : а – 0,7 м; б – 0,8 м; в – 0,9 м

В отечественной и зарубежной практике имеется ряд предложений по борьбе с пляской проводов, которые условно могут быть разделены на три группы:

- изменение конструктивных параметров линий с целью устранения опасных сближений проводов;

- установка гасителей и использование проводов новой конструкции, активно воздействующих на процессы гололедообразования и пляски;

- применение плавки гололеда на проводах электрическим током.

В работе [19] отмечалось, что увеличение горизонтального смещения между проводами по условиям пляски в гораздо меньшей мере повышает стоимость линий по сравнению с увеличением вертикальных расстояний. Поэтому с учетом проведенных нами исследований для предотвращения опасных сближений при пляске определим оптимальные расстояния между проводами по горизонтали при их треугольном расположении на опоре. Для каждого значения стрелы провеса (с учетом возможной разрегулировки) выберем наименьшую величину расстояния между проводами D'_{\min} из всего массива расчетных данных для параметров разработанной модели с учетом диапазонов их изменения. Расчетные расстояния между проводами по горизонтали a_p при их треугольном расположении на опоре определим из условия:

$$D' = a_o \cdot k_s = \left\{ \left[\frac{a_p}{2} - \frac{4 \cdot f'_1 \cdot x'}{l} \cdot \left(1 - \frac{x'}{l} \right) \cdot \sin \varphi' \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[\frac{(4,122 \cdot f'_2 - 11,334 \cdot A'_m - 0,212) \cdot 2 \cdot x' - A'_m \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot x'}{l}}{l} \right]^2 \right\}^{0,5}$$

$$+ b - \frac{4 \cdot f_1' \cdot x'}{l} \cdot \left(1 - \frac{x'}{l}\right) \cdot \cos \varphi' \left. \right\}^2 \Bigg\}^{1/2}, \quad (2.21)$$

где a_0 – допустимое расстояние между проводами;

k_3 – коэффициент запаса;

φ' – угол отклонения провода при скорости ветра V' ;

x', V', A'_m – параметры модели по формуле (2.21), определяющие наименьшие расстояния между проводами D'_{\min} .

После возведения в квадрат обеих частей выражения (2.21) и последующих преобразований, получим

$$a_p = \frac{8 \cdot f_1' \cdot x'}{l} \cdot \left(1 - \frac{x'}{l}\right) \cdot \sin \varphi' + 2 \cdot \left\{ D'^2 - \left[\frac{(4,122 \cdot f_2' - 11,334 \cdot A'_m - 0,212) \cdot 2 \cdot x'}{l} - \right. \right. \\ \left. \left. - A'_m \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot x'}{l} + b - \frac{4 \cdot f_1' \cdot x'}{l} \cdot \left(1 - \frac{x'}{l}\right) \cdot \cos \varphi' \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (2.22)$$

Результаты расчета горизонтальных расстояний между проводами на опоре, исключаяющих их опасные сближения в процессе пляски при отсутствии и наличии возникающей при эксплуатации ВЛ 6–10 кВ разрегулировки стрел провеса проводов, представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

РАСЧЕТНЫЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ПРОВОДАМИ,
ИСКЛЮЧАЮЩИЕ ИХ ОПАСНЫЕ СБЛИЖЕНИЯ ПРИ ПЛЯСКЕ

Стрелы провеса проводов f_1, f_2 , м	Расстояния между проводами на опоре, м					
	при отсутствии разрегулировки стрел провеса δ_{f1}	при наличии разрегулировки стрел провеса δ_{f1}				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,7	$\frac{1,20}{1,20}$	$\frac{1,20}{1,20}$	$\frac{1,30}{1,35}$	$\frac{1,48}{1,53}$	$\frac{1,64}{1,69}$	$\frac{1,83}{1,88}$
	$\frac{1,24}{1,30}$	$\frac{1,45}{1,49}$	$\frac{1,66}{1,70}$	$\frac{1,83}{1,88}$	$\frac{1,97}{2,01}$	$\frac{2,11}{2,15}$
0,8	$\frac{1,44}{1,49}$	$\frac{1,68}{1,72}$	$\frac{1,87}{1,91}$	$\frac{2,04}{2,08}$	$\frac{2,19}{2,23}$	$\frac{2,35}{2,39}$
	$\frac{1,65}{1,70}$	$\frac{1,86}{1,91}$	$\frac{2,05}{2,09}$	$\frac{2,22}{2,26}$	$\frac{2,40}{2,44}$	$\frac{2,56}{2,60}$
1,0	$\frac{1,82}{1,87}$	$\frac{2,05}{2,09}$	$\frac{2,25}{2,29}$	$\frac{2,44}{2,48}$	$\frac{2,61}{2,65}$	$\frac{2,77}{2,80}$

Примечание: в числителе приведены расстояния при $k_s = 1,1$; в знаменателе – при $k_s = 1,2$.

Анализ таблицы 2.2 показывает, что для стрел провеса, не превышающих 0,7 м и при отсутствии их разрегулировки, расчетное расстояние между проводами 1,2 м можно считать достаточным, а для стрел провеса 0,8...1,1 м оно должно составлять 1,24...1,87 м. Разрегулировка стрелы провеса f_1 верхнего провода существенно влияет на величину расчетного расстояния между проводами. Так, для $f_1 = 0,7$ м уже при $\delta_l = 0,2$ расчетное расстояние a_p должно составлять 1,30...1,35 м, а при $\delta_l = 0,5$ оно увеличивается до 1,83...1,88 м. Для стрел провеса проводов в пределах 0,7...1,0 м с учетом возникающей на практике их разрегулировки ($\delta_l = 0,1...0,5$) расчетные расстояния между проводами, исключаящие их опасные сближения при пляске, должны быть не менее 1,83...2,56 м.

Горизонтальные расстояния между проводами ВЛ 6–10 кВ ограничиваются возможностью проведения работ по закреплению провода без выхода персонала на траверсу. Работы по закреплению провода на опоре (монтаж изолятора, закрепление провода на изоляторе) выполняются без затруднения при длине траверсы до 1,7 м [93]. Более простые работы электромонтеры могут выполнять одной рукой при длине траверсы до 2,1 м.

Таким образом, для предотвращения междуфазовых замыканий на ВЛ 6–10 кВ при пляске проводов со стрелами провеса не более 1,1 м (без учета возможной разрегулировки стрел провеса) необходимо увеличить длину траверсы до 1,82...1,87 м, что соответственно потребует повышения прочности опор и вызовет затруднения при монтажных работах. Этот способ не может быть признан радикальным решением проблемы из-за высокой стоимости и невозможности проведения монтажных работ при выборе расстояний между проводами с учетом возникающей при эксплуатации ВЛ разрегулировки стрел провеса проводов. Кроме того, что важно, увеличение расстояний между проводами, снижая вероят-

ность междуфазовых замыканий, не оказывает какого-либо активного воздействия на снижение интенсивности пляски, в то время, как известно [8, 24], пляска приводит к многочисленным перетираниям проводов и вязальной проволоки, срывам изоляторов, выдергиванию крючьев, трещинам на железобетонных опорах и приставках. Поэтому более перспективными методами борьбы с пляской проводов следует считать установку гасителей и использование проводов новой конструкции, активно воздействующих на процессы гололедообразования и пляски, а также применение плавки гололедных отложений на проводах электрическим током.

ГЛАВА 3. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЗАЩИТЕ СЕЛЬСКИХ ВЛ 6–10 кВ ОТ ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ

3.1. Результаты испытаний известных гасителей пляски проводов на ВЛ 6–10 кВ и оценка их эффективности

Опыт эксплуатации воздушных линий электропередачи в Башкирской энергосистеме показывает, что пляска проводов ВЛ 6–10 кВ наблюдается чаще, чем в сетях 35–500 кВ и практически распространена на всей территории Башкирии. Пляска проводов в этих сетях приводит к массовым повреждениям элементов пролета и аварийным отключениям линий [80]. Поэтому защита ВЛ 6–10 кВ путем установки гасителей пляски – один из актуальных вопросов повышения эксплуатационной надежности линий электропередачи сельскохозяйственного назначения.

В России и за рубежом разработаны различные по конструкции и принципу действия гасители пляски проводов для ВЛ 35 кВ и выше, классификация которых приведена в работе Бекметьева Р.М. [8]. Однако до настоящего времени не уделяется достаточного внимания разработке и проверке эффективности различных устройств для защиты от пляски проводов ВЛ 6–10 кВ, имеющих ряд конструктивных особенностей. Информация об условиях и результатах организованных испытаний гасителей пляски проводов практически отсутствует. Оценка их эффективности в ряде энергосистем страны проводится на основе единичных наблюдений и подчас носит противоречивый характер [58]. Поэтому в гололедные сезоны 1973–1979 гг. на комплексе экспериментальных линий были проведены испытания и оценка эффективности известных гасителей низкочастотных колебаний проводов: аэродинамического гасителя пляски ВНИИЭ, пластинчатого гасителя пляски проводов КазНИИЭ, гасителя пляски проводов ОРГРЭС, сосредоточенных грузов.

Комплекс экспериментальных линий (рис. 3.1) расположен вблизи поселка Аксаково Республики Башкортостан на территории Белебеевско-Бугульминской возвышенности с отметками над уровнем моря до 390 м, отнесенной к особому району гололедности и III по ветру с повышенными скоростями ветра при гололеде (до 20 м/с) [44].

Площадка комплекса представляет собой возвышенность с южным и юго-западными склонами крутизной до 45°. Рельеф окружающей местности способствует частому, даже в тихую погоду, возникновению на площадке ветров повышенной скорости южного и юго-западного направления – преобладающих и гололедонесущих в данном районе.

Комплекс включает четыре параллельно расположенные относительно друг друга линии (Л-1, Л-2, Л-3, Л-4) на разных горизонталях склона с разницей в высотных отметках каждая по 5...6 метров с участками, по-разному сориентированными к сторонам света (опоры СНВ-2,7; провода АС-35/6,2; АС-70/11,0; штыревые изоляторы ШФ10-А, ШСС-10, длина пролетов 50...60 м). Линии оборудованы устройствами плавки гололеда на проводах токами короткого замыкания.

Четыре линии (радиальные Р-1, Р-2, Р-3, Р-4) расположены на ровной площадке и по-разному сориентированы к сторонам света. Каждая линия Р-1, Р-2 и Р-4 состоит из трех пролетов, расходящихся лучами из одной точки, длина пролетов 50, 75 и 100 м с проводами АС-35/6,2, АС-50/8,0 и АС-70/11,0 соответственно. Линии оборудованы устройствами для изменения натяжения (стрел провеса) проводов.

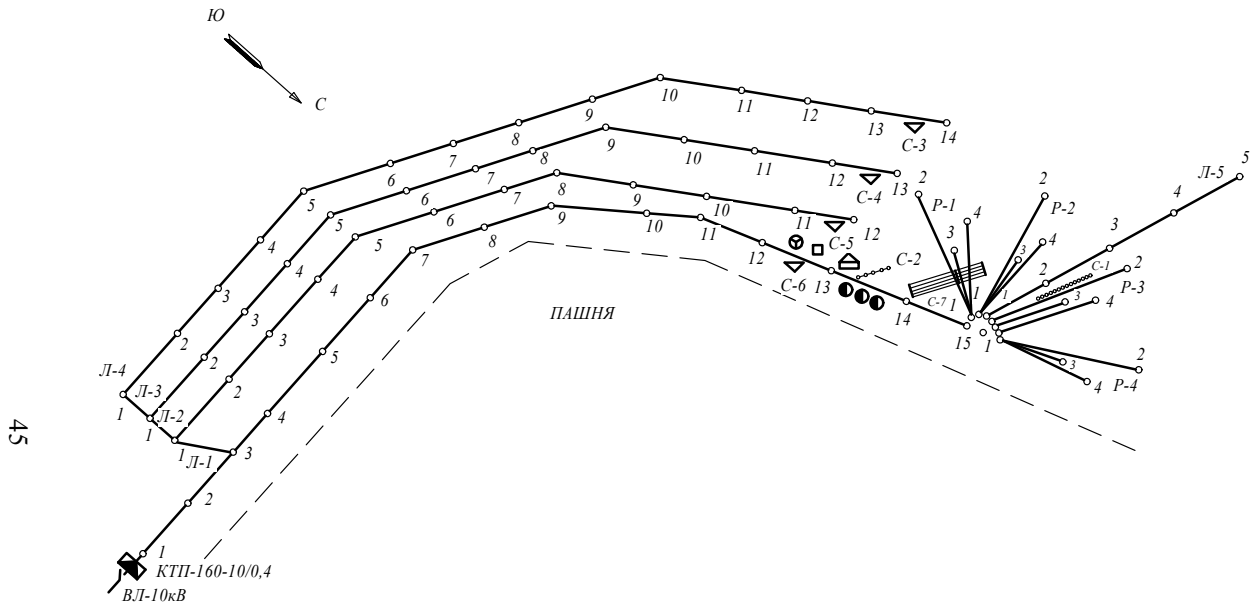






Рис. 3.1. Комплекс экспериментальных линий: Л-1...Л-4 – воздушные линии, расположенные на разных горизонталях склона (горизонтальные линии); Р-1...Р-4 – воздушные линии с пролетами 50, 75, 100 м (радиальные линии); С-3...С-6 – типовые гололедные станки; С-1, С-2, С-7 – гололедные станки нетиповой конструкции;  – вагончик-мастерская;  – кино-фотосъемочная вышка;  – передвижная монтажная вышка;  – стационарные мачты для снятия с проводов образцов гололеда

На базе радиальной линии Р-3 построен опытный участок, который состоит из трех анкерных пролетов длиной 50, 75 и 100 м и четырех пролетов ВЛ 10 кВ (Л-5) по 50 м каждый. Анкерные пролеты и участок ВЛ 10 кВ сориентированы таким образом, что углы с господствующими ветрами составляют от 20 до 90°. Провода в трех анкерных пролетах с одной стороны закрепляются на траверсе одной порталной опоры. Траверсы опор имеют специальную конструкцию, позволяющую изменять расстояния между проводами как по горизонтали, так и по вертикали, и снабжены натяжными устройствами для изменения величины стрел провеса проводов. Расположение проводов в пролетах – треугольное. В одном пролете линии Л-5 дополнительно смонтированы провода на высоте 3 м.

Для наблюдения за процессом гололедообразования на комплексе установлены четыре типовых гололедных станка (С-3, С-4, С-5, С-6) и три станка нетиповой конструкции (С-1, С-2, С-7).

Для проведения визуально-инструментальных наблюдений за колебаниями проводов малых сечений и процессом гололедообразования на комплексе имеется передвижная монтажная вышка.

Размещение пролетов комплекса с разной ориентацией к сторонам света и на разных отметках возвышенности обеспечивает при экспериментальных исследованиях многообразное сочетание факторов (ветер, гололедные отложения), определяющих параметры колебаний проводов в ветровом потоке. Этим обеспечивается получение положительных результатов исследований за сравнительно короткое время, несмотря на непредсказуемость (случайный характер) возникновения различных видов колебаний проводов малых сечений.

Для выполнения экспериментальных исследований комплекс оснащен необходимыми приборами и оборудованием.

Аэродинамический гаситель пляски ВНИИЭ [103, 116] выполнен из изоляционного материала в виде протяженной пластины, закрепленной вдоль провода. Действие гасителя основано на изменении характера обтекания провода воздушным потоком и создании аэродинамических сил, препятствующих развитию пляски.

Пластинчатый гаситель пляски проводов КазНИИЭ [8, 117] выполнен в виде легкой пластины, которая закрепляется на проводах линий электропередачи, подверженных пляске. Принцип действия заключается в том, что проводу в процессе колебаний сообщаются дополнительные крутильные движения; при этом в зоне установки гасителя происходит скругление гололедного осадка, что приводит к снижению амплитуды или подавлению пляски.

Гаситель пляски проводов ОРГРЭС [102] выполнен в виде грузов на рычагах, установленных на проводе в пролете ВЛ 10 кВ. За счет увеличения крутильной жесткости провода предполагается добиться уменьшения амплитуды пляски.

Установка сосредоточенных грузов [25] приводит к увеличению рассеиваемой энергии за счет изменения частоты собственных колебаний провода, создания в местах установки грузов сосредоточенных нагрузок, делящих пролет на части и вызывающих низкочастотные колебания провода с большим числом полуволн.

Монтаж гасителей пляски каждого типа производился на двух проводах АС-35/6,2 в двух пролетах, причем всего гасителями различных конструкций было оборудовано 8 пролетов длиной 50 м каждый. Третий провод в каждом пролете не оборудовался гасителями и использовался в качестве контрольного.

Аэродинамические гасители пляски ВНИИЭ монтировались в каждом пролете на трех участках в зоне $1/4$, $1/2$, $3/4$ его длины, причем высота пластины была выбрана равной диаметру провода.

Доля длины оборудованного гасителями провода составляла 20% общей длины пролета [14].

Пластинчатые гасители пляски проводов КазНИИЭ устанавливались на проводе в зоне $1/4$ и $3/4$ длины пролета. Пластины закреплялись на проводе под углом 45° к вертикали. Угол между пластинами в пролете составлял 90° . Размеры пластин гасителя выбирались согласно рекомендациям КазНИИЭ (420×280 мм) [66].

Гасители пляски проводов ОРГРЭС, выполненные в виде грузов на консолях (длина рычага 0,2 м, вес груза 9,8 Н), размещались в зоне $1/3$ и $2/3$ длины пролета, при этом один груз устанавливался с закручиванием провода по часовой стрелке, а другой – против часовой стрелки. Угол между осью консоли груза и вертикалью составлял 40° .

Сосредоточенные грузы весом 39,2 Н каждый подвешивались к проводам при помощи зажимов в зоне $1/3$ и $2/3$ длины пролета.

Для фиксации параметров и условий пляски проводов использовались следующие приборы и оборудование: ручной анемометр, секундомер, бинокль, кинокамера, компас, флюгер ФВТ, термометр, масштабная линейка, подвижная телескопическая вышка. Форма и размеры гололедного осадка определялись путем огибания его контура тонкой медной проволокой и последующего фиксирования размеров поперечного сечения на миллиметровой бумаге. Фиксация амплитуды пляски и размаха крутильных колебаний осуществлялась путем обработки кинокадров заснятого процесса пляски проводов.

Пляска проводов возникала внезапно и в сложных метеорологических условиях, поэтому проведение измерений параметров пляски проводов оказалось возможным только для 54 случаев, основная часть которых приведена в работах [34, 85].

До настоящего времени оценка эффективности гасителей проводилась только по одному показателю, характеризующему снижение амплитуды пляски провода, оборудованного гасителем, по сравне-

нию с амплитудой пляски контрольного провода [8]. Однако этот показатель не дает полную оценку эффективности гасителя, так как при рассмотрении не учитывается число случаев одновременной пляски проводов с гасителем и без него, число случаев пляски проводов с гасителем при отсутствии пляски контрольных проводов. Поэтому в качестве критериев эффективности различных гасителей предлагаются два показателя: показатель частоты пляски провода с гасителем и показатель снижения амплитуды пляски.

Показатель частоты пляски провода с гасителем $k_{\text{ч}}$ определяется следующим образом:

$$k_{\text{ч}} = \frac{(n_1 + n_2) \cdot 100}{n}, \quad (3.1)$$

где n_1 – число случаев одновременной пляски оборудованного гасителем и контрольного проводов;

n_2 – число случаев пляски провода, оборудованного гасителем при отсутствии пляски контрольного;

n – общее число наблюдаемых случаев пляски проводов

$$n = n_1 + n_2 + n_0;$$

n_0 – число случаев пляски контрольного провода при отсутствии пляски провода, оборудованного гасителем.

Показатель снижения амплитуды пляски определим по формуле:

$$k_A = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \left(\frac{A_{\text{кп}}}{A_{\text{шт}}} \right)_i}{n_1}, \quad (3.2)$$

где $A_{\text{кп}}$ – амплитуда колебаний контрольного провода;

$A_{\text{шт}}$ – амплитуда колебаний провода с гасителем.

Результаты измерений параметров пляски проводов, оборудованных испытываемыми гасителями, приведены в таблице 3.1.



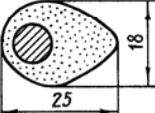
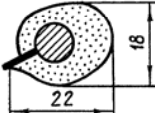
В процессе гололедообразования пластина аэродинамического гасителя пляски ВНИИЭ отклонялась от первоначального положения на угол от 40 до 80° (в середине пролета), что снижало эффективность его действия. Отклонение пластины объясняется малой крутильной жесткостью проводов ВЛ 6–10 кВ, вследствие чего эксцентричная нагрузка гололедных отложений приводит к повороту провода и гасителя.

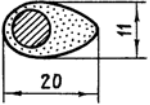

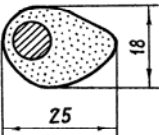
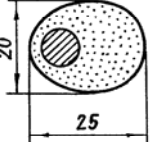
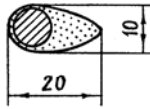
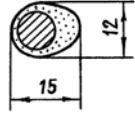
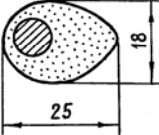
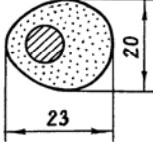
На проводах, оборудованных пластинчатым гасителем КазНИИЭ, сечение провода с гололедом по длине пролета имело различную форму: на расстоянии 2...3 м по обе стороны от гасителя более скругленную, далее – примерно такую же, как и на проводе, не оборудованном гасителем. В одном из трех случаев наблюдалась пляска провода, оборудованного гасителем, по траектории эллипса с двумя полуволнами при отсутствии колебаний контрольных проводов.

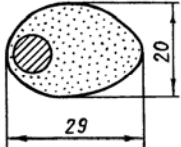
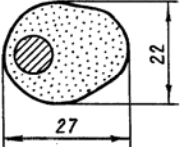
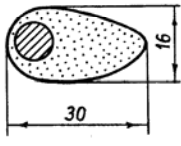
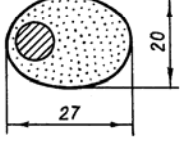
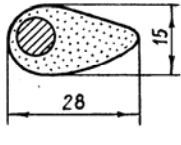
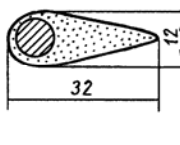
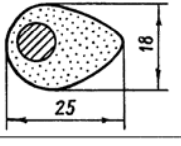
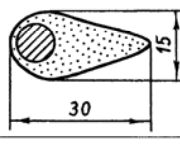
Гасители пляски проводов ОРГРЭС за счет увеличения крутильной жесткости провода приводят к образованию на проводах симметричных односторонних отложений, имеющих более заостренную форму, чем на контрольных проводах. Между гасителями, установленными на проводе, в большинстве случаев наблюдались высокочастотные колебания участка провода. В местах установки гасителей обнаружен износ провода, что совпадает с результатами наблюдений при использовании гасителей ОРГРЭС в семи энергосистемах страны [51, 58].

Таблица 3.1

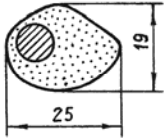
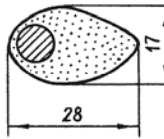
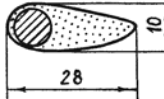
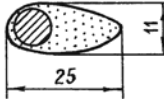
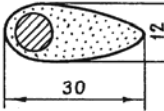
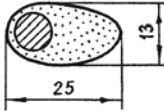
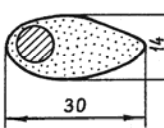
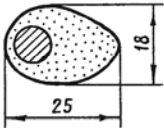
ПАРАМЕТРЫ ПЛЯСКИ КОНТРОЛЬНЫХ И ОБОРУДОВАННЫХ ГАСИТЕЛЯМИ ПРОВОДОВ

Дата, время начала пляски	Ветер		Формы и размеры гололеда на проводе		Размах колебаний в вертикальной плоскости (м), угол закручивания провода в середине пролета, град (отношение размаха к стреле провеса)		Размах колебаний в горизонтальной плоскости провода, м		Частота колебаний провода, Гц		Число полу-волн колебаний провода	
	Скорость, м/с	Направление к оси линии, град	контрольном	оборудованном гасителем	контрольного	оборудованного гасителем	контрольного	оборудованного гасителем	контрольного	оборудованного гасителем	контрольного	оборудованного гасителем
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Аэродинамический гаситель пляски ВНИИЭ												
20.11.74 13.50	10-15	30-40			0,30-0,40 - (0,27-0,36)	0,20-0,25 - (0,18-0,23)	-	-	1,35	3,50	2	4
11.11.75 16.15	9-10	30-40			0,35-0,40 - (0,32-0,36)	0,15-0,20 15-20 (0,14-0,18)	-	-	1,20	4,00	2	4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
15.11. 76 13.50	10	50- 70			-	0,30-0,40 - (0,27-0,36)	-	-	-	2,00	-	2
Пластиночатый гаситель КазНИИЭ												
16.11. 75 15.20	5-6	60			-	0,40-0,45 30-40 (0,53-0,60)	-	0,20-0,30 - (0,27-0,40)	-	1,30	-	2
05.11. 77 16.10	11- 13	70- 80			-	0,30-0,40 40-50 (0,40-0,53)	-	-	-	1,50	-	2
10.11. 77 11.00	13- 15	60- 70			0,30-0,40 15-20 (0,40-0,53)	0,15-0,25 10-15 (0,20-0,33)	-	-	1,95	1,45	2	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
20.02. 78 14.30	14- 15	50- 60			-	0,30-0,40 30-40 (0,40-0,53)	-	-	-	1,40	-	2
25.11. 79 19.10	6-8	60- 70			0,35-0,45 - (0,47-0,60)	0,20-0,30 15-20 (0,27-0,40)	-	-	2,00	1,50	2	2
Гаситель типа ОРГРЭС												
19.11. 74 16.45	8,2	50- 70			0,30-0,40 - (0,27-0,36)	0,20-0,30 25-30 (0,18-0,27)	-	-	1,56	0,55	2	2
16.11. 77 16.10	8- 10	50- 70			0,30-0,40 - (0,27-0,36)	0,20-0,30 20-25 (0,18-0,27)	-	-	1,65	0,65	2	2

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
11.11 78 11.20	6-8	80- 90			-	0,30-0,40 20-25 (0,27-0,36)	-	-	-	0,80	-	2
Сосредоточенные грузы												
20.11. 74 12.10	10- 15	80			0,20-0,30 15-20 (0,18-0,27)	0,40-0,45 - (0,36-0,41)	-	0,50-0,60 - (0,45-0,54)	2,30	0,95	2	2
12.11. 75 09.50	5-8	50- 60			-	0,30-0,40 - (0,40-0,53)	-	0,20-0,30 - (0,27-0,40)	-	0,90	-	2
13.11. 75 11.00	9- 10	30- 40			0,30-0,40 15-20 (0,40-0,53)	0,35-0,45 - (0,47-0,60)	-	0,25-0,30 - (0,33-0,40)	1,45	0,93	2	2

Пляска проводов, оборудованных сосредоточенными грузами, наблюдалась с амплитудами, превышающими величины амплитуд колебаний контрольных проводов. Движение провода, оборудованного сосредоточенными грузами, во всех случаях наблюдалось по эллиптической кривой (размах колебаний в вертикальной плоскости составлял 0,30...0,45 м, в горизонтальной плоскости – 0,20...0,60 м). При этом контрольные провода колебались только в вертикальной плоскости с размахом 0,20...0,40 м с закручиванием провода на 15...20°.

На основе данных таблицы 3.1 и сведений о числе случаев пляски контрольных проводов в опытных пролетах, представленных в работе [34], определены показатели эффективности рассмотренных выше испытываемых гасителей (табл. 3.2).

Таблица 3.2

ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАСИТЕЛЕЙ
ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ

Тип гасителя	Число случаев пляски			Показатели эффективности гасителей	
	n_0	n_1	n_2	k_q	k_A
Аэродинамический гаситель пляски ВНИИЭ	80	2	1	3,6	1,85
Пластинчатый гаситель КазНИИЭ	123	2	3	3,9	1,68
Гаситель типа ОРГРЭС	54	2	1	5,3	1,40
Сосредоточенные грузы	35	2	1	7,9	0,75

Анализ таблицы 3.2 показывает, что согласно разработанным критериям, гасители пляски проводов конструкции ВНИИЭ, КазНИИЭ, ОРГРЭС частично демпфируют колебания проводов

ВЛ 6–10 кВ, причем наиболее эффективно – аэродинамический гаситель пляски ВНИИЭ. Износ проводов в местах установки гасителей ОРГРЭС ограничивает их практическое использование. Применение сосредоточенных грузов в качестве гасителей пляски проводов ВЛ 6–10 кВ нецелесообразно.

3.2. Повышение аэродинамической устойчивости провода при ветре и гололеде

3.2.1. Гасители, активно воздействующие на процессы гололедообразования и пляски

Образование односторонних гололедных отложений на проводе приводит к снижению его аэродинамической устойчивости в ветровом потоке и возникновению низкочастотных автоколебаний (пляски) проводов воздушных линий электропередачи. При этом условие неустойчивости провода, покрытого односторонним гололедом, определяется критерием Ден-Гартога [28]:

$$\frac{\partial c_y}{\partial \alpha} + c_x < 0, \quad (3.3)$$

где $c_y(\alpha)$ – зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки α ;
 c_x – коэффициент лобового сопротивления.

