

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

УДК 621.315

На правах рукописи

АБИТАЕВА РАХИМАШ ШАНРАКБАЕВНА

**Повышение надежности воздушных линий электропередач сверхвысокого
напряжения в условиях воздействия гололедно-ветровых нагрузок**

6D071800 – Электроэнергетика

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант
доктор технических наук,
профессор
А.Б. Бекбаев

Зарубежный научный консультант
доктор технических наук,
профессор
В.В. Титков

Республика Казахстан
Алматы, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	4
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Основные сведения о пляске проводов и гололедообразовании.....	10
1.2 Современное состояние и постановка задач.....	17
1.3 Основные характеристики и причины пляски проводов.....	25
Выводы по первому разделу.....	30
2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ	32
2.1 Возникновение и интенсивность пляски в зависимости от скорости ветра.....	32
2.2 Анализ продолжительности пляски проводов.....	35
2.3 Анализ последствий пляски проводов на воздушных линиях.....	40
Выводы по второму разделу	42
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ РАСЩЕПЛЕННОЙ ФАЗЫ.....	44
3.1 Исследование пляски проводов расщепленной фазы	44
3.2 Свободное крутильное колебание расщепленного провода ВЛ.....	49
3.2.1 Уравнение крутильного движения расщепленного провода.....	49
3.3 Собственные частоты поперечного и крутильного движения расщепленного провода.....	53
3.4 Крутильная жесткость расщепленной фазы.....	54
Выводы по третьему разделу.....	56
4 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ	58
4.1 Характеристика сил, действующих на провод при пляске	58
4.2 Математическая модель пляски расщепленной фазы без учета движения гирлянды изоляторов.....	60
4.3 Математическая модель пляски расщепленной фазы с учетом движения гирлянды изоляторов.....	73
4.4 Диапазон ожидаемой интенсивности пляски и влияние скорости ветра при изменении длины пролета.....	80
4.5 Методы борьбы с пляской проводов.....	89
4.5.1 Анализ активных мер по борьбе с пляской проводов.....	89
4.5.2 Анализ пассивных мер по борьбе с пляской проводов.....	92
4.5.3 Разработка полезной модели (патент) по борьбе с пляской проводов.....	96
Выводы по четвертому разделу.....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	102
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	104
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Патент.....	112

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Шаблон MATLAB-кода для построения графика линейного перемещения $\alpha(t)$, решая уравнение второго порядка с заданными параметрами.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Шаблон MATLAB-кода, график зависимости критической скорости ветра от диаметра провода.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Шаблон MATLAB-кода, 3D-график зависимости критической скорости ветра от диаметра провода и расчётного усилия...	118
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Шаблоны MATLAB-кода, график зависимости критической скорости ветра от диаметра провода при фиксированном значении расчётного усилия.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Шаблоны MATLAB-кода, график зависимости критической скорости ветра от расчётного усилия при фиксированном значении диаметра провода.....	120

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 7.1-2003. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

Приказ Министра энергетики Республики Казахстан. Об утверждении Правил устройства электроустановок: утв. 20 марта 2015 года, №230 (зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 29 апреля 2015 года, №10851).

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВЛЭП	– воздушные линии электропередачи
ВЛ	– воздушные линии
ЛЭП	– линии электропередачи
РП	– расщепленные провода
РФ	– расщепленная фаза
ВЛ	– воздушная линия
СВН	– линия сверхвысокого напряжения
КЗ	– короткие замыкания
АО	– АО «Казахстанская компания по управлению электрическими
КЕГОК	сетями»
МЭС	– межсистемные электрические сети
ПУЭ	– правила устройства электроустановок
GA	– Grid availability - доступность сети (%)
AIT	– Average Interruption Time - среднее время прерывания (мин)
ENS	– недоотпуск электроэнергии (тыс. кВт·ч.)
LTIFR	– Lost Time Injury Frequency Rate – частота травм с потерей трудоспособности
SAIDI	– System Average Interruption Duration Index – средняя продолжительность перерыва электроснабжения потребителей (мин)
SAIFI	– System Average Interruption Frequency Index – средняя частота перерывов электроснабжения потребителей
СИГРЭ	– Международный Совет по большим электрическим системам ВН
CIGRE	– Conseil International des Grands Réseaux Électriques

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Во всем мире передача электроэнергии на большие расстояния осуществляется по воздушным электрическим сетям. Требования, которые предъявляются к воздушным линиям электропередачи – это бесперебойное электроснабжение потребителей электрической энергией надлежащего качества. Электрические сети подвержены опасным метеорологическим воздействиям и одно из которых связано с гололедно-ветровыми нагрузками, которые могут привести к перерыву электроснабжения больших промышленных районов и центров.

Устойчивые низкочастотные колебания одиночного провода или расщеплённой фазы в целом, вызванные давлением ветра и подъёмной силой, возникающей из-за несимметричности профиля, принято называть "пляской" (в странах ближнего зарубежья) или "галопированием" (в странах дальнего зарубежья). Под галопированием понимаются низкочастотные колебания (0,2-2,0 Гц) большой амплитуды, которые происходят в основном в горизонтальной плоскости с образованием двух или трёх (а иногда и более) полуволн в пролёте.

Явление пляски возникает при ветре и образовании гололеда на проводах. Оно может быть продолжительностью несколько часов, но может продолжаться и до нескольких суток. При колебаниях проводов с большой амплитудой опоры воздушных ЛЭП испытывают большие динамические нагрузки, нередко случай схлестывания проводов фаз. Поэтому в результате явления пляски происходят оплавления и пережоги проводов, повреждения и поломки опор, гирлянд изоляторов и других элементов электрических сетей. При этом длительность перерыва электроснабжения линии, для устранения возникших повреждений, иногда достигает значительного времени и исчисляется не только часами, но и несколькими сутками.

Бурный рост строительства и выгодность применения воздушных ЛЭП при передаче электроэнергии на большие расстояния за последние годы привело к тому, что все большее внимание инженеров и научных работников многих стран обращено к изучению явления пляски проводов. Такими исследованиями усиленно занимаются в США, Канаде, Англии, Бельгии, Дании, Норвегии, Франции, Японии, Китае и т.д. Развернуты исследования и в ближайших соседних с нами странах, таких как, Украина, Белоруссия и Россия.

Пляска проводов изучается давно, но до настоящего времени еще не совсем найдены эффективные меры борьбы с ней. Таким образом, пляска обледенелых проводов во всем мире является одной из основных проблем в области проектирования и эксплуатации воздушных линий электропередачи. Она существенно влияет на габариты, стоимость и надежность линий. В настоящее время наиболее актуальными задачами для энергосистемы Казахстана в этой области являются:

1. Уточнение условий благоприятствующих опасной пляске проводов.
2. Определение территорий, где возможно возникновение пляски проводов, которое необходимо учитывать при сооружении и эксплуатации

воздушных ЛЭП, т.е. составления карты районирования территорий по частоте возникновения пляски.

3. Определение параметров колебательного процесса.

4. Разработка наиболее эффективных и экономичных средств (гасителей) для ограничения и подавления пляски проводов.

В связи с этим, возникает необходимость комплексного исследования (статистика, теория и эксперимент) явления пляски проводов ВЛЭП. Основным критерием для оценки возможной подверженности ВЛ пляске служат статистические данные, обобщающие опыт эксплуатации электрических сетей. Основная цель разработки теоретических вопросов пляски заключается в составлении общей математической модели, позволяющей при заданных условиях определить главные характеристики колебательного процесса – интенсивность пляски, число полуволн, частоту, динамическую нагрузку и условия аэродинамической неустойчивости проводов с гололедным осадком в ветровом потоке. Основная цель экспериментальных исследований является оценка эффективности тех или иных мер борьбы с пляской, кроме того оценка некоторых параметров линий (оценка декрементов колебания, крутильной жесткости одиночных и расщепленных фаз, частотных характеристик и т.д.), необходимых для решения ряда прикладных задач. Результаты таких исследований должны послужить для повышения надежности воздушных линий электропередачи.

Целью работы является повышение надежности воздушных линий электропередач сверхвысокого напряжения в условиях воздействия гололедно-ветровых нагрузок.

Задачи докторской диссертации

1. Установить статистика – вероятностные зависимости пляски проводов от различных факторов (формы и ориентировочных размеров гололедного осадка, скорости воздушного потока и его ориентация относительно воздушной линий, климатических условий, а также от параметров пляски) на примере анализа статистических данных за годы эксплуатации ВЛЭП.

2. Провести теоретические исследования свободных колебаний расщепленных проводов. В дальнейшем используются при разработке математической модели пляски проводов.

3. Разработать математическую модель пляски проводов ВЛ при воздействии гололедно-ветровых нагрузок.

4. Проверить достоверность математической модели (сопоставление с экспериментальными данными, сравнение с данными других источников) и провести анализ методов борьбы с явлением пляски проводов (на уровне изобретений).

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются физические процессы взаимных перемещений проводов расщепленной фазы воздушных линий электропередач сверхвысокого напряжением при различных видах их низкочастотных колебаний, возникающих в условиях ветровых и гололедных нагрузок.

Методы исследования. Исследование основано на данных и информациях, собранных как из рецензируемой литературы, так и из отчетов государственных органов, которые обеспечили современный анализ пляски проводов.

В работе использованы методы математической статистики, методы теории колебаний и теоретической механики; уравнения Лагранжа; методы теории вероятностей и математической статистики при определении закона распределения амплитуд пляски проводов и обработке полученных экспериментальных данных. Для выполнения технических задач применялись методы экспериментального и количественного исследования, основанные на обработке данных в программных средах MathCAD, Excel и Microsoft Visio с применением средств написания макросов и построения графиков.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Исследование и анализ механизма возникновения пляски проводов.
2. Определение в заимосвязи пляски проводов с внешними погодными условиями и их влияние на характер протекания пляски проводов на основе статистических данных пляски проводов на воздушных линиях.
3. Результаты исследования свободного крутильного колебания расщепленного провода.
4. Математическая модель пляски проводов с учетом нелинейности исследуемого объекта.
5. Результаты анализа различных способов борьбы с явлениями пляски проводов (на уровне изобретений).

Теоретическая и практическая значимость исследования заключается в возможности использования научных и практических результатов исследований в повышении надежности и защите от обрыва проводов воздушных линий электропередачи из-за гололедно-ветровых воздействий. Выбор метода гашения пляски проводов ВЛЭП и рекомендации при разработке гасителей.

Реализация результатов работы:

1. При эксплуатации, а также при проектировании новых воздушных ЛЭП или реконструкции существующих с учетом пляски проводов (обоснованный выбор габаритов ВЛЭП).
2. При разработке мер борьбы с явлениями пляски проводов (на основе анализа периодических решений уравнения движения и условий аэродинамической неустойчивости ВЛ с гололедным осадком в ветровом потоке) и при расчете параметров гасителей пляски.
3. Материалы выполненных в диссертации исследований используются в учебном процессе кафедры «Энергетика» при КазНУТУ имени К.И. Сатпаева для ОП: 6B07128 - «Цифровая энергетика», 6B07101 – «Энергетика».

Обоснование и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются публикациями в изданиях, рекомендованных Комитет по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан

(КОКСНВО МНВО РК); апробацией в отечественных и международных научных конференциях, а также патентом РК.

Связь работы с планом государственных научных программ. Научные исследования по теме диссертаций проведены в соответствии с планами НИР кафедры «Энергетика» КазННТУ имени К.И. Сатпаева в рамках государственного образовательного гранта по докторантуре.

Апробация работы и публикаций. результаты работы доложены на:

- в семирном Конгрессе инженеров и ученых: «Энергия будущего: инновационные сценарии и методы их реализации» (Астана, 2017 – 19-20 июня);

- на научных семинарах кафедры «Энергетика» КазННТУ имени К.И. Сатпаева.

По теме диссертационного исследования было опубликовано 17 печатных работ, из них две статьи в журнале и статья в Международной конференции, входящих в базу данных Scopus, 4 статьи – в изданиях, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК, а также 9 публикации в Международных конференциях и Всемирном Конгрессе инженеров и ученых, патент РК (Приложение А).

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 разделов и заключения. Общий объем работы содержит 111 страниц машинописного текста, 33 рисунка, 12 таблиц, список использованной литературы из 120 наименований и 6 приложений.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Основные сведения о пляске проводов и гололедообразовании

Воздушная линия электропередачи является весьма протяжённым сооружением, постоянно подвергающимся воздействию различных атмосферно-климатических факторов.

Динамическое действие ветра – это основная причина колебаний (пляска, вибрация), которые возникают в отдельных элементах линии, или могут охватывать её всю, включая опоры [1-6]. Динамические нагрузки районированы по территории РК и выбираются в соответствии с рекомендациями нормативного документа «Правила устройства электроустановок» (ПУЭ). Концептуальные решения, формирующие стратегию развития энергетической отрасли большинства стран мира, во многом определяются работой СИГРЭ (Conseil International des Grands Réseaux Électriques, CIGRE) – это Международный Совет по большим электрическим системам высокого напряжения [7]. Эта организация, созданная во Франции в 1921 г., на сегодняшний день является самой авторитетной научно-технической ассоциацией, объединяющих ученых и специалистов-энергетиков всего мира [8-14].

В процессе эксплуатации ВЛ сверхвысокого напряжения наблюдаются различные виды колебаний проводов.

Исследование колебаний проводов и разработка мероприятий по борьбе с ними являются одной из важнейших проблем, связанных с надёжной работой ВЛ. Снижение надёжности работы электрических сетей особенно характерно для гололедных районов, где воздушные линии электропередачи подвержены опасным метеорологическим воздействиям.

В настоящее время наиболее актуальными и требующими внимания, в особенности применительно к воздушным линиям сверхвысокого напряжения, является пляска проводов. Причиной такого явления некоторые авторы считают наличие подъёмной силы у проводов некруглого сечения. Но, колебания наблюдались и у круглых проводов, где подъёмная сила и аэродинамический момент были равны нулю. В следствие этого, на сегодняшний день так и нет полного понимания природы возникновения пляски проводов.

Пляска проводов бывает разного вида. К примеру, на одном пролете наблюдали пляску одной фазы с одной полуволной, где провод опускался в середине пролета, не доходя до земли 4-5 м, и поднимался до уровня тросов, на двух других фазах была пляска с двумя и четырьмя полуволнами и двойной амплитудой соответственно 5-6, а также 2-3 м. Движение проводов при пляске происходит не только в вертикальной плоскости, но и в горизонтальной. Опасной считается пляска с одной полуволной, когда может произойти схлестывание провода с тросом при подъеме провода до уровня тросов и выше. При таких случаях чаще всего движение провода в смежных промежуточных пролетах происходит согласовано. При подъеме провода в одном пролете в

соседних пролетах провод опускается, при этом гирлянды на промежуточной опоре отклоняются в сторону пролета, в котором провод идет вниз.

Частота колебаний при пляске зависит от длины волны и соответствует собственной частоте колебаний провода и определяется по формуле (1):

$$f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{T}{m}}, \quad (1.1)$$

где f – частота, Гц;

λ – длина волны, м;

T – тяжение в проводе с гололедом, Н;

m – удельная масса провода с гололедом, кг/м.

Они могут служить причиной коротких замыканий с перекрытиями и термическими перегрузками, приводящими в результате к пережогу провода, могут быть причиной перерывов электроснабжения. Кроме того, они могут вызывать недоотпуск электроэнергии при необходимости выполнения ремонта. Такие колебания создают также дополнительные динамические нагрузки на элементы конструкции ВЛ, которые ухудшают их механические свойства. Известно, что низкочастотные колебания способствуют износу проводов и разрушению распорок [5, с. 17-24; 15].

Наиболее интенсивная пляска проводов возникает при отложении гололеда. Аварии при гололедно-ветровых нагрузках парализуют систему энергоснабжения потребителей вследствие массовых обрывов проводов, разрушения арматуры, изоляции и поломок опор ВЛ [1, с. 4-262; 2, с. 3-150; 4, с. 3-71].

Понятие гололеда объединяет в себя различные виды твердых осадков: изморози (кристаллической и зернистой), гололеда (стекловидный и матовый), мокрого снега, а также смеси этих осадков. Гололед можно охарактеризовать: формой отложений и их плотностью, диаметром гололедной муфты, интенсивностью нарастания отложений [1, с. 3-266; 2, с. 3-150; 4, с. 3-71; 16, 17]. Процесс гололедообразования может длиться от нескольких часов или суток до 2-3 месяцев с колебаниями интенсивности или временным прекращением. При продолжительном процессе возникают особо опасные отложения на проводах и тросах массой 10-20 кг/м (удельная нагрузка 100-200 Н/м) и более.

Большую опасность для ВЛ представляет отложение гололеда, изморози и мокрого снега на проводах с точки зрения, как статических, так и динамических нагрузок в виде колебаний различных типов. Наибольшую опасность для ВЛ представляет «ледяной дождь» – гололед, образующийся при выпадении переохлажденного дождя перед медленно движущимся теплым фронтом (20-25 км/ч).

В зависимости от температуры, направления и скорости ветра различают цилиндрическую, овальную и гребневидную формы гололедных отложений. На форму и массу гололедных отложений также влияют параметры ВЛ: высота

подвеса провода, диаметр провода, жесткость проводов и режим работы энергосистемы.

Односторонние отложения гололеда при воздействии ветра на провода и тросы создают условия аналогичные аэродинамической подъемной силе, действующей на крыло самолета. Амплитуда и частота пляски зависят от силы и направления ветра, формы гололедных отложений и конструктивных особенностей линий. Климатические условия, вызывающие пляску, могут быть определены почти точно. Опыт показал, что основные условия – это температура около точки замерзания и скорость ветра более 5-6 м/с, т.е. условия, когда гололёд и снег могут осесть на проводах, образуя крыловидный аэродинамический профиль [4, с. 3-71].

Отложение гололеда на проводах и тросах, увеличивает их вес. При этом возрастает тяжение в проводах, а также стрелы провеса. Образование гололеда усложняет эксплуатацию ВЛ. Гололедные отложения создают внешние механические нагрузки на опоры линии электропередачи. Для каждой территории в зависимости от климатических условий уровень нагрузок различный. Учет этих нагрузок регламентируется ПУЭ. Особенно большие нагрузки возникают при пляске проводов и грозозащитных тросов.

Отложения гололеда могут вызывать: разрегулировку тросов и проводов и их сближение между собой; сближение проводов и тросов при подскоке вследствие одновременного сброса гололеда; интенсивную пляску, вызывающую короткие замыкания между проводами и тросами, ожоги проводов и тросов, а в некоторых случаях повреждения линейной арматуры и креплений; значительную перегрузку проводов и тросов и их обрывы; перегрузку и поломку траверс.

Пляска проводов является результатом воздействия на провод периодически изменяющейся подъемной силы и аэродинамического момента, возникающие при его обтекании равномерным воздушным потоком и представляют серьезную опасность для прочности и надёжности линий электропередач. Первые крупные аварии, вызванные этим явлением, продемонстрировали недостаточность знаний и технологий для борьбы с ним, что требовало системного подхода и научных исследований. Одной из первых крупных аварий, вызванных пляской, стало событие 1961 года на линиях 400-500 кВ Волжская ГЭС – Москва.

В настоящее время, при разработке мер борьбы с пляской проводов в основном используются опытные участки ВЛ. Следует отметить, что в некоторых странах построены опытные полигоны для исследования гололедно – ветровых воздействий на ВЛ6-1150 кВ. Пляска на этих линиях возбуждается путем прикрепления к проводам специальных имитаторов гололеда (обтекателей), имеющих неустойчивую аэродинамическую характеристику. В частности, такими обтекателями (D – образными и каплеобразными) был в свое время оснащен опытный полигон КазНИИ Энергетики им. академика Ш. Чокина.

Далее мы посмотрим на статистику аварийных отключений межсистемных электрических сетей АО «KEGOC», включая по причине пляски проводов с 2006 по 2024 годы (рисунок 1).

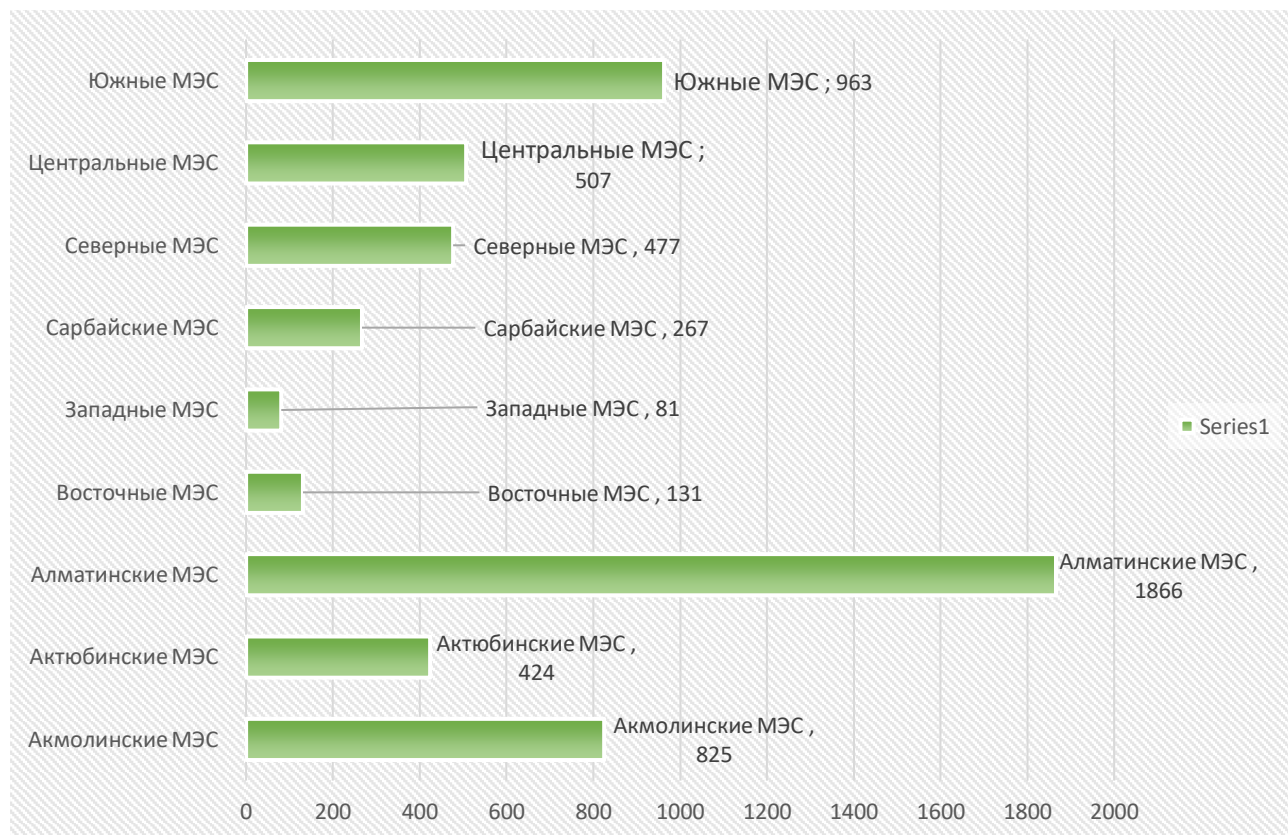


Рисунок 1 – Аварийные отключения ВЛ за 2006-2024 гг.

Ежегодно на территории Казахстана воздушные линии подвергаются воздействию гололедно-ветровым явлениям, в осенний, зимний и весенний период. Серьезные гололедные воздействия, и как следствие пляска проводов, выражены в поломках конструкций опор сверхвысокого напряжения, изоляции, арматуры, обрывах проводов и грозотросов. Наиболее частому воздействию гололедных нагрузок по статистике подвержены линии электропередач с напряжением 220-500 кВ (рисунок 2).

Так, например, анализ данных эксплуатации линий электропередач компании АО «KEGOC» показывает, что за период с 2014 по 2024 годы было зафиксировано 82 случая пляски проводов на линиях с различными классами напряжения (рисунок 3). В результате пляски были повреждены опоры, провода и арматура.

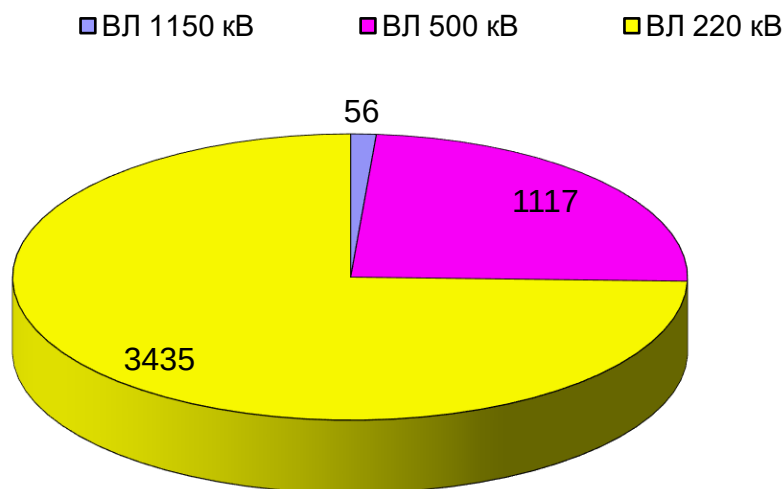


Рисунок 2 – Количество аварийных отключений ВЛ по классу напряжения

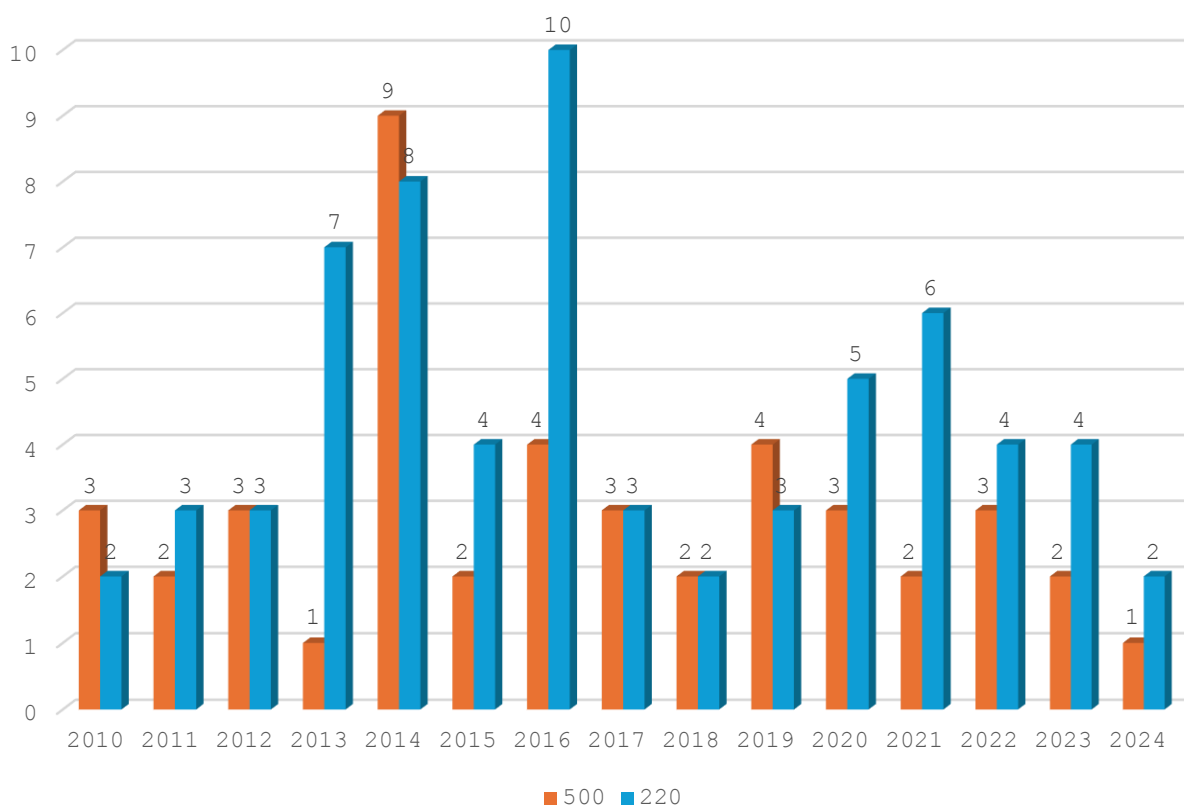


Рисунок 3 – Число случаев пляски проводов ВЛ по классу напряжения

Следует отметить, что больше всего подвержены влиянию метеоусловий воздушные линии электропередачи в центральных и северных регионах Казахстана (рисунок 4). К примеру, по данным пресс-службы АО «KEGOC» из-

за неблагоприятных погодных условий 7 и 8 ноября 2009 года произошло отключение ВЛ–500 кВ Л–5120 «Экибастузская ГРЭС-1 - Нура», с оставляющей т ранзит «Север-Юг Казахстана», кроме того, был зафиксирован ряд отключений ВЛ 220 кВ в Карагандинском регионе.

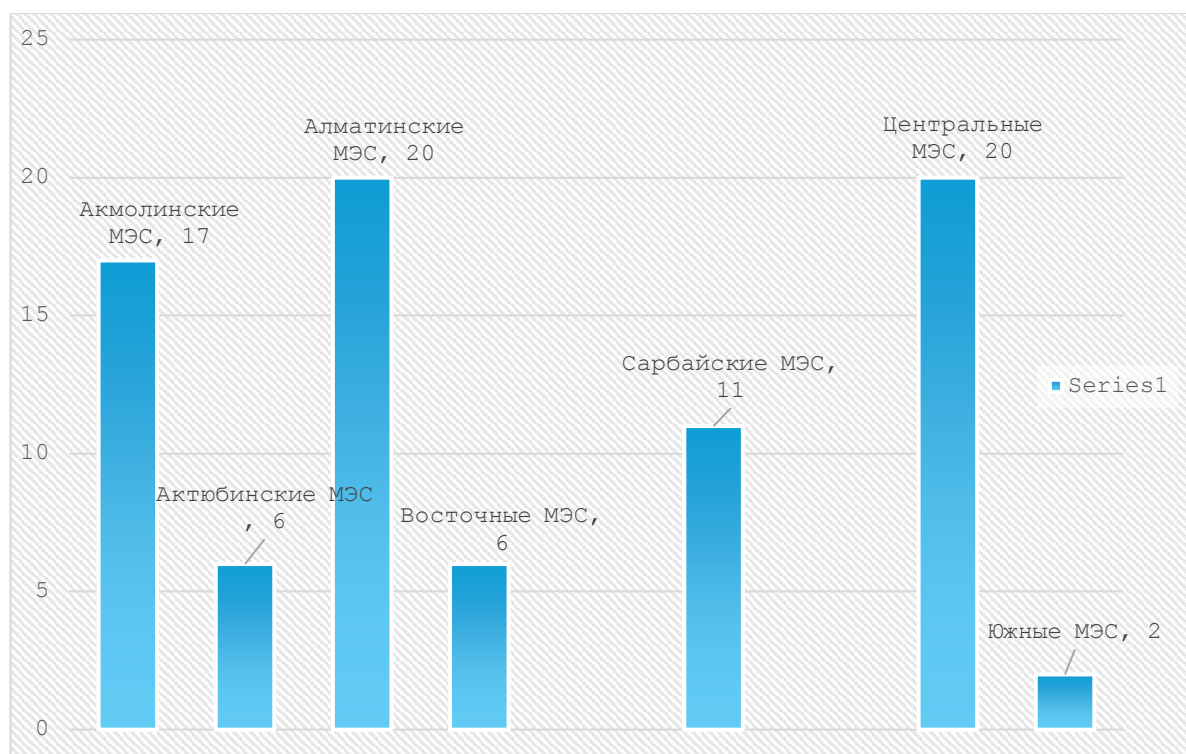


Рисунок 4 – Число случаев пляски проводов ВЛ

В РК эксплуатируется около 50 тыс. км воздушных линий электропередачи н апряжением 35-500 кВ. По данным пресс – службы АО «KEGOC» за 2021 год произошло 309 аварийных отключений, в 129 случаях нормальная работа сети сохранена успешным действием устройств автоматического повторного в ключения, в 180 случае произошли отключения с неуспешным АПВ. За 2022 год в электрических сетях произошло 202 аварийных отключения, в 99 случаях устойчивая работа сети сохранена успешным действием устройств а втоматического повторного включения, в 103 случаях произошли отключения с неуспешным АПВ.

За соответствующий период 2023 года произошло 98 аварийных отключений, в 43 случаях нормальная работа сети сохранена успешным действием устройств автоматического повторного включения, в 55 случаях произошли отключения с неуспешным АПВ.

В первом полугодии 2024 года в электрических сетях АО «KEGOC» произошло уже 152 аварийных отключения, в 85 случаях устойчивая работа сети сохранена успешным действием устройств автоматического повторного включения, в 67 случаях произошли отключения с неуспешным АПВ.

Общее количество аварийных отключений возросло на 55% (с 98 до 152), количество отключений с неуспешным АПВ возросло на 22% (с 55 до 67).

Общее количество технологических нарушений увеличилось на 30%.

Из общего числа причин отказов некоторая часть составляют воздействия с верх расчётных гололедно-ветровых воздействий (рисунок 5) на провода, тросы, опоры. Такие аварии сопровождаются большим числом разрушений и обуславливают время восстановления ВЛЭП от нескольких часов до нескольких суток. Возникает недоотпуск электроэнергии из-за гололедно-ветровых аварий, и оно достигает 15-20% от общего годового недоотпуска из-за отказов по всей стране.

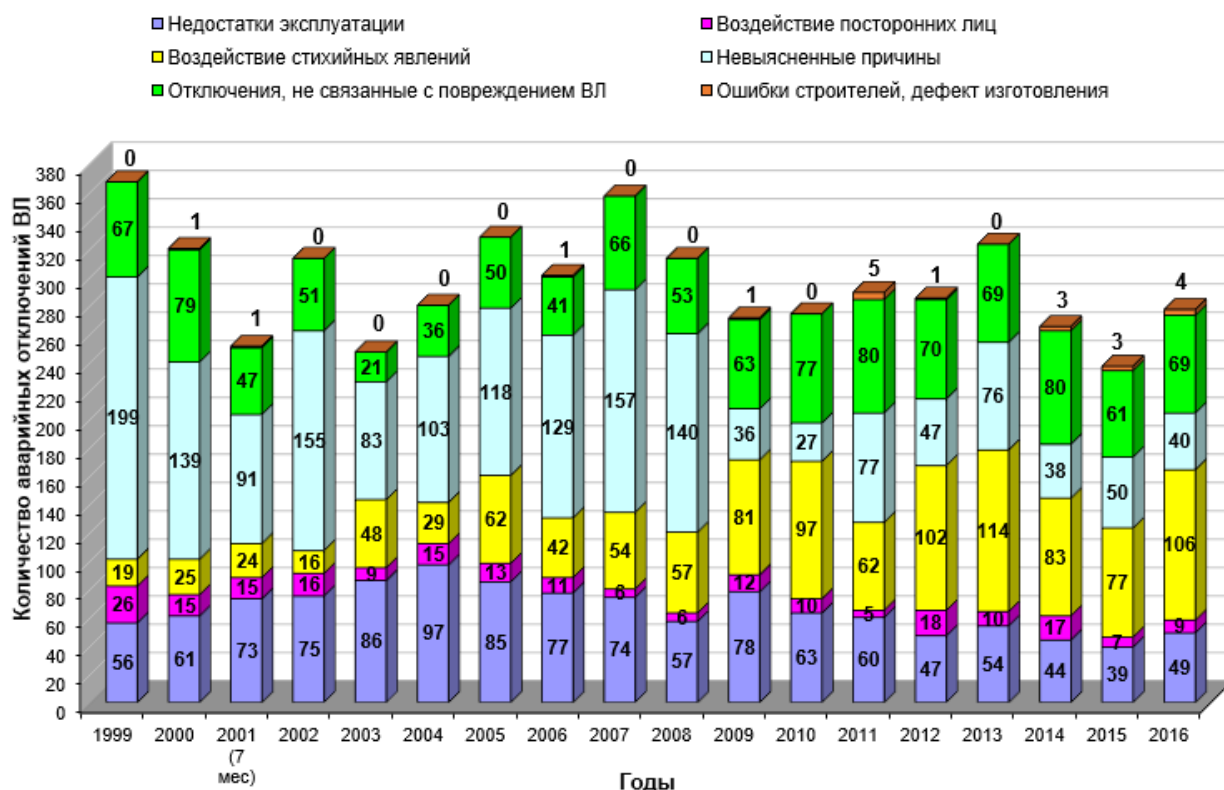


Рисунок 5 – Количество и причины аварийных отключений ВЛ

В 1 полугодии 2024 года на линиях электропередачи произошло 22 технологических нарушения, что составляет 85% от общего количества технологических нарушений. Количество данного вида технологических нарушений по сравнению с аналогичным периодом 2023 г. возросло на 22%.