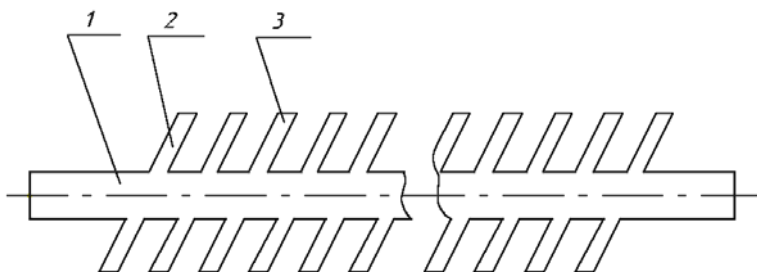
Известно, что наиболее эффективные аэродинамические способы гашения колебаний опираются на ряд аэродинамических эффектов: изменение циркуляции потока вокруг тела, создание сдвига фаз в отрыве вихрей вдоль образующей упругого тела при обтекании его по-

током воздуха и другие [49]. Изменение циркуляции потока вокруг тела может быть осуществлено путем искусственного формирования на проводе в процессе гололедообразования форм гололедных отложений, имеющих устойчивые к колебаниям аэродинамические характеристики. Среди известных гасителей, работающих на этом принципе, наибольшее распространение получили аэродинамические стабилизаторы ВНИИЭ, выполненные в виде узких длинных пластин, располагаемых строго вертикально под проводом на части пролета.

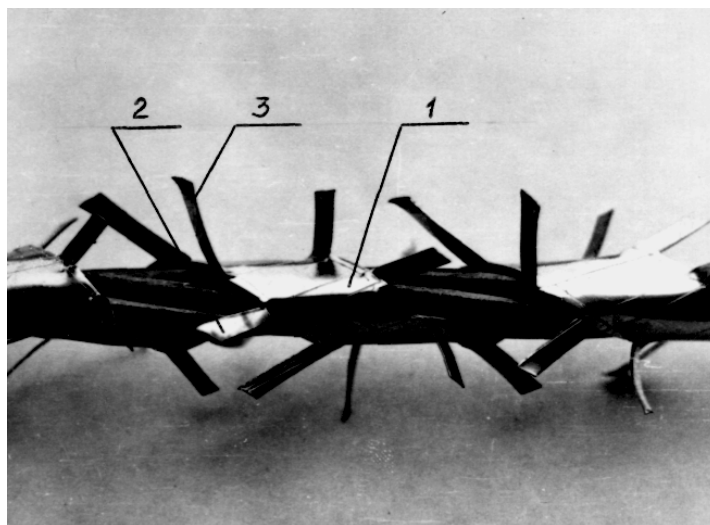
Испытания аэродинамических стабилизаторов, выполненные в полевых условиях, как уже отмечалось выше, показали их недостаточную эффективность применительно к проводам малых сечений. При повороте провода под действием эксцентричной гололедной нагрузки пластины отклоняются от вертикального положения (до $40 \dots 80^\circ$), что снижает эффективность гашения колебаний, а в отдельных случаях способствует их возникновению. В ряде работ [8, 51, 58] указывалось на возможность возникновения колебаний проводов даже при отсутствии гололеда в результате поворота пластин стабилизатора на части провода в пролете, возникающего при монтаже или в процессе эксплуатации. Так, на ВЛ Куйбышевэнерго и Донбасэнерго стабилизаторы ВНИИЭ после двухлетней эксплуатации были демонтированы из-за отсутствия положительного эффекта [58].

С целью устранения указанных недостатков разработано простое устройство для предотвращения колебаний проводов (авторское свидетельство № 936148) [127]. Оно выполнено в виде алюминиевой полосы 1 с зубцами 2 и 3 (рис. 3.2), которая навивается на провод электропередачи и закрепляется по концам при помощи обычной вязальной проволоки. Зубцы 2 витков спирали 1 располагаются тангенциально проводу, а зубцы 3, предварительно отогнутые под прямым углом к поверхности полосы, радиально проводу. Шаг винтовой

намотки выбирается в диапазоне $(1...5) \cdot d$ (d – расчетный диаметр провода) [90]. Полоса может также навиваться на проводе с разным шагом, величина которого изменяется в указанных пределах.



а



б

Рис. 3.2. Устройство для предотвращения колебаний проводов:
а – до установки на проводе; б – после установки на проводе

Предлагаемый гаситель, в общем, представляет конструкцию «ерша», что исключает необходимость его строгой ориентации в рабочем положении и существенно облегчает технологию его установки на проводе в пролете ВЛ.

Для определения аэродинамических характеристик провода, оборудованного разработанным гасителем, была выполнена его продувка в аэродинамической трубе КазНИИЭ (инж. Заглиев И.Г., 1986). В трубе последовательно устанавливались образцы провода АС-35/6,2, оборудованного гасителем (длиной 345 мм) с высотой выступающих зубцов 5, 8 и 10 мм и провода без гасителя (контрольного). Скорость воздушного потока в аэродинамической трубе изменялась в пределах 5...20 м/с.

Проведенные испытания показали, что подъемная сила во всем диапазоне скоростей не возникает. Гаситель, установленный на проводе, снижает величину его аэродинамического коэффициента лобового сопротивления (рис. 3.3) за счет турбулентности потока, создаваемой выступающими над поверхностью провода зубцами гасителя. Это подтверждается результатами исследований, проведенных в работах [49, 99, 106]. Из рисунка 3.3 видно, что коэффициент лобового сопротивления провода с гасителем не зависит от числа Рейнольдса (или скорости потока), а определяется размерами зубцов: с их увеличением коэффициент лобового сопротивления снижается. Поэтому на основе опытных данных оптимальную высоту зубцов гасителя следует выбирать в диапазоне $(0,8 \dots 1,2) \cdot d$.

Выбор высоты зубцов следует проводить также в зависимости от наибольшей величины односторонних отложений гололеда, зарегистрированных в данном районе при пляске проводов.

В течение пяти лет были изучены формы гололедных и изморозевых отложений, образующихся на поверхности провода и гасителя, в полевых условиях в натурном пролете ВЛ 10 кВ длиной 50 м [48, 90].

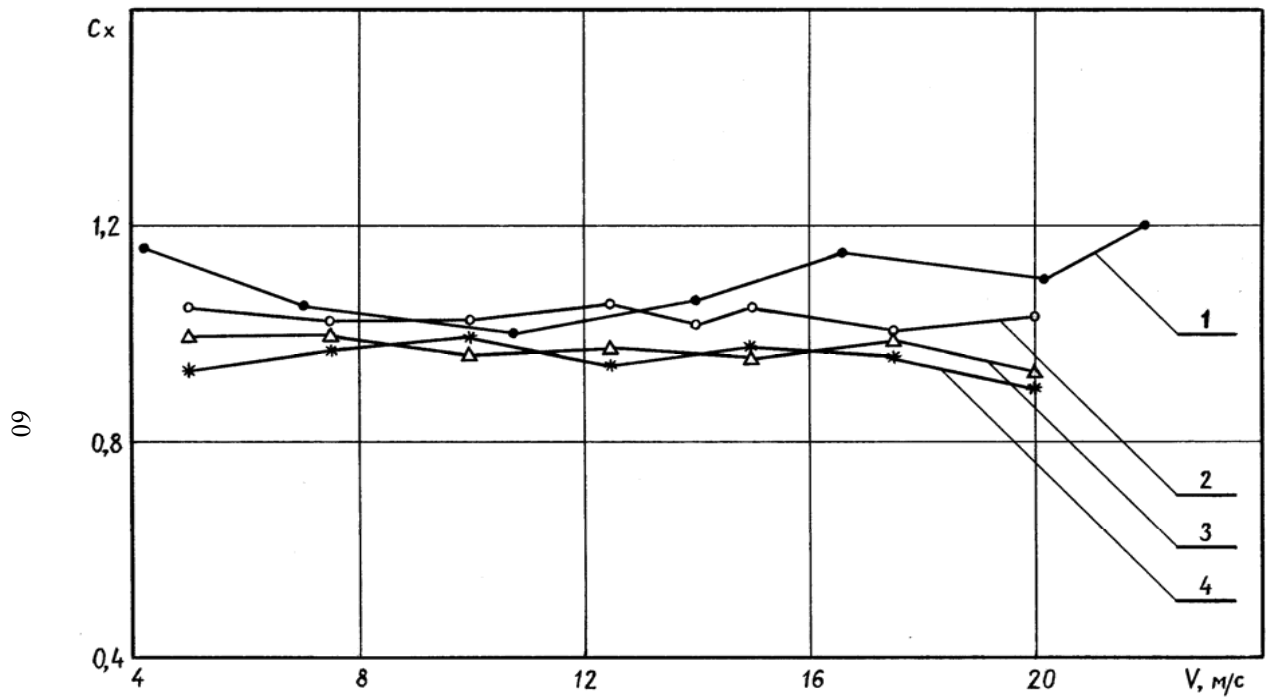
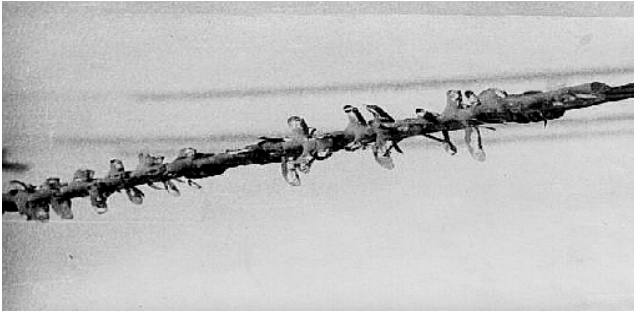


Рис. 3.3. Зависимость аэродинамического коэффициента лобового сопротивления провода от скорости воздушного потока: 1 – без гасителя; 2, 3, 4 – с гасителем при высоте выступа зубцов соответственно 5 мм, 8 мм, 10 мм

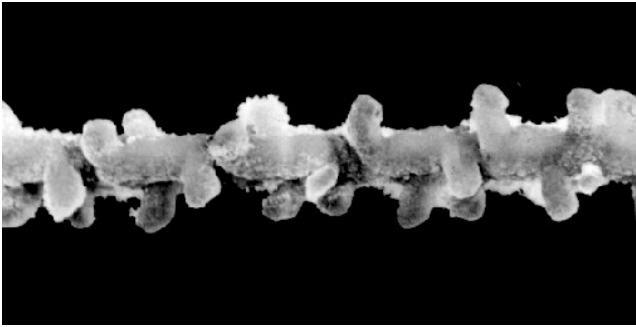
Наблюдения показали, что на участках провода, оборудованных гасителем, гололедные отложения формируют поверхность с переменным по длине профилем неправильной формы (рис. 3.4). На витках спирали гололедные отложения имеют одностороннюю, несколько размытую форму, близкую к отложениям на участках провода, необорудованных гасителем. На зубцах высота отложений составляла 1...4 мм. При всех зафиксированных на проводе размерах гололедных отложений, характерных для режимов пляски, имело место достаточное выступание слоя льда на зубцах относительно отложений на витках спирали.

При отложении изморози (или снега) образующаяся на поверхности гасителя муфта имела несколько большие размеры, чем на поверхности провода (за счет большей начальной поверхности), однако, как показали наблюдения, под действием ветра и при повышении температуры воздуха муфта на поверхности гасителя разрушалась быстрее, чем муфта на проводе. Очевидно, это объясняется тем, что зубцы изменяют картину обтекания гасителя воздушным потоком и, покрываясь изморозью, снижают связь между отдельными частями муфты и уменьшают ее плотность. При встряхивании провода вручную или при помощи шеста большая часть изморози с участков провода, оборудованных гасителем, как правило, опадала, в то время как на остальной части практически оставалась.

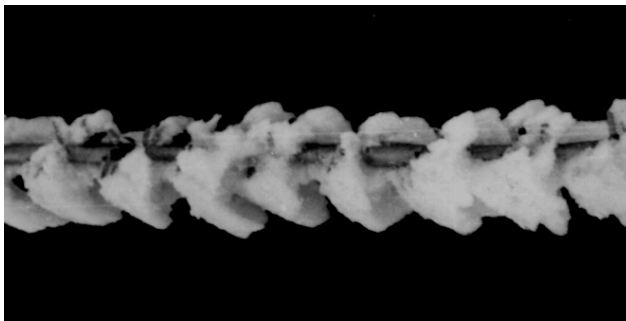
Для подтверждения способности разработанного гасителя повысить аэродинамическую устойчивость провода при гололедообразовании путем снижения подъемной силы была выполнена продувка в аэродинамической трубе КазНИИЭ участка провода без гасителя и оснащенного гасителем с имитацией гололедных отложений. Имитация гололедных отложений была выполнена пластилином по форме, идентичной представленной на рисунке 3.4а. Аэродинамические характеристики определялись при скоростях воздушного потока 6 и 12 м/с, характерных для режимов пляски проводов.



а



б



в

Рис. 3.4. Отложения гололеда (а, б) и изморози (в) на поверхности гасителя

Проведенные испытания показали, что при скорости воздушного потока 12 м/с подъемная сила на участке провода с гасителем не возникала. При скорости 6 м/с наблюдались незначительные по величине и переменные по знаку колебания подъемной силы (рис. 3.5), при этом наибольшие значения коэффициента подъемной силы для провода с гасителем были в 3,5...7,7 раза меньше, чем для провода без гасителя [48]. Во всем диапазоне изменения угла атаки α , включая зону отрицательного наклона графика функции $c_y = f(\alpha)$, выполнялось условие устойчивости по Ден-Гартогу [28].

Характер изменения коэффициента подъемной силы доказывает, что при обдувании воздушным потоком воздуха поверхности с переменным по длине профилем неправильной формы в каждом поперечном сечении возникают разные по величине и знаку значения подъемной силы. Это нарушает регулярность сил аэродинамического воздействия, распределенных по длине гасителя с гололедным отложением, в результате чего существенно уменьшается интенсивность или даже исключается возникновение низкочастотных колебаний провода.

Согласно нашим наблюдениям и сведениям, представленным в работах [34, 83], пляска проводов ВЛ 6–10 кВ часто возникает с двумя полуволнами в пролете, поэтому разработанный гаситель устанавливается в зоне 1/4 и 3/4 длины пролета. Для эффективного воздействия на колебательный процесс необходимо устанавливать гасители на части длины провода с тем, чтобы существенно снизить зону подвода активной энергии (разницы между долей энергии ветрового потока, которая преобразуется колебательной системой и направляется на поддержание пляски, и энергией, расходуемой колебательной системой на преодоление аэродинамических сопротивлений). Поэтому эффективность гасителя будет определяться его размерами, в частности, общей длиной оборудованных гасителями участков провода в пролете.

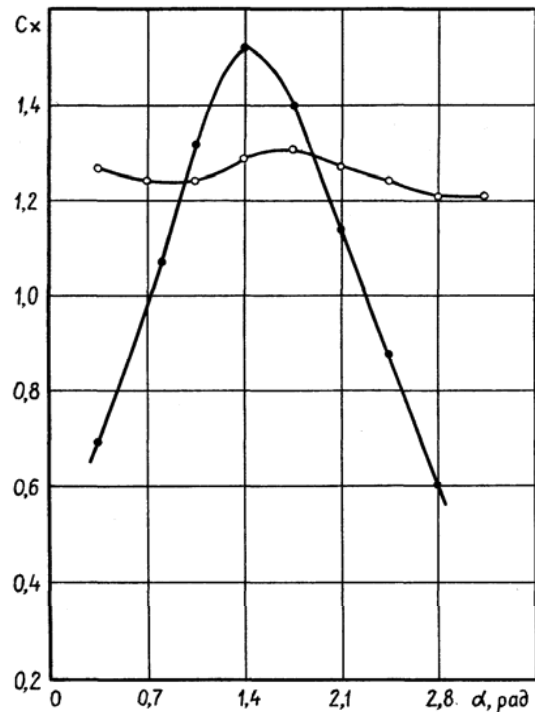
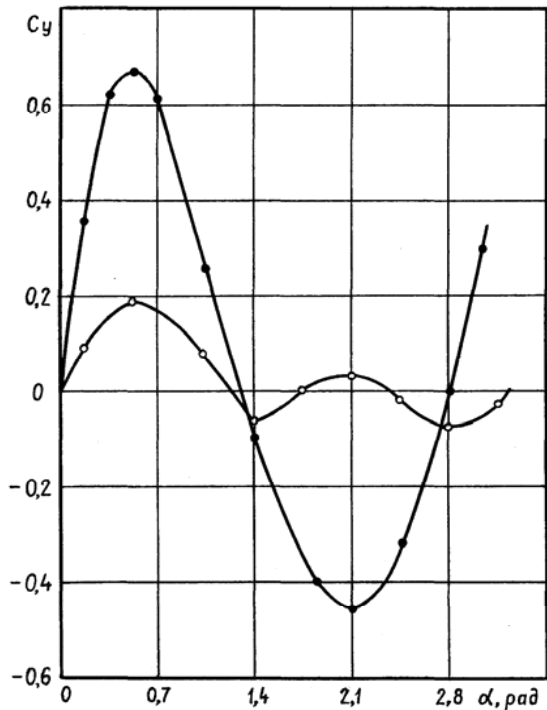


Рис. 3.5. Аэродинамические характеристики провода без гасителя (—●—) и с гасителем (—○—) при наличии гололедных отложений

По методике, представленной в работах [8, 24] и основанной на расчленении колебательного цикла на элементарные процессы с последующим суммированием результатов, расчет активной энергии выполняется по формуле:

$$E_a = \Delta l \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{2q} |\Delta A_{ij}|_y \cdot L_{ij}, \quad (3.4)$$

где $|\Delta A_{ij}|_y$ – путь, проходимый отрезком провода Δl по вертикаль-

ной оси координат;

L_{ij} – подъемная аэродинамическая сила;

i – порядковый индекс отрезка провода Δl ($i = 1, 2 \dots n$);

j – порядковый индекс времени t для каждого положения провода;

$2q$ – число положений провода в течение одного колебания.

В общем случае подъемная сила L определяется следующим выражением:

$$L = \frac{\rho_s \cdot d}{2} \cdot \sqrt{\left(V - \frac{\partial x}{\partial t}\right)^2 + \left(-\frac{\partial y}{\partial t}\right)^2} \cdot \left[-\left(V - \frac{\partial x}{\partial t}\right) \cdot f_L(\alpha) - \frac{\partial y}{\partial t} \cdot f_D(\alpha) \right], \quad (3.5)$$

где ρ_s – плотность воздуха;

d – характерный размер сечения провода с гололедом;

V – скорость ветрового потока;

$\frac{\partial y}{\partial t}$, $\frac{\partial x}{\partial t}$ – скорости вертикального и горизонтального переме-

щений провода;

$c_x = f_D(\alpha)$, $c_y = f_L(\alpha)$ – зависимости коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы от угла атаки α .

$$\alpha = \alpha_{\phi} + \operatorname{arctg} \left(\frac{-\partial y / \partial t}{V - \partial x / \partial t} \right);$$

α_{ϕ} – первоначальный угол сечения провода с гололедом относительно ветрового потока.

С учетом проведенных в аэродинамической трубе испытаний провода с гасителем на устойчивость можно принять, что на участке провода с гасителем отсутствует подвод активной энергии для поддержания пляски. Поэтому при расчете активной суммарной энергии участка провода в зонах установки гасителей из рассмотрения исключаются. При установке гасителей на проводе в двух зонах пролета выражение для расчета активной энергии представим в следующем виде:

$$E'_a = \Delta l \cdot \sum_{i=1}^{x_1} \sum_{j=1}^{2q} |\Delta A_{ij}|_y \cdot L_{ij} + \Delta l \cdot \sum_{x_2}^{x_3} \sum_{j=1}^{2q} |\Delta A_{ij}|_y \cdot L_{ij} + \Delta l \cdot \sum_{x_4}^n \sum_{j=1}^{2q} |\Delta A_{ij}|_y \cdot L_{ij}, \quad (3.6)$$

где x_1, x_3 – координаты начала зоны действия гасителя;

x_2, x_4 – координаты конца зоны действия гасителя.

Для предотвращения пляски проводов необходимо, чтобы активная суммарная энергия была меньше потерь энергии на внутреннее трение, возникающих из-за перемещения отдельных повивов провода относительно друг друга, трения между ними, деформаций растяжения, кручения, изгиба провода, а также его перемещений в местах крепления к штыревому изолятору.

Таким образом, для расчета эффективности гасителей требуются данные о форме, размерах, ориентации гололедного осадка на проводе и в зоне установки гасителей, соответствующие им аэроди-

намические характеристики, которые изменяются случайным образом в процессе гололедообразования, а также сведения о потерях энергии на внутреннее трение в проводе при его низкочастотных колебаниях. Теоретически определить эти параметры не представляется возможным. Для их получения необходимо проведение трудоемких экспериментальных работ как на лабораторных стендах, так и в натуральных условиях. Поэтому для определения оптимальной зоны охвата гасителями проводов, позволяющей предотвратить их пляску, были выполнены визуально-инструментальные наблюдения в течение семи гололедно-ветровых сезонов [40].

Гасители устанавливались в трех опытных пролетах длиной по 50 м на двух проводах каждого пролета в зоне $1/4$ и $3/4$ его длины, при этом третий провод использовался в качестве контрольного. При испытаниях зона охвата провода гасителями в пролетах составляла 12, 16, 20%.

Для определения формы и размеров гололедных отложений на проводе разработан новый способ, позволяющий копировать в плоскости спиливания поперечное сечение отложений в натуральную величину (авторское свидетельство № 1398010) [45, 133]. Предложенный способ предусматривает использование специального копирующего устройства (рис. 3.6). Оно выполнено в виде двух шарнирно соединенных половин диска 1 и 2 из прозрачного материала (например, органического стекла) с выступами 3 и центральным отверстием под провод 4. Половины диска 1 и 2 устанавливаются на проводе 4 вплотную к срезу гололедного отложения 5. При помощи отвеса в виде нити 6 и груза 7 половины диска 1 и 2 фиксируются в рабочем положении замком 8, а на выступах 3 устанавливается неполное упругое кольцо 9 со стрелкой 10. Поворачивая стрелку 10 на фиксированные углы (по круговой шкале на половинах диска 1 и 2), каждый раз определяют размеры отложений 5 по шкале, нанесенной на стрелке 10. Таким образом, копируется точный профиль

гололедных отложений на проводе. Копирование может быть также выполнено путем наложения на устройство прозрачной бумаги со взаимно перпендикулярными осями и отверстием под выступ 3 и последующего обвода карандашом контура гололедного отложения 5.

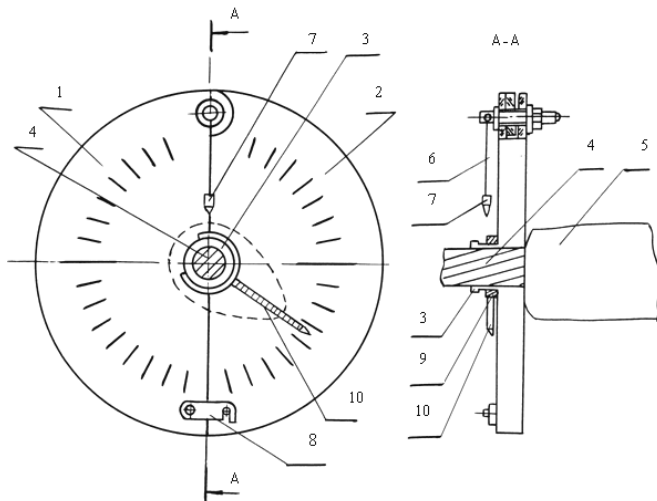


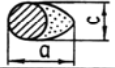


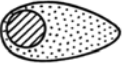
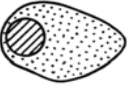
Рис. 3.6. Устройство для определения формы гололедных отложений на проводе

За указанный период испытаний зарегистрировано 32 случая пляски контрольных проводов. Пляска проводов наблюдалась в вертикальной плоскости с двумя полуволнами в пролете частотой 1,0...2,3 Гц, размахом колебаний 0,25...0,50 м. Колебания происходили при скорости ветра 8...13 м/с при односторонних гололедных отложениях со стенкой 4...8 мм и при эксцентричных отложениях диаметром (наибольшим размером гололеда) 15...28 мм и толщиной 10...18 мм.

При испытаниях были зафиксированы случаи одновременной пляски контрольных проводов и проводов, оборудованных гасителями (табл. 3.3).

Таблица 3.3

ПАРАМЕТРЫ ПЛЯСКИ КОНТРОЛЬНЫХ И ОБОРУДОВАННЫХ ГАСИТЕЛЯМИ ПРОВОДОВ

№ п/п	Форма гололеда на контрольном проводе	Размеры гололеда $a \times c$, мм	Скорость ветра, м/с	Направление ветра к оси пролета, град	Размах колебаний в вертикальной плоскости, м			
					контрольного провода	Число полувольт		
						провода, оборудованного гасителем, с охватом его длины, %		
					12	16	20	
1		14 × 8	8 – 10	40 – 50	$\frac{0,25 - 0,30}{2}$	$\frac{0,15 - 0,20}{4}$	–	–
2		15 × 8	12 – 13	70 – 80	$\frac{0,25 - 0,30}{2}$	$\frac{0,15 - 0,20}{4}$	$\frac{0,10 - 0,15}{4}$	–
3		15 × 10	12 – 13	60 – 70	$\frac{0,45 - 0,50}{2}$	$\frac{0,30 - 0,35}{2}$	$\frac{0,15 - 0,20}{4}$	–
4		25 × 12	10 – 12	50 – 60	$\frac{0,45 - 0,50}{2}$	$\frac{0,25 - 0,30}{2}$	$\frac{0,15 - 0,20}{4}$	–
5		26 × 17	8 – 10	60 – 70	$\frac{0,40 - 0,45}{2}$	$\frac{0,25 - 0,30}{2}$	$\frac{0,15 - 0,20}{4}$	–

Сравнительный анализ результатов измерений показывает, что при охвате гасителями 12% длины провода в пролете размах колебаний снижался в 1,46...1,73 раза при двухполуволновой пляске (3 случая) и в 1,57 раза при переходе двухполуволновой пляски в четырехполуволновую (2 случая). При охвате гасителями 16% длины провода пляска возникала только с четырьмя полуволнами, при этом размах колебаний провода снижался в 2,20...2,71 раза. Пляска проводов, оборудованных гасителями с охватом 20% их длины, ни разу не возникла; в отдельных случаях имели место незначительные хаотические перемещения отдельных участков провода при одновременном раскачивании его под действием ветра.

Таким образом, проведенные в аэродинамической трубе и в полевых условиях длительные испытания показали высокую эффективность работы предлагаемого гасителя при установке в зоне $1/4$ и $3/4$ длины пролета с общим охватом 20% длины провода.

При больших гололедных отложениях на проводе, оборудованном гасителем, образуется более скругленная поверхность с переменным по длине профилем неправильной формы. Размеры гололедной муфты на гасителе превышают размеры гололедного отложения на проводе, что приводит к увеличению гололедной нагрузки. С целью оценки увеличения гололедной нагрузки на проводе, оборудованном гасителем, были скопированы профили отложений гололеда на гасителе в шести равноотстоящих друг от друга на расстоянии 0,02 м сечениях и на участке провода без гасителя (рис. 3.7). Копирование сечений гололедных отложений осуществлялось при помощи разработанного копирующего устройства. Расчеты показали, что площади сечений гололедного отложения на гасителе превышают площадь сечения гололеда на проводе на 5,2...23,9% или в среднем на 12,9%. В пересчете на всю длину провода превышение гололедной нагрузки при использовании гасителей составит всего лишь 2,6%.