Технологические нарушения на ВЛ произошли с повреждением элементов линии и связаны с погодными условиями, к примеру:

1) 10.01.24 г. Филиал «Восточные МЭС». Отключение ВЛ 220 кВ Л-3050 «ЕЭК - №51». Причина - неблагоприятные погодные условия, переменный порывистый ветер, дождь, переходящий в снег. Образование гололедных отложений на проводах привело к их пляске с большой амплитудой колебания. В результате на опоре №446 срезало стопорный шплинт пальца скобы крепления поддерживающей гирлянды изоляторов фазы «С» к траверсе опоры, вследствие чего произошло его высвобождение и вылет, повлекшее за собой падение всей изолирующей подвески на землю;

2) 08.02.24 г. Филиал «Южные МЭС». Отключение ВЛ 220 кВ Л-2779 «Тюлькубас (т) – Бурное (т)». В пролёте опор №42-43 произошёл обрыв провода фазы «А». Причина - перекрытие электрической дугой воздушного промежутка «провод ф. «А» Л-2779 – провод ВЛ 10 кВ Ф-38» во время пляски проводов Л-2779 и ВЛ-10 кВ при сильном порывистом ветре. Совместное действие нагрева от дуги и ударных волн, возникающих при схлопывании дугового канала, привело к электроэрозии провода с потерей механической прочности стального сердечника и, как следствие, его разрыву;

3) на опоре №347 500 кв (104,7 км от ПС Агадырь) излом верхнего узла крепления гирлянды фазы "С" в результате сильной пляски проводов (при обнаружении места повреждения - пляска проводов продолжалась несколько часов), при этом был сильный порывистый ветер, метель, обильные осадки-снег;

4) 10.02.24 г. в филиале «Акмолинские МЭС» произошло отключение ВЛ-2671 «Степная – Макинск». Причина - пляска проводов с односторонним гололедообразованием на проводе толщиной стенки 15-20 мм, при скорости ветра 16 м/с. Образование гололёдно-изморозевых отложений на проводах разных фаз в одном пролете, под воздействием бокового ветра привели к колебанию проводов с разной частотой и с разным числом полувольт, что повлекло за собой пробой изоляции воздушного промежутка и возникновению междуфазного короткого замыкания проводов фаз «В» и «С» в пролётах опор №200-203 и отключению воздушной линии.

В соответствии с утверждённой Стратегией развития АО «KEGOC» на 2022-2031 гг. в Компании определены следующие ключевые показатели деятельности:

Ниже, в таблице 1, приведены значения данных показателей за последние 5 лет.

Таблица 1 – Ключевые показатели деятельности АО «KEGOC» на 2022-2031 гг.

Показатели	Полярность	2020 год	2021 год	2022 год	2023 год, факт	2024 год, план	1 полугодие 2024 год, факт
ENS	Снижать	1368,87	1176,95	316,93	987,83	-	197,40
AIT	Снижать	6,674	5,432	0,682	0,657	6,411	*0,394
GA	Повышать	99,99873	99,99896	99,99987	99,99988	99,99878	*99,99993
LTIFR	Снижать	0	0,15	0,45	0,15	0,55	0
SAIDI	Снижать	0,163	0,089	0,060	0,070	≤3,7	*0,006
SAIFI	Снижать	0,071	0,120	0,040	0,050	≤3,7	*0,053
* – Расчёт произведён на основании данных о среднегодовой мощности и количестве потребителей Компании за 2023 г.							

1.2 Современное состояние и постановка задач

Обзор литературы

Явление пляски проводов как фактор, снижающий надежность электроснабжения, исследуется уже давно, однако до настоящего времени

окончательного решения этой проблемы не найдено. В настоящее время отсутствует единая теория расчёта проводов, позволяющая анализировать возникающие в расчетной практике проблемы при проектировании ЛЭП при статическом и динамическом нагружении потоком воздуха. Несмотря на то, что провода относятся к механике твердого деформируемого тела, а именно к механике стержней, их поведение под воздействием воздушных потоков остается недостаточно изученным.

Дж. Ден-Гартог, исследуя колебания профиля с одной вертикальной степенью свободы, описал явление пляски как автоколебательный процесс, возникающий и поддерживаемый аэродинамическими силами при обтекании проводов, покрытых гололедом. Он установил [15, р. 1074-1075], что причиной пляски может быть аэродинамическая неустойчивость профиля – явление, при котором аэродинамическая сила, действующая со стороны потока при малых колебаниях, не демпфирует их, а, напротив, способствует увеличению амплитуды. В ходе своих исследований автор вывел необходимое условие неустойчивости:

$$G(\alpha) = C_{\text{ка}}(\alpha) + C'_{\text{яв}}(\alpha) < 0. \quad (1.2)$$

Данное условие носит название Глауэрта – Ден-Гартога, поскольку оно было первоначально сформулировано Глауэртом [18] как необходимое условие аэродинамической неустойчивости при исследовании авторотации – крупных крутильных колебаний вокруг продольной оси. В настоящее время анализ устойчивости профиля в потоке, как правило, сводится к проверке условия Глауэрта–Ден-Гартога, которое включено в нормы проектирования и подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями.

Следует отметить, что данное условие выведено для систем с одной степенью свободы и представляет собой необходимое условие аэродинамической неустойчивости – явления, характеризующегося резким увеличением амплитуды колебаний профиля в потоке. Актуальной научной задачей является определение необходимых и достаточных условий (критериев) устойчивости по Ляпунову положений равновесия в потоке для профилей с двумя и тремя степенями свободы [1, с. 3-266; 19]. В работе [1, с. 3-266] была рассмотрена модель движения профиля с тремя степенями свободы, в которой было получено достаточное условие неустойчивости положений равновесия. В исследовании [19, с. 3-118] представлены достаточные условия устойчивости и неустойчивости положений равновесия для всех возможных случаев движения профиля (с одной, двумя и тремя степенями свободы) при наличии упругих или вязкоупругих связей.

На основе качественных соображений Ден-Гартог пришел к выводу, что наибольшей неустойчивостью обладают сечения в форме полукруга, ориентированного плоской стороной навстречу потоку, а также сечение вытянутого прямоугольника (рисунок 6). При этом полукруг является наиболее неустойчивым из всех известных сечений. В ходе экспериментов в

аэродинамической трубе Ден-Гартог наблюдал высокоамплитудные колебания упруго закрепленного цилиндра с полукруглым сечением, что подтвердило его теоретические выводы. Причина устойчивости или неустойчивости полукруга объясняется различными режимами обтекания, наблюдаемыми в экспериментах, и изменением числа Рейнольдса: при его высоких значениях лобовое сопротивление существенно снижается.

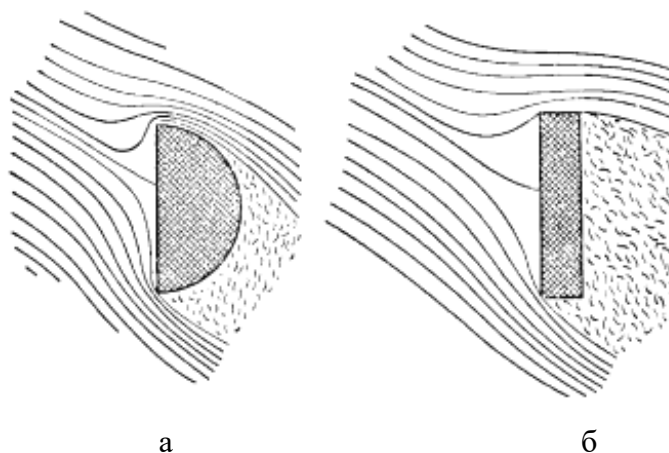


Рисунок 6 – Воздушный поток вокруг плохообтекаемых тел

Примечание – Составлено по источнику [15, р. 1075]

Работы [20-25] позволили сделать ряд выводов о причинах возникновения пляски проводов. Если пляска вызвана аэродинамической неустойчивостью, то положение центра масс сечения цилиндра играет существенную роль: если он не совпадает с осью вращения, в заимное влияние крутильного и поступательного движений может как расширять, так и сужать область неустойчивости. Колебания большой амплитуды могут возникать из-за эффекта сближения собственных частот поступательных и крутильных колебаний, при этом условие Глауэрта – Ден-Гартога (2) может не выполняться [22, р. 967-975; 23, р. 699-706].

Вопросам повышения надежности воздушных линий электропередачи (ВЛ) при воздействии ветровых и гололедных нагрузок посвящено множество научных исследований. Существенный вклад в изучение этой проблемы внесли как отечественные, так и зарубежные ученые. Анализ аварийных отключений ВЛ в России показал, что наибольший процент отключений приходится на высоковольтные и сверхвысоковольтные линии, которые являются наиболее уязвимым звеном системы передачи электроэнергии потребителям.

Значительное число публикаций посвящено проблеме возникновения пляски проводов, так как она представляет серьезную угрозу надежности и прочности воздушных линий электропередачи [2, с. 3-150; 8, р. 3-145; 26-38]. В этих работах рассматриваются приближенные математические модели проводов, не учитывающие всех конструктивных особенностей ВЛ. Упрощенные математические модели пляски разработаны в [39, 40].

Исследованию теоретически возможных механизмов автоколебаний (пляски) ВЛ посвящены работы [8, р. 3-145; 36, р. 1565-1573; 38, р. 141-144; 41, 42].

В работе [28, с. 3-11] предложены упрощенные физические и математические модели динамики проводов, представленных как абсолютно гибкие с терзжи, находящиеся в воздушном потоке. Оценивается амплитуда колебаний при пляске и приводятся методы борьбы с этим явлением. Монография содержит обширную информацию о случаях пляски проводов, характеристиках явления, параметрах проводов и методике оценки эффективности гасителей пляски. В работе [26, с. 3-20] (продолжение исследования [2, с. 3-150]) приводится алгоритм приближенного учета динамических нагрузок, действующих на участок провода при установившейся пляске, однако не рассматривается характер конечных колебаний проводов.

Математическое моделирование аэроупругих колебаний проводов ВЛ и численный анализ построенных моделей представлены в работах [3, р. 3-201; 43-46], где используется метод конечных элементов. В [47, 48] применяется метод Галеркина для моделирования колебаний проводов.

Работа [35, с. 45-48] объясняет физические особенности пляски проводов, используя более общую модель провода как системы с тремя степенями свободы. Однако уравнения, описывающие колебания провода в потоке, не приводятся. Автор, анализируя записи колебаний проводов на действующих линиях и опытных участках, высказывает предположение о родстве пляски проводов с флаттером крыла самолета. Также приводятся результаты экспериментальных исследований аэродинамических характеристик проводов с гололедом при различных профилях, например, зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки, что может быть полезно при численных расчетах динамики проводов при обледенении.

Статистические данные многочисленных наблюдений и регистрации гололедообразования на проводах ВЛ приведены в [2, с. 3-150; 4, с. 3-71; 8, р. 3-145; 16, с. 32-38; 17, с. 44-45; 26, с. 3-20; 29, с. 3-114; 32, с. 72-76; 49-51]. В этих работах изложены основные понятия теории пляски проводов и тросов, методы расчета ее параметров, способы оценки опасности и механизмы возникновения и развития. В частности, в [17, с. 44-45] рассмотрены наблюдения обледенения проводов ВЛ в Башкирии и случаи пляски проводов, что позволило определить статистические характеристики профилей гололедообразования и скоростей ветра при пляске проводов в конкретных районах. В [4, с. 3-71] приводятся описания пляски расщепленных проводов напряжением 500 кВ и ее последствия.

Низкочастотные колебания расщепленной фазы играют важную роль в проектировании воздушных линий, так как могут приводить к коротким замыканиям, перегрузкам и повреждению проводов. При длительном воздействии они могут стать причиной перерывов в электроснабжении и усложнять проведение ремонтных работ. Такие колебания создают дополнительные динамические нагрузки на элементы конструкции ВЛ, ухудшая их механические свойства. Известно, что низкочастотные колебания

способствуют износу проводов и разрушению распорок [5, с. 17-24; 6, с. 22-31; 9, с. 160-170; 14, с. 68-70; 52].

Движение расщепленной фазы в воздушном потоке обусловлено действием нескольких аэродинамических сил: лобового сопротивления (в направлении относительной скорости потока), подъемной силы (перпендикулярно потоку) и моментов этих сил относительно центра масс. Величины аэродинамических сил и моментов зависят от формы тела и числа Рейнольдса (Re), определяющего соотношение сил инерции и вязкости воздушного потока [53]. Для подветренного провода расщепленной фазы сила лобового сопротивления зависит от его положения в аэродинамическом следе, а также на него действует подъемная сила, направленная к оси симметрии следа [10, с. 36-62; 54]. На наветренный провод действует только стационарная сила лобового сопротивления. Аэродинамические нагрузки на сечения провода можно оценить по стационарным аэродинамическим коэффициентам профиля провода. При этом для качественного анализа колебаний проводов полезны приближенные зависимости, полученные на основе экспериментов и выраженные простыми тригонометрическими функциями, как, например, в [55].

Обширная литература стран ближнего зарубежья (в прошлом) была посвящена и изучению колебаний расщепленных проводов. В этих работах разрабатывались механические модели пляски, предлагались упрощенные методы расчета параметров, проводились вычислительные эксперименты с учетом движения провода, его параметров и свойств материала [2, с. 3-150; 9, с. 160-170; 10, с. 36-62; 11, с. 47-56; 56-68].

Очень много литературы посвящено борьбе с пляской проводов, включая подробное описание мер её предотвращения, а также использование гасителей пляски [2, с. 3-150; 4, с. 3-71; 9, с. 160-170; 11, с. 47-56; 29, с. 3-114; 49, с. 3-95; 61, с. 64-69; 63, с. 45; 69].

Влияние пляски и других видов движения расщеплённой фазы, на наш взгляд, следует оценивать ещё на этапе проектирования воздушных линий (ВЛ). При этом необходимо рассматривать возможные альтернативные решения [56, с. 11-16].

На примере первой в СССР крупной аварии, вызванной интенсивной пляской проводов на линии 400–500 кВ в 1961 г., с использованием современной волновой турбулентной резонансной модели впервые выполнен численный анализ параметров этого явления, включая:

- углы наклона провода у поддерживающего зажима;
- уровни динамических напряжений;
- размах амплитуд пляски в двух плоскостях изгиба провода;
- среднюю периодичность повторяемости;
- уровни и структуру энергий возбуждения и диссипации;
- уровни снижения расстояний в пролёте между горизонтальными фазами, фазой и тросом;

– зависимость интенсивности пляски от изгибных сил проводов и фаз [69, с. 197-201].

Перечисленные факторы могут служить основой для разработки мероприятий и новых технологий повышения надёжности работы линий, что составляет технический аспект уроков, извлечённых из аварии 1961 года.

Расчёт амплитуды пляски проводов имеет ключевое значение. Например, оказалось, что регулирование изгибной жёсткости проводов и фаз в пролёте позволяет снизить амплитуду пляски в 2-3 раза и более. Однако оценка амплитуды пляски [70-72], полученная на основе обширных наблюдений, не является полностью точной.

Анализ литературы по статическим и динамическим исследованиям проводов ЛЭП, находящихся в воздушном потоке, позволяет выделить несколько основных замечаний:

1. Применяемые математические модели рассматривают частные случаи задач статики и динамики проводов с большим числом допущений и упрощений.

2. Основным недостатком используемых моделей является отсутствие дифференциальных уравнений в частных производных, необходимых для описания систем с распределёнными параметрами, таких как "жёсткие" провода.

3. Провисающий провод в стационарном потоке может значительно отклоняться от вертикальной плоскости, что оказывает влияние на его колебания.

4. В реальности провода не являются абсолютно гибкими стержнями (нитеями). Они обладают малой, но ненулевой изгибной и крутильной жёсткостью, что приводит к напряжённо-деформированному состоянию, отличному от состояния абсолютно гибкого стержня, особенно в местах закрепления провода.

5. На реальные провода, находящиеся в потоке воздуха, действуют распределённые аэродинамические нагрузки, зависящие от отклонения провода. Без учёта этой зависимости корректное определение статического напряжённо-деформированного состояния провода невозможно.

6. В имеющихся исследованиях не рассматривались нестационарные колебания "жёстких" проводов воздушных ЛЭП (как систем с распределёнными параметрами) при внезапном возникновении потока воздуха и при импульсном нагружении проводов аэродинамическими силами.

В начале ноября 2023 года из-за экстремальных погодных условий, таких как дождь, снег и заморозки, на некоторых линиях электропередачи в северо-восточном регионе Китая произошло обледенение и скачки напряжения, что привело к многочисленным отключениям [73]. Принимая во внимание обрыв проводов, были подробно проанализированы причины, процессы и характеристики линий электропередач высокого напряжения. В целом можно определить, что после обледенения проводов первого порядка, из-за отсутствия или недостаточной эффективности мер по предотвращению обледенения,

произошло межфазное короткое замыкание. В результате этого часть с крученного провода расплавилась, что вызвало динамическое напряжение, сосредоточенное в месте разрыва оставшегося поперечного сечения провода. Из-за многократного изгиба и растяжения оставшиеся многожильные провода превысили предельное напряжение разрушения, что привело к их полному разрыву. Таким образом, неисправность обрыва провода в данном случае тесно связана с межфазным пробоем, вызванным скачками напряжения. В данной статье проведен анализ неисправностей путем сбора данных о конструкции линии, метеорологических условиях на месте и характеристиках неисправностей, а также предоставлена техническая поддержка для дальнейших работ по профилактике и контролю.

В работе [74] для понимания и предотвращения аварий, связанных с галопированием, были уточнены основные амплитудные и частотные характеристики данного явления путем анализа рельефа местности, проектных параметров линии и данных наблюдений на месте. Затем, проанализировав местный погодный процесс, исследованы температурные изменения, осадки, направление ветра и другие метеорологические элементы до и после возникновения галопирования. В сочетании с моделированием и анализом методов прикладной механики проведен количественный анализ факторов, вызывающих галопирование. Данный подход обеспечил теоретическую основу и техническую поддержку для предотвращения колебаний при строительстве линий электропередачи в энергосистеме Шаньдуна и в Китае в целом.

В работах [19, с. 4-115; 75] представлен анализ аэродинамических характеристик силовых воздействий на провода. Аэродинамические коэффициенты каждого подводящего провода и расщепленной фазы из четырех проводников рассчитаны с использованием различных уравнений. Показаны результаты расчетов аэродинамического коэффициента каждого подводящего и четырех разделенных проводов в зависимости от угла атаки ветра. Установлено, что аэродинамические коэффициенты различных проводников, включая коэффициент подъемной силы, коэффициент лобового сопротивления и коэффициент кручения, демонстрируют сходные тенденции при изменении угла атаки ветра и имеют близкие значения. Коэффициент подъемной силы достигает максимума при углах атаки ветра 30° и 170° , в то время как коэффициент лобового сопротивления достигает пика при угле атаки 90° . Галопирование возникает в результате сочетания крутильного и вертикального движения пучка проводов, которые обусловлены аэродинамическими силами.

В статье [76] рассматривается применение различных передовых технологий борьбы с обледенением и антиобледенением на воздушных линиях электропередачи. Представлены последствия обледенения и антиобледенения ВЛЭП, включая механические перегрузки стальных опор, неравномерное обледенение в разное время суток, скачкообразное обледенение проводов, обледенение изоляторов и линий электропередачи, которые наблюдаются в последние годы по всему миру. В данной работе рассматриваются механизмы образования различных видов обледенения на ВЛ, а также влияние

метеорологических факторов, рельефа местности, высоты над уровнем моря, направления линии, высоты подвеса, геометрии и электрического поля на процесс обледенения. Обобщены сведения о применении различных современных технологий защиты ВЛ от обледенения, их преимуществах и недостатках [76, p. 10-18].

В работе [77] представлена новая динамическая модель для анализа пляски воздушных линий электропередачи (ВЛЭП). Уравнения движения для одинарных и двойных линий, соединенных пружинными прокладками, получены с использованием энергетического подхода и метода вычисленных режимов. Эти уравнения выражены в матричной форме, что упрощает численный анализ и сокращает время вычислений. Достоверность модели подтверждена экспериментально путем сравнения теоретических и измеренных собственных частот реальных линий электропередачи, установленных на полигоне. Полученные результаты хорошо согласуются, что подтверждает корректность предложенной модели. Галопирующие силы моделировались с учетом квазистационарной аэродинамической подъемной силы и сопротивления, что позволило предсказать явление галопирования. Итоги численного моделирования представлены в [77, p. 4173-4180].

В работе [78] рассматривается аэроупругая неустойчивость обледенелого провода с расщепленной фазой в полете, закрепленном на распорке. Анализ проводится методом первого приближения, который включает линеаризацию нелинейных уравнений в точке равновесия и дальнейшее исследование линеаризованных уравнений в её окрестности.

Отмечается, что интенсивное строительство высоковольтных линий, связанное с развитием крупных энергетических систем, делает проблему пляски проводов особенно актуальной. Обеспечение надежности этих дорогостоящих систем критично для стабильного энергоснабжения. Исследование пляски проводов является частью общей задачи повышения надежности [79].

Работы [80-82] посвящены изучению пляски обледенелых проводов, расщепленных на четыре, в ветровом потоке. Аэродинамические силы и аэроупругие свойства таких проводов исследовались в аэродинамической трубе с использованием жестких и аэроупругих моделей. Коэффициенты демпфирования определялись экспериментально. Результаты показали, что линии с четырьмя проводами в фазе подвержены пляске, обусловленной крутильными колебаниями. На основании данных, полученных в аэродинамической трубе, установлено, что пляска характеризуется эллиптическими орбитами, отрицательными коэффициентами демпфирования и отрицательной деформацией в положении провисания. Эти выводы могут служить основой для разработки мер предотвращения пляски в четырехпроводных линиях с обледенением.

Так как обледенение ЛЭП оказывает значительное влияние на безопасность энергосистем, надежные технологии борьбы с ним критичны для стабильной работы. В исследовании [83] обобщены механизмы и факторы,

влияющие на обледенение, проанализированы мировые технологии борьбы с ним, а также рассмотрены различные материалы и методы их применения, с определением направлений дальнейшего развития.

Из анализа следует, что увеличение амплитуды крутильных движений приводит к снижению амплитуды линейных колебаний и наоборот. В некоторых источниках указывается, что частоты линейных и крутильных движений при пляске совпадают [84], но это не является универсальным правилом. Пляска может возникать и при несовпадении этих частот. С увеличением скорости ветра и длины пролета, а также снижением натяжения провода, колебательный процесс усложняется, приводя к хаотичным крутильным и линейным движениям [85]. Частоты поперечных и крутильных колебаний при этом могут не совпадать [86].

В работе [87] предложена стохастическая модель пляски проводов на основе дифференциального уравнения в частных производных. Аппроксимация уравнения позволяет описывать динамику колебаний с заданным числом мод. Модель учитывает порывы ветра и накопление льда на проводах. Доказаны достаточные условия для экспоненциальной среднеквадратичной стабилизации системы. Оптимизация коэффициентов демпфирования и расположения гасителей позволяет эффективно стабилизировать колебания.

Исследование [88] посвящено расчету колебаний многопролетных ВЛЭП с большой амплитудой и низкой частотой. Разработаны методики оценки устойчивости с татического профиля проводника, нагруженного ветром и льдом, с применением конечно-элементной модели с несколькими степенями свободы. Для минимизации вычислительных затрат в процессе временного разбиения используются методы усреднения Крылова–Боголюбова и Галеркина.

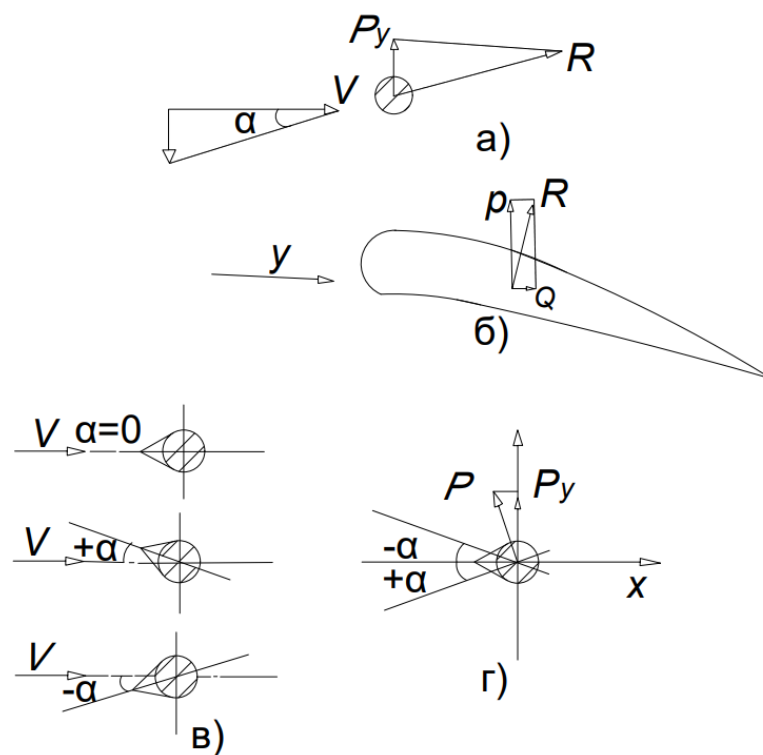
В обзоре [89] рассматриваются явления галопирования, вызванные ветром, с анализом их особенностей и достижений в данной области. Используя квазистационарную модель аэроупругих сил, воздействующих на жесткий цилиндр с тремя степенями свободы (двумя перемещениями и вращением в плоскости поперечного сечения), взаимодействующие силы описаны в простой форме, что делает возможным исследование сложных механических систем в линейной и нелинейной областях, а также их динамического поведения.

1.3 Основные характеристики и причины пляски проводов

Пляска проводов – это явление, которое называют самовозбуждающимся колебанием или автоколебанием. Автоколебание от вынужденных колебаний отличается тем, что силы, которые поддерживают колебания, создаются в процессе самих колебаний, и что немаловажно, вся эта автоколебательная система сама управляет поступлением энергии извне. Пляске подвержены провода любой конструкции [2, с. 3-150; 4, с. 3-71; 15, р. 1074-1075; 18, р. 8].

Для начала поясним действие аэродинамических сил на провод круглого сечения (рисунок 7а [4, с. 15-18]). Представим, что провод движется вниз. Если нет ветра, то этот круглый провод при движении вниз, находился бы под

действием потока воздуха, направленного вниз. Теперь появился ветер со скоростью v и дует на провод слева. В таком случае провод, движущийся вниз со скоростью v_1 , должен испытывать результирующее воздействие воздушного потока, дующего снизу под углом α , равным $\arctg(v_1/v)$. Для круглого симметричного провода направление ветра совпадает с направлением силы, поэтому сила R , действующая на провод при боковом ветре и движении провода вниз, имеет вертикальную составляющую, направленную вверх (P_y). В следствие того, что провод перемещается в низ, то P_y оказывается противоположно направленной движению, и соответственно она должна его гасить. И, наоборот, если провод идет вверх, то вертикальная составляющая силы направлена вниз. Отсюда напрашивается такой вывод, что колебания провода круглого сечения не могут и не будут развиваться только под воздействием горизонтального воздушного потока.



а – воздействие воздушного потока на провод круглого сечения; б – крыло самолета; в – изменение угла атаки при повороте провода вокруг своей оси; г – изменение угла атаки воздушного потока

Рисунок 7 – Аэродинамические силы и углы атаки

Если провод будет иметь гололед неправильной формы и соответственно провод некруглого сечения, то сила, возникающая от ветра, при движении провода вверх или вниз, может иметь вертикальную составляющую, и которая будет направлена в сторону движения провода. Например, крыло самолета (рисунок 7б), где направление воздушного потока и направление силы, воздействующей на тело, могут и не совпадать. Это явление очень сложное, поэтому значения аэродинамических сил, которые возникают при обтекании

тела воздушным потоком, получают, как правило, путем эксперимента, путем продувки моделей в аэродинамической трубе [1, с. 3-265; 2, с. 3-150; 19, с. 4-115].

В качестве тестового образца использовался алюминиевый провод для сетей 400 кВ в Бельгии с искусственным льдом, смоделированным на основе реальных наблюдений. Лёд изготавливался из силикона, обеспечивающего плотность и текстуру, близкие к природному льду. Эксперименты проводились в аэродинамической трубе университета Льежа, которая позволяет достигать скоростей ветра до 60 м/с. Пробные образцы подвешивались на пружинах с определённой жёсткостью, что обеспечивало минимальное демпфирование.

Для измерения аэродинамических коэффициентов использовались три динамометра, фиксирующие вертикальную силу, момент и сопротивление. Каждое измерение повторялось трижды для каждого угла атаки и различных скоростей ветра. Полученные данные обрабатывались с использованием интерполяции для построения плавных кривых зависимости аэродинамических коэффициентов от угла атаки.

Пляска в аэродинамической трубе наблюдалась в диапазоне скоростей ветра от 8 до 20 м/с. Были зафиксированы разные формы эллипсов пляски, которые зависят от угла обледенения и частотного расстроения. Максимальные амплитуды вертикальных и горизонтальных колебаний наблюдались при углах обледенения, близких к 30° .

Значения аэродинамических сил определяют при различных углах атаки [15, р. 1074-1075]. Аэродинамической характеристикой называют зависимость величины аэродинамической силы от угла атаки. Значения этих сил определяют при различных углах атаки. Изменение угла атаки – это угол между направлением воздушного потока и условной осью, при этом поворачивают обдуваемый провод вокруг своей оси при неизменном направлении воздушного потока (рисунок 7в).

Изменения угла атаки можно добиться изменением направления воздушного потока при неизменном положении тела (рисунок 7г). При этом при изменении угла атаки подъемная сила P , перпендикулярная потоку, направлена не вертикально. При небольших изменениях угла атаки, значения P и P_y будут всегда близки по величине и направлению.

Пляска проводов происходит всегда с частотой, близкой к частоте собственных колебаний провода в полете, формула (1).

Движения различных сечений провода при пляске в общем случае состоят из линейных и крутильных колебаний. Рассмотрим простейший случай для пояснения основных характеристик линейных перемещений – это колебание провода в вертикальной плоскости. На рисунке 8 [4, с. 15-18] показаны положения провода для нескольких форм колебаний. Выше уже говорилось об одном из параметров пляски это число полуволн в полете.

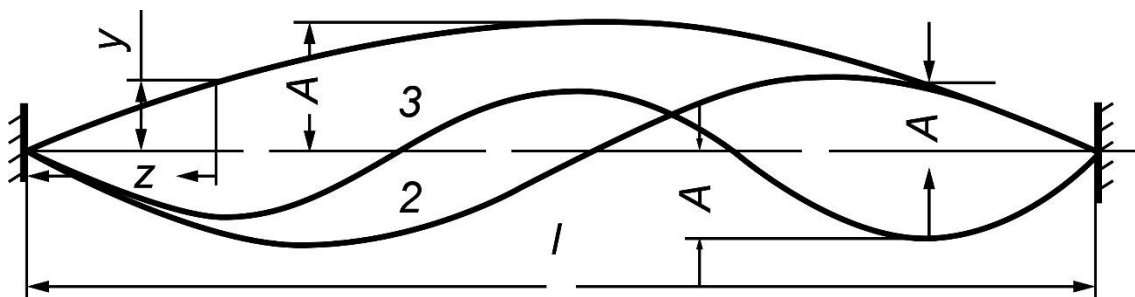


Рисунок 8 – Положение провода в пролете

Колебание с одной полуволной (кривая 1) имеет две неподвижные точки на концах провода, так называемые стоячие волны, наиболее характерные для пляски. При этих колебаниях все сечения провода в пределах полуволны имеют одинаковое направления движения, в одно время проходят зону максимальных скоростей и достигают крайних верхних и нижних положений. Размах пляски $2A$ (удвоенная амплитуда колебаний или перемещение провода от крайней нижней точки движения до крайней верхней, называемое амплитудой "пик-пик") наибольших значений достигает при колебаниях с одной полуволной в пролете, рисунок 9 [90]. Наибольшее значение двойной амплитуды колебаний, т.е. расстояние между нижним и верхним положением провода (рисунок 9), при пляске с одной, двумя и большим числом полуволн в пролете может быть определено одним из следующих способов [90]:

1) с помощью угломерных инструментов (теодолит, угломер) по формуле (1.3):

$$2A = B \operatorname{tg} \beta \quad (1.3)$$

где B - расстояние между местом установки инструмента и линией, м;

β - угол между верхним и нижним положениями провода, град.

2) приближенно с помощью масштабной линейки.