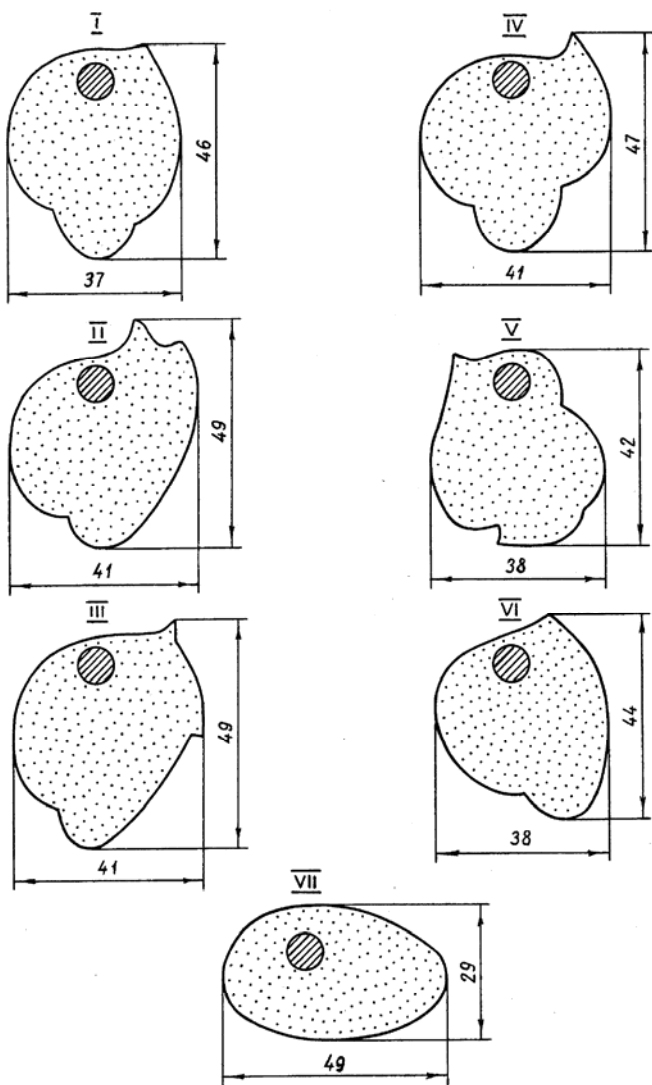


Рис. 3.7. Профили сечений гололедных отложений на гасителе (I–VI) и на проводе (VII)

Как видно из рисунка 3.7 профили гололедных отложений на гасителе имеют более скругленную, приближающуюся к цилиндрической форму: введенный в разделе 2.1 показатель формы гололедного отложения на гасителе составляет 0,10...0,20, а на проводе – 0,41.

Таким образом, использование гасителя при больших гололедных отложениях на проводе практически не вызывает увеличения гололедной нагрузки, а формирование поверхности гололедной муфты, близкой по форме к цилиндрической, повышает, как известно, аэродинамическую устойчивость провода с гололедом.

Расчет экономического эффекта выполнен путем сравнения приведенных затрат Z_y на внедрение разработанного устройства для предотвращения колебаний проводов с приведенными затратами Z_n , связанными с плавкой гололедных отложений (как средства борьбы с пляской проводов).

Затраты на плавку гололеда определяются по формуле [79]:

$$Z_n = K_n \cdot (p + p_a + p_э) + I_n + U_n,$$

где K_n – капиталовложения для плавки на 1 км линии,

$K_n = 100 \dots 150$ руб/км¹ [53];

p – нормативный коэффициент эффективности;

p_a – ежегодные амортизационные отчисления от капиталовложений в устройства плавки, $p_a = 0,06$ [79];

$p_э$ – ежегодные издержки на эксплуатацию устройств плавки, $p_э = 0,045$ [79].

I_n – технологические издержки;

U_n – ущерб от отключения потребителей.

¹ Здесь и далее по тексту приведены показатели в ценах 1991 г.

В технологические издержки I_n включаются затраты I_1 на электроэнергию, используемую для плавки гололеда, и стоимость содержания дополнительного персонала и транспортных расходов I_2 для внеочередных ремонтов и осмотров ВЛ, наблюдений за окончанием плавки, производства переключений для плавки гололеда на подстанциях и других работ, не учитываемых в отчислениях на обслуживание и ремонт устройств и оборудования плавки гололеда [72]. Стоимость содержания дополнительного персонала определяется трудозатратами на каждую плавку и выражается через заработную плату, а транспортные расходы рассчитываются по времени использования транспорта на плавку и себестоимости машино-часа в гололедные месяцы.

Стоимость электроэнергии, затрачиваемой на плавку, определяется выражением [72]:

$$I_1 = m \cdot I^2 \cdot R \cdot \tau \cdot c,$$

где I – ток плавки, А;

τ – длительность плавки, ч;

m – число фаз;

R – сопротивление провода, Ом;

c – себестоимость электроэнергии (0,4...2,0 коп/кВт·ч).

При продолжительности плавки гололедных отложений, характерных для режимов пляски проводов, в пределах 1...11 мин (см. раздел 3.3), токе плавки 300 А и средней себестоимости электроэнергии I_1 составит 0,04...0,46 руб/км. Согласно расчетам, выполненным в работе [72], $I_2 = 0,74$ руб/км.

Ущерб от отключения потребителей зависит от их характера, отключаемой мощности и длительности плавки гололеда (с учетом времени оперативных переключений на подстанциях). Ущерб на 1 км ВЛ 10 кВ с проводом АС-35/6,2 при удельном ущербе 0,75 руб/кВт·ч [95] составит 8,5...11,2 руб.

Приведенные затраты на плавку гололеда в зависимости от величины удельных капитальных вложений K_n (при средних значениях технологических издержек и ущерба от отключения потребителей) составят 36,3...49,1 руб./км. Приведенные затраты на изготовление и монтаж разработанного устройства на проводах ВЛ 10 кВ длиной 1 км составят, в среднем, 8,5 руб.

Таким образом, приведенные затраты, связанные с использованием предлагаемого устройства, меньше затрат на проведение плавки гололедных отложений при пляске проводов, в 4,3...5,8 раза или на 27,8...40,6 руб/км.

Разработанное устройство для предотвращения колебаний проводов внедрено на ВЛ 10 кВ Белебеевских электрических сетей РЭУ «Башкирэнерго», включено в Указание Минэнерго СССР (от 27.01.86 г., № Ш-1102) для массового внедрения на ВЛ 10 кВ как средства борьбы с пляской проводов. С учетом общего индекса цен по электроэнергетике (45,8) за период с 1992 по 2007 гг., полученного на основе данных, представленных в статистических сборниках Государственного комитета Республики Башкортостан по статистике (Башкортостанстат), экономический эффект от внедрения предлагаемого устройства составит, в среднем, 1566 руб/км.

Повышение аэродинамической устойчивости провода при гололеде достигается также при использовании ряда разработанных устройств: аэродинамического гасителя, самоустанавливающегося на проводе в требуемое рабочее положение независимо от способа его навески (авторское свидетельство № 746799) [122]; устройства в виде цилиндрического элемента, установленного на проводе с возможностью его вращения в процессе гололедообразования (авторское свидетельство № 616674) [119]; конструкции закрепления провода на штыревом изоляторе, обеспечивающей его поворот при гололеде (авторское свидетельство № 700877) [120].

Снижение интенсивности пляски проводов или ее предотвращение, как уже отмечалось, обеспечивается путем уменьшения зоны подвода активной энергии. Для этого может быть использован метод механического удаления односторонних гололедных отложений на части длины провода. Для реализации этого метода разработан ряд устройств, обеспечивающих скалывание льда в процессе гололедообразования ножевыми полосами из магнитного материала с положительной температурой точки Кюри (авторское свидетельство № 890507) [123], цилиндрическими пружинными элементами, установленными на проводе с зазором (авторские свидетельства №№ 902129, 936149, 957332, 1243059) [124, 128, 129, 131], а также рычажными V-образными ударными элементами (авторские свидетельства №№ 917247, 959199) [125, 130].

Устройство для гашения пляски проводов (авторское свидетельство № 1243059) внедрено на предприятии (п/я М-5175) г. Степногорска Целиноградской области с годовым экономическим эффектом 224 тыс. рублей (в ценах 2007 г.).

3.2.2. Аэродинамически стабильный провод и результаты его испытаний

Применение гасителей пляски, устанавливаемых на проводах, требует дополнительных материальных затрат на монтаж и контроль за их состоянием в процессе эксплуатации, особенно в труднодоступных для обслуживающего персонала местах прохождения воздушных линий электропередачи. Кроме того, эффективность демпфирования низкочастотных колебаний проводов в полете повышается с увеличением зоны охвата гасителями провода по его длине. Поэтому для устранения выявленных недостатков разработан новый провод линии электропередачи (авторское свидетельство № 714509) [121], в котором повышение аэродинамической

устойчивости при ветре и гололеде достигается за счет изменения его конструкции. Следует отметить, что в США широкое применение получили устанавливаемые на проводах ВЛ спиральные демпферы пляски – спойлеры, работающие на принципе, аналогичном разработанному аэродинамически стабильному проводу.

С целью оценки эффективности демпфирования низкочастотных колебаний проводов ВЛ 6–10 кВ были выполнены сравнительные испытания аэродинамически стабильного провода и спойлера на комплексе экспериментальных линий во время гололедно-ветровых сезонов.

Аэродинамически стабильный провод отличается от стандартного тем, что диаметр одной из проволок внешнего повива больше диаметра остальных (рис. 3.8). Выбор диаметра этой проволоки базируется на опытах профессора Г. А. Савицкого [75] и принимается в работах [3, 46, 86] равным

$$d_y = (0,1 \dots 0,2) \cdot (2 \cdot d + d_y) + d, \quad (3.7)$$

где d_y , d_y – диаметры увеличенной и центральной проволок соответственно, мм;

d – диаметр остальных проволок повива, мм.

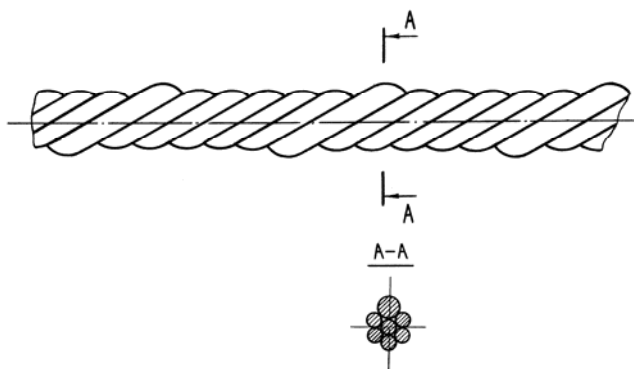


Рис. 3.8. Аэродинамически стабильный провод линии электропередачи

Проволока увеличенного диаметра представляет собой ребро, расположенное по винтовой линии с шагом, равным шагу скрутки провода. Назначение ребра состоит в том, что оно искажает симметрию натекающего потока путем воздействия на его пограничный слой.

Испытания, проведенные в аэродинамической трубе КазНИИЭ, показали, что при скоростях воздушного потока от 2 до 27 м/с у провода новой конструкции аэродинамическая подъемная сила отсутствует, а лобовое сопротивление по сравнению со стандартным проводом увеличивается незначительно (до 9%) [3, 4].

Изготовление провода новой конструкции на заводе не требует изменения оборудования и техпроцессов. Условие плотного прилегания проволок друг к другу обеспечивается за счет некоторого уменьшения диаметра проволок внешнего повива стандартного провода, например для изготовления аэродинамически стабильного провода на базе стандартного провода АС-70/11 диаметр должен быть уменьшен с 3,8 до 3,5 мм. Диаметр увеличенной проволоки внешнего повива при этом выбирается равным 5,0 мм.

Аэродинамически стабильный провод на базе провода АС-70/11 был изготовлен по заказу ПОЭиЭ «Башкирэнерго» на заводе «Кирскабель» (один барабан 4000 м). По оценке специалистов завода стоимость первых партий такого провода возрастет на 5...10%. При серийном производстве стоимости проводов стандартной и новой конструкций практически не должны отличаться.

Аэродинамически стабильный провод, изготовленный на базе стандартного провода АС-70/11, имеет следующие конструктивные данные [46]: диаметр провода – 12,3 мм (наибольший), 10,8 мм (наименьший); сечение провода общее – $79,05 \text{ мм}^2$, алюминиевой части – $67,71 \text{ мм}^2$, стальной – $11,34 \text{ мм}^2$; число проволок в проводе и их диаметр – $5 \times 3,5 \text{ мм}$ и $1 \times 5,0 \text{ мм}$ (алюминиевая часть), $1 \times 3,8 \text{ мм}$ (стальная часть); погонная масса провода – 0,316 кг/м. Длина одного шага повива провода равна 224 мм.

Спиральный демпфер пляски – спойлер изготавливается из прутков диэлектрического материала различных диаметров. Каждый конец спойлера (рис. 3.9) имеет сформированный при изготовлении спиральный участок закрепления, предназначенный для более плотного прилегания концов прутка сверху провода. Часть прутка между концами участков закрепления представляет зону плотного двойного повива вокруг провода с шагом, равным 1,83 м. Диаметр прутка демпфера должен составлять 45...85% диаметра провода согласно рекомендациям, представленным в работах [32, 76, 114]. Спойлеры рекомендуется устанавливать на проводе с охватом 20...25% длины пролета.



Рис. 3.9. Спиральный демпфер (спойлер), установленный на проводе

Принцип действия спойлера такой же, как и аэродинамически стабильного провода. Отличие заключается в том, что зона действия спойлера ограничена пределами того участка провода, где он установлен.

В связи с невозможностью приобретения спойлеров заводского изготовления были использованы многожильные и одножильные провода (медные и алюминиевые) с резиновой изоляцией. Для плотного и надежного прилегания спойлеров к проводу через каждые 0,25...0,30 м они закреплялись к проводу капроновыми нитями. Общая длина спойлера составляет 4,27 м, длина участков закрепления – 0,61 м, диаметр спойлера – 7...9 мм.

В рамках проводимых испытаний в течение двух лет были изучены особенности гололедообразования на аэродинамически стабильном проводе и проводе со спойлером [39]. Измерения парамет-

ров гололедных отложений выполнялись в двух пролетах ВЛ 10 кВ комплекса экспериментальных линий, в которых были смонтированы три разных провода (аэродинамически стабильный провод, провод со спойлером и контрольный провод АС-70/11) на доступной с земли высоте. При измерениях использовалось специальное копирующее устройство, описание которого представлено в разделе 3.2.1.

За два гололедных сезона было проведено 24 измерения гололедных отложений в середине пролета, наиболее характерные из них представлены на рис. 3.10–3.12. Для оценки изменения формы и размеров гололедных отложений замеры на аэродинамически стабильном проводе проводились в четырех равноотстоящих друг от друга сечениях в пределах одного шага его повива (рис. 3.11), а на проводе со спойлером – в восьми сечениях в пределах одного шага повива спойлера (рис. 3.12).

Результаты измерений показали, что отложения гололеда на аэродинамически стабильном проводе и проводе, оборудованном спойлером, в пределах длины одного шага их повива располагаются по винтовой линии (волнообразно). Поэтому подъемные силы, возникающие на одних участках провода, будут компенсироваться силами на других участках, в результате чего согласно теории Ден-Гартога [28] повышается аэродинамическая устойчивость провода в полете при воздействии ветра. В пределах длины одного шага повива аэродинамически стабильного провода и спойлера высота стенки отложения изменяется незначительно и может быть принята постоянной. Превышение погонной массы гололедных отложений на аэродинамически стабильном проводе по сравнению с проводом АС-70/11 составляет 2,7...5,1% [43], что совпадает с данными измерений, представленными в работе [32], применительно к проводу, оборудованному спойлером.

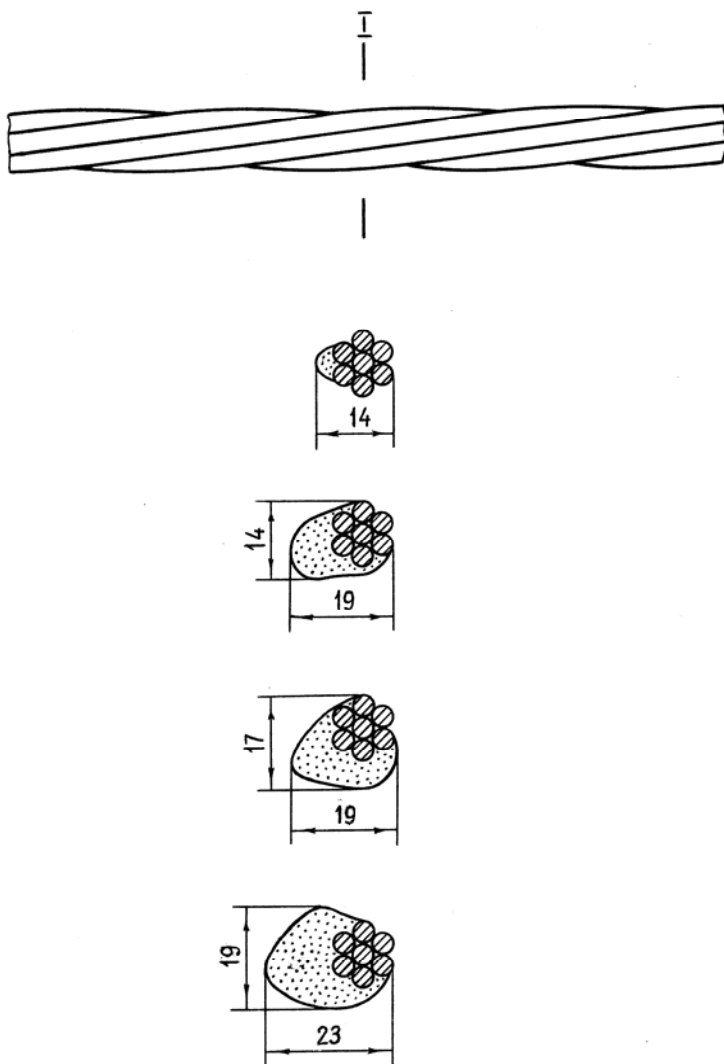


Рис. 3.10. Формы и размеры гололедных отложений на контрольном проводе

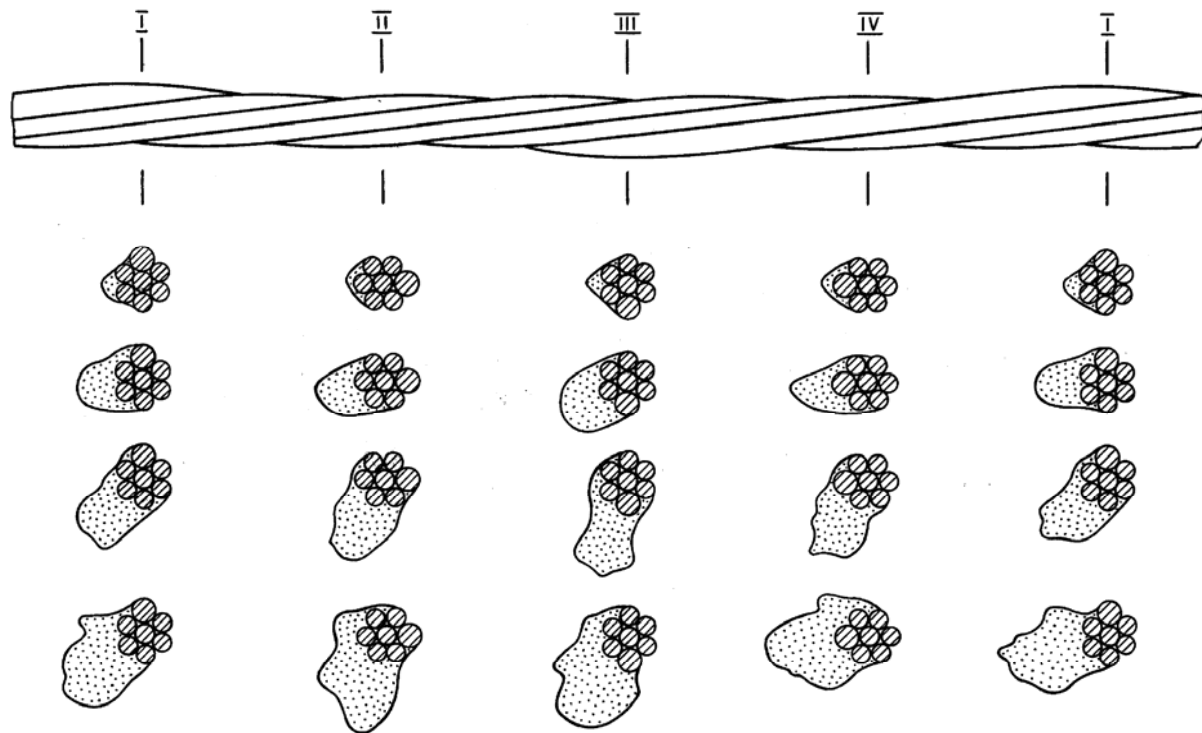
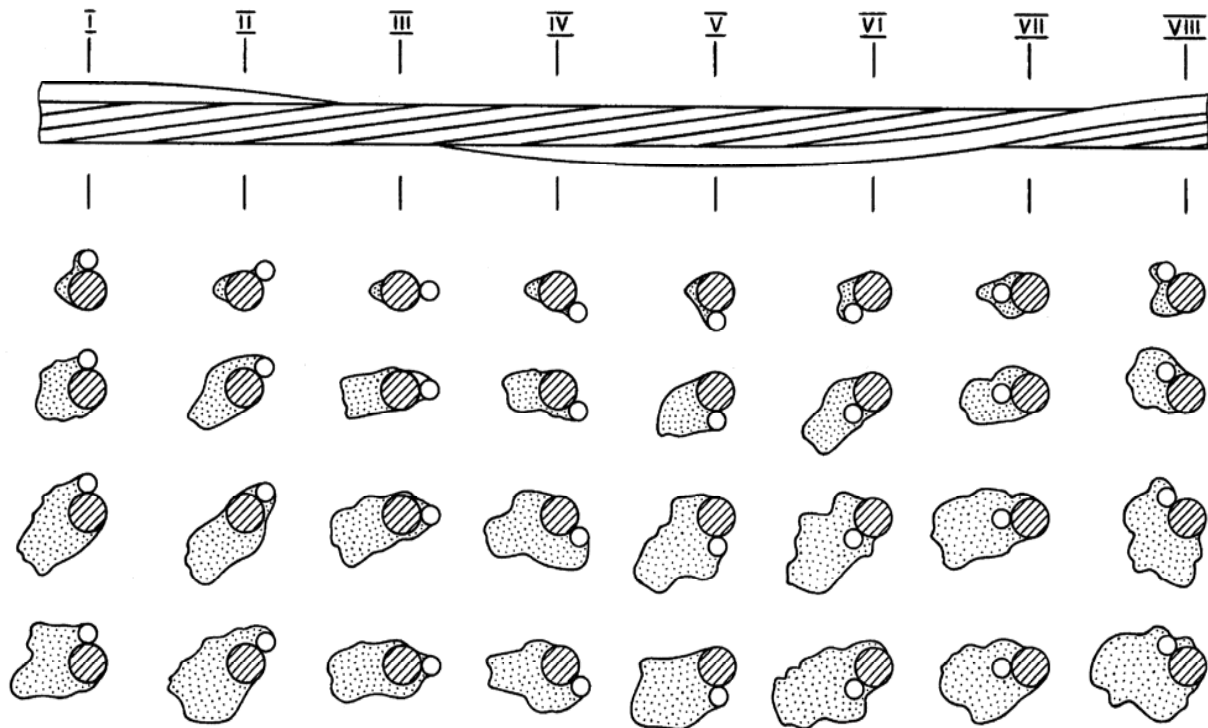


Рис. 3.11. Формы гололедных отложений на аэродинамически стабильном проводе



82

Рис. 3.12. Формы гололедных отложений на проводе со спойлером

Сравнительные испытания аэродинамически стабильного провода и спойлеров проводились в четырех пролетах длиной 50 м, оснащенных необходимыми измерительными устройствами и оборудованием [39]. Аэродинамически стабильный провод монтировался на одной из нижних фаз каждого пролета, на второй нижней фазе устанавливались четыре спойлера: два – в зоне 1/4 и два – в зоне 3/4 длины пролета. Верхний провод всех пролетов использовался в качестве контрольного. Стрелы провеса проводов в пролетах составляли 0,7...0,9 м. Кроме того, аэродинамически стабильный провод и спойлеры были установлены в 15 пролетах длиной 50...60 м, расположенных на разных отметках возвышенности и по-разному ориентированных к сторонам света. Регистрация параметров возникающей пляски проводов осуществлялась кино съемкой. Для измерения крутильных колебаний проводов в пролетах устанавливались указатели закручивания.

В течение двух лет за три гололедные волны на комплексе экспериментальных линий зафиксированы 12 случаев пляски проводов, параметры которой и сопутствующие метеорологические условия приведены в таблице 3.4. Во всех зафиксированных случаях подверженные пляске провода имели небольшие односторонние отложения гололеда с толщиной стенки от 3 до 10 мм. Скорость ветра, при которой наблюдалась пляска проводов, составляла от 2 до 12 м/с, направление воздушного потока к оси линии – от 20 до 80°. Пляска проводов прекращалась в результате изменения скорости, направления ветра или температуры окружающей среды.

Таблица 3.4

ПАРАМЕТРЫ ПЛЯСКИ ИСПЫТУЕМЫХ ПРОВОДОВ НА КОМПЛЕКСЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

№ п/п	Метеоусловия			Размеры гололеда на проводе в середине пролета $a \times c$, мм	Размах колебаний (м) в вертикальной плоскости			Число полу-волн колебаний в пролете	Частота колебаний, Гц	Размах крутильных колебаний в середине пролета, град
	скорость ветра, м/с	направление ветра к оси пролета, град	температура воздуха, °С		контрольного провода	провода, оборудованного спойлерами	аэродинамически стабильного провода			
1	5–8	50–75	–1	18×12	0,10–0,15	–	–	4	2,0	12
2	5–8	60–80	–1	18×12	0,10–0,15	–	–	4	2,0	15
3	5–8	50–75	–1	19×14	–	0,10–0,15	–	4	2,5	–
4	4–5	60–80	–3	18×13	–	0,15–0,20	–	4	3,3	20
5	4–5	60–80	–3	19×13	0,15–0,20	–	–	4	2,5	–
6	4–5	60–80	–3	18×13	–	–	0,15–0,20	4	2,5	–
7	3–4	20–40	–9	18×12	0,35	–	–	2	1,0	70–80
				19×13	–	0,25	–	2	1,0	70–80
8	4–5	20–40	–10	18×12	0,35	–	–	2	1,0	70–80
				19×13	–	0,30	–	2	1,0	70–80
9	3–4	20–40	–8	18×13	0,30–0,35	–	–	2	1,1	70–80
10	3–4	20–40	–10	18×12	0,10–0,15	–	–	2	1,1	70–80
11	10–12	55–60	–3	21×16	–	0,20–0,25	–	2	1,5	20–30
12	2–4	40–50	–11	14×12	0,20–0,25	–	–	2	1,1	15

При пляске проводов размах колебаний в вертикальной плоскости достигал: при двухполуволновой пляске – 0,35 м, при четырехполуволновой – 0,20 м. Частота двухполуволновой пляски проводов составляла 1,0...1,1 Гц, четырехполуволновой – 2,0...3,3 Гц. Размах крутильных колебаний провода при пляске изменялся в широких пределах: имели место как случаи пляски без движений закручивания, так и случаи пляски проводов с размахом крутильных колебаний до 80°. Следует отметить, что в последних случаях (табл. 3.4, пп. 7–10) пляска проводов возникала под действием ветра, направленного со стороны, противоположной гололедным отложениям.

Анализ данных, приведенных в таблице 3.4, показывает, что за период испытаний пляска контрольных проводов возникала 8 раз; проводов со спойлерами – 5 раз; аэродинамически стабильного провода – 1 раз, при этом пляска аэродинамически стабильного провода в отличие от проводов, оборудованных спойлерами, наблюдалась только с четырьмя полуволнами. При одновременной пляске контрольных проводов и проводов, оборудованных спойлерами (табл. 3.4, пп. 7–8), последние колебались с амплитудами в 1,17...1,40 раза меньше, чем амплитуды колебаний контрольных проводов. Сравнительно высокая эффективность аэродинамически стабильного провода при воздействии ветра и гололеда обеспечивается за счет взаимной компенсации возникающих подъемных сил по всей его длине, а не на отдельных участках провода в зоне установки спойлеров.

Были проведены сравнительные испытания при искусственном возбуждении пляски исследуемых проводов, покрытых гололедом, путем изменения их тяжения в полете длиной 100 м [39]. Тяжение провода с помощью лебедки сначала плавно увеличивалось от 1666 Н (170 кгс) до 4704 Н (480 кгс), а затем плавно уменьшалось до первоначальной величины (3 повтора через каждые 30...40 мин.). При измерении тяжения проводов использовал-

ся динамометр ДПУ-05-2. Опыты проводились при скорости ветра 5 м/с, направлении ветра к оси полета $80...90^\circ$ и температуре воздуха -5°C . На проводах имелись односторонние гололедные отложения с толщиной стенки 4...6 мм.

Пляску контрольного провода АС-70/11 при испытаниях удалось вызвать 4 раза с двумя, 6 раз с четырьмя и 6 раз с восемью полуволнами при тяжениях 2254...2646 Н (230...270 кгс), 2842...3724 Н (290...380 кгс), 3724...4312 Н (380...440 кгс) соответственно. Размах в вертикальной плоскости и частота колебаний провода с двумя полуволнами достигали соответственно 0,4...0,6 м и 0,55...1,00 Гц; с четырьмя полуволнами – 0,20...0,25 м и 1,00...1,30 Гц; с восемью полуволнами – 0,10...0,15 м и 1,60...3,30 Гц. Частота крутильных колебаний провода превышала частоту колебаний в вертикальной плоскости: при двухполуволновой пляске в 3,0...6,4 раза, четырехполуволновой – в 3,1...4,5 раза, восьмиполуволновой – в 1,8...3,8 раза.