Наблюдатель отходит от линии на 50-60 м и, держа на вытянутой руке масштабную линейку, отмечает на ней разницу между верхним и нижним положениями провода при пляске (см). Значение двойной амплитуды пляски (м) подсчитывается по формуле (1.4):

$$2A = 2a \frac{B}{b} \quad (1.4)$$

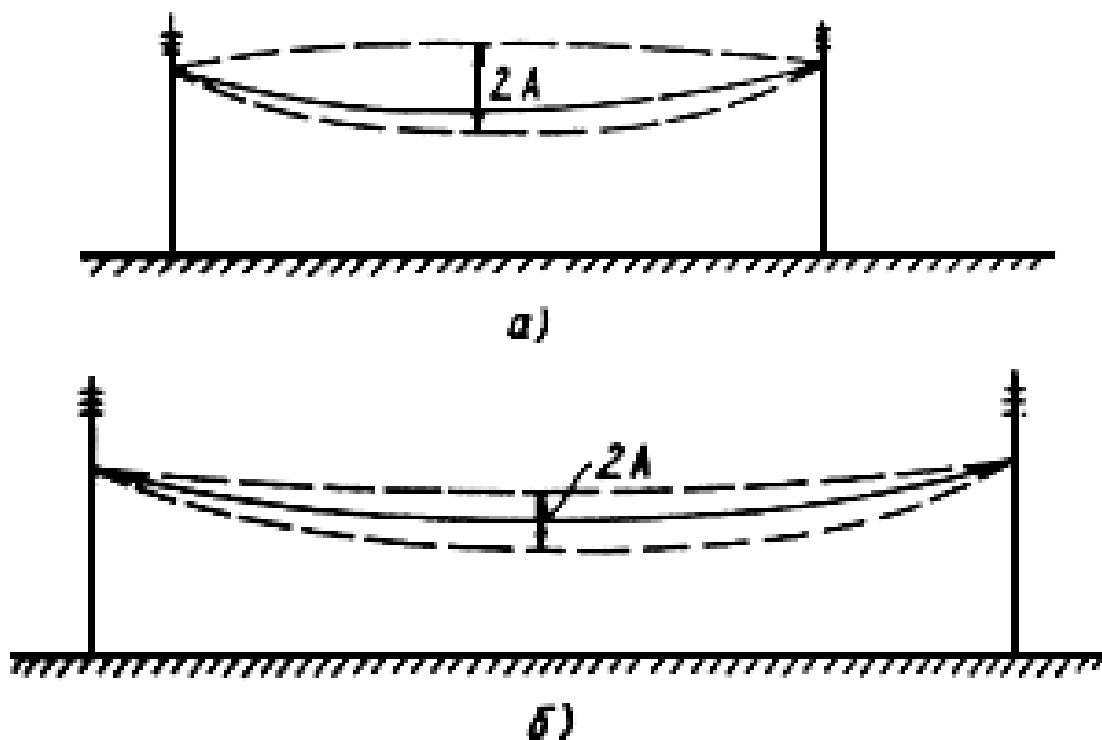
где $2a$ - разница между верхним и нижним положениями провода по масштабной линейке, см;

B - расстояние между наблюдателем и линией, м;

b - расстояние от глаза наблюдателя до линейки, см.

Наиболее опасной является пляска с одной полуволной в пролете, когда размах колебаний может превышать стрелу провеса и достигать в пролетах небольшой длины (до 200 м) 4-6 м, а в пролетах большей длины (400-500 м) 6-

12 м. При этом амплитуда переменной составляющей тяжения одиночного провода либо каждого из проводов расщепленной фазы достигает 10-40 кН.



а - малой длины; б - большой длины

Рисунок 9 – Пляска с одной полуволной в пролете

Двух полуволновые колебания (кривая 2, рисунок 8) в пределах одного пролета представляют собой одну полную волну с двумя неподвижными точками на концах и одной в середине пролета. Движения точек провода в одной и второй полуволнах направлены в противоположные стороны. Кривая 3 - это трех полуволновая пляска с четырьмя неподвижными точками. Пляска с двумя полуволнами чаще всего происходит с амплитудами "пик-пик" 1,5-3 м, однако есть данные о колебаниях с размахом до 4-6 м. Размах пляски с тремя полуволнами по имеющимся данным не превосходит 4 м. Реже встречаются случаи менее опасной много полуволновой пляски с четырьмя и более полуволнами в пролетах ВЛ.

Длина пролета обозначена через l . Наиболее опасными формами пляски проводов являются колебания с числом полуволн до 4.

Бывают случаи, когда в одном пролете, но на разных фазах одновременно наблюдается пляска с различным числом полуволн.

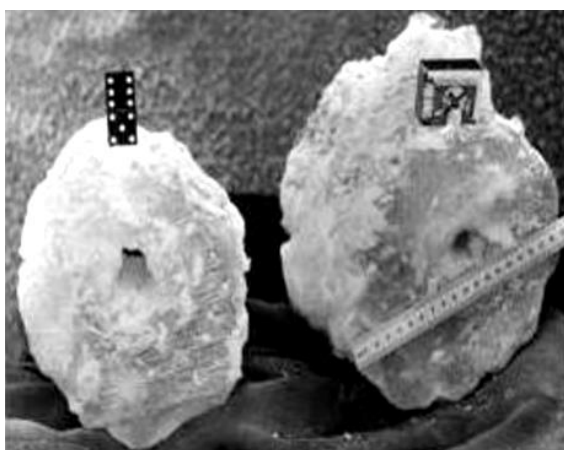
Колебания проводов могут быть полностью описаны, если мы знаем закономерности движения любой точки провода вдоль пролета во времени, по следующему уравнению:

$$y = f(z, t), \quad (1.5)$$

где y – координата точки провода на расстоянии z от одной из опор;
 t – время.

Основная цель теоретического анализа колебательного процесса при пляске заключается, по существу, в раскрытии прямых и обратных связей между основными действующими факторами и получении соответствующего решения в виде формулы (3).

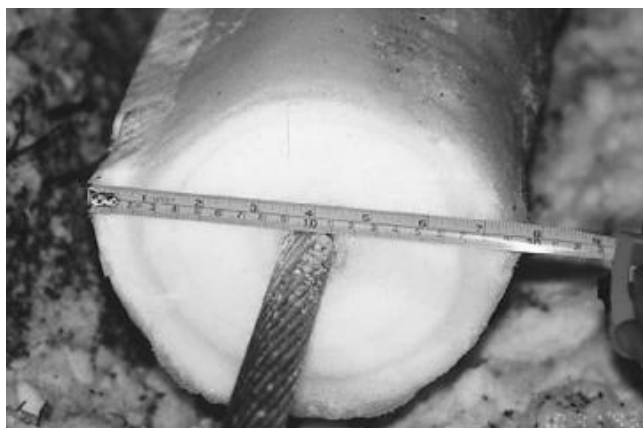
Пляска при несимметричном профиле гололеда на проводе возникает при определенном направлении ветра, различные формы гололеда показаны на рисунке 10. Пляска возникает, когда ветер, при котором образуется гололед, меняет свое направление на противоположное.



а



б



в

Рисунок 10 – Образование гололеда на проводах ВЛ

Выводы по первому разделу

Пляска проводов – это самовозбуждающиеся колебания (автоколебания), которые состоят из трех видов простых гармонических колебаний: вертикальных, горизонтальных и крутильных.

Пляске подвержены провода любой конструкции.

Фазовый угол между крутильными и поступательными колебаниями может иметь разные значения при разных формах гололеда и направлениях ветра.

Наиболее подвержены пляске расщепленные провода чем одиночные и в зависимости от длины пролета возникает пляска с одной и более полуволнами.

Наиболее опасными формами пляски проводов являются колебания с числом полуволн до четырех.

В одном пролете, но на разных фазах одновременно могут наблюдаться пляска с различным числом полуволн.

Пляска возникает в результате сочетания крутильного и вертикального движения пучка проводов, которые обусловлены аэродинамическими силами.

Значения аэродинамических сил определяют при различных углах атаки.

2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ

2.1 Возникновение и интенсивность пляски в зависимости от скорости ветра

Для предотвращения снижения надежности ВЛ из-за воздействия гололедно-ветровых нагрузок уже давно ведутся интенсивные разработки и внедряются различные системы предотвращения гололедно-ветровых аварий на воздушных линиях электропередачи [91-94]. В соответствии с этим, в данном разделе приводится анализ возникновения пляски и ее интенсивность в зависимости от скорости ветра (V , м/сек). Как мы уже сказали, образование гололеда на проводах сочетается с действием ветра. Однако в процессе формирования отложений или после его завершения, скорость и направление ветра могут меняться, вызывая усиление, ослабление или прекращение пляски проводов. Для установления вероятностной зависимости между скоростью ветра и частотой случаев пляски, были обработаны случаи пляски, имевшие место в энергосистемах нашей страны и России [91, с. 916-919]. В результате этой обработки построена гистограмма на рисунке 11 и выведен дифференциальный закон распределения.

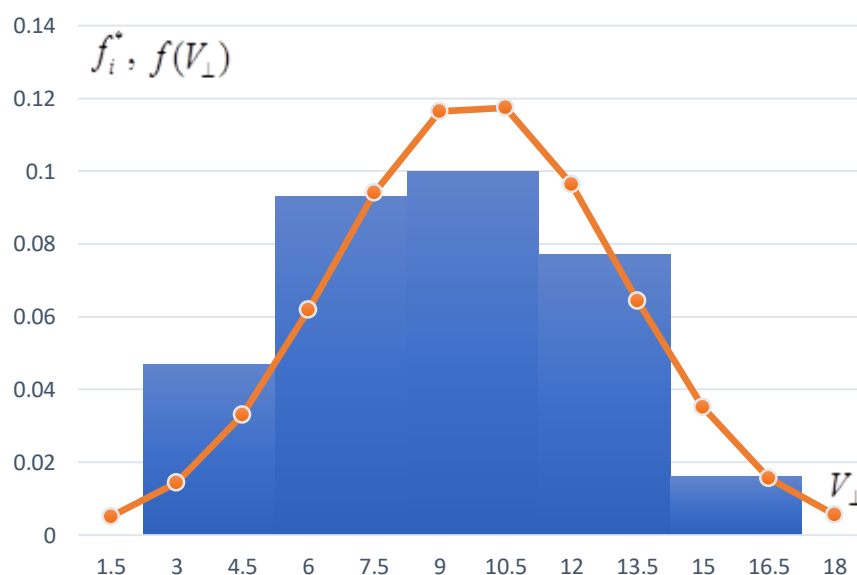


Рисунок 11 – Гистограмма и выравнивающая ее кривая

Данные для построения гистограммы приведены в таблице 2. Через $V_{\perp}$ обозначена вертикальная составляющая скорости ветра, определяемая по формуле (2.1):

$$V_{\perp} = V \sin \alpha, \quad (2.1)$$

где V - модуль скорости ветра;

α - угол атаки к линии (угол между вектором скорости и ВЛЭП).

Таблица 2 - Интервальный ряд распределения

Частоты	Интервал скоростей, $V_{\perp}$ (м/с)					Сумма
	3 ÷ 6	6 ÷ 9	9 ÷ 12	12 ÷ 15	15 ÷ 18	
Частота, n_i	16	34	35	28	7	120
Относительная частота f_i^*	0,14	0,28	0,3	0,23	0,05	1

Относительные частоты определены по формуле (2.2):

$$f_i^* = \frac{n_i}{n}, \quad (2.2)$$

где n - общее число наблюдений ($n = 120$).

Статистический ряд представлен в виде гистограммы (рисунок 11).

Далее по виду гистограммы подобрана аппроксимирующая кривая, характеризующая лишь существенные черты статистических данных. Как видно из рисунка, выравнивание статистического ряда можно выполнить с помощью нормального закона. Плотность распределения в этом случае

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

где m - математическое ожидание;

σ - среднеквадратическое отклонение.

При оценке параметров распределения используется статистическое среднее m^* и статистическая дисперсия D^*

$$m^* = \sum_1^k V_{\perp i} f_i^*, \quad (2.4)$$

$$D^* = \sum_1^k (V_{\perp i} - m^*)^2 \cdot f_i^*, \quad (2.5)$$

где k число интервалов ($k=5$);

$V_{\perp i}$ - представитель i -го разряда (принимается значение, соответствующее середине интервала).

После вычисления, получили: $m^* = 9,81$, $D^* = 10,95$.

Выбираем параметры нормального закона так, чтобы выполнялись условия:

$$m = m^* = 9,81, \sigma = \sqrt{D^*} = 3,31 \quad (2.6)$$

Таким образом, плотность распределения можно представить следующим образом:

$$f(V_{\perp}) = 0,12 e^{-\frac{(V_{\perp} - 9,81)^2}{21,9}} \quad (2.7)$$

На рисунке 11 также представлена выравнивающая гистограмму аналитическая кривая, построенная по формуле (7).

Согласованность аналитического и эмпирического распределения проверялась по критерию χ^2 (Пирсона):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - nF_i)^2}{nF_i}, \quad (2.8)$$

где F_i - теоретическая вероятность попадания в i -й интервал, которая определяется с помощью нормированной функции нормального распределения

$$F_i = \Phi\left(\frac{V_{\perp(i+1)} - m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{V_{\perp i} - m}{\sigma}\right),$$

где $\Phi(x)$ – нормированная функция нормального распределения.

В результате вычисления получены: расчетное $\chi^2 = 2,74$ и табличное значение «хи» квадрата $\chi_{\alpha}^2 = 5,991$ для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и степени свободы равным двум. Поскольку $\chi_{\alpha}^2 > \chi^2$, то можно считать, что эмпирическое распределение, в общем, хорошо согласуется с нормальным распределением.

Полученные результаты позволяют определить вероятность, с которой наблюдается пляска проводов в определенном диапазоне скоростей ветра. Средняя скорость ветрового потока при пляске составляет около 10 м/сек. Среднеквадратичное отклонение σ указывает на диапазон скорости, благоприятный для возникновения пляски проводов. В нашем случае этот диапазон лежит примерно в пределах от 5 до 12 м/сек. Согласно статистике, внутри этих границ лежат 85 из 120 наблюдений, то есть около 70%. Увеличение или уменьшение скорости ветра за этими пределами сопровождается уменьшением вероятности появления пляски проводов.

Следует отметить, что аэродинамическая неустойчивость гололеда относительно ветрового потока должна зависеть и от величины скорости ветра, и его направления относительно к ВЛ (так называемого угла атаки). Результаты анализа показывают, что в подавляющем большинстве случаев (около 70%) пляска проводов наблюдается в интервале углов от 30 до 60 градусов. При дальнейшем увеличении угла атаки (в диапазоне от 60° до 90°) число случаев пляски как одно полуволновых, так и много полуволновых несколько уменьшаются. При этом вероятность появления много полуволновой пляски уменьшается при перпендикулярном (или близкой к перпендикулярному) направлении ветра к ВЛ.

Кроме того, следует отметить, что чаще всего опасной является одно полуволновая пляска и она как правило возникает при короткой длине пролета. С увеличением длины пролета возрастает вероятность появления много полуволновой пляски.

2.2 Анализ продолжительности пляски проводов

Одной из характеристик пляски является ее продолжительность по времени. Можно провести анализ о продолжительности пляски на основе статистической обработки данных наблюдений [92, с. 49-50]. В данном разделе на основе обработки 82 случаев пляски проводов установлены эмпирические и теоретические функции распределения продолжительности пляски. На основе установленных законов распределения сделаны соответствующие выводы.

С целью представления характерной закономерности и научно обоснованных выводов о продолжительности пляски проводов ЛЭП в работе обработаны 82 случая пляски, имевших место в нашей стране и ближнего зарубежья [1, с. 4-264; 2, с. 3-150; 4, с. 3-71; 8, р. 3-144; 15, р. 1075-1076; 34, с. 3-6]. Результаты обработки приведены в таблице 3. Эмпирическая функция распределения продолжительности пляски дана на рисунке 12.

Таблица 3 – Результаты обработки статистических наблюдений

Длительность пляски, t (час)	Накопленная частота, Σn_i	Относительная накопленная частота, Σf_i^*		Теоретическое распределение,		Критерий Пирсона, χ^2
		w_i	w_i/h	t	$F_i(t)$	
До 3	34	0,42	0,14	0	0,24	0
3-6	28	0,3	0,11	1,5	0,16	0,0033
6-9	14	0,06	0,06	4,5	0,08	0,004
9-12	5	0,01	0,02	7,5	0,03	0,0035
12-15	1	0,005	0,003	10,5	0,01	-
-	-	-	-	13,5	0,005	$\chi^2 = 1,86$

Выравнивание эмпирического распределения можно выполнить с помощью степенной функций:

$$F(t) = at^{\nu}, t > 0 \quad (2.9)$$

где a и ν - параметры распределения, величины которых определяют по данным таблицы 2.

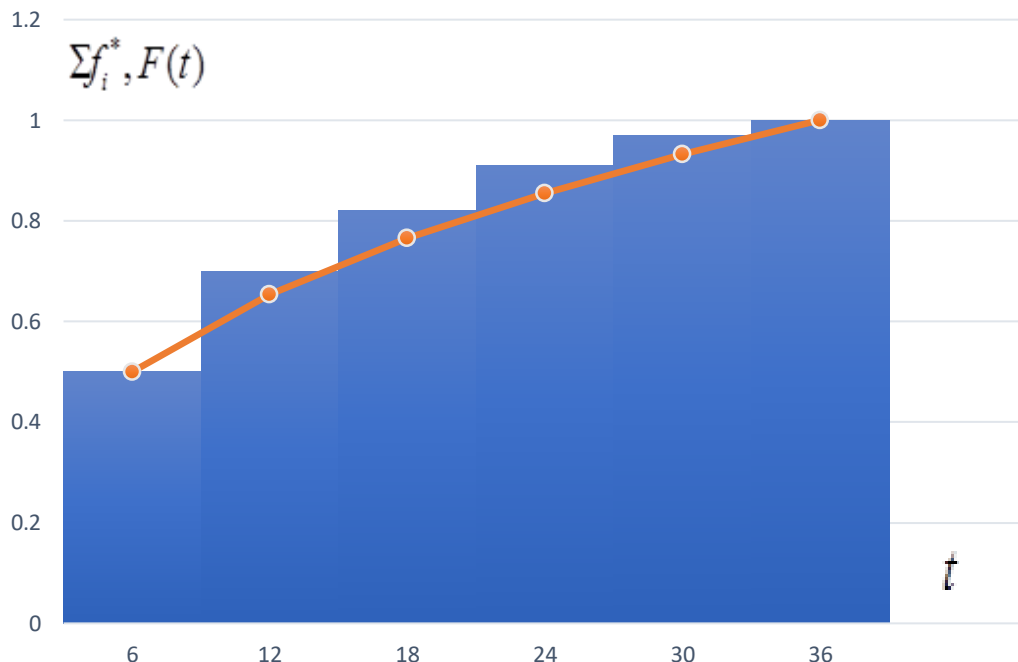


Рисунок 12 – Эмпирические и теоретические функции распределения

Логарифмируя (1), получим:

$$\lg F(t) = \lg a + \nu \lg t. \quad (2.10)$$

Подставляя в уравнение (2) табличные значения координат первой и последней точек столбца 2 и 4, как наиболее удаленных, находим:

$$\lg 0,5 = \lg a + \nu \lg 6,$$

$$\lg 1 = \lg a + \nu \lg 36.$$

Решив систему уравнений относительно искомых величин, получим:

$$\nu = \frac{\lg 0,5 - \lg 1}{\lg 6 - \lg 36} = 0,387,$$

$$\lg a = \lg 0,5 - \nu \lg 6 = -0,6021, a = 0,25.$$

С учетом числовых значений параметров теоретический закон распределения имеет вид:

$$F(t) = 0,24e^{-0,238 \cdot t} \quad (2.11)$$

Результаты подсчета теоретического распределения по формуле (15) внесены в таблицу 3, а графическое изображение дано на рисунке 12.