Пляска провода со спойлером возникала 1 раз с двумя, 5 раз с четырьмя и 11 раз с восемью полуволнами при тяжениях 2254 Н (230 кгс), 2548...2744 Н (260...280 кгс), 3038...3920 Н (310...400 кгс) соответственно. Размах и частота колебаний провода с двумя полуволнами составляли 0,40 м и 0,90 Гц, с четырьмя полуволнами – 0,30...0,40 м и 1,25...1,40 Гц, с восемью полуволнами – 0,15...0,25 м и 2,50...3,00 Гц. Частота крутильных колебаний провода при пляске превышала частоту вертикальных колебаний при двухполуволновой пляске в 4,4 раза, при четырехполуволновой – в 3,5...4,8 раза, при восьмиполуволновой – в 2,3...3,3 раза.

Пляска аэродинамически стабильного провода возникала 5 раз только с восемью полуволнами при тяжениях 2940...4704 Н (300...480 кгс). Размах колебаний провода в вертикальной плоскости достигал 0,10...0,15 м, частота составляла 1,40...2,50 Гц, при

этом частота крутильных колебаний превышала частоту линейных в 3,2...4,3 раза.

Таким образом, результаты проведенных испытаний свидетельствуют об эффективной работе разработанного аэродинамически стабильного провода в режиме гололедно-ветровых нагрузок. Провод новой конструкции внедрен в Белебеевском предприятии ПОЭиЭ «Башкирэнерго» в 1990 г. с экономическим эффектом 90 тыс. рублей на 100 км ВЛ 10 кВ [4] (с учетом индекса цен 41,2 тыс. руб/км в ценах 2007 г.).

3.3. Применение плавки гололеда на проводах линий электропередачи переменным током

Плавка гололеда на проводах воздушных линий электропередачи, используемая для предупреждения опасных перегрузок, начинает находить широкое применение в качестве средства предотвращения пляски обледенелых проводов [1, 8, 16, 24, 58, 64]. Удаление гололеда путем плавки позволяет устранить саму причину возникновения пляски проводов. В настоящее время устройствами плавки гололеда оборудовано свыше 135000 км линий. В качестве средства борьбы с пляской проводов плавка гололеда используется на линиях электропередачи энергосистем Киевэнерго, Мосэнерго, Днепрэнерго, Харьковэнерго, Башкирэнерго, Донбассэнерго, а также на ВЛ ПО Дальние электропередачи. Так, в Киевэнерго схемами плавки гололеда оборудовано около 5000 км линий. К началу 1986 года в Башкирской энергосистеме устройствами плавки было оборудовано более 3000 км ВЛ 35–220 кВ (164 схемы плавки на проводах и 100 – на тросах), 7000 км ВЛ 6–10 кВ (410 схем плавки) и достигнута их устойчивая работа в гололедно-ветровых режимах [9, 89]. В сетях 6–10 кВ плавка голо-

леда проводится на номинальном напряжении способом трехфазного короткого замыкания преимущественно в длительном режиме.

Важное значение имеет правильное определение длительности плавки, которая зависит от величины протекающего по проводам тока, метеоусловий во время плавки, структуры и размеров гололедных отложений на проводе и рассчитывается по известной формуле профессора В.В. Бургсдорфа [74]. Многолетняя практика подтвердила возможность использования этой формулы при плавке значительных по размерам гололедных отложений, когда в результате постепенного закручивания провода их форма существенно приближается к цилиндрической.

Пляска проводов ВЛ 6–10 кВ наблюдается, как правило, при малых гололедных отложениях, имеющих явно выраженную одностороннюю клиновидную форму. Проведенные наблюдения показали, что в начальной стадии процесса гололедообразования гололед в поперечном сечении покрывает лишь некоторую часть периметра сечения провода, а в дальнейшем – весь провод, образуя эксцентричное одностороннее гололедное отложение, имеющее со стороны провода, противоположной гололедонесущему потоку, тонкую пленку (стенку). В связи с отсутствием способов получения информации в начальный период гололедообразования, значительная часть плавков для предотвращения пляски проводов проводится при наличии на проводах односторонних эксцентричных отложений.

Согласно руководящих указаний [74] величину тока и время плавки односторонних гололедных отложений принимают равным величине и времени плавки цилиндрического гололеда с толщиной стенки 5 мм. Однако на практике при плавке односторонних отложений, характерных для режимов пляски проводов ВЛ 10 кВ, расчетная продолжительность плавки превышает фактическую

в 1,5...4,5 раза, что приводит к необоснованным затратам электроэнергии. Подтверждением этому являются данные о фактическом времени плавок односторонних гололедных отложений, проведенных в качестве эксперимента на ряде действующих ВЛ 10 кВ одного из электросетевых предприятий Башкирской энергосистемы (табл. 3.5) [42]. Измерения проводились визуально в одном из пролетов проплавляемой линии от момента включения схемы плавки (связь с диспетчерским пунктом осуществлялась по рации) до полного удаления отложений с проводов. Снижение продолжительности плавки односторонних отложений объясняется тем, что по мере расплавления слоя льда, непосредственно примыкающего к поверхности провода, отложения под действием вращающего момента поворачиваются относительно провода, занимая вертикальное положение. После проплавления тонкой стенки, расположенной теперь уже над проводом, происходит сброс гололедного отложения. Так как форма и размеры гололедных отложений по длине пролета различны, то сброс их при плавке происходит постепенно от мест крепления провода на изоляторе к середине пролета, где стенка проплавления имеет наибольшую величину. Поэтому размеры гололедных отложений при определении продолжительности их плавки необходимо фиксировать в середине пролета.

Ввиду отсутствия сведений о фактической стенке проплавления, зависимости ее от геометрических размеров эксцентричных гололедных отложений, были изучены формы таких отложений на проводе АС-35/6,2 в 60 случаях пляски проводов, зафиксированных в пролетах ВЛ 10 кВ комплекса экспериментальных линий [91, 94]. Формы гололедных отложений на проводе определялись с помощью специального копирующего устройства, описанного в разделе 3.2.1. Виды гололедных отложений на проводах для середины пролета система-

тизированы по форме, размерам и стенке проплавления и представлены в табл. 3.6.

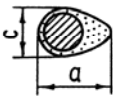
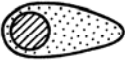







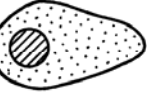
Таблица 3.5

**СВЕДЕНИЯ О ПАРАМЕТРАХ ПЛАВКИ ОДНОСТОРОННИХ
ЭКЦЕНТРИЧНЫХ ГОЛОЛЕДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
НА ПРОВОДАХ ВЛ 10 КВ**

Наименование фидера	Ток плавки, А	Размеры гололедных отложений, мм	Плотность гололедных отложений, г/см ³	Метео-условия		Фактическое время плавки, мин	Расчетное время плавки цилиндрического гололеда с толщиной стенки 5 мм, мин
				температура воздуха, °С	скорость ветра, м/с		
ф. 4 Глуховская	200	15×10	0,75	-4	6	3	13,6
ф. 15 Малиновка	280	17×12	0,90	-4	6	2	6,2
ф. 18 Урсаево	128	20×16	0,75	-2	6	15	38,0
ф. 741 (до Ирека)	200	25×12	0,80	-4	10	7	10,4
ф. 9 УБ	220	28×12	0,60	-4	3	3	6,9
ф. 2 Белебей	300	30×15	0,60	-8	8	3	5,4

Таблица 3.6

ФОРМЫ И РАЗМЕРЫ ЭКСЦЕНТРИЧНЫХ ГОЛОЛЕДНЫХ
ОТЛОЖЕНИЙ НА ПРОВОДЕ ПРИ ПЛЯСКЕ

№№ п/п	Форма гололедного отложения	Размеры гололедного отложения $a \times c$, мм	Число случаев пляски проводов	Толщина стенки проплавления, мм
1		15×10	6	1,0
2		20...25×11	3	1,5
		17...20×12	3	
3		23...26×12	3	2,0
		28...30×10	3	
4		24×14...16 (28...30×12)	9 2	2,5
5		24...26×17	3	3,0
		28×15	6	
6		27...30×17	3	3,5
		25...28×18	14	
		30×14...15	3	
7		30...32×18	2	4,0

Анализ полученных данных показывает, что действительная толщина стенки проплавления эксцентричных отложений, характерных для пляски проводов, в большинстве случаев (58 из 60) составляет 1,0...3,5 мм. Для каждого случая были выполнены расчеты приведенной стенки гололедного отложения цилиндрической формы с площадью поперечного сечения, равной площади прямоугольника со сторонами, определяемыми геометрическими размерами эксцентричного отложения.

На основе полученных измерений и расчетов методом криволинейной корреляции получена зависимость фактической стенки проплавления эксцентричного гололедного отложения b от приведенной стенки b_3 , [36]:

$$b = 0,048 \cdot b_3^2 - 0,063 \cdot b_3 + 0,878, \quad (3.8)$$

где $b_3 = \sqrt{\frac{a \cdot c}{\pi}} - \frac{d}{2}$;

a – диаметр гололедного отложения, мм;

c – толщина гололедного отложения, мм;

d – расчетный диаметр провода, мм.

Для исследования режимов плавки гололедных отложений на комплексе экспериментальных линий три горизонтальные линии с проводами АС-35/6,2 были оборудованы схемами плавки (рис. 3.13). Ввиду незначительной длины этих линий (0,71; 0,78 и 0,85 км) напряжение плавки выбрано равным 380 В. Плавка гололеда на проводах осуществлялась путем поочередного подключения линий к источнику напряжения.

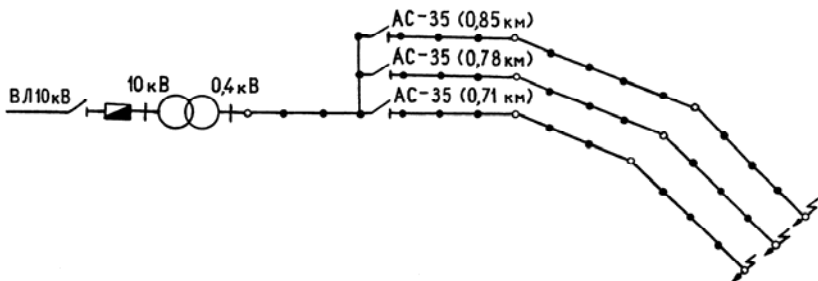


Рис. 3.13. Схема плавки гололеда на проводах ВЛ 10 кВ комплекса экспериментальных линий

Ток плавки выбирался из условия, что он должен быть достаточным для расплавления гололедных отложений за приемлемое время и в то же время он не должен приводить к перегреву провода. При расчетах токов плавки, согласно работе [81], температура воздуха принималась равной -10°C , скорость ветра – 8 м/с. Расчетная продолжительность плавки с учетом опыта эксплуатации и в целях улучшения условий проведения экспериментов была принята равной 30 мин [61]. Ввиду отсутствия пересечений опытных линий, допустимый ток определялся из условия исключения перегрева провода при плавке, а необходимый ток – по формуле профессора В.В. Бургсдорфа:

$$I_n^2 \cdot R_{i0} \cdot \tau = \frac{t}{R_{T0} + R_{T1}} \cdot \tau + 10 \cdot \gamma \cdot d \cdot b + \frac{0,045 \cdot \gamma \cdot D^2}{R_{T0} + R_{T1}} \left(R_{T1} + 0,22 \cdot \frac{R_{T0}}{\lg D/d} \right) \cdot t, \quad (3.9)$$

где I_n – ток плавки, А;

R_{i0} – сопротивление 1 м провода при 0°C , Ом;

τ – время плавки, ч;

t – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

γ – объемный вес гололеда, $\text{г}/\text{см}^3$;

b – толщина стенки гололеда, см;

d – диаметр провода, см;

D – внешний диаметр провода с гололедом, см;

R_{T0} – тепловое сопротивление 1 м гололедного цилиндра при переходе от внутренней к наружной поверхности

$$R_{T0} = \frac{\lg D/d}{273 \cdot \lambda};$$

R_{T1} – тепловое сопротивление при переходе с 1 м длины наружной поверхности обледенелого провода в воздух

$$R_{T1} = \frac{1}{0,09 \cdot D + 1,1 \cdot \sqrt{V \cdot D}};$$

λ – коэффициент теплопроводности (для льда принимается равным 0,0227);

V – скорость ветра, м/с.

Результаты расчетов токов плавки для гололедных отложений с толщиной стенки от 1 до 22 мм приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКОВ ПЛАВКИ

Толщина стенки гололеда, мм	Необходимый ток плавки, А	Допустимый ток плавки при температуре воздуха		
		– 1°С	– 5°С	– 10°С
1	218	336	342	352
2	228			
3	238			
4	245			
5	253			
10	286			
15	313			
20	338			
22	348			

Для расширения диапазона токов плавки использованы два наиболее простых способа трехфазного и двухфазного короткого замыкания. Токи плавки определялись по следующим формулам:

$$I_n^{(3)} = \frac{U_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (Z_T + Z_0 \cdot L)}, \quad (3.10)$$

$$I_n^{(2)} = \frac{U_n \cdot 10^3}{2 \cdot (Z_T + Z_0 \cdot L)}, \quad (3.11)$$

где U_n – напряжение плавки, кВ;

Z_T – сопротивление питающего трансформатора, приведенное к напряжению цепи плавки

$$Z_T = \frac{U_K \cdot U_H^2}{100 \cdot W_H}, \text{ Ом};$$

Z_0 – удельное полное сопротивление линии, Ом/км;

U_K – напряжение к.з. питающего трансформатора, %;

W_H – номинальная мощность питающего трансформатора, тыс. кВА.

Расчетные токи плавки при двухфазном способе короткого замыкания для линий длиной 0,71; 0,78; 0,85 км составили 300, 280, 255 А соответственно, а при трехфазном способе короткого замыкания – 350, 330, 300 А. Полученные токи позволяют провести намеченные эксперименты. Расчетное время плавки эксцентричных гололедных отложений, характерных для режимов пляски проводов, составляет от 1 до 11 мин.

Результаты опытных плавок на комплексе экспериментальных линий приведены в таблице 3.8. Размеры гололедных отложений на проводах измерялись в середине пролета штангенциркулем с исполь-

зованием передвижной вышки. Фактическое время плавки фиксировалось секундомером, расчетное определялось из формулы (3.9):

$$\tau = \frac{10 \cdot \gamma \cdot d \cdot b + \frac{0,045 \cdot \gamma \cdot D^2}{R_{T0} + R_{T1}} \cdot \left(R_{T1} + 0,22 \cdot \frac{R_{T0}}{\lg D/d} \right) \cdot t}{I_n^2 \cdot R_{i0} - \frac{t}{R_{T0} + R_{T1}}}, \quad (3.12)$$

при этом стенка проплавления b определялась с учетом внешних размеров эксцентричных гололедных отложений из полученного выражения (3.8).

Таблица 3.8

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПЛАВКЕ ГОЛОЛЕДА
НА КОМПЛЕКСЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Размеры отложений, мм	Плотность отложений, г/см ³	Метеоусловия		Ток плавки, А	Толщина стенки проплавления, мм	Продолжительность плавки, с	
		температура воздуха, °С	скорость ветра, м/с			фактическая	расчетная
23 × 12	0,90	-2	8	300	2,0	85	93
23 × 16	0,78	-3	10	300	2,5	120	128
28 × 15	0,87	-1	8	300	3,0	120	135
26 × 18	0,82	-2	8	300	3,5	150	160
30 × 18	0,82	-4	2	330	4,0	150	162

Анализ данных, приведенных в таблице 3.8, показывает, что расчетное время плавки эксцентричных гололедных отложений со

стенкой проплавления, определяемой по предложенной методике, отличается от фактически необходимого на 6,7...12,5%.

Таким образом, для предотвращения пляски проводов путем проведения плавки необходимо по размерам гололедных отложений на проводе в середине пролета определить фактическую стенку проплавления из полученного выражения (3.8), а требуемую продолжительность плавки – по формуле (3.12). С учетом возможных погрешностей при определении размеров и плотности гололедных отложений, метеорологических условий на трассе ВЛ и сопротивления проводов, расчетную продолжительность плавки следует увеличить на 20...25%.

Для использования полученных результатов исследований на практике в условиях электросетевых предприятий была составлена программа и выполнены расчеты на ПК продолжительности плавки гололедных отложений в режимах пляски проводов АС-35/6,2 с плотностью гололеда $0,9 \text{ г/см}^3$, стенкой проплавления эксцентричных гололедных отложений от 1 до 5 мм (с шагом 0,5 мм), при температуре воздуха от -1 до -10°C , скорости ветра от 5 до 15 м/с, токах плавки от 200 до 350 А [42]. На основе выполненных расчетов на рисунках 3.14 – 3.16, в качестве примера, приведены графические зависимости для определения времени плавки гололедных отложений при заданных токах плавки и наиболее характерных для пляски проводов ВЛ 6–10 кВ метеорологических условиях. Кривые построены в предположении, что изменяется один из трех метеорологических факторов (стенка проплавления гололеда, температура воздуха и скорость ветра). Стенка проплавления в данном случае может быть определена по внешним размерам эксцентричных гололедных отложений из таблицы 3.6.

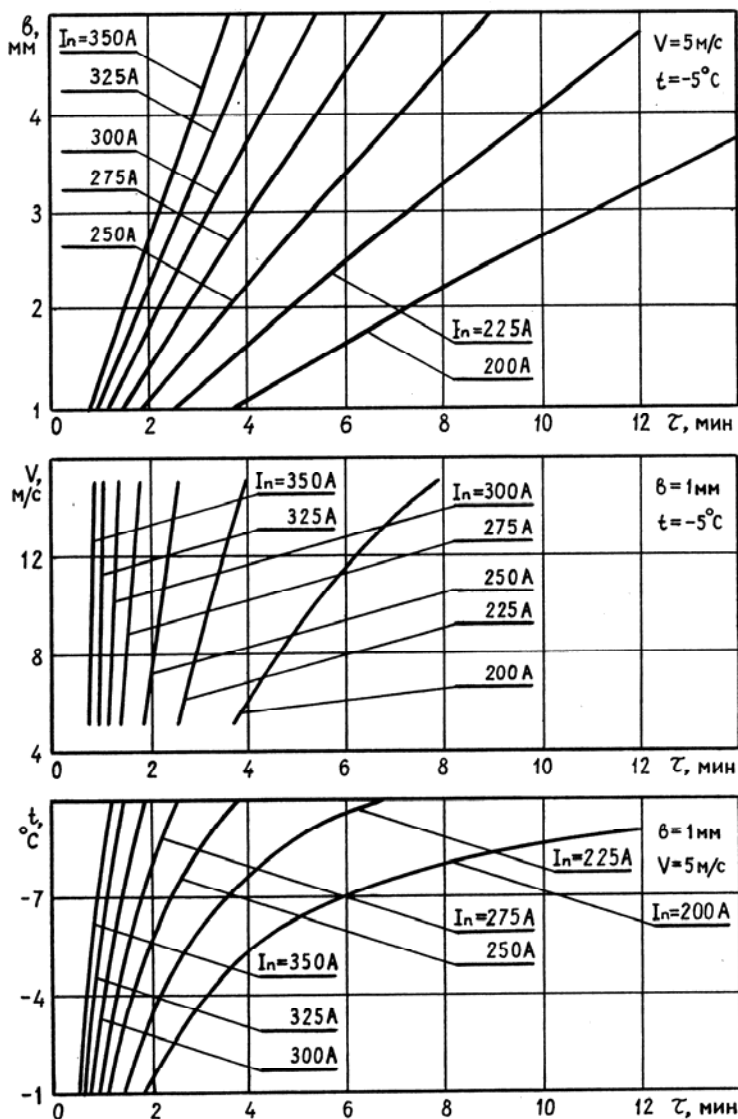


Рис. 3.14. Графические зависимости для определения времени плавки гололеда при различных метеорологических условиях ($b = 1 \text{ мм}$)

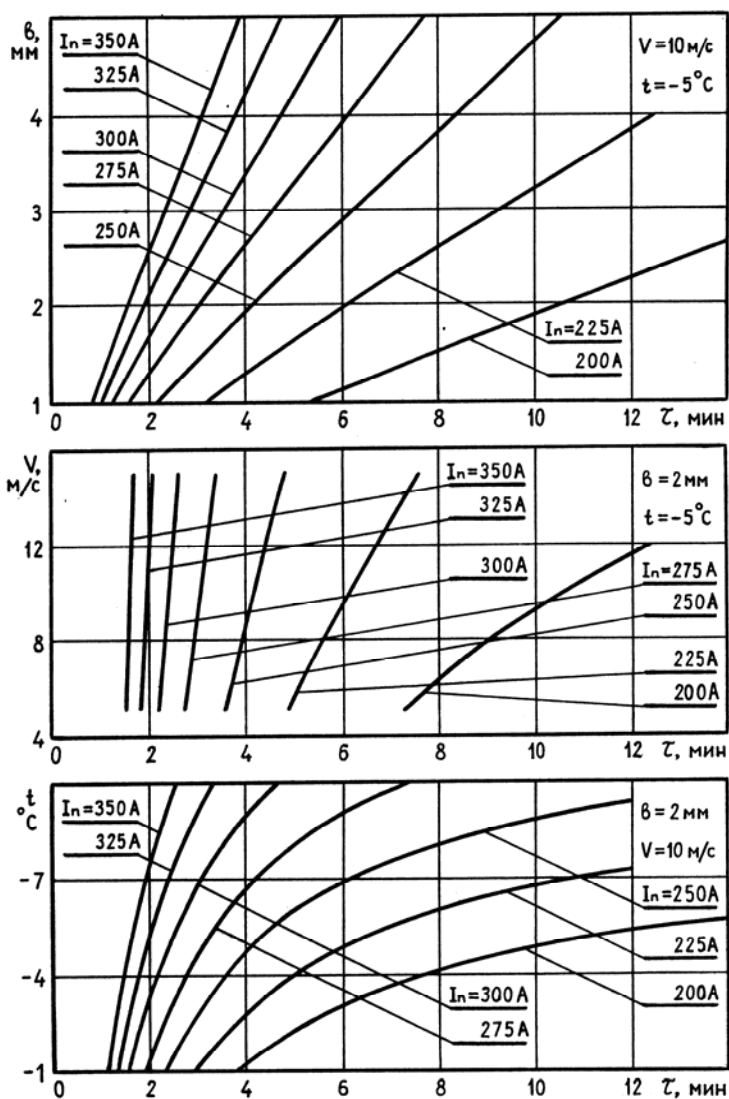


Рис. 3.15. Графические зависимости для определения времени плавки гололеда при различных метеорологических условиях ($b = 2 \text{ мм}$)

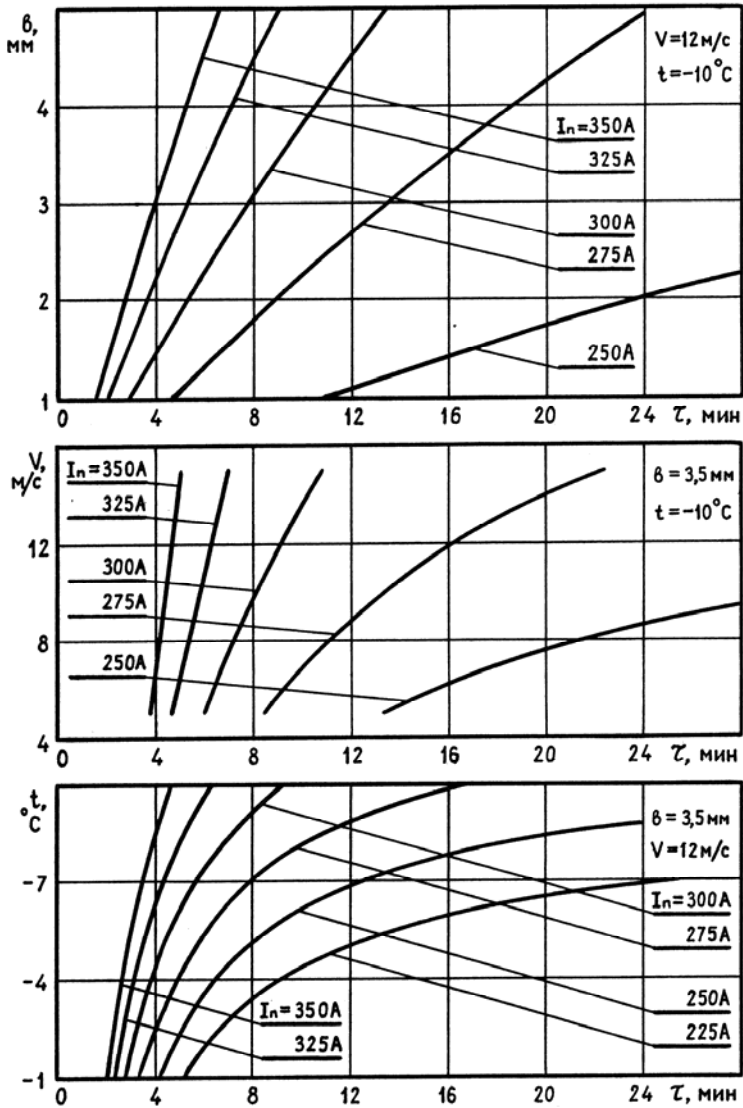


Рис. 3.16. Графические зависимости для определения времени плавки гололеда при различных метеорологических условиях ($b = 3,5 \text{ мм}$)

3.4. Дистанционное обнаружение пляски проводов и прогнозирование её возникновения на ВЛ 10 кВ

При плавке гололеда на линиях, подверженных пляске проводов, лимит времени на ее проведение очень ограничен. Он исчисляется от начала гололедообразования до наступления критических значений метеоусловий, вызывающих пляску проводов (форма и размеры гололеда, скорость и направление ветра). В этих условиях плавку необходимо вести четко, максимально сокращая затраты времени на ее организацию и проведение. Это может быть обеспечено:

- получением достоверной и полной информации о метеоусловиях на трассе ВЛ и возникновении пляски проводов;
- своевременным началом плавки, правильным определением очередности и продолжительности плавки гололеда на каждой линии;
- техническим обеспечением работы обслуживающего персонала;
- четким распределением функций и обязанностей лиц и подразделений, участвующих в мероприятии по предотвращению пляски проводов.

Суммарное время на подготовку и плавку гололеда $t_{\text{пг}}$ определяется следующими составляющими:

$$t_{\text{пг}} = t_{\text{реш}} + t_{\text{сб}} + t_{\text{пл}} + t_{\text{раз}} + t_{\text{вв}}, \quad (3.13)$$

где $t_{\text{реш}}$ – интервал времени от получения сообщения о начале гололедообразования или пляски проводов до принятия решения о проведении плавки (включая вывод ВЛ в ремонт);

$t_{\text{сб}}$ – время сборки схемы плавки гололеда;

$t_{\text{пл}}$ – продолжительность процесса плавки;

$t_{\text{раз}}$ – продолжительность разборки схемы плавки гололеда;

$t_{\text{вв}}$ – продолжительность ввода ВЛ в работу.

В отдельных случаях, как указывается в работе [65] $t_{\text{реш}}$ составляет 45...48% от суммарного времени $t_{\text{пр}}$. Эта неоправданная задержка времени начала плавки объясняется отсутствием на ВЛ 6–10 кВ сигнализаторов (датчиков) обнаружения пляски проводов. Информация о начале гололедообразования, поступающая с метеопостов, не всегда достоверна. Отсутствие надежной информации о возникновении пляски проводов не позволяет дежурному персоналу своевременно принимать решения о проведении плавки с целью предотвращения пляски проводов. В связи с этим весьма важно оборудовать ВЛ, на которых уже применяется плавка гололеда, надежными датчиками обнаружения пляски проводов, а метеопосты – устройствами для определения начала гололедообразования, так как в большинстве случаев пляска проводов возникает при наличии на них малых гололедных отложений.

До настоящего времени в России и за рубежом вопросам дистанционного обнаружения пляски проводов и определения ее основных параметров внимания практически не уделялось. Имеются отдельные сведения о способе определения параметров пляски проводов путем установки датчиков: индукционного преобразователя тока вблизи провода линии электропередачи (авторское свидетельство № 556528) [118], механического контактного инерционного устройства непосредственно на проводе (авторское свидетельство № 928490) [126].

Как показали наши наблюдения в полевых условиях, пляска проводов ВЛ 6–10 кВ происходит с одной и двумя полуволнами в пролете. Если датчик установлен в середине пролета, то он будет фиксировать амплитуду пляски при однополуволновых колебаниях, но практически не будет реагировать на двухполуволновые колебания. При установке датчика в зоне $1/4$ длины пролета, он фиксирует амплитуду при двухполуволновых колебаниях, а при одно-

полуволновой пляске дает заниженное значение амплитуды. Поэтому установка одного датчика в пролете не позволяет контролировать число полуволн при пляске, а, следовательно, определять ее фактическую амплитуду, что важно для оценки опасности последствий таких колебаний и своевременного принятия решения о плавке гололеда для предотвращения пляски проводов.

С целью повышения точности измерения и определения числа полуволн разработан новый способ определения пляски проводов, по которому на проводе в пролете устанавливаются два датчика, каждый на расстоянии $1/4$ его длины, измеряют и сравнивают однофазовые или противофазовые амплитуды колебаний датчиков (патент РФ № 2017297) [37, 137].

Из приведенной в разделе 2.2 формулы (2.13) следует, что при вертикальных колебаниях провода типа пляски в пролете длиной l с числом полуволн m и амплитудой A_m величина его вертикальных перемещений y на расстоянии x от опоры определяется следующим выражением (при крайних положениях провода):

$$y = A_m \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot x}{l} \quad (3.14)$$

При двухполуволновой пляске провода ($m = 2$) колебания датчиков происходят в противофазе, т. е. со сдвигом фазы 180° . При этом показания индикаторов измерительных приборов на диспетчерском пункте, фиксирующих амплитуды колебаний датчиков, будут одинаковы по величине и противоположны по фазе (например, стрелки отклоняются в разные стороны). В этом случае в исследуемом пролете фиксируют пляску провода с двумя полуволнами, а ее амплитуда соответствует амплитуде колебаний любого датчика, так как согласно формулы (3.14) $A_m = y$.

При однополуволновой пляске провода ($m = 1$) датчики фиксируют величину однофазовых смещений провода на расстоянии $1/4$ длины пролета ($y = A_m \cdot \sqrt{2}/2$), при этом показания индикаторов измерительных приборов будут одинаковы по величине и по фазе (например, стрелки отклоняются в одну сторону). В этом случае в исследуемом пролете фиксируют пляску провода с одной полуволной и амплитудой $A_m = y \cdot \sqrt{2}$, т. е. для получения фактической амплитуды пляски необходимо показания измерительного прибора увеличить в $\sqrt{2}$ раз.

Известный вышеупомянутый контактный датчик обнаружения пляски (авторское свидетельство № 928490) [126], устанавливаемый на проводе в пролете ВЛ, фиксирует только факт наличия пляски провода с амплитудой более той, на которую он настроен, и не позволяет обнаружить пляску с меньшей амплитудой. Это существенно ограничивает возможности датчика, так как на практике длительные низкочастотные колебания проводов даже с малыми амплитудами часто вызывают ослабления и повреждения их креплений к штыревым изоляторам. Поэтому необходимо фиксировать пляску проводов во всем диапазоне ее возможных амплитуд. С этой целью для реализации предложенного способа определения пляски проводов разработана новая конструкция датчика (авторское свидетельство № 1436166) [134].

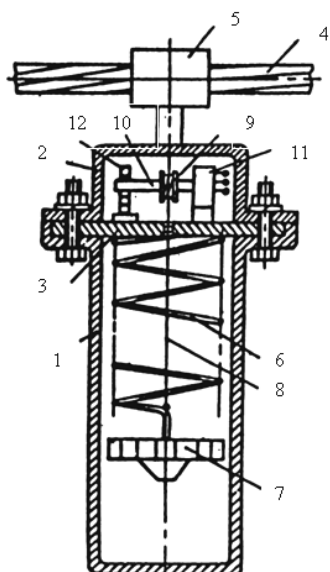
Датчик обнаружения пляски проводов (рис. 3.17а) включает цилиндрический корпус 1 с верхней крышкой 2 и горизонтальной площадкой между ними 3, которые в сборе представляют единую конструкцию, закрепленную вертикально на проводе 4 зажимом 5. На площадке 3 снизу жестко закреплен один конец цилиндрической пружины 6 (чувствительного элемента), а другой ее конец снабжен самоцентрирующимся грузом 7, например, в виде звездочки (для исключения поршневого эффекта). На грузе 7 закреп-

лена нить 8, проходящая через центральное отверстие в площадке 3 и намотанная на ролик 9, установленный на оси 10 потенциометра сопротивления 11, закрепленного на площадке 3 сверху. Ось 10 снабжена предварительно закрученной спиральной пружиной 12, закрепленной на площадке 3.

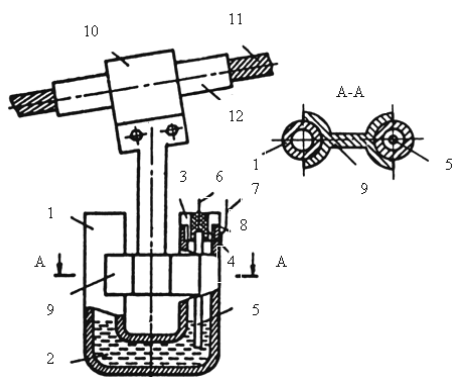
Пляска провода 4 вызывает перемещения витков цилиндрической пружины 6 с грузом 7 относительно корпуса 1, жестко связанного с проводом 4, причем величина этих перемещений пропорциональна амплитуде пляски. При перемещениях груза 7 вверх нить 8 ослабевает. Под действием раскручивающего усилия спиральной пружины 12 ось 10 поворачивается в направлении раскручивания пружины 12 и нить 8 наматывается на ролик 9. При перемещении груза 7 вниз нить 8 вызывает раскручивание ролика 9, поворот оси 10 потенциометра 11 и закручивание спиральной пружины 12. Таким образом, поворот оси 10 при пляске провода 4 вызывает изменение сопротивления потенциометра 11, который включен в цепь контролирующего электронного устройства (на рисунке не показано). Эти изменения сопротивления позволяют контролировать величину перемещений провода 4 при пляске и их амплитудные значения (по крайним положениям оси 10 потенциометра 11).

Применительно к ВЛ с протяженными пролетами (более 100 м), имеющими большие величины стрел провеса проводов, разработана другая конструкция датчика (авторское свидетельство № 1479997) [136].

Датчик обнаружения пляски проводов (рис. 3.17б) включает токопроводящий корпус 1 в виде U-образной трубки с ртутным заполнителем 2. Торец одного колена корпуса 1 наглухо запаян (заварен), а другого снабжен завинчивающейся в корпус 1 крышкой 3, в центре которой жестко установлена изолирующая пробка 4.



а



б

Рис. 3.17. Датчики обнаружения пляски проводов:
а – по а.с. № 1436166; б – по а.с. № 1479997

В изолирующей пробке 4 по центру закреплен одним концом чувствительный элемент 5 в виде угольного (графитового) стержня, частично погруженного в ртутный наполнитель 2, и его вывод 6 проходит через пробку 4 и покрыт в месте его выхода на внешнюю поверхность пробки 4 клеящим веществом, например, на основе эпоксидной смолы. Корпус 1 снабжен выводом 7, приваренным к его поверхности вблизи вывода 6. Между крышкой 3 и корпусом 1 расположена уплотнительная прокладка 8, а между коленами корпуса 1 жестко установлена (например, сваркой) распорка 9, при помощи которой корпус 1 фиксируется на зажиме 10 в вертикальном положении под проводом 11, снабженным изоляционной втулкой 12.

При отсутствии пляски провода 11 корпус 1 в виде U-образной трубки расположен под проводом 11 в вертикальном положении, а угольный стержень 5 частично погружен в ртутный наполнитель 2. Электрическое сопротивление угольного стержня 5 определяется его длиной до уровня погружения в ртутный наполнитель 2 и может быть включено выводами 6 и 7 в электрическую цепь контролирующего устройства (на рисунке не показано), а полученный при этом электрический сигнал информирует об отсутствии пляски провода 11.

При пляске провода 11 в результате его вертикальных перемещений корпус 1 отклоняется от вертикали (по мере подъема провода), при этом уровень ртутного наполнителя 2, перетекающего из одного колена корпуса 1 в другое, где установлен угольный стержень 5, поднимается. Длина стержня 5 до погружения в наполнитель 2, а, следовательно, и его электрическое сопротивление уменьшается, причем это уменьшение соответствует величине подъема провода 11 (т. е. его амплитуде), которая фиксируется контролирующим устройством по величине электрического сигнала. Чем больше амплитуда пляски, тем больше уровень ртутного наполнителя 2 в колене корпуса 1 с угольным стержнем 5 и тем меньше его электрическое сопротивление.

При опускании провода 11 корпус 1 возвращается в исходное вертикальное положение, ртутный наполнитель 2 перетекает из колена с угольным стержнем 5, уменьшая уровень его погружения. При этом сопротивление увеличивается до первоначального, а электрический сигнал фиксирует начальное положение провода 11, далее цикл повторяется. По времени цикла можно определить период и частоту пляски провода 11.

Пляска проводов, как уже отмечалось, часто возникает в сложных метеорологических и ночных условиях, как правило, при наличии малых гололедных отложений на проводах. Информация о метеоусловиях и гололедообразовании поступает с государственных метеостанций обслуживаемой зоны, соседних энергосистем, метеопостов сетевых предприятий, организованных в характерных точках обслуживаемой зоны и от персонала предприятий при осмотре ВЛ. Контролирование начала процесса гололедообразования на упомянутых объектах позволит прогнозировать возможность возникновения пляски проводов отдельных линий и повысить оперативность работы обслуживающего персонала по плавке гололеда. Поэтому было разработано устройство для контроля гололедообразования (авторское свидетельство № 1476560) [135].

Устройство для контроля гололедообразования (рис. 3.18) включает полый корпус в виде расширяющегося к лобовой части конического стакана 1, закрытого выпуклой сеткой 2. В стакане 1 в нижней его части жестко установлен подшипник 3, через который проходит вертикальная трубка 4 по оси поворота стакана 1, предназначенная для подачи сжатого воздуха в полость стакана 1. Трубка 4 при помощи фланца 5 жестко закрепляется на любой горизонтальной опоре. Внутри стакана 1 установлен чувствительный элемент в виде мембраны 6, которая прижимается по краям упором 7, на котором с зазором с мембраной 6 закреплена электроко-

нтактная система, например, в виде микровыключателя 8. На крышке 9 стакана 1 закреплены вертикальные пластины 10, представляющие вместе со стаканом 1 следящую флюгерную установку, которая всегда ориентируется навстречу ветру и гололедоносущему потоку. В негололедные сезоны, в целях предотвращения загрязнения полости стакана 1, сетка 2 может быть закрыта полиэтиленовой крышкой или пленкой.

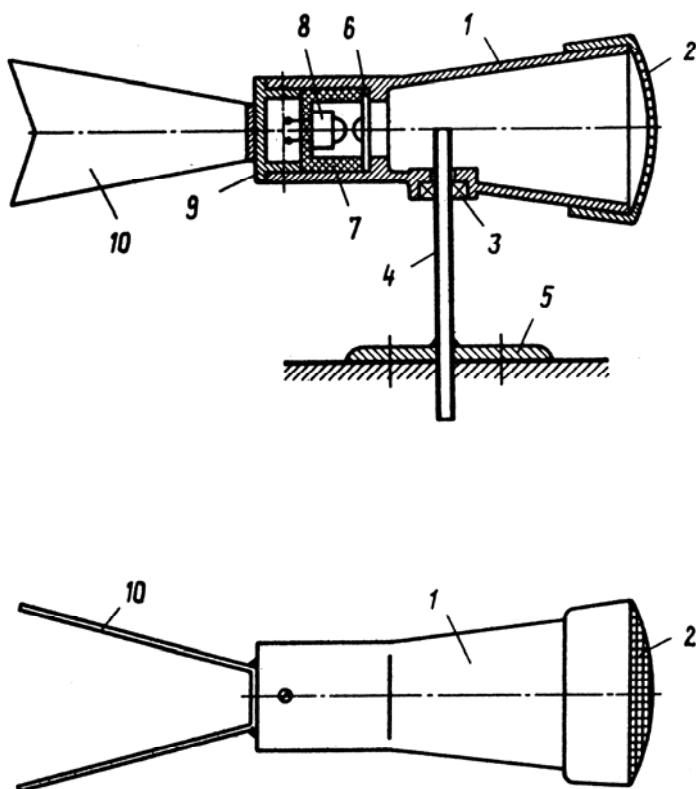


Рис. 3.18. Устройство для контроля гололедообразования

В гололедный период периодически через определенные промежутки времени, определяемые в зависимости от средней интенсивности обледенения, через трубку 4 в полость стакана 1 подается сжатый воздух (при необходимости нагретый). В случае отсутствия гололеда на сетке 2 воздух, поступающий из трубки 4, выходит наружу через отверстия в этой сетке, при этом мембрана 6 не деформируется и контакты микровыключателя 8 в исходном состоянии разомкнуты.

В начальной стадии гололедообразования отверстия в сетке 2 забиваются тонкой пленкой льда и не пропускают наружу воздух, поступающий в полость стакана 1 из трубки 4. При этом под действием разности давлений мембрана 6 деформируется и нажимает на кнопку микровыключателя 8, замыкая его контакты, что сигнализирует о начале гололедообразования. Для удаления гололеда с сетки 2 после получения сигнала о появлении льда в полость стакана 1 через трубку 4 подается под высоким давлением нагретый воздух, который пробивает отложения гололеда на сетке 2 и оплавляет его, продувая сетку. Быстрое удаление гололеда с сетки 2 позволяет оперативно подготовить устройство к работе по определению продолжения гололедообразования и его окончания. Подача нагретого воздуха по трубке 4 улучшает также условия работы подшипника 3 в гололедных условиях и способствует удалению влаги из полости стакана 1.

Устройство не дает ложную информацию при образовании изморози, так как за счет меньшего сцепления этих отложений с сеткой 2 (по сравнению с гололедными) они просто выдуваются потоком воздуха, поступающего в полость стакана 1 из трубки 4, при этом повышается эффективность и точность обнаружения начала образования именно гололеда.

Ориентировка устройства навстречу гололедонесущему потоку за счет поворота стакана 1 с пластинами 10 на трубке 4 как на

оси позволяет независимо от направления ветрового потока получить на сетке 2 стакана 1 отложения льда, что обеспечивает возможность его использования для контроля гололедообразования на неподвижных объектах.

Обнаружение начала гололедообразования может быть также осуществлено при помощи разработанного устройства для контроля уровня гололедной нагрузки, устанавливаемого непосредственно на проводе ВЛ 10 кВ и работающего на принципе закручивания провода по мере образования на нем гололеда (авторское свидетельство № 1330687) [132].

Устройство для контроля уровня гололедной нагрузки (рис. 3.19) содержит провод 1 с установленной на нем уплотняющей втулкой 2, на которую насажен корпус 3 в виде полого цилиндра, с внутренней стороны боковой поверхности 4 которого имеется кольцевая канавка 5, образованная двумя кольцевыми обоймами 6. По обеим сторонам кольцевой канавки 5 расположены не замкнутые по окружности полоски 7, выполненные из токопроводящего материала с большим удельным сопротивлением. В кольцевую канавку 5 помещен шарик 8 из токопроводящего материала. Между втулкой 2 и кольцевыми обоймами 6 расположена дополнительная втулка 9. Корпус 3, кольцевые обоймы 6 и дополнительная втулка 9 имеют радиальную прорезь, в которую вставлена шпонка 10 из электроизоляционного материала, выполненная с окном 11, повторяющим профиль кольцевой канавки 5, и является ее продолжением. Крепление шпонки 10 к корпусу 3 и одновременное крепление всего устройства на проводе осуществляется винтами 12. Полоски 7 с одной из сторон снабжены выводами 13 для подключения устройства, измеряющего электрическое сопротивление.

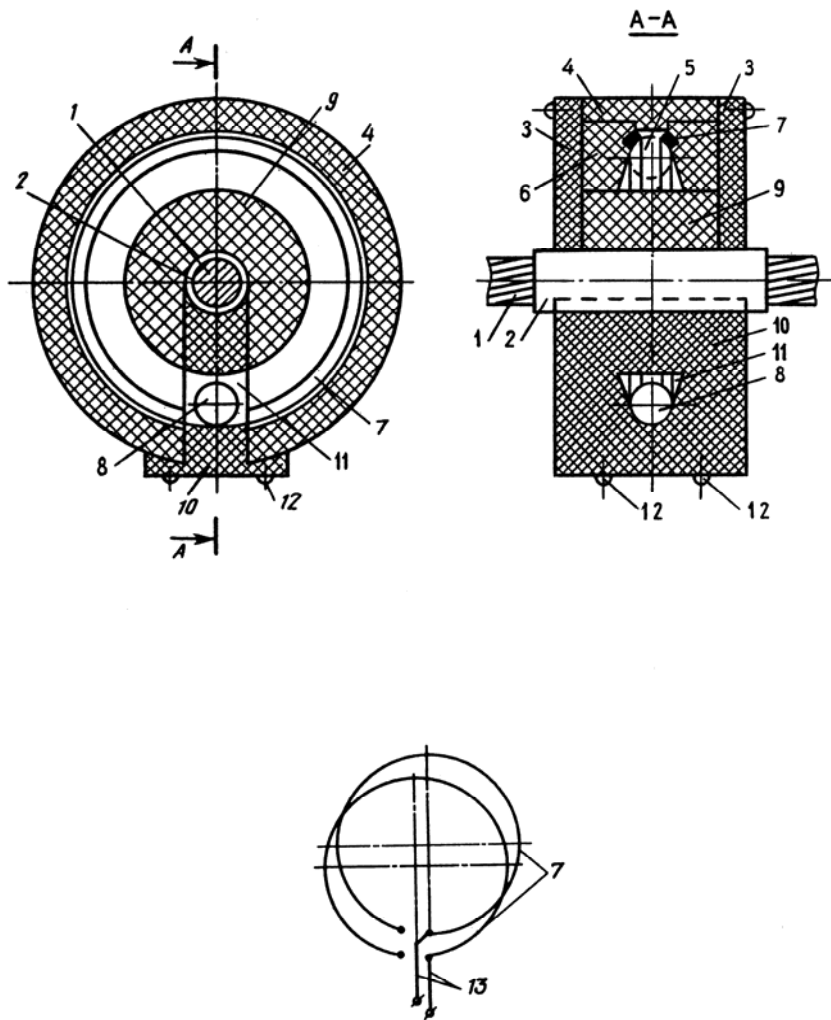


Рис. 3.19. Устройство для контроля уровня гололедной нагрузки на проводе

Корпус 3 располагается на проводе 1 таким образом, чтобы при отсутствии гололеда шпонка 10 занимала нижнее вертикальное положение, при этом шарик 8 не замыкает полосок 7 и сопротивление контактной системы равно бесконечности. При определенных метеорологических условиях на проводе 1 с его наветренной стороны образуется одностороннее гололедное отложение. За счет эксцентриситета отложения возникает крутящий момент, в результате чего провод 1 поворачивается вокруг своей оси на некоторый угол. Одновременно на этот же угол поворачивается корпус 3, жестко закрепленный на проводе 1. Электропроводящий шарик 8, как тело качения, сохраняет свое нижнее положение, т. е. перекачивается соответственно углу поворота провода 1 в окне 11 шпонки 10 и далее в кольцевой канавке 5, замыкая полоски 7.

Подключив к выводам 13 устройство для измерения сопротивления, можно по величине сопротивления контактной системы определить угол закручивания провода и по его величине судить о погонной массе гололедного отложения на проводе, при этом могут быть использованы результаты исследований, представленные в разделе 4.2.

Благодаря резкому изменению сопротивления контактной системы при малых углах поворота и тому обстоятельству, что провода ВЛ 6–10 кВ обладают малой крутильной жесткостью, повышается чувствительность устройства при определении начала гололедообразования. Чувствительность устройства также повышается за счет того, что оно может располагаться в середине пролета, где угол закручивания провода больше, чем в местах его крепления.

Поскольку сопротивление контактной системы однозначно связано с углом поворота провода, расширение функциональных возможностей устройства достигается за счет его способности вы-

давать непрерывную информацию об уровне гололедной нагрузки на проводе.

Наличие радиального паза в элементах конструкции и шпонки упрощает монтаж и демонтаж устройства за счет того, что при этом не требуется разрезать или отсоединять провод линии электропередачи.

Таким образом, предложенный способ определения пляски проводов и разработанные для его реализации датчики позволят получать информацию о возникновении на ВЛ низкочастотных колебаний проводов и своевременно проводить плавку гололеда для их прекращения.

Передача информации от датчиков обнаружения пляски проводов может быть осуществлена как по высокочастотным каналам связи с использованием фазных проводов ВЛ, так и по радиоканалу.

Оснащение линий электропередачи устройствами для обнаружения пляски проводов (датчики, аппаратура для передачи и приема информации) требует дополнительных затрат. Поэтому необходимо определить эффективность использования устройств для обнаружения пляски проводов и решить задачу выбора оптимального решения, соответствующего минимуму приведенных затрат.

Технико-экономическая оценка выбора устройств и эффективности дистанционного обнаружения пляски проводов должна выполняться на основе материалов, полученных применительно к местным метеорологическим условиям и условиям эксплуатации сетей напряжением 6–10 кВ.

Уравнение приведенных затрат для линий электропередачи, не оснащенных устройствами для обнаружения пляски проводов, можно представить в следующем виде:

$$Z_1 = P_H \cdot (K_L + K_{II}) + (I_L + I_{II}) + C_1 \cdot \Delta \mathcal{E}_1 + Y_2, \quad (3.15)$$

где P_H – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;

$K_{Л}$ – капитальные затраты на строительство линий электропередачи;

$K_{П}$ – капитальные затраты на устройство плавки гололеда;

$I_{Л}$ – годовые расходы по эксплуатации линий электропередачи;

C_1 – удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии из-за аварий, вызванных пляской проводов;

$\Delta \mathcal{E}_1$ – недоотпуск электроэнергии при авариях;

$У_2$ – затраты на восстановление участков ВЛ, поврежденных из-за пляски проводов.

Величина амортизационных отчислений на устройство плавки и затраты на его обслуживание $I_{П}$ могут приниматься пропорциональными капитальным вложениям [53]:

$$I_{П} = \alpha_{П} \cdot K_{П},$$

где $\alpha_{П}$ – коэффициент отчисления на амортизацию, капитальный ремонт и эксплуатационное обслуживание, который может быть принят 0,11.

Для линий, оборудованных устройствами для обнаружения пляски проводов, уравнение приведенных затрат принимает следующий вид:

$$Z_2 = P_H \cdot (K_{Л} + K_{П} + K_{У}) + (I_{Л} + I_{П} + I_{У}) + C_2 \cdot m \cdot \Delta \mathcal{E}_2 + C_3 \cdot m \cdot \Delta \mathcal{E}_3, \quad (3.16)$$

где $K_{У}$ – капитальные затраты на устройства для обнаружения пляски проводов;

I_y – годовые расходы по эксплуатации устройств для обнаружения пляски проводов;

C_2 – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, расходуемой на плавку гололеда;

m – расчетное число плавков в год;

$\Delta \mathcal{E}_2$ – расход электроэнергии на плавку гололеда, проводимой для прекращения пляски проводов;

C_3 – удельный ущерб при отключении потребителей на время плавки гололеда;

$\Delta \mathcal{E}_3$ – недоотпуск электроэнергии потребителям во время плавки.

Условием целесообразности оснащения линий электропередачи устройствами для обнаружения пляски проводов будет снижение общих расчетных затрат: $Z_2 < Z_1$.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРОВОДОВ МАЛЫХ СЕЧЕНИЙ ПРИ ОПАДЕНИИ ГОЛОЛЕДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Характер перемещения проводов при опадении гололедных отложений исследован недостаточно. Данные о величине и характере перемещения (подскока, подпрыгивания) проводов малых сечений отсутствуют. В работах [11, 18, 33, 50, 70, 108, 111] представлены данные экспериментальных исследований подскока проводов ВЛ 35 кВ и выше в вертикальной плоскости при сбросе грузов, имитирующих гололедную нагрузку.

Особенностью поведения проводов малых сечений в условиях интенсивного гололедообразования является значительное их закручивание под действием эксцентричной нагрузки односторонних отложений. При опадении гололедных отложений возникающие упругие силы сопротивления крутящему моменту приводят к сложной форме перемещения провода. На сложную форму перемещения провода при опадении гололедных отложений указывали О.Г. Вексельман [18] и А.А. Глазунов [23]. Горизонтальные отклонения при таких перемещениях проводов увеличивают вероятность их опасных сближений, особенно при несинхронных раскачиваниях под действием ветра. В связи с этим возникла необходимость выполнения экспериментальных исследований перемещения проводов малых сечений при опадении гололедных отложений.

Для приближения условий опытов к реальным, необходимо углы закручивания провода устанавливать соответствующими их действительным значениям при разных видах, формах, размерах и массе гололедных и гололедно-изморозевых отложений. Для этого необходимо изучить процесс закручивания провода по длине

пролета при гололеде, механизм гололедообразования, определить зависимость угла закручивания от массы гололедных отложений.

4.1. Модель закручивания провода по длине пролета в процессе гололедообразования

Известно, что угол поворота провода с гололедом определяется действующими крутящими моментами и характеристиками провода на кручение. В работе Е. П. Никифорова [63] связь между крутящим моментом от гололедного осадка, углом закручивания и конструктивными параметрами воздушной линии электропередачи описывается следующим уравнением:

$$M = G \cdot I_{\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dl}, \quad (4.1)$$

где M – суммарный крутящий момент, действующий на расстоянии x от узла крепления провода на опоре;

I_{π} – полярный момент инерции;

$\frac{d\varphi}{dl}$ – приращение угла закручивания провода на единицу

длины пролета;

G – модуль сдвига.

Точный учет угла закручивания провода в пролете по уравнению (4.1) невозможен, так как значения углов, действующих сил и крутящих моментов вдоль продольной оси провода в пролете не остаются постоянными. Под их воздействием, в общем случае, углы поворота сечений вдоль пролета изменяются достаточно сложным образом. Поэтому определение угла закручивания провода

с гололедом по длине пролета является важной частью исследования процесса гололедообразования на проводах ВЛ 6–10 кВ.

При изучении закручивания провода с гололедом будем считать, что силы тяжения передаются через сечения только по проводу, а гололедный осадок не участвует в передаче этих усилий. Такое предположение можно обосновать следующим образом. В процессе гололедообразования нагрузка на провод возрастает, и дополнительные растягивающие силы приводят к деформациям провода, вызывая его удлинение. Вместе с проводом деформируется и гололедный осадок, воспринимая часть растягивающих сил. Обычно гололед осаждается на проводе со стороны гололедонесущего потока, образуя несимметричную форму. Поэтому нормальные напряжения будут перераспределяться по сечению, в результате чего точка приложения равнодействующей сил тяжения несколько сместится относительно оси вращения провода. При этом возникает дополнительный крутящий момент, который следовало бы учитывать при оценке общего угла закручивания провода. Однако при растяжении гололедного осадка в нем могут образовываться микротрещины, которые разгружаются от сил тяжения и степень участия осадка в передаче растягивающих сил будет незначительной.

Пусть провод с гололедом неподвижно закреплен на опорах в точках A и B (рис. 4.1). Предварительно разобьем длину провода l на n участков. Длина каждого участка выбирается таким образом, что в его пределах изменением крутящего момента можно пренебречь. Моменты прикладываются в середине каждого участка на расстоянии $l_1, l_2 \dots l_i$ и т.д. от точки A . Расстояние l_i в общем виде ($i = 1, 2, 3 \dots n$) определим следующим образом:

$$l_i = \frac{(2i-1) \cdot l}{2n}. \quad (4.2)$$

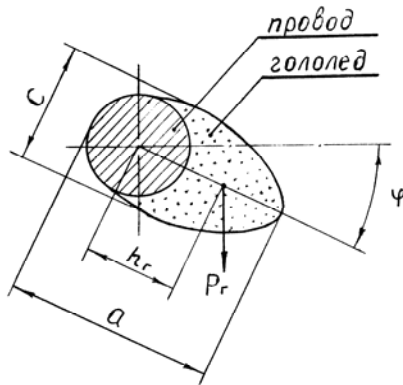
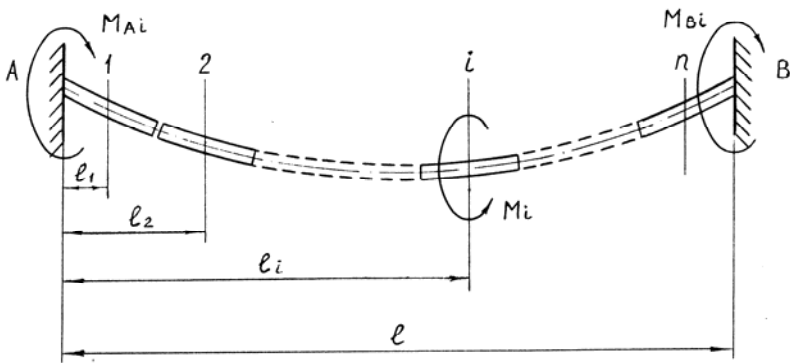


Рис. 4.1. Расчетная схема для определения угла закручивания провода с гололедом по длине пролета

Будем полагать, что крутильные деформации являются упругими. Пусть в произвольном сечении i на расстоянии l_i от точки A действует крутящий момент M_i , который в местах крепления провода A и B создает опорные моменты M_{Ai} и M_{Bi} .

По условию задачи

$$M_i = M_{Ai} + M_{Bi}, \quad (4.3)$$

$$\varphi_{li} = \varphi_{ni} = \varphi_i, \quad (4.4)$$

где φ_{li} и φ_{ni} – углы поворота левой и правой части сечения i -го участка провода (при условном разрезании провода в точке i).