Проверка согласованности теоретического и эмпирического распределения осуществлялась по критерию Пирсона:

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{[\Sigma f_i^* - F(t)]^2}{F(t)} \quad (2.12)$$

Результаты вычисления приведены в таблице 11, ($\chi^2 = 1,86$).

Табличное значение критерия $\chi_{\alpha}^2 = 2,78$ определено для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и число степеней свободы равно четырем.

Поскольку $\chi_{\alpha}^2 > \chi^2$, то можно считать, что эмпирическое распределение хорошо согласуется с экспоненциальным распределением.

Согласно (3), средняя продолжительность пляски за наблюдаемый период составляет:

$$\bar{t} = \int_0^{36} (1 - 0,25t^{0,387}) dt \approx 10 \text{ часов.}$$

Теоретическая плотность распределения определяется по формуле (2.13):

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = 0,097t^{-0,613} \quad (2.13)$$

Плотность распределения продолжительности пляски убывает с возрастанием длительности пляски.

От частоты повторяемости и интенсивности пляски зависит выбор конструкции ВЛ и мероприятий по защите проводов от пляски. Поскольку такие мероприятия связаны со значительным увеличением капитальных вложений на стадии строительства или эксплуатации линии, большое значение имеет выявление территорий, где пляска наиболее опасна и защитные меры будут наиболее эффективными.

Возможность возникновения пляски на ВЛ определяется подверженностью данного района гололедно-изморозевым отложениям,

условиями прохождения трассы, то есть характеристика рельефа, гололедно-ветровые районы, ориентация линий относительно направления ветра при наличии гололедных отложений.

Отложения на проводах в виде мокрого снега появляются при температурах воздуха от +2 до -2°C. Гололед образуется при выпадении переохлажденного дождя или при переохлажденном тумане при температурах от 0 до -5°C. Изморозь образуется на проводах при температурах воздуха от -3 до -15°C. Известны также случаи пляски проводов в северных районах при температурах ниже -30°C, причиной которых, очевидно, является образование сублимационной изморози.

Пляска может возникать при отложении тонкого слоя гололеда, малозаметного с земли. Наиболее характерными для отечественных энергосистем являются случаи пляски с отложениями гололеда толщиной от 3 до 20 мм. Как правило, образование отложений на проводах сочетается с действием ветра. Однако в процессе формирования отложений или после его завершения скорость и направление ветра могут меняться, вызывая усиление, ослабление или прекращение пляски. Результаты наблюдений показали, что пляска проводов наблюдается при наличии на проводах гололедно-изморозевых отложений в осенне-зимние и весенние сезоны года, таблица 4 [93, с. 219-222].

Таблица 4 - Число случаев пляски при различных сезонах года

Пляска проводов	Сезоны года			Всего
	осенний период	зимний период	весенний период	
Число случаев пляски	26	48	8	82
В процентном соотношении %	24	60	16	100

По результатам анализа данных наблюдений можно отметить, что сопутствующие погодные условия для возникновения пляски приходятся в основном на зимние месяцы (60 % от всех случаев пляски). Наименьшее число случаев наблюдалось в весенний период (всего 16 %).

Таким образом, благоприятные метеоусловия, способствующие возникновению пляски проводов охватывают значительный период времени (около полугода). Как показывают статистические данные наблюдений, явления пляски проводов могут возникать в широком диапазоне изменений температуры воздуха, в частности от +3 до -16°C (что немаловажно для нашей страны). Число случаев пляски в зависимости от температуры воздуха приведено в таблице 5.

Таблица 5 – Число случаев пляски при изменении температуры воздуха

Пляски	Диапазон температуры, °С				Всего
	от +1°С до +3°С	от 0°С до -5°С	от -5°С до -10°С	более -10°С	
Число случаев пляски	5	63	12	2	82
В процентном соотношении (%)	4	46	23	7	100

Как показывают статистические данные, больше всего случаев пляски (66%) происходит при температуре воздуха от нуля до -5°С, немного меньшее число при температуре от -5 до -10°С (23%). Очень редко наблюдается пляска проводов при положительной температуре воздуха от +1 до +3°С.

Из всего этого можно сделать вывод, что большинство случаев пляски происходит при температуре воздуха от нуля до -10°С (75%).

Для энергосистемы Казахстана это имеет важное значение, потому что такая температура воздуха имеет место быть на преобладающих районах страны.

Наряду с соответствующими характеристиками метеорологических условий для возникновения пляски проводов, большое значение имеет рельеф местности, где проходят воздушные линии.

Число случаев пляски в зависимости от рельефа местности приведено в таблице 6.

Таблица 6 - Число случаев пляски в зависимости от рельефа местности

Пляски	Характер местности				Всего
	холмистая	равнинная	пересеченная	гористая	
Число случаев пляски	8	64	9	1	82
%	29	55	15	1	100

Как видно, больше всего случаев пляски происходит в равнинной местности, а меньше в холмистой и пересеченной местностях.

Очень редко наблюдается пляска проводов в гористой местности. Так как в нашей стране преобладают равнинная и холмистая местности, то вопрос возникновения пляски проводов и ее повторяемость у нас актуальна.

При проектировании ВЛ применяют карты районирования по нормативной стенке гололеда и по максимальной скорости ветра (ПУЭ). Расчетные климатические условия и мероприятия по повышению механической прочности конструктивной части ВЛ при проектировании выбираются в соответствии с этими картами по скоростным напорам ветра и толщине гололедных образований и грозовой активности.

Карты районирования территории Республики Казахстан составлены по данным многолетних метеорологических наблюдений. Территория РК по данным этих карт разделена на VII районов по ветру (ПУЭ, приложение 3) и на IV района и особый район по толщине стенки гололеда (ПУЭ, приложение 2).

Характеристики климатических условий, а именно: нормативные толщина стенки гололеда для высоты 10 м и ветровое давление на высоте 10 м над поверхностью земли приведены в таблицах 178 и 176 ПУЭ.

Мы понимаем, что в последнее время повсеместно произошли и происходят изменения климата на Земле (меняется скорость и направление ветра, температура воздуха и т.д.), поэтому не исключено, что данные в таблицах на данный момент должны быть скорректированы.

В таблице 2 приведено число случаев пляски при различных скоростях ветра и гололедных образованиях.

Если проанализировать случаи пляски проводов, то наиболее часто в МЭС РК возникала пляска в I-III ветровых и гололедных районах.

2.3 Анализ последствий пляски проводов на воздушных линиях

При пляске проводов могут иметь место различные повреждения элементов ЛЭП [94, с. 72-75]. Имеющиеся данные [1, с. 3-264; 4, с. 3-71; 69, р. 40-48] показывают, что до 60% случаев пляски приводят к нарушению режима работы ВЛ или к повреждению их элементов, причем только в 30% случаев нарушения ограничиваются кратковременными отключениями ВЛ и не сопровождаются перебоями в работе линий продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток. В некоторых случаях ремонтно-восстановительные работы требуют значительных затрат и длительного отключения линии.

Повреждения на ВЛЭП могут быть сгруппированы следующим образом:

1. Перекрытия между фазами при вертикальном расположении проводов. Перекрытия между проводом и тросом, как при вертикальном, так и при горизонтальном расположении проводов.

2. Перекрытия на землю в анкерной петле/шлейфе/ провода при подбрасывании соединителя или при чрезмерных поднятиях и опусканиях провода.

3. Обрывы проводов и тросов от пережогов дугой или от потери механической прочности.

4. Обрывы проводов и тросов непосредственно у опоры и зажима, соединителя или в других местах, где возможны перегрузки от повторных воздействиях усилия выше расчетных, а также от резких динамических толчков.

5. Обрывы проводов в анкерной петле от поломки жил в результате перегибов и возникающих усталостных явлений.

6. Расстройство креплений и арматуры гирлянд изоляторов и провода, проявляющиеся в виде само отвинчивания гаек, выпадения болтов, перетирания и выпадения плиток, разрыва скоб и т.д.

7. Ослабление механической прочности опор, вплоть до повреждения отдельных элементов или поломки опоры целиком.

В энергосистемах Казахстана за 25-летний период эксплуатации воздушных ЛЭП различного класса напряжений было зафиксировано большое количество случаев аварийного отключения с повреждениями элементов ВЛ и

без повреждения. И ранее в первой главе мы приводили статистику повреждения и отключении в МЭС. Все случаи аварийных отключений на воздушных линиях электропередач по причине пляски проводов при анализе были разбиты на три группы (таблица 7). Как видно из таблицы 7, больше всего случаев отключений без повреждения (24 случая) произошло на линиях 110 кВ. Очень редко отключении наблюдается на линиях 35 кВ (4 случая). Чаще всего происходят повреждения проводов, тросов и арматуры (63 случая) и больше всего страдают линий среднего напряжения. Меньше всего происходят повреждения элементов опор (всего 8 случаев).

Таблица 7 – Число случаев повреждений при авариях на ВЛЭП по причине пляски проводов

Характер повреждений	Напряжение ВЛЭП, кВ				Всего
	500	220	110	35	
Отключения без повреждения	7	9	24	4	44
Повреждения проводов, тросов и арматур	10	12	17	24	63
Повреждения элементов опор	-	2	2	4	8
Итого	17	23	43	32	115

Все выше проанализированные статистические данные приводятся для воздушных линий высокого напряжения.

Таблица 8 – Статистика аварийных отключений по воздействиям стихийных явлений на МЭС АО «КЕГОС»

Годы	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Аварийные отключения по воздействиям стихийных явлений, в том числе:	97	57	92	114	83	77	96	60	46	63	94
Падение опор	1	1	2	4	2	1	3	1	1	2	4
Обрыв провода (или шлейфа), грозотроса	5	1	4	3	2	5	5	5	1	4	3
Повреждение провода (шлейфа), грозотроса	1	1	2	8	1	0	4	1	1	2	8
Разрыв гирлянды изоляторов	2	0	11	6	3	4	5	2	0	11	6
Пляска проводов, грозотроса	5	5	6	8	17	6	14	6	4	7	8
Поджигание провода (или шлейфа) к телу опоры	28	7	20	25	9	12	28	10	7	10	15
Гололедообразование	5	0	0	12	9	8	0	5	2	1	12
Грозовые перенапряжения	45	41	44	38	31	36	33	25	31	24	28
Прочее	5	1	3	10	9	5	4	5	1	3	10

В соответствии с таблицей 8, все случаи аварийных отключений по воздействиям стихийных явлений при анализе межсистемных электрических сетей АО «КЕГОС» были разбиты на группы. Как известно, к МЭС относятся воздушные линии высокого и сверхвысокого напряжений. Следовательно, по данным статистики, аварийные отключения из-за воздействия пляски проводов

тоже занимают не последнее место в сетях сверхвысокого напряжения. Так как эти линии передают очень большую нагрузку, то их отключение несут с собой достаточно большие потери электрической энергии.

Пляска проводов на воздушных линиях межсистемного значения могут привести к следующим последствиям:

1. Системные аварии. Сближение фаз проводов и их столкновение с грозозащитными тросами вызывают короткие замыкания и выходу из строя воздушной линии электропередачи.

2. Увеличение износа. Низкочастотные колебания приводят к повреждениям арматуры, гирлянд изоляторов и самих проводов.

3. Экономические потери. Ремонт повреждённых воздушных линий сверхвысокого напряжения и последующие усиления конструкций требуют значительных денежных затрат.

Если происходит системная авария, то интенсивная пляска провода может привести к отключению энергоснабжения на значительных территориях.

Аналогичные анализированные данные случаев аварийных отключений ВЛ по причине пляски проводов приводятся и в других работах [1, с. 4-264; 2, с. 3-150; 4, с 3-71; 11, с. 47-56; 18, р. 8].

Выводы по второму разделу

1. Результаты анализа показывают, что в подавляющем большинстве случаев, пляска проводов наблюдается в интервале углов от 30 до 60 градусов. При дальнейшем увеличении угла атаки число одно-, - много полуволновых случаев пляски несколько уменьшаются. И следует отметить, что вероятность появления много полуволновой пляски уменьшается при перпендикулярном (или близкой) направлении ветра к ВЛ.

Чаще всего, одно полуволновая пляска возникает при короткой длине пролета. С увеличением длины пролета возрастает вероятность появления много полуволновой пляски.

2. Основная масса случаев пляски наблюдается в коротком промежутке времени. Так, число случаев пляски, имеющее продолжительность до 6 часов наблюдается с 50% вероятностью

$$F(0,6) = 0,25t^{0,387} = 0,5.$$

3. Две третей случаев пляски проводов от общего количества наблюдений имеет продолжительность до десяти часов. За такой промежуток времени провода испытывают длительные циклические нагрузки, вследствие чего они могут быть повреждены в местах крепления к элементам опор.

4. Вероятность появления пляски с длительностью, превышающие сутки составляет не более 10%.

5. Средняя продолжительность пляски составляет около 4-8 часов.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке мероприятий по повышению надежности ВЛ.

Как видно, больше всего случаев отключений без повреждения (58 случаев) произошло на линиях 220 кВ. Затем отключения наблюдается на линиях сверхвысокого напряжения 500 кВ. Чаще всего происходят повреждения проводов, тросов и арматуры на воздушных линиях высокого напряжения.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ РАСЩЕПЛЕННОЙ ФАЗЫ

3.1 Исследование пляски проводов расщепленной фазы

Если каждая фаза выполнена двумя и более проводами, то такая конструкция фазы считается расщеплённой. В линиях традиционного исполнения с номинальным напряжением 330 (иногда 220) кВ фазы расщеплены на два провода, в линиях 500 кВ – на три провода.

На воздушных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения, как правило, применяются расщепленные провода (РП), позволяющие существенно снизить потери энергии, вызываемые коронным разрядом [95]. Конструкция расщепленного провода представляет собой совокупность одиночных проводников, центры сечения которых размещаются на окружности радиуса расщепления, μ_i – угол, определяющие расположения отдельных проводов в пучке (рисунок 13). При таком расположении универсальными геометрическими характеристиками расщепленного провода становятся радиус кругового сечения одиночного проводника r_0 , упомянутый выше радиус расщепления R и количество одиночных проводов в фазе $n=3$ [95, с. 3-410; 96].

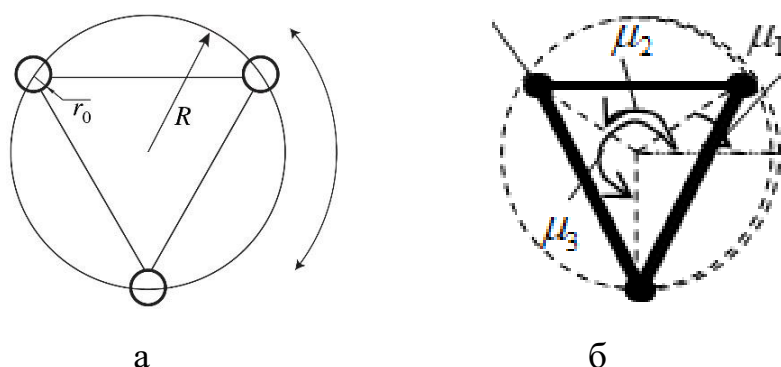


Рисунок 13 - Конструкция расщепленного провода

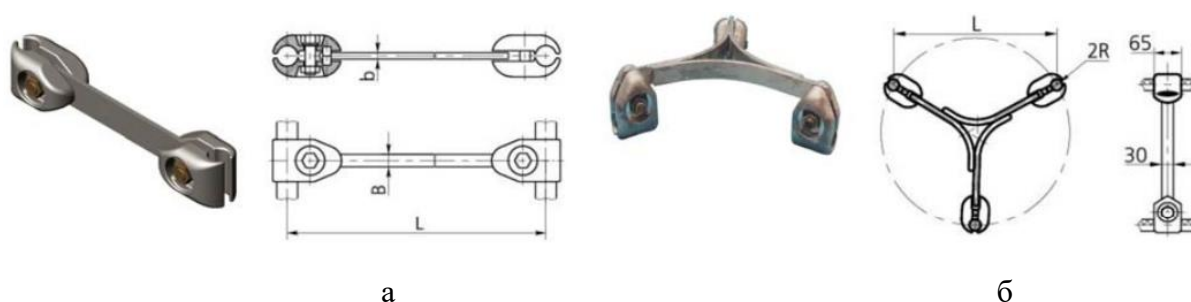
Отложение гололеда на трех проводах расщепленной фазы ВЛ 500 кВ при ветре поперек линии, как правило, бывает односторонним. Это происходит вследствие невозможности поворота жестко скрепленных распорками проводов под действием одностороннего гололеда [4, с. 19]. 3. Отмечено, что на линиях сверхвысокого напряжения, для которых характерно расщепление каждой фазы, характер движения р.ф. зависит от её конструктивного исполнения. Поэтому становится актуальным выявление принципиально новых решений в области конструирования расщеплённой фазы.