Выразим крутящий момент M_i через моменты M_{Ai} и M_{Bi} . Согласно расчетной схеме (рис. 4.1) получим:

$$\varphi_{li} = \frac{M_{Ai} \cdot l_i}{G \cdot I_{II}}; \quad \varphi_{ni} = \frac{M_{Bi} \cdot (l - l_i)}{G \cdot I_{II}}.$$

Тогда по условию (4.4)

$$\frac{M_{Ai} \cdot l_i}{G \cdot I_{II}} = \frac{M_{Bi} \cdot (l - l_i)}{G \cdot I_{II}}.$$

Исходя из равенства $M_{Ai} = M_i - M_{Bi}$ имеем:

$$M_{Bi} = \frac{l_i \cdot M_i}{l} = \frac{(2i-1)}{2n} \cdot M_i \quad (4.5)$$

и

$$M_{Ai} = M_i - \frac{(2i-1)}{2n} \cdot M_i = \frac{(2n-2i+1)}{2n} \cdot M_i. \quad (4.6)$$

Определим угол поворота первого участка провода φ_1 :

$$\varphi_1 = \frac{M_A \cdot l_1}{G \cdot I_{II}}, \quad (4.7)$$

где $M_A = \sum_{i=1}^n M_{Ai}$.

С учетом выражений (4.2) и (4.6)

$$\varphi_1 = \frac{l}{(2n)^2 \cdot G \cdot I_{II}} \cdot \sum_{i=1}^n (2n - 2i + 1) \cdot M_i. \quad (4.8)$$

Угол закручивания φ_2 второго участка провода можно определить аналогично первому участку по формуле (4.7), заменив l_1 на l_2 , однако при этом необходимо учесть влияние на угол закручивания φ_2 момента M_1 . Для этого определим дополнительный угол закручивания провода φ'_2 на расстоянии $(l - l_2)$ от точки B через опорный момент M_{B1} :

$$\varphi'_2 = \frac{M_{B1}}{G \cdot I_{II}} \cdot (l - l_2). \quad (4.9)$$

Тогда общий угол закручивания φ_2 второго участка определим выражением:

$$\varphi_2 = \frac{l_2}{G \cdot I_{II}} \cdot \sum_{i=2}^n M_{Ai} + \frac{M_{B1}}{G \cdot I_{II}} \cdot (l - l_2) \quad (4.10)$$

или с учетом полученных формул (4.2), (4.5), (4.6) после соответствующих преобразований

$$\varphi_2 = \frac{3 \cdot l}{(2n)^2 \cdot G \cdot I_{II}} \cdot \sum_{i=2}^n (2n - 2i + 1) \cdot M_i + \frac{M_1 \cdot l \cdot (2n - 3)}{(2n)^2 \cdot G \cdot I_{II}}. \quad (4.11)$$

Таким образом, с учетом проведенных нами исследований суммарный угол закручивания любого участка провода по длине пролета в общем виде определится следующим образом:

$$\varphi_1 = \frac{l}{(2n)^2 \cdot G \cdot I_{II}} \cdot \left[\sum_{j=1}^n (2n - 2j + 1) \cdot M_j \right], \quad (4.12)$$

$$\varphi_2 = \frac{l}{(2n)^2 \cdot G \cdot I_{II}} \cdot \left[3 \cdot \sum_{j=2}^n (2n - 2j + 1) \cdot M_j + (2n - 3) \cdot M_1 \right], \quad (4.13)$$

$$\varphi_i = \frac{l}{(2n)^2 \cdot G \cdot I_{II}} \cdot \left[(2i - 1) \sum_{j=i}^n (2n - 2j + 1) \cdot M_j + (2n - 2i + 1) \cdot \sum_{j=1}^{i-1} (2j - 1) \cdot M_j \right], \quad (4.14)$$

$$\varphi_n = \frac{l}{(2n)^2 \cdot G \cdot I_{II}} \cdot \left[\sum_{j=1}^n (2j - 1) \cdot M_j \right]. \quad (4.15)$$

Полученные формулы (4.12) – (4.15) для определения угла закручивания провода выведены в предположении, что значения крутящих моментов на каждом участке провода не зависят от поворота этих участков. В действительности картина оказывается более сложной. Сложность решения полученных уравнений заключается в том, что их правая и левая части содержат искомую величину φ_i , которая входит в выражения для определения составляющих моментов на каждом участке M_j .

$$M_i = \gamma \cdot S_r \cdot \frac{l}{n} \cdot h_r \cdot \cos \varphi_i \cdot 10^{-3}, \quad (4.16)$$

где γ – плотность гололедного отложения, г/см³;

S_r – площадь сечения гололедного отложения на участке, мм²;

h_T – эксцентриситет, характеризующий положение центра тяжести сечения, м.

Для решения уравнения (4.14) используется метод последовательных приближений, суть которого заключается в следующем. Предварительно задаем значение угла закручивания $\varphi_i = 0$. При этом предположении определяются все значения моментов и по формуле (4.14) вычисляется угол закручивания $|\varphi_i|_1$. Затем определяются все моменты с учетом закручивания $|\varphi_i|_1$ и рассчитывается угол $|\varphi_i|_2$ и так далее до выполнения условия:

$$|\varphi_i|_S - |\varphi_i|_{S-1} \leq \varepsilon,$$

где ε – заданная точность расчета.

Для подтверждения правильности выведенных уравнений были выполнены расчеты на ПК и результаты сравнены с экспериментальными данными, полученными путем измерения углов поворота провода с гололедом по длине пролета. Измерения проводились на комплексе экспериментальных линий в натуральных пролетах длиной 50 м, оборудованных проводом АС-35/6,2. Форма, размеры гололедных отложений, угол поворота провода с гололедом определялись с помощью разработанного копирующего устройства (раздел 3.2.1). Измерения проводились в семи точках по длине пролета: на расстоянии 1 м от каждой из опор, в зоне 1/8, 1/4, 1/2, 3/4 и 7/8 длины пролета.

При расчетах было принято значение крутильной жесткости провода $1,90 \text{ Н}\cdot\text{м}^2/\text{рад}$, полученное на основе проведенных экспериментальных исследований [44], а площадь поперечного сечения

гололедного отложения по форме, близкой к эллипсовидной, определялась по формуле:

$$S_r = \frac{\pi}{4} \cdot ac - S_n, \quad (4.17)$$

где a, c – диаметр и толщина гололедного отложения, мм;

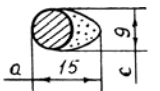
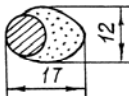
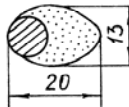
S_n – расчетная площадь сечения провода, мм².

Первая составляющая полученного выражения подтверждена экспериментально путем сравнения с эквивалентной площадью круга с радиусом окружности, длина которой равна длине медной проволоки при ее полном огибании контура провода с гололедом.

Результаты теоретических расчетов и опытных замеров углов закручивания провода при различных гололедных отложениях представлены в таблице 4.1. Расчетные значения углов закручивания отличаются от экспериментальных не более чем на 6,5...9,0%, что подтверждает правильность разработанной модели закручивания провода с гололедом по длине пролета. Анализ полученных данных показывает, что максимальный угол закручивания провода с гололедом наблюдается в середине пролета и уменьшается по мере приближения к узлам крепления провода на опорах, при этом углы закручивания участков провода, равноудаленных от середины пролета, имеют одинаковые значения. Так, в зоне 1/4 (3/4) длины пролета по сравнению с серединой угол закручивания провода с гололедом меньше в 1,2...1,3 раза, в зоне 1/8 (7/8) длины пролета – в 1,7...2,0 раза, на расстоянии 1 м от опор – в 8,7...11,4 раза.

Таблица 4.1.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИЗМЕРЕНИЙ
УГЛОВ ЗАКРУЧИВАНИЯ ПРОВОДА С ГОЛОЛЕДОМ ПО ДЛИНЕ ПРОЛЕТА

Форма и размеры гололедного отложения на проводе, мм	Плотность гололеда, $\text{г/см}^3 \cdot 10^{-3}, \text{м}$	Эксцентриситет	Значения углов закручивания провода по длине пролета φ , град.													
			I м от опоры		$1/8\ell$		$1/4\ell$		$1/2\ell$		$3/4\ell$		$7/8\ell$		I м от опоры	
			теор.	экс.	теор.	экс.	теор.	экс.	теор.	экс.	теор.	экс.	теор.	экс.	теор.	экс.
	0,85	6,0	2,4	2,5	13,5	13,0	21,4	20,0	27,3	29,0	21,4	22,0	13,5	14,0	2,4	2,5
	0,67	6,5	3,9	4,0	20,6	19,0	31,1	30,0	38,2	40,0	31,1	32,0	20,6	19,0	3,9	4,0
	0,62	7,5	5,5	6,0	28,4	27,0	40,6	41,0	47,9	50,0	40,6	40,0	28,4	28,0	5,5	6,0

4.2. Определение зависимости угла закручивания провода от погонной массы гололедных отложений

С учетом разработанной модели влияние закручивания провода на форму, размеры и массу отложений гололеда становится понятным из рассмотрения процесса гололедообразования на проводе линии электропередачи по длине пролета (рис. 4.2).

Наиболее часто гололед и изморозь образуются из капель мороси и тумана, осаждающихся на наветренной поверхности провода. При движении в потоке воздуха на каплю, в общем случае, действуют сила тяжести, сила инерции и сила трения воздуха о каплю. Ввиду малого размера капль действием силы тяжести можно пренебречь. На достаточном удалении от провода капля движется горизонтально совместно с потоком. Возле провода, как отмечается в работе [63], поток раздваивается, а линии тока искажаются. Сила трения начинает отклонять каплю, препятствуя ее осадению на проводе. Крайние капли пролетают мимо провода, вследствие чего ширина полосы, из которой все капли оседают на проводе, получается меньше его диаметра. Согласно нашим наблюдениям в начальной стадии гололедообразования ширина полосы составляет (0,58...0,64) диаметра провода.

Вес гололедного осадка определяется количеством влаги, оседающей на проводе из набегающего потока, по формуле [62]:

$$P = 100 \cdot \alpha \cdot d \cdot H \cdot V \cdot t, \quad (4.18)$$

где d – диаметр провода, см;

H – содержание влаги в потоке воздуха, г/см³;

V – скорость ветра, см/с;

t – время, с;

α – коэффициент, учитывающий влияние аэродинамических факторов, размер капль тумана или мороси, скорость ветра.

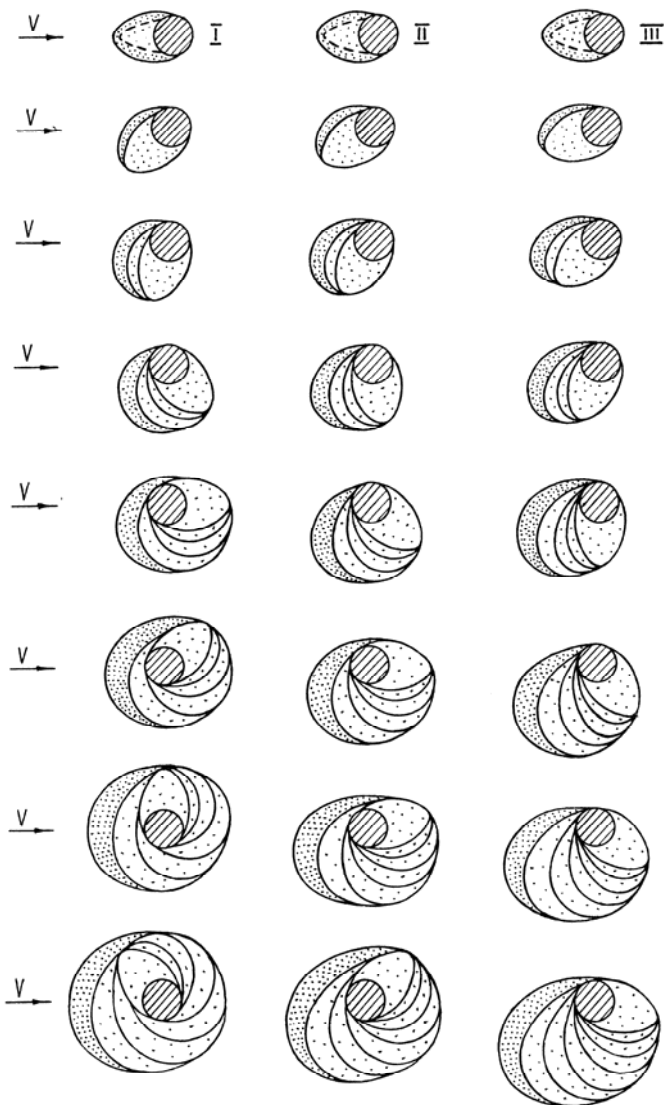


Рис. 4.2. Процесс формирования гололедных отложений на проводе в зоне $1/2$ (I), $1/4$ (II), $1/8$ (III) длины пролета

По мере формирования гололедного осадка поверхность окружности провода охватывается отложениями на 30...60%. Образовавшееся одностороннее отложение вызывает момент, закручивающий провод. Поворот провода вместе с осадком, как видно из рисунка 4.2, увеличивает площадь для отложения новых образований, при этом изменяется их форма и увеличивается интенсивность отложений. Новые отложения способствуют дополнительному закручиванию, что приводит к более полному охвату провода гололедом. В конечном итоге гололедный осадок образует сплошную эллиптическую муфту, которая при продолжении процесса гололедообразования приближается к цилиндрической форме. В отличие от односторонних отложений, такая форма при благоприятных климатических условиях способна сохраняться длительное время даже при сильных ветровых и других механических воздействиях.

Согласно нашим наблюдениям и данным, представленным в работах [97, 98], сплошная гололедная муфта на проводах образуется при закручивании провода на $200...250^\circ$. Однако в работе [97] отмечается, что форма осадка стабилизируется при полном повороте провода на 360° , в отдельных случаях при интенсивных процессах эллипсовидная форма сохранялась и при углах $400...500^\circ$.

Интенсивность нарастания гололеда зависит от направления гололедонесущего потока по отношению к оси трассы ВЛ. В ходе исследований было установлено, что наиболее интенсивно процесс гололедообразования происходит при перпендикулярном направлении потока к оси трассы ВЛ. В общем случае толщина стенки гололеда пропорциональна синусу угла между направлением гололедонесущего потока и осью трассы ВЛ. В работе [68] отмечается, что гололедные нагрузки при ветрах, нормальных к оси ВЛ, в 1,5...2,5 раза больше нагрузок, наблюдаемых при продольных ветрах.

Из анализа рассмотренного нами процесса гололедообразования следует, что в середине пролета отложения имеют форму,

близкую к цилиндрической, при этом толщина стенки гололеда, охватывающей провод, максимальна. По мере удаления от середины пролета к узлам крепления провода на опоре толщина стенки, расположенная над проводом, уменьшается. Это приводит к тому, что сброс гололедных или гололедно-изморозевых отложений с провода при повышении температуры воздуха, выветривании или проведении плавки гололеда электрическим током будет происходить в пролете, начиная с зон, расположенных вблизи узлов крепления, продвигаясь по пролету к его середине. В последней стадии опадения гололедных отложений, как следует из рисунка 4.2, возможен их одновременный сброс в зоне $1/4-3/4$ длины пролета, составляющей до 50%.

Согласно разработанной нами модели закручивания провода с гололедом по длине пролета, связь между углом закручивания провода и массой гололедного отложения является многофакторной и определяется сочетанием как метеорологических, так и конструктивных параметров.

Угол закручивания провода при гололедных отложениях зависит от крутильной жесткости провода и от величины крутящего момента. Каждый из этих основных факторов в свою очередь определяется рядом условий. Крутильная жесткость зависит от материала и конструкции провода, его диаметра, длины пролета, тяжения провода (стрелы провеса), расстояния от точек закрепления его на опоре. Изменение крутящего момента зависит от интенсивности гололедного процесса, плотности, размеров и формы осадка, определяющих его массу и величину эксцентриситета, характеризующего расположение центра тяжести сечения.

Недостаточное соблюдение параметров моделирования реальных ВЛ может привести к существенным ошибкам при исследованиях. Поэтому, как отмечалось в работе [63], количественная

оценка влияния закручивания провода на увеличение массы гололедного отложения может быть сделана только на основе экспериментов. Исходя из этого, в течение 10 лет в полевых условиях были проведены экспериментальные исследования зависимости углов закручивания провода от погонной массы гололедных отложений [41]. Угол закручивания определялся с помощью установленных на проводе в середине пролета указателей поворота в виде стрелки. Масса определялась путем удаления с провода участка гололедного отложения с последующим расплавлением его в мензурке. Измерения проводились в опытных пролетах длиной 50 м, оборудованных проводом АС-35/6,2.

Согласно рекомендациям, изложенным в работе [97], для одного и того же провода в конкретном пролете тесная связь между массой гололедного отложения и углом закручивания (коэффициент корреляции $r = 0,82$) наблюдается лишь для осредненных (по 15...30 измерениям) углов. Поэтому для определения указанной зависимости осреднение углов закручивания для значения погонной массы отложения проводилось по 15...20 измерениям. За период наблюдений были выполнены измерения углов закручивания провода при следующих видах отложений: гололеде прозрачном и мутном (матовом), изморози зернистой и кристаллической.

Гололедные отложения представляют твердый осадок стекловидного строения из прозрачного или мутного (матового) льда. Образование гололеда происходит при температуре воздуха от 0 до -5°C , скорости ветра 5...10 м/с при туманах, дождях, мороси. Прозрачный гололед имел плотность 0,47...0,89 г/см³, мутный – 0,48...0,55 г/см³.

Зернистая изморозь выпадает преимущественно при тумане, температуре воздуха от -3 до -10°C и скорости ветра до 8 м/с. Плотность зернистой изморози составляла 0,17...0,30 г/см³.

Кристаллическая изморозь с плотностью $0,02 \dots 0,1 \text{ г/см}^3$ образуется при температуре воздуха от -10 до -25°C , скорости ветра до 5 м/с , в основном, в ночное время, продолжительность отложения составляет несколько часов.

При изменениях погодных условий и длительном тумане на проводах имели место наслоения гололеда и изморози, в результате чего возникали сложные отложения значительной величины. Среднее значение плотности сложных отложений находилось в пределах $0,32 \dots 0,47 \text{ г/см}^3$.

Результаты измерений часто встречающихся гололедных и гололедно-изморозевых отложений приведены в приложении А (табл. А1). Погонная масса разного вида отложений составляла: для гололеда (прозрачного и мутного) – $0,027 \dots 0,66 \text{ кг/м}$, для зернистой изморози – $0,042 \dots 0,61 \text{ кг/м}$, для сложных образований – $0,99 \dots 1,85 \text{ кг/м}$. Углы закручивания провода с отложениями при этом изменялись в пределах $0,17 \dots 6,19 \text{ рад}$. ($10^\circ \dots 355^\circ$).

Опытные данные осредненных значений углов закручивания провода с гололедными отложениями представлены на рис. 4.3. Путем обработки опытных данных методом наименьших квадратов получены следующие зависимости угла закручивания провода φ от погонной массы гололедных отложений m_r :

$$\varphi = \begin{cases} 9,50 \cdot m_r - 0,09 & \text{при } m_r \leq 0,28 \text{ кг/м} \\ 1,97 + (11,86 \cdot m_r - 2,96)^{1/2} & \text{при } m_r \geq 0,28 \text{ кг/м} \end{cases} \quad (4.19)$$

Таким образом, проведенные исследования позволяют определить величину угла закручивания провода с гололедом в середине пролета ВЛ 6–10 кВ и провести с учетом предварительного закручивания измерения перемещений провода при сбросе грузов, имитирующих гололедную нагрузку.

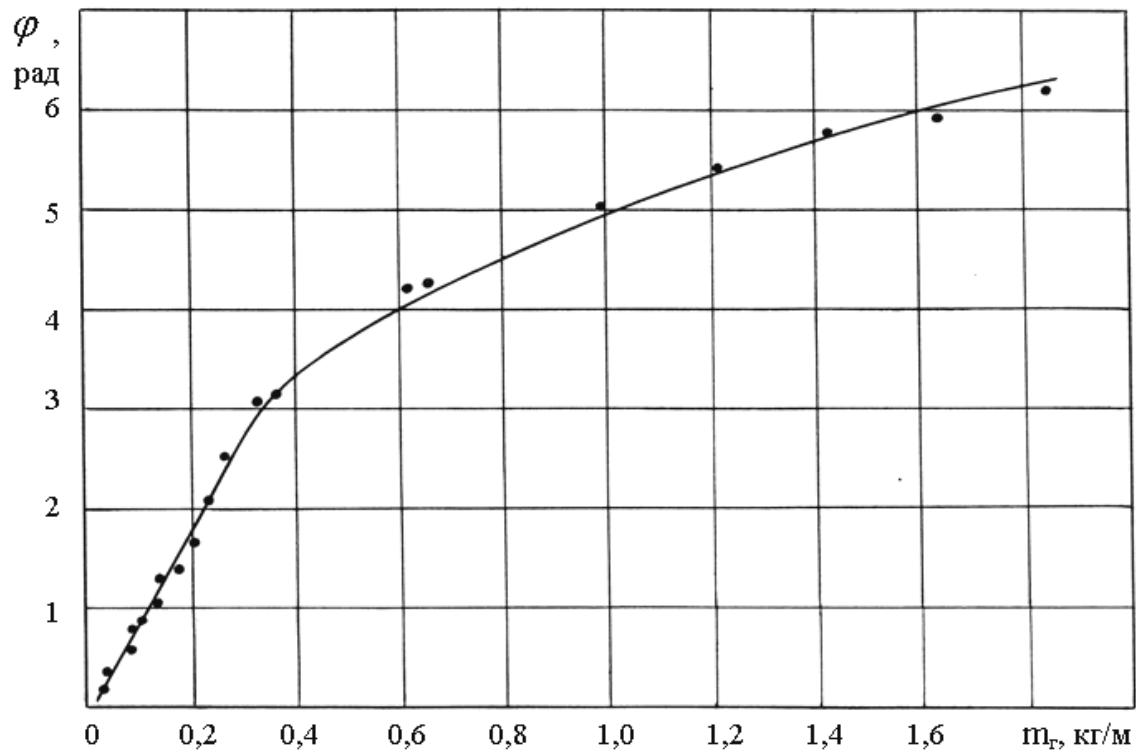


Рис. 4.3. Зависимость угла закручивания провода, покрытого гололедными отложениями, от их погонной массы

4.3. Методика и результаты измерений перемещений провода при опадении гололедных отложений

Измерения перемещений провода при опадении гололедно-изморозевых отложений проводились в опытном пролете длиной 50 м с двумя горизонтально расположенными проводами АС-35/6,2 путем сбрасывания грузов, имитирующих гололедную нагрузку [38]. Замеры проводились с помощью трех специальных устройств для измерения максимальных перемещений провода, установленных на Г-образной стойке и на одном из проводов в середине пролета (рис. 4.4).

Устройство для измерения максимальных перемещений проводов [44] включает (рис. 4.5–4.6) корпус 1, внутри которого расположен вращающийся барабан 2, предварительно закрученный упругим элементом 3 и фиксатором 4. На барабане 2 закреплен конец нити 5 с последующей ее намоткой. Указатель перемещения 6 удерживается на нити 5 за счет трения. Корпус 1 закрепляется зажимом 7 на одном проводе 8, а свободный конец нити 5 – зажимом 9 на другом. Указатель 6 жестко связан с измерительной нитью 10, перемещающейся относительно трубки 11, закрепленной на корпусе 1 и соединенной дополнительной нитью 12 со стойкой 13.

Во время сближения проводов участок нити 5 под действием усилий закручивания барабана 2 проскальзывает через указатель перемещения 6 и наматывается на барабан. При расхождении проводов нить 5 сматывается с барабана 2, а указатель 6 удерживается на ней и отходит от начального положения – корпуса 1 устройства, при этом длина выступающей части нити 10 уменьшается на величину перемещения указателя 6. Таким образом, за время проведения эксперимента указатель 6 фиксируется в положении наибольшего сближения проводов (минимального расстояния между проводами).

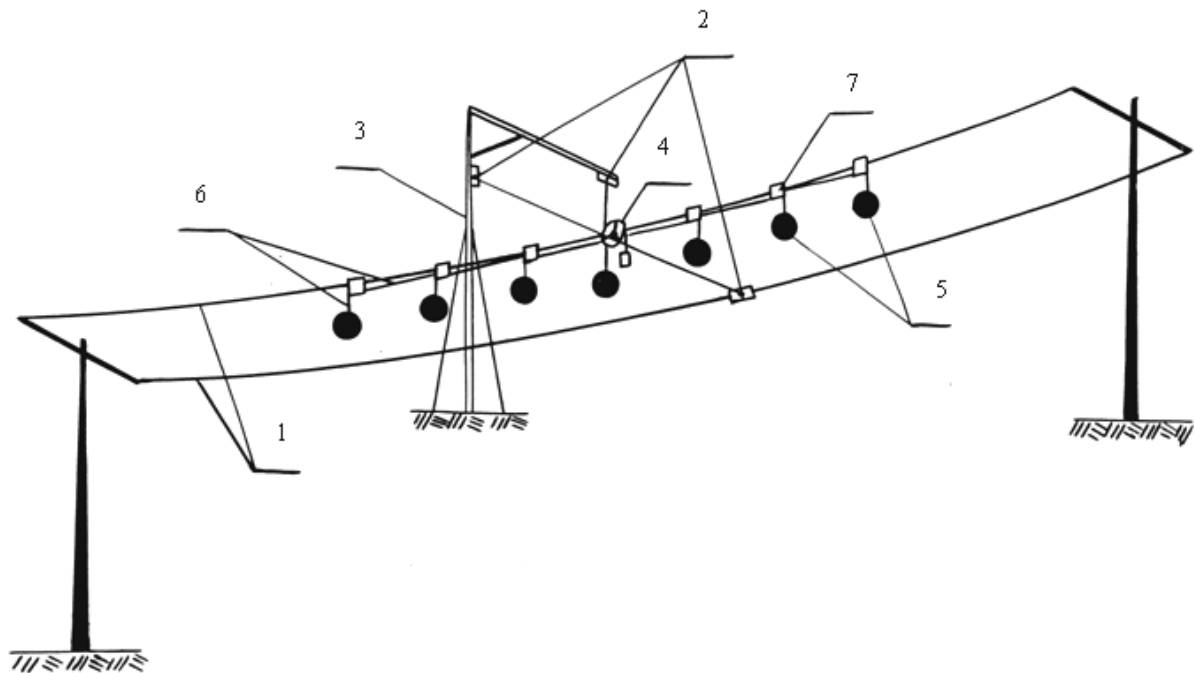


Рис. 4.4. Опытный пролет для определения перемещений провода при сбросе грузов:
1 – провода; 2 – устройства для измерения перемещения провода; 3 – Г-образная стойка;
4 – шкив; 5 – грузы; 6 – нить; 7 – устройства для подвески грузов

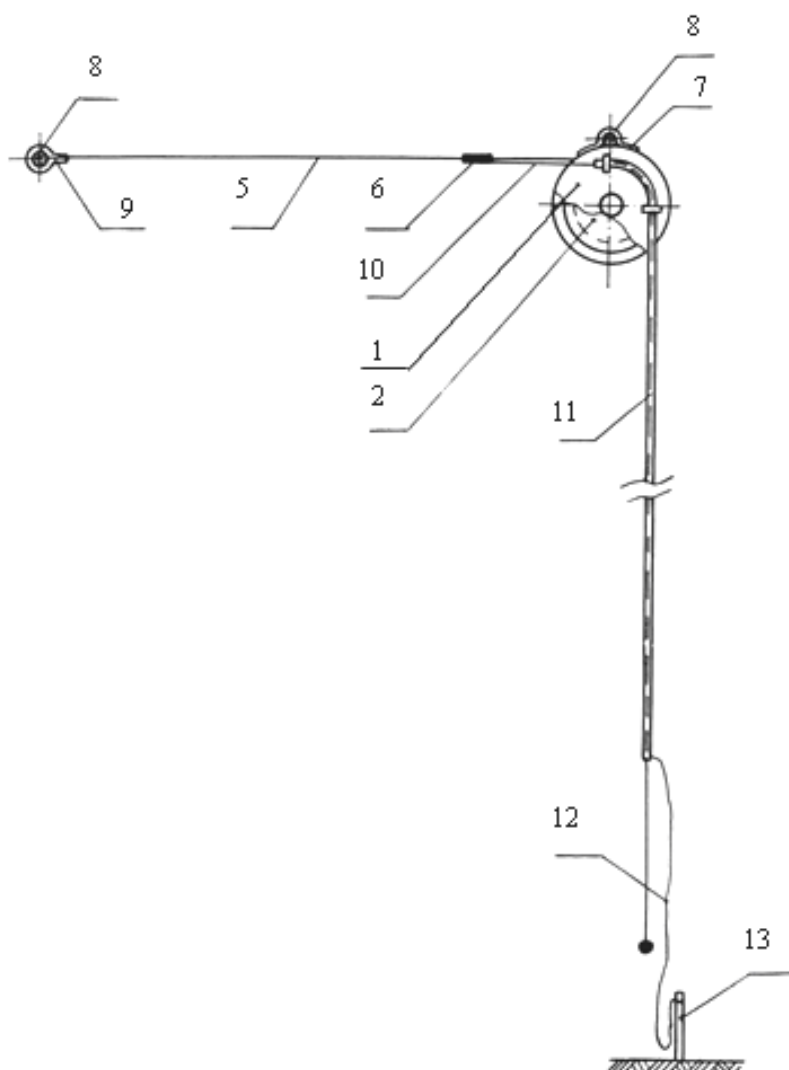


Рис. 4.5. Измерение расстояний между двумя проводами при их сближениях под действием ветра

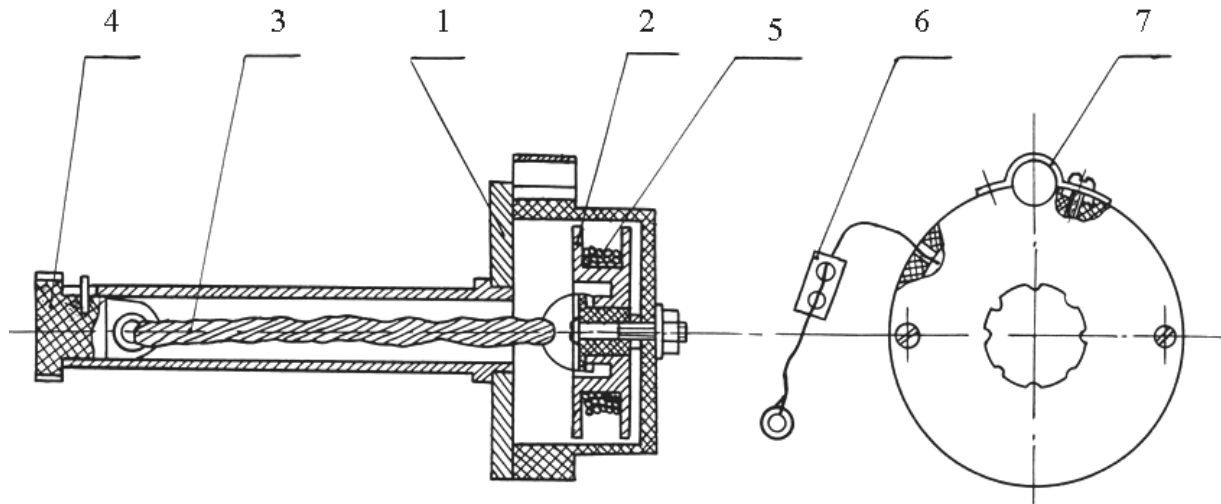


Рис. 4.6. Устройство для измерения расстояний между проводами при их сближениях

Опыты проводились без закручивания и с предварительным закручиванием провода в пролете при стрелах провеса 0,5; 0,7 и 0,9 м. Закручивание провода на требуемый угол осуществлялось путем подбора веса груза, подвешенного к шкиву, закрепленному на проводе в середине пролета, при этом величина угла закручивания определялась из полученного нами выражения (4.19).

В ряде работ [11, 23, 50] указывается, что одновременный сброс гололедных отложений с провода по всей длине пролета маловероятен и на практике не наблюдается. Подскок провода имеет место при опадении гололедных отложений, расположенных в средней части пролета на участке, составляющем до 50% его длины, что совпадает с нашими наблюдениями (рис. 4.7) и выводами, сделанными на основе рассмотрения процесса гололедообразования с учетом закручивания провода по длине пролета.

При проведении экспериментов вес падающих грузов принимали близким к гололедным нагрузкам, имевшим место при наблюдениях (табл. А1, приложение А), что составило от 29,4 до 548,8 Н для одного пролета. Идентичность условий эксперимента с условиями равномерной нагрузки достигалась применением значительного числа грузов (до 10...14), равномерно распределенных по длине пролета с расстоянием между ними 2,5...4,0 м. Сброс грузов с провода осуществлялся одновременно путем срезания в середине пролета всех нитей, на которых подвешивались грузы. Близкая к нашим опытам равномерность распределения нагрузки была принята Карсаулидзе А.Н. [50] при определении величины подскока провода в пролете ВЛ 35 кВ.

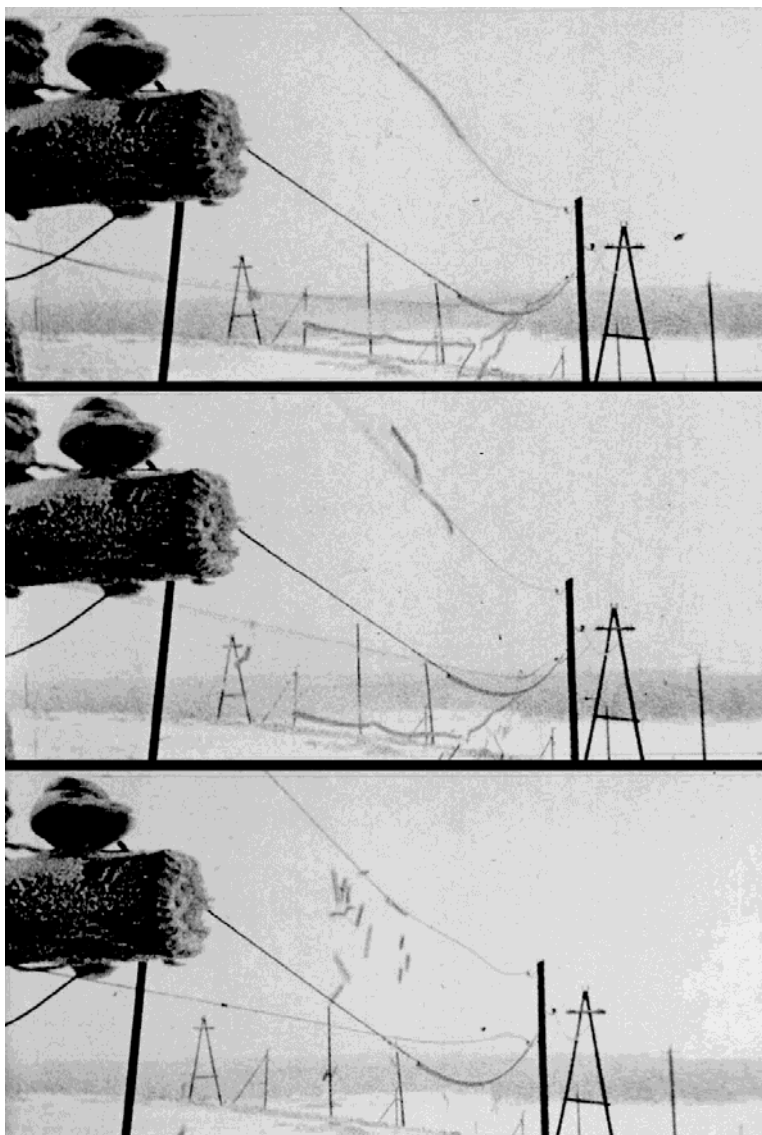


Рис. 4.7. Фрагменты киносъемки опадения гололедных отложений и подскока провода в пролете ВЛ

Измерения перемещений провода без предварительного закручивания показали, что величины подскока при разных стрелах провеса отличаются незначительно (на 1,8...5,2%). Поэтому в дальнейшем эксперименты проводились при стреле провеса провода 0,7 м и разных грузах. При проведении опытов с предварительно закрученным проводом измерительными устройствами 2 (рис. 4.4) зафиксированы горизонтальные смещения в обе стороны от вертикального положения провода, что указывает на сложную форму его движения при подскоке после сброса грузов; при этом для анализа учитывалось наибольшее из двух измеренных значений горизонтальных перемещений. Результаты измерений представлены в таблице 4.2.

Анализ полученных результатов показывает, что при отсутствии закручивания провода его перемещение (подскок) после сброса грузов происходит в вертикальной плоскости, а его величина увеличивается с ростом разности стрел провеса нагруженного и ненагруженного проводов.

Значения вертикальных перемещений, полученные экспериментально, были сравнены с расчетными величинами подскока H при опадении гололедных отложений по известной формуле, предложенной профессором В.В. Бургсдорфом [11, 23]:

$$H = \Delta f \cdot \left(2 - \frac{l}{1000} \right), \quad (4.20)$$

где Δf – разность стрел провеса провода при нагрузке гололедом и после его сброса;

l – длина пролета.

Таблица 4.2

ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРОВОДА ПРИ ПОДСКОКЕ ПОСЛЕ СБРОСА ГРУЗОВ,
ИМИТИРУЮЩИХ ОПАДЕНИЕ ГОЛОЛЕДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Вес сбрасываемых грузов, Н	Разность стрел провеса нагруженного и ненагруженного проводов, м	Угол закручивания провода, рад	Величина перемещения провода, м			
			без закручивания		при закручивании	
			в вертикальной плоскости	в горизонтальной плоскости	в вертикальной плоскости	в горизонтальной плоскости
29,4	0,16	0,49	0,29	–	0,28	0,04
58,8	0,25	1,05	0,47	–	0,46	0,08
88,2	0,32	1,57	0,61	0,01	0,60	0,11
117,6	0,36	2,18	0,68	0,02	0,65	0,12
181,3	0,41	3,23	0,79	–	0,76	0,15
240,1	0,49	3,66	0,92	0,02	0,89	0,17
298,9	0,53	4,01	1,04	0,03	1,01	0,19
328,3	0,54	4,19	1,06	0,03	1,03	0,20
450,8	0,61	4,80	1,16	0,03	1,13	0,22
548,8	0,65	5,23	1,24	0,04	1,21	0,25

Сравнительный анализ показал хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных: при $\Delta f = 0,16$ м расчетная величина вертикального перемещения провода отличается от экспериментальной на 6,9%, а при $\Delta f \geq 0,25$ м – на 1,0...4,3%.

Закручивание провода существенно изменяет траекторию его движения при подскоке, при этом вместе с перемещениями провода в вертикальной плоскости имеют место его горизонтальные отклонения. Значения вертикальных перемещений меньше, чем в опытах без закручивания провода, а их отличие от расчетных величин по формуле (4.20) составляет до 10,7%. Величина горизонтальных отклонений с ростом угла закручивания увеличивается и при его максимальном значении достигает 0,25 м.

Путем обработки опытных и расчетных данных методом наименьших квадратов получены выражения для определения вертикальных (H_B) и горизонтальных (H_G) перемещений предварительно закрученного провода при его подскоке после сброса грузов, имитирующего опадение гололедных отложений [47]:

$$H_B = 0,974 \cdot \Delta f \cdot \left(2 - \frac{l}{1000} \right) - 0,018 \cdot \quad (4.21)$$

$$H_G = 0,211 \cdot \Delta f \cdot \left(2 - \frac{l}{1000} \right) - 0,025 \cdot \quad (4.22)$$

Значения вертикальных и горизонтальных перемещений провода, рассчитанные по формулам (4.21) и (4.22), отличаются от экспериментальных данных не более чем на 2,6 и 4,1% соответственно.

Действительные величины перемещений провода при подскоке будут меньше значений, определенных по формулам (4.21) и (4.22) из-за невозможности одновременного опадения гололедных отложений со всего провода по длине пролета. Как уже отмечалось, в реаль-

ных условиях опадение (сброс) гололеда с провода имеет затяжной по времени характер, происходит отдельными участками в направлении от опор к середине пролета и приводит к меньшему (по величине) подскоку провода. Поэтому необходимо определить поправочные коэффициенты K_{II} к формулам (4.21) и (4.22) для случаев частичного сброса гололедных отложений. Для этого на основе расчетных и опытных данных получены зависимости вертикальных и горизонтальных перемещений провода при подскоке от веса гололедных отложений (веса грузов) P в диапазоне 88,2...548,8 Н:

$$H_B = 0,380 + 0,259 \cdot 10^{-2} \cdot P - 0,196 \cdot 10^{-5} \cdot P^2, \quad (4.23)$$

$$H_G = 0,061 + 0,562 \cdot 10^{-3} \cdot P - 0,427 \cdot 10^{-6} \cdot P^2. \quad (4.24)$$

Расчеты, выполненные по формулам (4.23) и (4.24), позволили определить среднюю величину поправочного коэффициента K_{II} :

$$K_{II} = 0,291 + 1,128 \cdot 10^{-2} \cdot K_P - 4,182 \cdot 10^{-5} \cdot K_P^2, \quad (4.25)$$

где $K_P = \frac{P' \cdot 100}{P}$, %;

P' – вес сброшенного с провода гололеда, Н;

P – вес гололеда, полностью покрывающего провод, Н.

При наиболее вероятном случае опадения гололедных отложений с 30...50% длины пролета в средней его части величина подскока с учетом значений поправочного коэффициента, полученных по формуле (4.25), будет составлять 59...75% от подскока при одновременном сбросе расчетной гололедной нагрузки со всего провода в пролете. Следовательно, результаты, полученные по

формулам (4.21) и (4.22) с учетом поправочного коэффициента, могут рассматриваться как теоретически максимально возможные.

На практике возможны случаи подскока провода при опадении гололедно-изморозевых отложений в моменты сближений фазных проводов при их несинхронных раскачиваниях. Так, например, в результате несинхронных раскачиваний при скорости ветра 20 м/с и коэффициенте разрегулировки стрел провеса 0,2 сближения проводов, покрытых гололедно-изморозевыми отложениями, могут достигать 0,91...0,96 м (согласно исследованиям, приведенным в работе [44]), а с учетом возможных горизонтальных отклонений при опадении отложений – 1,10...1,15 м.

Проведенные исследования показали, что в естественных условиях с учетом закручивания провода в процессе гололедообразования его движение при подскоке после опадения гололедно-изморозевых отложений характеризуется вертикальными перемещениями и горизонтальными отклонениями. Величины этих перемещений, определяемые на основе полученных выражений с введением поправочного коэффициента, должны учитываться при выборе оптимальных расстояний между проводами ВЛ 6–10 кВ, исключающих их опасные сближения при воздействии ветровых и гололедных нагрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследований низкочастотных колебаний проводов сельских ВЛ 6–10 кВ в условиях гололедно-ветровых нагрузок и методов борьбы с пляской проводов получены следующие результаты:

1. Установлено, что на ВЛ 6–10 кВ пляска проводов более часто повторяется и более широко распространена, чем на ВЛ 35–500 кВ, при этом имеют место наиболее опасные виды пляски в вертикальной плоскости с меньшим числом полуволн в пролете и двойной амплитудой колебаний, достигающей 0,67 стрелы провеса провода. Двойная амплитуда колебаний в соотношении к стреле провеса проводов распределена по нормальному закону.

2. Разработанная модель сближения проводов сельских ВЛ 6–10 кВ при пляске позволяет определять расстояния между фазными проводами при разных режимах низкочастотных колебаний, параметрах пролета, степени разрегулировки стрел провеса проводов. Численные исследования модели показали, что опасные сближения проводов при пляске, вызывающие аварийные отключения линий электропередачи, возникают при скоростях ветра 10 м/с и более. Опасные сближения проводов с их крюковым расположением на опорах по сравнению с треугольным происходят более часто и при меньших величинах стрел провеса и амплитудах пляски. Увеличение стрел провеса проводов, коэффициента их разрегулировки при заданных режимах пляски приводит к уменьшению расстояний между проводами при их сближениях.

3. Выполненные расчеты горизонтальных расстояний между проводами, при которых исключаются их опасные сближения при пляске, показали, что с учетом возникающей при эксплуатации ВЛ 6–10 кВ разрегулировки стрел провеса проводов эти расстояния ограничиваются возможностью выполнения работ по закреплению провода

к штыревому изолятору с опоры и не могут быть реализованы на практике. Поэтому наиболее перспективными методами борьбы с пляской проводов являются установка гасителей и использование проводов новой конструкции, активно воздействующих на процессы пляски и гололедообразования, а также применение плавки гололедных отложений на проводах переменным током.

4. Испытания применяемых на ВЛ 35 кВ и выше гасителей пляски в полевых условиях показали их недостаточную эффективность по демпфированию низкочастотных колебаний проводов на ВЛ 6–10 кВ ввиду их конструктивных отличий и особенностей гололедообразования на проводах малых сечений. Поэтому применительно к ВЛ 10 кВ разработаны устройство для предотвращения колебаний проводов (авторское свидетельство № 936148) и провод электропередачи новой конструкции (авторское свидетельство № 714509), высокая эффективность которых доказана экспериментально путем продувки в аэродинамической трубе КазНИИЭ и проведения длительных испытаний в полевых условиях при воздействии гололедно-ветровых нагрузок. Устройство для предотвращения колебаний проводов и аэродинамически стабильный провод после успешных испытаний внедрены в Башкирской энергосистеме.

5. Показано, что методика расчета времени плавки гололедных отложений, проводимой в целях борьбы с пляской проводов на ВЛ 6–10 кВ, не учитывает особенностей гололедообразования на проводах малых сечений. Предложенная на основе многолетних наблюдений систематизация эксцентричных гололедных отложений на проводах по форме и размерам позволила установить зависимость между действительной стенкой проплавления отложений и их внешними геометрическими размерами. Проведенные опытные плавки гололедных отложений, наблюдающихся при пляске проводов, подтвердили правильность разработанной методики расчета их продолжительности по действительной стенке проплавления.

6. Для получения достоверной информации о возникновении пляски и своевременного проведения плавки гололеда разработаны способ дистанционного определения пляски проводов (патент РФ № 2017297), датчики для ее обнаружения (авторские свидетельства №№ 1436166, 1479997), а также устройства для контроля гололедообразования (авторские свидетельства №№ 1476560, 1330687), которые могут быть использованы для прогнозирования возможной пляски проводов на ВЛ 6–10 кВ.

7. Разработана модель закручивания провода по длине пролета в процессе гололедообразования, правильность которой подтверждена экспериментально в полевых условиях. Показано, что угол закручивания провода с гололедом имеет максимальное значение в середине пролета и уменьшается по направлению к опорам: в зоне $1/4$ длины пролета угол закручивания меньше в 1,2...1,3 раза, в зоне $1/8$ – в 1,7...2,0 раза, на расстоянии 1 м от опоры – в 8,7...11,4 раза.

8. Экспериментальными исследованиями установлено, что закручивание проводов малых сечений в значительной степени влияет на величину и характер их перемещений при опадении гололедных отложений. Получены данные о закручивании проводов малых сечений при разных видах, параметрах и массе отложений, экспериментальные зависимости, позволяющие определять величину вертикальных перемещений и горизонтальных отклонений предварительно закрученного провода при сбросе грузов, имитирующих гололедную нагрузку. Показано, что горизонтальные отклонения провода увеличиваются с ростом угла закручивания и при его величине 5,23 рад достигают 0,25 м.

Получено выражение для определения поправочного коэффициента, учитывающего частичный сброс гололедно-изморозевых отложений с провода в пролете. Показано, что при наиболее вероятном случае опадения отложений с 30...50% длины провода в средней части пролета значения поправочного коэффициента находятся в пределах 0,59...0,75.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андриевский, В. Н. Эксплуатация воздушных линий электропередачи / В. Н. Андриевский, А. Т. Голованов, А. С. Зеличенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 616 с.

2. Байков, С. П. Выбор расстояний между проводами, проводами и тросами по условиям пляски проводов / С. П. Байков, Р. А. Голубцов, П. Е. Сандлер // Электрические станции. – 1967. – № 8. – С. 57–61.

3. Байрамгулов, Ю. Ж. Борьба с пляской проводов в сельских сетях 6–10 кВ / Ю. Ж. Байрамгулов, В. Ю. Кабашов // Совершенствование конструкции, эксплуатации и ремонта сельскохозяйственной техники: [сборник трудов] / Ульяновский СХИ. – Куйбышев, 1979. – С. 145–148.

4. Байрамгулов, Ю. Ж. Совершенствование сельских воздушных линий электропередачи 6–10 кВ, подверженных динамическим нагрузкам: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.02 / Ю. Ж. Байрамгулов. – СПб. – Пушкин, 1993. – 48 с.

5. Байрамгулов, Ю. Ж. Исследование пляски проводов сельских воздушных ЛЭП / Ю. Ж. Байрамгулов, В. Г. Урманов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 2. – С. 13.

6. Башкатов, А. Ф. Исследование движения узловых точек при автоколебаниях нити (провода) / А. Ф. Башкатов, И. А. Карамов // Совершенствование конструкции, эксплуатации и ремонта сельскохозяйственной техники: [тематический сборник] / Ульяновский СХИ. – Ульяновск, 1979. – С. 139–141.

7. Бекметьев, Р. М. Влияние воздействия ветровой нагрузки на условия работы проводов в пролетах ЛЭП / Р. М. Бекметьев // Проблемы общей энергетики и единой энергетической системы. – Алма-Ата, 1976. – Вып. 10. – С. 106–110.

8. Бекметьев, Р. М. Пляска проводов воздушных линий электропередачи / Р. М. Бекметьев, А. Ш. Жакаев, Н. В. Ширинских. – Алма-Ата: Наука КазССР, 1979. – 152 с.

9. Борьба с гололедом в электросетевых предприятиях Башкирэнерго / В. Н. Александров, В. А. Амосов, И. Е. Голубков, Р. М. Рудакова // Электрические станции. – 1997. – № 6. – С. 52–55.

10. Будзко, И. А. Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко, В. Ю. Гессен. – 2-е изд., перераб. – М.: Колос, 1979. – 480 с.

11. Бургсдорф, В. В. Определение амплитуды подпрыгивания провода при сбросе гололеда или мокрого снега / В. В. Бургсдорф, А. Н. Карсаулидзе // Труды ЦНИЭЛ. – М., 1956. – Вып. 5. – С. 91–107.

12. Бургсдорф, В. В. Аэродинамическое сопротивление проводов и тросов ВЛ электропередачи / В. В. Бургсдорф, Б. Ю. Махлин. – М.; Л.: Гос. энергетическое изд-во, 1958.

13. Бургсдорф, В. В. Новые исследования в области линий электропередачи / В. В. Бургсдорф // Воздушные линии электропередачи: переводы докладов Международной конференции (СИГРЭ). – М., 1965. – С. 3–28.

14. Бургсдорф, В. В. Новые исследования воздушных линий электропередачи / В. В. Бургсдорф // Воздушные линии электропередачи: переводы докладов Международной конференции (СИГРЭ). – М., 1975. – С. 3–32.

15. Бургсдорф, В. В. Новые результаты исследований линий электропередачи и повышение их надежности / В. В. Бургсдорф // Воздушные линии электропередачи: переводы докладов Международной конференции (СИГРЭ-82). – М., 1984. – С. 3–27.

16. Бургсдорф, В. В. Колебания проводов ВЛ, достижения и проблемы в разработке мероприятий по их ограничению / В. В. Бургсдорф, Д. С. Савваитов, В. А. Шкапцов // Повышение экономичности и надежности работы энергосистем. – М., 1984. – С. 42–48.

17. Вексельман, О. Г. Горизонтальное смещение проводов при их вертикальном расположении / О. Г. Вексельман // Электрические станции. – 1954. – № 9. – С. 44–47.

18. Вексельман, О. Г. Определение расстояния между проводами на линиях 35 кВ со штыревыми изоляторами / О. Г. Вексельман // Электрические станции. – 1955. – № 6. – С. 36–38.

19. Вексельман, О. Г. Расположение проводов и тросов по условиям «пляски» / О. Г. Вексельман // Электричество. – 1956. – № 2. – С. 55–58.

20. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 576 с.

21. Веялис, Б. С. Анализ повреждаемости проводов ВЛ от колебаний в сетях Волгоградэнерго / Б. С. Веялис, Ю. Ф. Белоусов, А. А. Санеев // Тезисы докладов на семинаре «Методы и способы устранения колебаний проводов воздушных линий электропередачи», (27 февраля – 3 марта 1977 г.) / ВНИИЭ. – М., 1977. – С. 33–35.

22. Винантс, В. Пляска проводов воздушных линий / В. Винантс, М. Риец // Воздушные линии электропередачи: переводы докладов Международной конференции (СИГРЭ). – М., 1972. – С. 47–57.

23. Глазунов, А. А. Основы механической части воздушных линий электропередачи: в 2 т. Т. 2. Основы проектирования воздушных линий электропередачи / А. А. Глазунов, А. А. Глазунов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 240 с.

24. Глебов, Э. С. Пляска проводов на воздушных линиях электропередачи 500 кВ / Э. С. Глебов. – М.: БТИ ОРГРЭС, 1965. – 72 с.

25. Глебов, Э. С. Борьба с пляской проводов ВЛ 500 кВ / Э. С. Глебов, Б. И. Мохов // Электрические станции. – 1970. – № 10. – С. 47–61.

26. Гмурман, В. С. Теория вероятностей и математическая статистика / В. С. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1972. – 368 с.

27. Горошков, Ю. И. Ветроустойчивость контактной сети / Ю. И. Горошков, А. И. Гуков. – М.: Транспорт, 1969. – 128 с.

28. Ден-Гартог, Дж. П. Механические колебания (русский перевод) / Дж. П. Ден-Гартог. – М.: Госиздат физико-математической литературы, 1960. – 560 с.

29. Динамические явления на линиях электропередачи / Альт, Бауэр, Боос, Юрденс, Пашен // Линии электропередачи. Подстанции переменного тока: переводы докладов Международной конференции (СИГРЭ-84). – М., 1987. – С. 160–171.

30. Дубровский, Н. Н. Пляска проводов на линиях электропередачи / Н. Н. Дубровский, Г. Ф. Нешта // Электрические станции. – 1963. – № 8. – С. 76–78.

31. Испытания имитированных схлестываний проводов при неравномерной нагрузке гололедом / Харада Исао, Ниитани Кадзуо, Козикэ

Кидзо [и др.] // Дэнки Корон, *Electrical Review*. – 1964. – Vol. 40, № 8. – С. 900–907.

32. Испытания устройств подавления пляски на ВЛ / Лепперс, Смат, Поффенбергер, Уофэм // Воздушные линии электропередачи: переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ–86) / под ред. В. А. Шкапцова. – М., 1988. – С. 3–23.

33. Исследование условий схлестывания проводов при гололеде на ЛЭП энергосистемы Хоккайдо // Дэнки Тэцудо, *Electrical Railways*. – 1964. – Vol. 18, № 6. – С. 18–21.

34. Исследование динамики провода в полете ВЛ 6–10 кВ: отчет о НИР (заключ.) / Башкирский сельскохозяйственный институт; рук. Башкатов А. Ф.; исполн.: Байрамгулов Ю. Ж., Кабашов В. Ю. [и др.]. – Уфа, 1978. – 182 с. – № ГР 76095000. – Инв. № Б752861.

35. Кабашов, В. Ю. К вопросу сближения и схлестывания проводов сельских ВЛ 6–10 кВ / В. Ю. Кабашов // Известия высших учебных заведений. Энергетика. – 1981. – № 7. – С. 33–36.

36. Кабашов, В. Ю. К вопросу плавки эксцентричных гололедных отложений при эксплуатации сельских ВЛ 10 кВ / В. Ю. Кабашов // Совершенствование конструкций, методов эксплуатации и ремонта сельскохозяйственной техники: (сборник научных трудов) / Башкирский ГАУ. – Уфа, 1995. – С. 88–90.

37. Кабашов, В. Ю. Повышение эффективности плавки гололеда для предотвращения пляски проводов ВЛ 10 кВ / В. Ю. Кабашов // Энергосбережение в Республике Башкортостан: материалы Второй научно-практической республиканской конференции, 27-28 янв. 1999 г. / УГАТУ. – Уфа, 1999. – Ч. 1. – С. 256–259.

38. Кабашов, В. Ю. Результаты экспериментальных исследований перемещений проводов ВЛ 10 кВ при опадании гололедных отложений / В. Ю. Кабашов // Материалы XLIV научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству»: в 4-х ч. / Челябинский ГАУ. – Челябинск, 2005. – Ч. 4. – С. 47–51.

39. Кабашов, В. Ю. Испытание средств защиты от пляски проводов ВЛ 6–10 кВ / В. Ю. Кабашов, Ф. Х. Усманов // Электрические станции. – 2005. – № 9. – С. 33–36.

40. Кабашов, В. Ю. Защита сельских ВЛ 6–10 кВ от низкочастотных колебаний проводов / В. Ю. Кабашов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005. – № 11. – С. 16–18.

41. Кабашов, В. Ю. Влияние массы гололедных отложений на закручивание проводов малых сечений / В. Ю. Кабашов // Перспективы агропромышленного производства регионов России в условиях реализации приоритетного национального проекта «Развитие АПК»: (материалы Всероссийской научно-практической конференции), 28 февр. – 3 марта 2006 г. / Башкирский ГАУ. – Уфа, 2006. – Ч. 3. – С. 257–260.

42. Кабашов, В. Ю. Применение плавки гололеда на сельских ВЛ 6–10 кВ для борьбы с пляской проводов / В. Ю. Кабашов // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции, 15–16 ноября 2007 г. / Уфимский гос. нефт. техн. ун-т. – Уфа, 2007. – Т. 1. – С. 21–28.

43. Кабашов, В. Ю. Повышение надежности сельских ВЛ 10 кВ при гололедно-ветровых нагрузках / В. Ю. Кабашов // Энергетика и энергоэффективные технологии: сборник докладов II ежегодной международной научно-технической конференции, 4–5 окт. 2007 г. / Липецкий гос. техн. ун-т. – Липецк, 2007. – С. 17–21.