На проводах расщепленной фазы в пролетах и петлях анкерных опор должны быть установлены внутрифазные дистанционные распорки (рисунок 14).



Рисунок 14 - Гололед на проводе расщепленной фазы при креплении проводов жесткими распорками

Расстояния между распорками или группами распорок, устанавливаемыми в пролете на расщепленной фазе, не должны превышать 40 или 60 м в зависимости от типа местности. Типовые варианты распорок показаны на рисунке 15 [97].



а – распорка РГ-1-400; б – распорка трехлучевая ЗРГ-3-400

Рисунок 15 - Типовые варианты распорок

Жесткое, препятствующее закручиванию крепление проводов расщепленной фазы распорками, а также большая длина пролетов воздушных линий 500 кВ, приводит к тому, что пляска проводов на воздушных линиях электропередач 500 кВ имеет весьма интенсивный характер, охватывает большие участки ВЛ и продолжается длительное время.

Ниже на рисунке 16 приведены формы отложения гололеда на ВЛ 500 кВ в зависимости от направления и скорости ветра, а также выпадаемого осадка [4, с. 19].

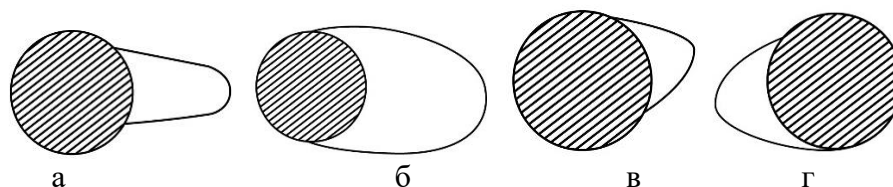


Рисунок 16 - Формы гололеда на проводах расщепленной фазы 500 кВ

Описания некоторых характерных случаев пляски на ВЛЭП 500 кВ приводят авторы и ближнего и дальнего зарубежья [2, с. 3-150; 4, с. 3-71; 49, с. 3-95; 98-101].

Самой опасной является пляска с одной полуволной в пролете, когда размах колебаний превышает стрелу провеса. При этом амплитуда переменной составляющей тяжения одиночного провода или каждого провода расщепленной фазы достигает 10-40 кН.

Были случаи, когда в одном пролете, но на разных фазах одновременно наблюдается пляска с различным числом полуволн. Низкочастотные колебания расщепленной фазы в целом играют важнейшую роль в выборе габаритов воздушной линии. Возникающие при пляске циклические нагрузки разрушают в первую очередь узлы, имеющие жесткую конструкцию и несущие большую нагрузку. По статистике на ВЛ 500 кВ в результате пляски было большое число нарушения прочности узлов крепления строенной гирлянды к траверсе анкерной опоры. В результате пляски проводов происходят замыкания проводов с тросами и между собой, что вызывает их повреждения токами короткого замыкания.

За время наблюдения за пляской проводов ВЛ 500 кВ за несколько лет эксплуатации были отмечены следующие повреждения: обрыв гирлянд на трех фазах; обрыв и повреждение защитных экранов на фазах; обрыв шлейфа на анкерных опорах; истирание скоб на анкерных соединениях; падение промежуточных железобетонных опор в анкерном участке из-за износа и одновременного обрыва скоб. Также отмечены многочисленные случаи истирания скоб анкерных гирлянд, нарушение прочности узлов крепления подвесных и натяжных гирлянд.

При анализе явления пляски проводов вначале предполагалось, что провод колеблется строго в вертикальной плоскости. Но, в действительности, вместе с вертикальными колебаниями наблюдаются также горизонтальные колебания и периодические закручивания провода относительно продольной оси. При расщепленной фазе с жесткими распорками иногда наблюдается закручивание всей фазы. Наибольший интерес представляют крутильные колебания провода, так как они вызывают изменение угла атаки и в соответствии с этим, они могут оказывать влияние на вертикальные колебания, возникновение и дальнейшее развитие которых является функцией изменения угла атаки. Можно отметить, что чем больше доля в изменении общего угла атаки при вертикальных перемещениях провода принадлежит крутильным колебаниям, тем большее воздействие оказывают крутильные колебания на размах вертикальных колебаний.

Наблюдения и большой объём измерений крутильных колебаний при пляске на действующих линиях и опытных стендах были проделаны в США и Канаде [98, р. 84-129].

На проводах были установлены указатели, которые фиксировали поступательные и крутильные колебания провода при пляске на киноплёнку.

Анализ киноплёнки показал, что частоты крутильных и вертикальных колебаний провода были почти одинаковы. В указанных случаях крутильные колебания возникали от силового воздействия поступательных колебаний. Фазы крутильных и вертикальных колебаний почти совпадали или отличались

примерно на 180° . Размах крутильных колебаний между двумя крайними положениями не превышал $10-25^\circ$. Когда амплитуды вертикальных колебаний были значительными и в соответствии с этим, изменения общего угла атаки, пропорциональные скорости провода при неизменной скорости ветра, были также большими, доля крутильных колебаний в изменении общего угла атаки была небольшой. Поэтому, в таких случаях, очевидно, что крутильные колебания не могли оказывать существенного влияния на вертикальные колебания провода. Крутильные колебания возникали за счет аэродинамического момента и не имели постоянного фазового угла между поступательными колебаниями. При этом наибольшая амплитуда поступательных колебаний была только в том случае, если крутильные колебания отставали от поступательных примерно на 40° . Были еще проведены ряд опытов, которые подтверждали влияние крутильных колебаний на возникновение пляски. При определенной скорости ветра, когда пляска не возникала, специально вручную возбуждались крутильные колебания, и при этом возникала пляска. Когда прекращались крутильные колебания, то и пляска прекращалась. Многие авторы отмечают, что расщепленные провода больше подвержены пляске, так как отложения гололеда имеют ассиметричную форму, которая благоприятна для пляски проводов [99]. Длина пролета влияет на число полувольт при пляске. Эксперименты показали, что при гололеде пляска начинается при скорости ветра 5-7 м/с и более. Амплитуда колебаний может расти до скорости ветра 20 м/с, а затем повышение скорости ветра не дает увеличения амплитуды. Пляска проводов сопровождается крутильными колебаниями с такой же частотой, что и поступательные колебания.

Схематическое изображение динамики пляски проводника показано ниже на рисунке 17 [102].

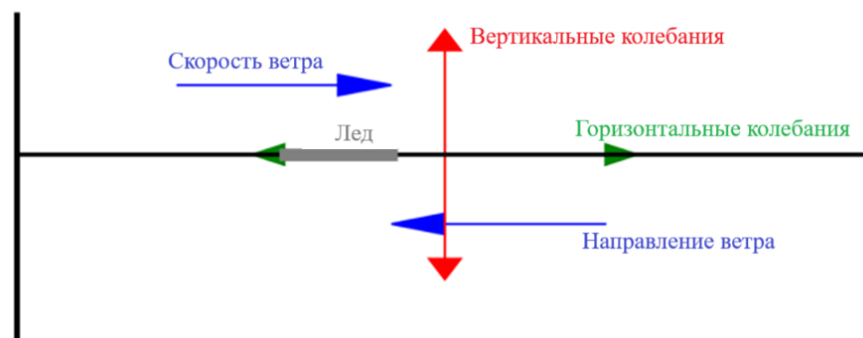


Рисунок 17 – Схематическое изображение динамики пляски проводника

Ниже приведены основные уравнения движения для вертикальных, горизонтальных и крутильных колебаний проводников:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = F_\omega; \quad (3.1)$$

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + c_\theta \frac{d\theta}{dt} + k_\theta \theta = M_\omega, \quad (3.2)$$

где m - масса на единицу длины;

c - коэффициент затухания;

k - жесткость;

F_ω - сила ветра;

I - момент инерции;

Θ_c - коэффициент крутильной жесткости;

K_Θ - крутильная жесткость;

Θ - угол кручения;

M_ω - аэродинамический момент.

Первое уравнение представляет собой вертикальное движение проводника, где первый член $m \frac{d^2 y}{dt^2}$ описывает силу инерции; второй член $c \frac{dy}{dt}$ учитывает затухание; ky учитывает силу, обусловленную жесткостью проводника. Правая часть уравнения F_ω , обозначает аэродинамическую силу, создаваемую ветром, которая, как правило, является нелинейной функцией как вертикального смещения y , так и угла кручения θ . Нелинейный характер аэродинамической силы подразумевает, что реакция проводника может проявляться в сложных формах, включая потенциальную связь между вертикальными и крутильными движениями.

Второе уравнение описывает крутильное движение проводника, где $I \frac{d^2 \theta}{dt^2}$ характеризует момент инерции; $c_\theta \frac{d\theta}{dt}$ - учитывает затухание крутильных колебаний; $k_\theta \theta$ - восстанавливающий момент, обусловленный крутильной жесткостью проводника. M_ω представляет собой аэродинамический момент, который аналогичен силе как в первом уравнении, и она может быть сложной функцией как от угла кручения θ , так и от вертикального смещения y . Взаимодействие между силой и моментом может приводить к сложным колебаниям, особенно при различных условиях ветра и свойствах проводника.

Взаимосвязь между вертикальными и крутильными движениями имеет решающее значение для понимания общего поведения проводов при пляске. Аэродинамическая сила и момент, создаваемый ветром, взаимозависимы, и их нелинейность может приводить к сложным моделям движения проводников при пляске, включая явления потенциального резонанса моментов при определенных скоростях ветра и направлениях [103]. Граничные условия, применяемые к этим уравнениям, необходимы для точного моделирования поведения проводника. Эти условия включают в себя фиксированные точки крепления проводника к опоре и начальные условия перемещения, а также угол наклона, который влияют на последующее перемещение. Учитывая нелинейный характер уравнений, аналитические решения часто неосуществимы. Для решения этих уравнений используются численные методы, такие как метод Рунге-Кутты. Численный подход позволяет рассчитать зависящее от времени поведение проводника, отражая сложную динамику явления пляски проводов при различных условиях работы.

3.2 Свободное крутильное колебание расщепленного провода ВЛ

Одной из проблем эксплуатации воздушных линий электропередачи высокого напряжения является обеспечение минимально допустимых расстояний между фазными проводами, а также между фазными проводами и элементами конструкции опор (стойки, траверсы).

Как известно, определенное влияние на процесс развития пляски наряду с соответствующими метеорологическими условиями оказывают характеристики крутильных движений расщепленного провода [104-106]. Синхронизированные вертикальные и крутильные колебания расщепленного провода вызывают периодические изменения угла атаки воздушного потока, воздействующего на провод [2, с. 3-150; 24, с. 3-71; 27, с. 3-253; 98, р. 84-129; 107, 108]. Для линий с расщепленными проводами крутильные колебания проявляются в периодических закручиваниях фазы в целом. Как известно, одно из предложений по борьбе с пляской проводов заключается в активном вмешательстве в этот процесс. Один из подходов основывается на достижении максимальных различий в частотах поперечных и крутильных колебаний, что повышает устойчивость РП к пляске. Широко используются гасители, принцип действия которых направлен на принудительную расстройку частот поперечных и крутильных движений РП (например, маятниковые гасители) [96, с. 3-694; 108, с. 36-41]. Для более эффективной реализации указанных мер интересно проанализировать крутильные движения РП с целью установления соотношений частот крутильных и поперечных колебаний и влияния на них конструктивных параметров расщепленного фазного провода воздушной линии. Кроме того, при расчете параметров некоторых типов гасителей, воздействующих на крутильные движения РП, необходимо иметь сведения о его крутильной жесткости. Сведения о крутильной жесткости полезно знать и при моделировании пляски РП с помощью эквивалентного провода, эквивалентных пружинных устройств и т.д. Для оценки крутильной жесткости применяются аналитические [109] и экспериментальные методы. Последние были, в частности, реализованы на опытном полигоне Казахстанского научно-исследовательского института энергетики. В задачу данной работы входит определение частотных характеристик свободных колебаний и крутильной жесткости расщепленного провода [106, с. 255-260].

3.2.1 Уравнение крутильного движения расщепленного провода

Уравнение крутильного движения РП определяем исходя из уравнения Лагранжа [104, с. 84-90]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{\Lambda}}{\partial \dot{\varphi}(t)} \right) - \frac{\partial L_{\Lambda}}{\partial \varphi(t)} = 0, \quad (3.3)$$

где $L_{\Lambda} = E_k - E_d$ – функция Лагранжа;

E_k – кинетическая энергия РП;

E_d - энергия деформаций проводов.

При аппроксимации форм колебаний расщепленного провода функциями вида:

$$\Phi(z, t) = \varphi(t) \sin \frac{\pi \cdot z}{\ell} . \quad (3.4)$$

Кинетическая энергия РП от вращательного движения равна

$$E_k = \int_0^{\ell} \frac{J_{\phi}}{2} \left(\frac{\partial \Phi(z, t)}{\partial t} \right)^2 dz = \frac{n P_0 \ell R^2}{4g} \dot{\phi}^2(t) , \quad (3.5)$$

где $\varphi(t)$ - обобщенная координата;

z - расстояние от опоры до произвольного сечения РП;

ℓ - длина пролета;

P_0 - масса одного метра провода;

n - число расщеплений (число проводов в фазе);

R - радиус расщепления;

J_{ϕ} - момент инерции расщепленного провода, который определяют

$$J_{\phi} = \frac{n P_0}{g} R^2 . \quad (3.6)$$

При условии, что зависимость между удлинением и натяжением провода носит линейный характер, энергия деформация i -го проводника расщепленного провода может быть выражена с помощью формулы (3.7) [110]

$$E_{di} = T_0 (L_{\phi} - L_0) + \frac{EF}{2\ell} (L_{\phi} - L_0)^2 , \quad (3.7)$$

где E - модуль Юнга;

F - площадь поперечного сечения провода;

T_0 - начальное натяжение провода.

Длину L_0 в положении статического равновесия i -го провода РП и длину L_{ϕ} в закрученном состоянии можно определить по приближенным формулам (3.8), (3.9), (3.10), (3.11), (3.12), (3.13), (3.14), (3.15):

$$L_0 = \int_0^{\ell} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y(z)}{\partial z} \right)^2 \right] dz ; \quad L_{\phi} = \int_0^{\ell} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y_{\phi}(z, t)}{\partial z} \right)^2 \right] dz , \quad (3.8)$$

где $y(z)$ и $y_\varphi(z, t)$ – функции, описывающие конфигурацию (провес) провода в пролете до и после закручивания РП. Расщепленная фаза представляет собой пучок, состоящих из нескольких проводов. На рисунке 12 приведена конфигурация расщепленной фазы, где число проводов в фазе равно трем.

Координатная функция, описывающая положение статического равновесия провода в пролете, определяется по известной формуле (3.9):

$$y(z) = \frac{P_0}{2T_0} z(\ell - z) \quad (3.9)$$

Согласно теореме косинусов, функция $y_\varphi(z, t)$ определяется после геометрических расчетов кручения РП вдоль пролета:

$$y_\varphi(z, t) = y(z) + \frac{1}{2} R \sin \mu_i \varphi^2(t) \sin^2 \frac{\pi z}{l} - R \cos \mu_i \varphi(t) \sin \frac{\pi z}{l}. \quad (3.10)$$

Здесь угол μ_i определяет место расположения отдельных проводов в пучке. Если через μ_i обозначить начальную угловую координату одного из проводов фазы, условно принимаемого за первый, то последующие углы μ_i определяются по формуле (3.11):

$$\mu_i = \mu_1 + \frac{2\pi(i-1)}{n}, \quad (3.11)$$

где $i=1-n$.

Например, для расщепленной фазы состоящей из трех проводов ($n=3$), согласно (3.11), имеем: $\mu_1=30^\circ$; $\mu_2=150^\circ$; $\mu_3=270^\circ$.

Длины проводов расщепленной фазы до (L_0) и после (L_φ) закручивания согласно формулам (3.8), (3.9), (3.10), равны следующим выражениям:

$$L_0 = \ell + \frac{P_0^2 \cdot \ell^3}{24 \cdot T_0^2}; \quad (3.12)$$

$$L_\varphi = L_0 + \frac{P_0 \cdot \ell^2}{2\pi \cdot T_0} \left(k_1 - \frac{4}{\pi} k_2 \right) + \frac{\ell}{4} (k_1^2 + k_2^2) - \frac{4\ell}{3\pi} k_1 k_2, \quad (3.13)$$

где

$$k_1 = \frac{\pi}{2\ell} R \sin \mu_i \varphi^2(t); \quad k_2 = \frac{\pi}{\ell} R \cos \mu_i \varphi(t).$$

Подставляя разности длин проводов $(L_\varphi - L_0)$ в формулу (3.7) и опуская промежуточные преобразования и вычисления, представим конечную формулу для энергии деформаций расщепленного провода в виде:

$$E_d = \sum_1^n E_{di} = \frac{\pi^2 R^2 T_0}{4\ell} \left(1 + \frac{8EFP_0^2 \ell^2}{\pi^4 \cdot T_0^3} \right) \sum_1^n \cos^2 \mu_i \cdot \varphi^2(t) +$$

$$+ \left[\frac{\pi^2 R^2 T_0}{16\ell} \left(1 + \frac{EFP_0^2 \ell^2}{2\pi^2 T_0^3} \right) \sum_1^n \sin^2 \mu_i + \frac{\pi^4 R^4 EF}{32\ell^3} \sum_1^n \cos^4 \mu_i \right] \cdot \varphi^4(t) +$$

$$+ \frac{\pi^4 R^4 EF}{64\ell^3} \sum_1^n \sin^2 \mu_i \cos^2 \mu_i \cdot \varphi^6(t) + \frac{\pi^4 R^4 EF}{512\ell^3} \sum_1^n \sin^4 \mu_i \cdot \varphi^8(t) \quad (3.14)$$

По выражениям (3.5) и (3.14) определяем функцию Лагранжа $L_\Lambda = E_k - E_d$. Подставляя L_Λ в уравнение (3.3), получим дифференциальное уравнение крутильного колебания:

$$\ddot{\varphi}(t) + \omega_\Lambda^2 s_1 \varphi(t) + \left(\Omega^2 s_2 + \frac{\pi^4}{4} D s_3 \right) \varphi^3(t) + \frac{3\pi^4}{16} D s_5 \varphi^5(t) + \frac{\pi^4}{32} D s_4 \varphi^7(t) = 0 \quad (3.15)$$

$$\text{где } D = \frac{gEFR^2}{P_0 \ell^4}; \Omega^2 = \frac{\pi^2 g T_0}{2P_0 \ell^2} \left(1 + \frac{EFP_0^2 \ell^2}{2\pi^2 T_0^3} \right); \omega_\Lambda^2 = \frac{\pi^2 g T_0}{P_0 \ell^2} \left(1 + \frac{8EFP_0^2 \ell^2}{\pi^4 T_0^3} \right).$$

Здесь ω_Λ определяет собственную частоту поперечного колебания линейаризованной системы [111].