44. Кабашов, В. Ю. Повышение надежности сельских воздушных линий 6–10 кВ в условиях воздействия ветровых нагрузок: монография / В. Ю. Кабашов. – Уфа: Изд-во «Здравоохранение Башкортостана», 2009. – 140 с.

45. Кабашов, В. Ю. Определение формы и размеров гололедных отложений на проводах воздушных линий электропередачи / В. Ю. Кабашов // Научное обеспечение устойчивого функционирования и развития АПК: материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием в рамках XIX Международной специализированной выставки «АгроКомплекс–2009», 3–5 марта 2009 г. / Башкирский гос. аграрный ун-т. – Уфа, 2009. – Ч. 1. – С. 261–262.

46. Кабашов, В. Ю. Испытание провода новой конструкции для сельских ВЛ 10 кВ при гололедно-ветровых нагрузках / В. Ю. Кабашов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 7. – С. 11–13.

47. Кабашов, В. Ю. Влияние гололеда на отклонение проводов сельских ВЛ 6–10 кВ / В. Ю. Кабашов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 3. – С. 29–30.

48. Кабашов, В. Ю. Результаты испытаний аэродинамического гасителя пляски проводов на сельских ВЛ 6–10 кВ / В. Ю. Кабашов // Безопасность жизнедеятельности: проблемы и пути их решения в АПК: сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 19 февр. 2010 г. / Семипалатинский гос. пед. ин-т, Башкирский гос. аграрный ун-т. – Уфа, 2010. – С. 116–120.

49. Казакевич, М. И. Аэродинамические способы гашения колебаний плохо обтекаемых тел в ветровом потоке / М. И. Казакевич // Строительная механика и расчет сооружений. – 1974. – № 6. – С. 66–70.

50. Карсаулидзе, А. Н. Исследование колебаний проводов воздушных линий электропередачи и выбор расстояний между проводами при вертикальном расположении: дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Карсаулидзе. – М., 1953. – 125 с.

51. Керимов, Ю. М. Пляска проводов на воздушных линиях электропередачи и мероприятия по борьбе с ней / Ю. М. Керимов, Б. Н. Еганов // Электрические станции. – 1975. – № 6. – С. 51–54.

52. Коган, Ф. Л. Разработка и осуществление мероприятий по повышению надежности энергосистем / Ф. Л. Коган // Электрические станции. – 2003. – № 4. – С. 4–11.

53. Кручинин, В. Л. Вопросы технико-экономического обоснования схем и устройств для плавки гололеда в сетях 6–10 кВ зоны Нижнего Поволжья / В. Л. Кручинин, Ю. Ф. Белоусов, Б. С. Веялис // Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи: (Материалы II Всесоюзного совещания). – Уфа, 1975. – С. 53–58.

54. Лангмакер. Междупазные распорки как средство предотвращения нарушений в работе ВЛ / Лангмакер, Штегеман, Штройбель // Воз-

душные линии электропередачи: переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-86) / Под ред. В. А. Шкапцова. – М., 1988. – С. 52–60.

55. Левченко, И. И. Программное обеспечение информационной системы контроля гололедообразования / И. И. Левченко, Е. И. Сацук // Электрические станции. – 2004. – № 10. – С. 15–18.

56. Левченко, И. И. Разработка и внедрение мероприятий по предотвращению гололедных аварий в электрических сетях энергосистем Северного Кавказа / И. И. Левченко // Электрические станции. – 2005. – № 3. – С. 46–50.

57. Ловецкая, Е. Н. Анализ случаев пляски проводов ВЛ 10–750 кВ / Е. Н. Ловецкая, Д. С. Савваитов, В. А. Шкапцов // Электрические станции. – 1987. – № 2. – С. 36–40.

58. Ловецкая, Е. Н. Анализ эффективности средств ограничения и подавления пляски проводов / Е. Н. Ловецкая, Д. С. Савваитов, В. А. Шкапцов // Электрические станции. – 1987. – № 4. – С. 48–51.

59. Металлические траверсы промежуточных железобетонных опор ВЛ напряжением 6–10 кВ с треугольным расположением проводов (дополнение к типовому проекту Т-576-64-У). – М.: ВНИИсельэлектро, 1967.

60. Морикава, М. Статистическая теория поведения воздушных линий электропередачи под действием ветровой нагрузки / М. Морикава, А. Иноуэ // Сумитомо дэнки. – 1964. – № 86. – С. 27–41. – Перевод с японского № 67730/7. – М.: Бюро переводов ВИНТИ, 1967. – 54 с.

61. Никитина, Л. Г. О выборе тока плавки гололеда / Л. Г. Никитина, Р. М. Рудакова // Электрические станции. – 1992. – № 4. – С. 46–49.

62. Никифоров, Е. П. Распределение веса гололедообразования на проводах различного диаметра / Е. П. Никифоров // Труды ВНИИЭ. – М., 1961. – Вып. 11. – С. 274–288.

63. Никифоров, Е. П. Влияние закручивания провода на вес отложения гололеда // Труды ВНИИЭ. – М., 1963. – Вып. 15. – С. 220–226.

64. Никифоров, Е. П. Повышение эффективности удаления гололедообразований с проводов ВЛ / Е. П. Никифоров // Электрические станции. – 2004. – № 4. – С. 40–48.

65. Оценка опыта эксплуатации и эффективности применения УПГ в энергосистемах / А. А. Нейман, Г. А. Генрих, Л. А. Никонец, А. И. Коныхов // Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи: (Материалы II Всесоюзного совещания). – Уфа, 1975. – С. 17–20.

66. Пластинчатые гасители пляски проводов ВЛ / Р. М. Бекметьев, Ф. Х. Усманов, А. Ш. Жакаев, Ю. Ж. Байрамгулов, В. Ю. Кабашов // Электрические станции. – 1979. – № 10. – С. 64–66.

67. Повышение надежности работы воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше в гололедных условиях: тематический сборник аннотаций патентных и литературных материалов. – М.: Энергосетьпроект, 1971. – 136 с.

68. Попов, Н. И. Характеристики гололедно-изморозевого режима в горных районах / Н. И. Попов // Ветровые и гололедные воздействия на конструкции горных ВЛ. – М., 1986. – С. 49–57.

69. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд. с испр., изм. и доп. – СПб.: Деан, 2001. – 925 с.

70. Прокопович, С. П. Исследование динамических характеристик воздушных линий на опорах с вантовой траверсой при сбросе гололеда / С. П. Прокопович // Линии электропередачи повышенной пропускной способности. – Л., 1985. – С. 91–97.

71. Пустыльников, Л. Д. Метод гашения пляски проводов / Л. Д. Пустыльников, В. А. Шкапцов // Известия Академии наук. Энергетика. – 1992. – № 6. – С. 74–81.

72. Рудакова, Р. М. Технологические издержки при плавке гололеда на линиях электропередачи / Р. М. Рудакова, Ф. Х. Усманов, М. Б. Гузаиров // Электрические станции. – 1978. – № 4. – С. 50–53.

73. Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства. – М.: ВГПИ и НИИ «Сельэнергопроект», 1977. – июнь-июль. – 200 с.

74. Руководящие указания по плавке гололеда / В. В. Бургсдорф, А. Ф. Дьяков, Л. А. Никонец [и др.] – М.: Министерство топлива и энергетики Российской Федерации, 1993.

75. Савицкий, Г. А. Основы расчета радиомачт / Г. А. Савицкий. – М.: Связьиздат, 1953. – 271 с.

76. Смирнов, Б. И. Опыт эксплуатации и проектирование ВЛ, проблемы динамики проводов / Б. И. Смирнов // Энергохозяйство за рубежом. – 1987. – № 4. – С. 20–27.

77. Типовой проект Т-669–64 «Унифицированные деревянные опоры на железобетонных и деревянных приставках для одноцепных ВЛ 0,4; 6–10 и 35 кВ». – М.: ВНИПИсельэлектро, 1964.

78. Тищенко, Т. А. К вопросу механических колебаний линий электропередачи / Т. А. Тищенко // Известия высших учебных заведений. Энергетика. – 1976. – № 7. – С. 8–13.

79. Усманов, Ф. Х. Методика оценки экономической эффективности плавки гололеда в распределительных электрических сетях / Ф. Х. Усманов, Д. В. Холмский // Электромеханика: труды / Уфимский авиац. ин-т. – Уфа, 1970. – Вып. 12. – С. 127–134.

80. Усманов, Ф. Х. Пляска проводов в сельских сетях 6–10 кВ / Ф. Х. Усманов, А. Ф. Башкатов, В. А. Максимов // Электрические станции. – 1972. – № 11. – С. 63–65.

81. Усманов, Ф. Х. Плавка гололеда на ВЛ Башкирэнерго / Ф. Х. Усманов // Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи: (материалы II Всесоюзного совещания). – Уфа, 1975. – С. 10–17.

82. Усманов, Ф. Х. Активно-пассивные мероприятия по борьбе с пляской проводов ВЛ 6–10 кВ / Ф. Х. Усманов, В. А. Максимов // Тезисы докладов на семинаре «Методы и способы устранения колебаний проводов воздушных линий электропередачи», (27 февраля – 3 марта 1977 г.) / ВНИИЭ. – М., 1977. – С. 36–38.

83. Усманов, Ф. Х. Пляска проводов на воздушных линиях 6–10 кВ / Ф. Х. Усманов, Ю. Ж. Байрамгулов // Электрические станции. – 1978. – № 12. – С. 53–56.

84. Усманов, Ф. Х. Анализ отключений сельских ВЛ 6–10 кВ / Ф. Х. Усманов, В. Ю. Кабашов, В. А. Максимов // Электрические станции. – 1980. – № 8. – С. 56–58.

85. Усманов, Ф. Х. Испытание гасителей пляски проводов на ВЛ 6–10 кВ / Ф. Х. Усманов, Ю. Ж. Байрамгулов, В. Ю. Кабашов // Электрические станции. – 1981. – № 7. – С. 51–56.

86. Усманов, Ф. Х. Борьба с «пляской» и схлестыванием проводов в сельских сетях 6–10 кВ / Ф. Х. Усманов, Ю. Ж. Байрамгулов, В. Ю. Кабашов // Тезисы докладов на совещании «Повышение надежности электроснабжения сельского хозяйства», (28 сентября – 2 октября). – М., 1982. – С. 54.

87. Усманов, Ф. Х. Крутильные колебания проводов линий 6–10 кВ / Ф. Х. Усманов, Ю. Ж. Байрамгулов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1982. – № 3. – С. 57–58.

88. Усманов, Ф. Х. Повышение надежности ВЛ 6–10 кВ в условиях гололедно-ветровых нагрузок / Ф. Х. Усманов // Электрические станции. – 1984. – № 8. – С. 69–71.

89. Усманов, Ф. Х. Обеспечение надежности работы ВЛ в гололедных зонах / Ф. Х. Усманов, А. Л. Лившиц // Электрические станции. – 1986. – № 4. – С. 50–52.

90. Усманов, Ф. Х. Повышение надежности элементов пролета сельских ВЛ 10 кВ при ветре и гололеде / Ф. Х. Усманов, В. Ю. Кабашов // Энергетик. – 1988. – № 9. – С. 23–24.

91. Усманов, Ф. Х. Применение плавки гололеда с целью предотвращения пляски проводов ВЛ 6–10 кВ / Ф. Х. Усманов, В. Ю. Кабашов // Повышение эффективности сельскохозяйственной техники: научно-производственная конф.: (тез. докл.) / Башкирский СХИ. – Уфа, 1988. – С. 43–44.

92. Усманов, Ф. Х. Пляска проводов малых сечений / Ф. Х. Усманов, Ю. Ж. Байрамгулов // Электрические станции. – 1988. – № 9. – С. 72–76.

93. Усманов, Ф. Х. О расстоянии между фазными проводами сельских ВЛ 10 кВ / Ф. Х. Усманов, М. Т. Сулейманов, В. Ю. Кабашов // Энергетик. – 1989. – № 6. – С. 22–23.

94. Усманов, Ф. Х. Определение продолжительности плавки одно-сторонних гололедных отложений на проводах ВЛ 10 кВ / Ф. Х. Усманов, В. Ю. Кабашов, М. С. Шаяхметов // Известия высших учебных заведений. Энергетика. – 1989. – № 7. – С. 50–52.

95. Ущерб от перерывов электроснабжения потребителей сельских районов / И. А. Будзко, Н. М. Зуль, М. С. Левин и др. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1984. – № 12. – С. 39–40.

96. Хейвард. Экономическая эффективность ограничения пляски проводов / Хейвард, Полсон, Полман // Воздушные линии электропередачи: переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-82) / под ред. В. В. Бургсдорфа. – М., 1984. – С. 44–55.

97. Холодов, В. В. Влияние конструктивных параметров воздушных линий электропередачи на величину гололедных отложений на проводах / В. В. Холодов, Н. И. Попов // Метеорологические нагрузки на сооружения. – М., 1976. – С. 30–36. – (Труды Гл. геофизич. обсерватории им. А. И. Воейкова; Вып. 379).

98. Холодов, В. В. Особенности гололедных отложений на конструкциях горных ВЛ / В. В. Холодов // Ветровые и гололедные воздействия на конструкции горных ВЛ. – М., 1986. – С. 39–48.

99. Ширманов, П. М. Курс аэродинамики / П. М. Ширманов. – М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1949. – 464 с.

100. Шкапцов, В. А. Вибрационная диагностика проводов компактных линий 110, 330 и 500 кВ и методы защиты от колебаний, вызываемых ветром / В. А. Шкапцов // Электрические станции. – 1994. – № 9. – С. 55–59.

101. Экспериментальные исследования схлестывания проводов распределительных ЛЭП при неравномерной загрузке гололедом / Аратани Кадзуо, Коикэ Кидзо, Гото Кадзуо [и др.] // Дэнрёкү, Electrical Power. – 1964. – Vol. 48, № 3. – Р. 34–39.

102. Яковлев, Л. В. Изучение пляски проводов / Л. В. Яковлев // Электрические станции. – 1970. – № 7. – С. 49–51.

103. Яковлев, Л. В. Физическая сущность пляски проводов / Л. В. Яковлев // Электрические станции. – 1971. – № 10. – С. 45–49.

104. Яковлев, Л. В. Новая конструкция гасителей «пляски» проводов ВЛ / Л. В. Яковлев // Энергетик. – 2002. – № 4. – С. 25–27.

105. Яковлев, Л. В. Комплексные методы и устройства для защиты проводов и грозозащитных тросов ВЛ от вибрации, «пляски» и гололедообразования / Л. В. Яковлев // Энергетик. – 2004. – № 3. – С. 15–17.
106. Chadha J., Jaster W. Influence of turbulence on the galloping instability of iced conductors // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. – 1975. – Vol. 94, № 5. – P. 1489–1499.
107. D'Agati J. R., Champa P. J. Field inspection of overhead lines reduces potential outages // Electrical World. – 1975. – Vol. 184, № 4. – P. 42–43.
108. Fecko S. Kmitanie vodičov // Energetika (ČSSR). – 1980. – Vol. 30, № 4. – S. 155–158.
109. Illovaški Pavle. Raspored provodnika s obzirom na pojave «galopiranja» (poigravanja) istih // Electroprivreda. – 1961. – Vol. 14, № 7–8. – P. 379–382.
110. Konzeption ei nes Frühwarn-systems zum Seiltanzen an Hochspannungsfreileitungen / Allnoch Norbert, Jürdens Claus, Müller Hans-Christian, Werner Julius // Elektrizitäts-wirtschaft. – 1993. – Jg. 92, № 8. – S. 468, 470, 472, 475–476.
111. Morgan V. T., Swift D. A. Flashovers between ice-loaded conductors // Electrical Review. – 1965. – Vol. 176, № 3. – P. 85.
112. Nigol O., Havard D. G. Control of torsionally induced conductor galloping with detuning pendulums // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Paper A 78 125-7. – New York, 1978. – January 29–February 3. – 9 p.
113. Observations sur le terrain du phenomene de gallop des conducteurs des lignes aeriennes: Formes de gallop // Electra. – 1995. – № 162. – S. 96–113.
114. O'Donnell J., Whapham R. Galloping control device is evaluated // Transmission and Distribution. – 1984. – Vol. 36, № 3.
115. Shichiri Y., To B., Matsubayashi Y. Experiments of sleep jump by means of seil model // Сумитомо дэнки, Sumitomo Electrical Review. – 1958. – P. 185–197.
116. А. с. 227430 СССР, МКИ H02G7/14. Способ защиты воздушных электрических линий от пляски проводов / А. Я. Либерман (СССР). – № 730045/24–7; заявл. 10.05.61; опубл. 25.09.68, Бюл. № 30.

117. А. с. 390618 СССР, МКИ H02G7/14. Устройство для гашения пляски проводов / Р. М. Бекметьев, А. Ш. Жакаев, Б. Н. Конырбаев (СССР). – № 1407662/24–7; заявл. 26.11.70; опубл. 11.07.73, Бюл. № 30.
118. А. с. 556528 СССР, МКИ H02G7/14. Способ обнаружения «пляски» проводов воздушных линий электропередачи / М. И. Пронникова, А. И. Селивахин (СССР). – опубл. 1977, Бюл. № 16.
119. А. с. 616674 СССР, МКИ² H02G7/14. Устройство для предотвращения пляски проводов / А. Ф. Башкатов, Ю. Ж. Байрамгулов, В. Ю. Кабашов (СССР). – № 2418197/24–07; заявл. 09.11.76; опубл. 25.07.78, Бюл. № 27.
120. А. с. 700877 СССР, МКИ² H01B17/22, H02G7/14. Устройство для закрепления провода линии электропередачи / Ф. Х. Усманов, Ю. Ж. Байрамгулов, В. Ю. Кабашов (СССР). – № 2624977/24–07; заявл. 07.06.78; опубл. 30.11.79, Бюл. № 44.
121. А. с. 714509 СССР, МКИ² H01B5/08. Провод электропередачи / Ю. Ж. Байрамгулов, В. Ю. Кабашов (СССР). – № 2421332/24–07; заявл. 19.11.76; опубл. 05.02.80, Бюл. № 5.
122. А. с. 746799 СССР, МКИ² H02G7/14. Аэродинамический гаситель пляски проводов для линий электропередачи / В. Ю. Кабашов, Ю. Ж. Байрамгулов (СССР). – № 2573014/24–07; заявл. 25.01.78; опубл. 07.07.80, Бюл. № 25.
123. А. с. 890507 СССР, МКИ³ H02G7/14. Устройство для предотвращения колебаний проводов / В. Ю. Кабашов, Р. З. Шайхитдинов (СССР). – № 2903268/24–07; заявл. 01.04.80; опубл. 15.12.81, Бюл. № 46.
124. А. с. 902129 СССР, МКИ³ H02G7/16. Устройство для удаления гололедных отложений / Ф. Х. Усманов, В. Ю. Кабашов, Р. З. Шайхитдинов (СССР). – № 2914736/24–07; заявл. 22.04.80; опубл. 30.01.82, Бюл. № 4.
125. А. с. 917247 СССР, МКИ³ H02G7/14. Устройство для гашения пляски проводов / В. Ю. Кабашов, Р. З. Шайхитдинов, В. А. Максимов (СССР). – № 2872906/24–07; заявл. 23.01.80; опубл. 30.03.82, Бюл. № 12.
126. А. с. 928490 СССР, МКИ³ H02G7/14. Датчик обнаружения пляски проводов / Р. М. Рудакова, М. Б. Гузаиров, Ю. А. Драпеко (СССР). – № 2920421/24–07; заявл. 06.05.80; опубл. 1982, Бюл. № 18.

127. А. с. 936148 СССР, МКИ³ H02G7/14. Устройство для предотвращения колебаний проводов / Ф. Х. Усманов, В. Ю. Кабашов, Ю. Ж. Байрамгулов, В. А. Максимов (СССР). – № 2809431/24–07; заявл. 08.08.79; опубл. 15.06.82, Бюл. № 22.
128. А. с. 936149 СССР, МКИ³ H02G7/16, H02G7/14. Устройство для удаления гололедных отложений / Ф. Х. Усманов, В. Ю. Кабашов, Р. З. Шайхитдинов (СССР). – № 2929276/24–07; заявл. 23.05.80; опубл. 15.06.82, Бюл. № 22.
129. А. с. 957332 СССР, МКИ³ H02G7/16. Устройство для удаления гололедных отложений / В. Ю. Кабашов (СССР). – № 3215097/24–07; заявл. 04.12.80; опубл. 07.09.82, Бюл. № 33.
130. А. с. 959199 СССР, МКИ³ H02G7/14. Устройство для гашения «пляски» проводов / В. Ю. Кабашов, Р. З. Шайхитдинов (СССР). – № 2892756/24–07; заявл. 12.03.80; опубл. 15.09.82, Бюл. № 34.
131. А. с. 1243059 СССР, МКИ⁴ H02G7/14. Устройство для гашения пляски проводов / В. Ю. Кабашов, Р. З. Шайхитдинов (СССР). – № 3595235/24–07; заявл. 23.05.83; опубл. 07.07.86, Бюл. № 25.
132. А. с. 1330687 СССР, МКИ⁴ H02G7/16. Устройство для контроля уровня гололедной нагрузки на проводе / В. Ю. Кабашов (СССР). – № 3979189/24–07; заявл. 25.11.85; опубл. 15.08.87, Бюл. № 30.
133. А. с. 1398010 СССР, МКИ⁴ H02G7/16. Способ определения величины гололедных отложений / Ф. Х. Усманов, В. Ю. Кабашов (СССР). – № 4108626/24–07; заявл. 23.06.86; опубл. 23.05.88, Бюл. № 19.
134. А. с. 1436166 СССР, МКИ⁴ H02G7/14, 7/16. Датчик обнаружения пляски проводов / В. Ю. Кабашов (СССР). – № 4204419/24–07; заявл. 28.01.87; опубл. 07.11.88, Бюл. № 41.
135. А. с. 1476560 СССР, МКИ⁴ H02G7/16. Устройство для контроля гололедообразования / Ф. Х. Усманов, В. Ю. Кабашов (СССР). – № 4191790/24–07; заявл. 09.02.87; опубл. 30.04.89, Бюл. № 16.
136. А. с. 1479997 СССР, МКИ⁴ H02G7/14. Датчик обнаружения пляски проводов / В. Ю. Кабашов (СССР). – № 4238251/24–07; заявл. 01.04.87; опубл. 15.05.89, Бюл. № 18.

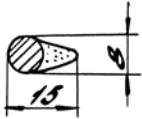
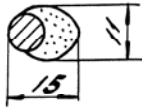
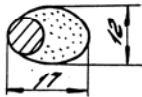
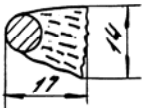
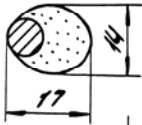
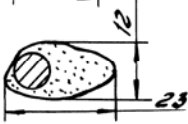
137. Пат. 2017297 Российская Федерация, МКИ⁵ H02G7/14. Способ определения пляски проводов / Кабашов В. Ю.; заявитель и патентообладатель Кабашов В. Ю. – № 5018260; заявл. 20.12.91; опубл. 30.07.94, Бюл. № 14.

138. Пат. 2016450 Российская Федерация, МКИ⁵ H02G7/14, H02G7/16. Способ обнаружения гололеда и «пляски» проводов на воздушных линиях электропередачи / Аманмамедов Ч. А., Карабаев Г. Х., Кулиев Т. А., Суханов С. С.; заявитель и патентообладатель Туркм. политехн. ин-т. – № 5016244/07; заявл. 09.12.91; опубл. 15.07.94, Бюл. № 13.

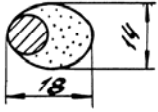
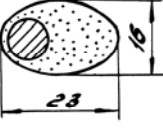
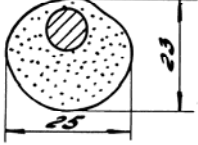

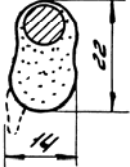
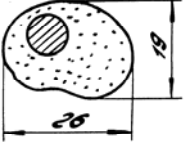
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1

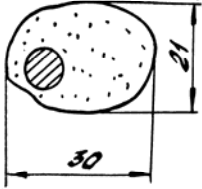
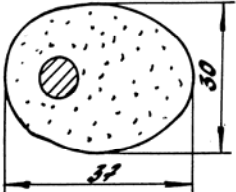
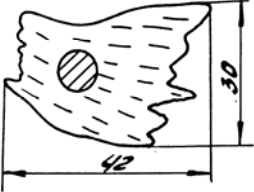
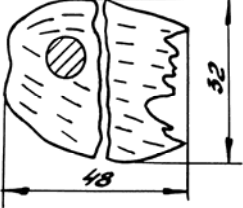
РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ЗАКРУЧИВАНИЕМ ПРОВОДОВ,
ПОКРЫТЫХ ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ

Вид отложения	Форма и размеры отложения, мм	Плотность отложения, г/см ³	Масса отложения, кг/м	Угол закручивания провода, рад.
1	2	3	4	5
Гололед прозрачный		0,47	0,027	0,17
Гололед прозрачный		0,82	0,076	0,61
Гололед прозрачный		0,84	0,1	0,87
Изморозь зернистая		0,25	0,042	0,35
Гололед прозрачный		0,85	0,13	1,05
Гололед мутный		0,48	0,088	0,79

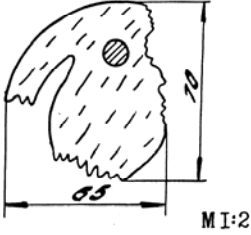
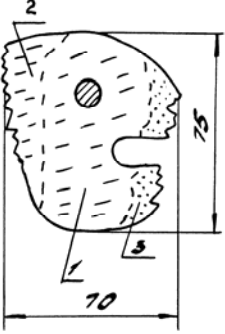
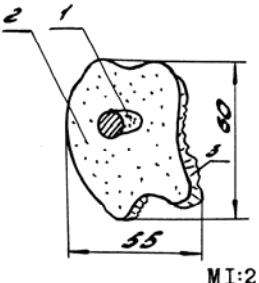
Продолжение приложения А

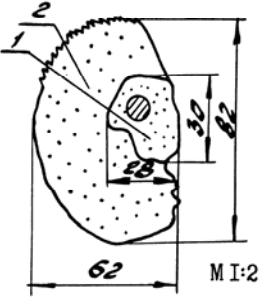
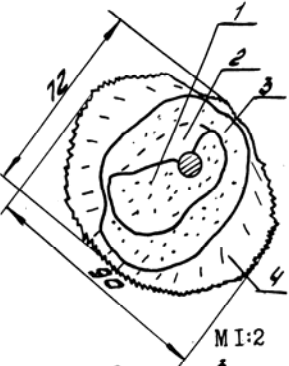
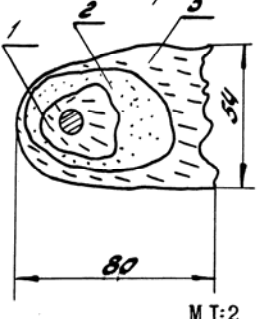
1	2	3	4	5
Гололед прозрачный		0,85	0,14	1,31
Гололед прозрачный		0,89	0,23	2,09
Гололед прозрачный		0,76	0,33	3,05
Гололед мутный		0,55	0,26	2,53
Гололед прозрачный		0,82	0,17	1,40
Гололед прозрачный		0,67	0,25	2,44

Продолжение приложения А

1	2	3	4	5
Гололед прозрачный		0,78	0,36	3,14
Гололед прозрачный		0,76	0,66	4,19
Изморозь зернистая (с внутренней прослойкой мутного гололеда)		0,30	0,32	3,05
Изморозь зернистая		0,17	0,2	1,66

Продолжение приложения А

1	2	3	4	5
Изморозь зернистая		0,17	0,61	4,19
Отложение сложное: 1-изморозь зернистая; 2-изморозь кристаллическая; 3-гололед мутный		0,19	0,99	5,06
Отложение сложное: 1-гололед прозрачный; 2-гололед мутный; 3- изморозь зернистая		0,41	1,21	5,41

1	2	3	4	5
<p>Отложение сложное: 1-гололед прозрачный; 2-гололед мутный</p>		0,47	1,85	6,19
<p>Отложение сложное: 1-гололед прозрачный; 2, 3 -гололед мутный; 4-изморозь зернистая</p>		0,32	1,64	5,93
<p>Отложение сложное: 1- изморозь зернистая; 2-гололед мутный; 3- изморозь зернистая</p>		0,42	1,42	5,76

Кабашов В.Ю.

**ЗАЩИТА СЕЛЬСКИХ ВОЗДУШНЫХ
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 6–10 кВ
ОТ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРОВОДОВ
ПРИ ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВЫХ НАГРУЗКАХ**

Монография

ООО «Издательство «Здравоохранение Башкортостана»
450000, РБ, г. Уфа, а/я 1293; тел./факс (347) 250-13-82.
E-mail: gigo07@mail.ru.

Подписано в печать 25.10. 2010 г.
Формат 60×84/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 9,76. Уч.-изд. л. 7,70.
Тираж 1000. Заказ № 579.