В таблице 9 ниже приведены отличные от нуля значения тригонометрических коэффициентов.

Таблица 9 – Числовые значения тригонометрических коэффициентов

Коэффициенты	Шаг расщепления n			
	2	3	4	5
$s_1 = \frac{1}{n} \sum_1^n \cos^2 \mu_i$	1	0,5	0,5	0,5
$s_2 = \frac{1}{n} \sum_1^n \sin^2 \mu_i$	1	0,5	0,5	0,5
$s_3 = \frac{1}{n} \sum_1^n \cos^4 \mu_i$	1	0,37	0,25	0,37
$s_4 = \frac{1}{n} \sum_1^n \sin^4 \mu_i$	0	0,37	0,25	0,37
$s_5 = \frac{1}{n} \sum_1^n \sin^2 \mu_i \cos^2 \mu_i$	0	0,12	0,25	0,12

3.3 Собственные частоты поперечного и крутильного движения расщепленного провода

Решение уравнения (3.15) осуществляется приближенным методом Бубнова–Галеркина [112].

Вариационная форма уравнения имеет вид:

$$\int_0^{\frac{2\pi}{\varpi_k}} \left[\ddot{\varphi}(t) + \omega_{\Lambda}^2 s_1 \varphi(t) + \left(\Omega^2 s_2 + \frac{\pi^4}{4} Ds_3 \right) \varphi^3(t) + \frac{3\pi^4}{16} Ds_5 \varphi^5(t) + \frac{\pi^4}{32} Ds_4 \varphi^7(t) \right] \cdot \delta \varphi dt = 0$$

Предположим

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cos \varpi_k t; \quad \delta \varphi = \delta \varphi_0 \cos \varpi_k t,$$

где φ_0 – амплитуда крутильного колебания расщепленного провода;

ϖ_k – искомая частота крутильного колебания.

Интегрируя вариационное уравнение с учетом $\delta \varphi$, получим частотное уравнение:

$$\varpi_k = \omega_k \left[1 + \frac{3}{4\omega_k^2} \left(\Omega^2 s_2 + \frac{\pi^4}{4} Ds_3 \right) \varphi_0^2 + \frac{15\pi^4}{128\omega_k^2} Ds_5 \varphi_0^4 + \frac{35\pi^4}{2048\omega_k^2} Ds_4 \varphi_0^6 \right] 1^{-\frac{1}{2}}, \quad (3.16)$$

где ω_k – собственная частота крутильного движения линеаризованной системы, определяемая по формуле (3.17):

$$\omega_k = \omega_{\Lambda} \sqrt{s_1}. \quad (3.17)$$

Как следует из формулы (3.17), отношение собственных частот поперечного и крутильного движения расщепленного провода величина постоянная и составляет:

$$\frac{\omega_{\Lambda}}{\omega_k} = \frac{1}{\sqrt{s_1}} = \sqrt{2}. \quad (3.18)$$

Формула (3.18) не учитывает влияния амплитуды поперечного и крутильного колебания на частотные характеристики. Частота поперечного колебания практически не изменяется с увеличением амплитуды [111, с. 64-65], а частота кручения чувствительна к изменению угла закручивания (рисунок 18а). Следовательно, с увеличением амплитуды кручения отношение (3.18) несколько уменьшается. Для определения отношения частот с учетом влияния

амплитуды крутильных колебаний ограничимся двухчленным приближением формулы (3.16) (для реальных линий ВЛЭП коэффициентом D можно пренебречь)

$$\tilde{\omega}_k = \omega_k \sqrt{1 + \frac{3}{4\omega_k^2} \left(\Omega^2 s_2 + \frac{\pi^4}{4} D s_3 \right)} \varphi_0^2 \approx \omega_k \sqrt{1 + \frac{3\Omega^2 s_2}{4\omega_k^2}} \quad (3.19)$$

В формуле (3.19) при упрощении φ_0 можно принять равным 1. Используя формулу (3.19), находим (с учетом $s_1 = s_2 = 0,5$):

$$\frac{\omega_\Lambda}{\tilde{\omega}_k} = \sqrt{\frac{8\omega_\Lambda^2}{4\omega_\Lambda^2 + 3\Omega^2}}. \quad (3.20)$$

По формуле (3.20) чем ближе отношение частот к единице, тем легче возбуждается пляска провода в пролете.

3.4 Крутильная жесткость расщепленной фазы

Крутильная жесткость расщепленного провода может быть определена исходя из зависимости между жесткостью и крутильной частотой эквивалентного вала. Согласно [112, с. 3-453] крутильная частота определяется по формуле (3.21):

$$p = \frac{\pi}{\ell} \sqrt{\frac{K}{J}} \quad (3.21)$$

где p - крутильная частота вала;

K – крутильная жесткость вала;

J - момент инерции вала.

Заменим РП эквивалентным валом

$$p = \tilde{\omega}_k; \quad K = K_{p\phi}; \quad J = J_{p\phi} = \frac{nP_0}{g} R^2.$$

Решив (3.21) относительно искомой величины $K_{p\phi}$, находим

$$K_{p\phi} = \frac{nP_0 \ell^2 R^2}{\pi^2 g} \omega_k^2 \left(1 + \frac{3\Omega^2 s_2}{4\omega_k^2} \right) = \frac{nP_0 \ell^2 R^2}{2\pi^2 g} \left(\omega_\Lambda^2 + \frac{3}{4} \Omega^2 \right). \quad (3.22)$$

Ниже приведены результаты теоретических расчетов, а также сопоставления теоретических и экспериментальных данных. Экспериментальные данные по частотным характеристикам, а также по

крутильной жесткости РП в свое время получены на опытном полигоне КазНИИ энергетики имени академика Ш.Ч. Чокина. Все расчетные и экспериментальные данные относятся к сталеалюминевому проводу марки АСО-330/39.

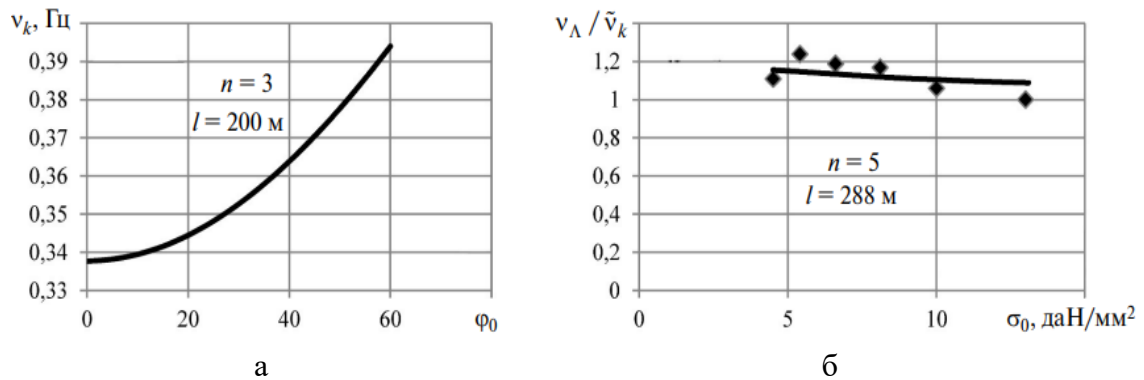


Рисунок 18 – а) зависимость частоты крутильного колебания расщепленного провода от амплитуды кручения, б) отношение частоты поперечного и крутильного колебания расщепленного провода

На рисунке 18а приведены зависимости частоты крутильного колебания от амплитуды кручения. Расчет выполнен при напряжении $\sigma_0=8$ даН/мм². Число расщепления – $n=3$. Длина пролета $l=200$ м. Как следует из рисунка, при амплитуде кручения $\phi_0 = 60^\circ$ (характеризует максимальный угол поворота РП при пляске) частота крутильного колебания может увеличиваться до 17%. С увеличением натяжения провода и длины пролета – это отличие несколько сглаживается.

На рисунке 18б приведены результаты сопоставления экспериментальных и расчетных данных об отношении частот поперечных и крутильных колебаний РП при различных σ_0 . Длина опытного пролета $l=288$ м, число расщепления $n=5$. Как видно, из рисунка 18, при малых напряжениях между расчетными и экспериментальными данными имеется небольшое расхождение. В целом можно отметить, что расчетные и экспериментальные данные согласуются между собой удовлетворительно.

Из рисунка 18 следует, что с увеличением напряжения разница в частотах уменьшается и расщепленные провода становятся более подверженными к пляске.

Таблица 10 – Сопоставление экспериментальных и теоретических данных крутильной жесткости расщепленного провода

Сопоставление	$n=5; \quad l=288 \text{ (м)}$				Примечание
$\sigma_0 \text{ (даН / мм}^2\text{)}$	4,5	5,4	8,5	13,2	
$K_{pф} \text{ (даН} \cdot \text{м}^2 \text{ / рад)}$	4087	3145	2123	2186	по формуле (3.22)
	1323	1008	655	651	по формуле (3.23)
	2659	2426	2493	3177	Эксперимент

В таблице 10 приведены результаты теоретических расчетов, а также сопоставление теоретических и экспериментальных данных.

Согласно [109, р. 909-915], для определения эквивалентной крутильной жесткости расщепленной фазы принимается формула (3.23):

$$K_{p\phi} = n\tau + T_0 R^2 \left(1 + \frac{EFP_0^2 \ell^2}{12T_0^3} \right) \quad (3.23)$$

где τ - крутильная жесткость одиночного провода (при расчетах можно пренебречь, потому что $\tau \ll K_{p\phi}$). Как показывает сравнительный анализ, расчетные формулы, полученные в [109, р. 909-915], дают для крутильной жесткости существенно заниженные значения.

Выводы по третьему разделу:

1) если пляска сопровождается крутильными колебаниями, и при этом наблюдается неодинаковая частота с поступательными колебаниями, то наибольшая амплитуда последних будет в том случае, когда крутильные колебания отстают от них на $40-45^\circ$;

2) крутильные колебания играют немаловажную роль в возникновении пляски проводов из-за более значительных внешних сил, необходимых для возникновения самой пляски и создания необходимого энергетического баланса, а также для протекания пляски проводов при изменении фазы угла атаки от крутильных колебаний;

3) частота поступательных колебаний при пляске почти равна собственной частоте колебаний провода, отличие на 10-20% может быть из-за формы гололеда;

4) частота крутильного колебания расщепленного провода всегда меньше частоты поперечного колебания. При минимальном расщеплении (это два провода в фазе по правилам) эти частоты совпадают. В нашей стране применяют 500 кВ, где шаг расщепления равен трем, и где частота крутильных колебаний всегда ниже, чем поперечных;

5) с увеличением натяжения и с уменьшением длины пролета разности между частотой поперечного и крутильного колебания уменьшаются; при незначительных крутильных колебаниях отставание по фазе самих крутильных колебаний от поступательных – небольшое ($5-10^\circ$), а изменение фазы общего угла атаки значительно ($20-80^\circ$);

6) частота крутильного колебания зависит от амплитуды кручения. При значительных крутильных колебаниях, может быть, большое число изменений крутильных колебаний по фазе (около 30°) с поступательными колебаниями, и при этом изменение общего угла атаки находится в пределах $35-40^\circ$; возрастание частоты с ростом амплитуды кручения происходит по нелинейному закону;

7) увеличение длины пролета, массы провода, числа расщепления (радиуса) и частоты колебания приводит к увеличению крутильной жесткости расщепленного провода;

8) на основании нелинейного дифференциального уравнения с использованием метода Бубнова-Галеркина рассчитаны крутильные колебания расщепленного провода, получены расчетные формулы для его крутильной жесткости. Установлены соотношения между характеристиками крутильных и поперечных колебаний расщепленного провода, позволяющие осуществлять оптимальный выбор параметров устройств подавления пляски;

9) сопоставление расчетов и экспериментальных данных, подтверждает надежность полученных формул. Они могут быть использованы при решении прикладных задач, связанных с ограничением пляски проводов.

Все эти выводы дают нам понять физическую сущность процесса пляски проводов и создать математическую модель пляски несмотря на то, что модель расчета получается сложным из-за нелинейности колебательной системы.

4 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛЯСКИ ПРОВОДОВ

4.1 Характеристика сил, действующих на провод при пляске

Как мы уже отметили ранее, при пляске провод совершает вертикальные и горизонтальные, а также и крутильные колебания, которые могут быть представлены в виде перемещений оси вращения провода и крутильных колебаний сечений относительно этой оси. При анализе внешних воздействий нужно учесть ввиду, что главную роль выполняют аэродинамические силы, которые служат источником энергии для поддержания колебательного процесса. Для расчета процесса пляски проводов надо знать значения аэродинамических сил, которые возникают при обтекании тела воздушным потоком. К примеру, коэффициент подъемной силы, для различных форм гололеда, были определены экспериментально в странах ближнего и дальнего зарубежья при испытаниях в аэродинамической трубе при различных скоростях ветра [19, с. 4-116; 74, р. 674-679; 75, р. 16650-1-16650-23; 76, р. 10-18; 77, р. 4173-4180; 78, р. 7-13; 79, р. 81-84; 80, р. 166-174; 81, р. 469-488; 82, р. 407-419; 83, р. 1224-1231; 84, р. 784-791; 85, р. 13-24; 86, р. 282-285; 87, р. 2121-2127; 88, р. 175-181]. Это позволило определить значение подъемной силы, кг, которая действует на провод длиной 1 м, для различных сечений проводов с гололедом по следующей формуле (4.1):

$$P_y = C_y \rho_B s v^2, \quad (4.1)$$

где C_y – коэффициент подъемной силы;

ρ_B – плотность воздуха, $\text{кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$;

s – площадь продольного сечения по диаметру провода длиной 1 м, свободного от гололеда, м^2 ;

v – скорость ветра, м/с .

Кроме коэффициента подъемной силы, необходимо знать лобовое сопротивление C_x и аэродинамический момент C_m .

Для крутильных колебаний провода аэродинамическая подъемная сила зависит от квадрата скорости ветра, поэтому эта сила будет преобладающей по сравнению с аэродинамической силой, возникающей от изменения угла атаки при поступательных колебаниях. Значит, воздействием на крутильные колебания, можно возбуждать или гасить пляску проводов.

Для характеристики внешних воздействий выделим отрезок провода с гололедным осадком. Сечение провода с гололедным осадком и основные действующие силы показаны на рисунке 19 [4, с. 3-71]. Характерными точками сечения провода с гололедом является центр приложения аэродинамических сил A , центр тяжести C , центр вращения O , центры приложения сил трения p . Через x, y обозначены координаты центра вращения относительно неподвижной системы отсчета. Расстояние от центра вращения до центра тяжести обозначено через l_c , а до центра трения через l_p . Провод повернут на произвольный

первоначальный угол Θ_ϕ относительно ветрового потока. Результирующая скорость V_a направлена к сечению под углом Θ_a . На единицу длины провода действуют усилия и крутящие моменты различного характера (рисунок 19).

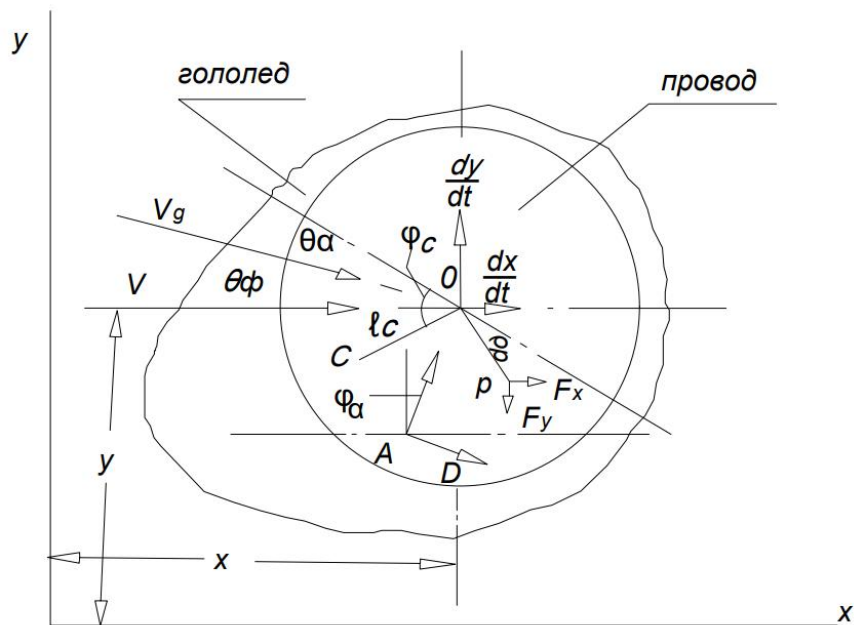


Рисунок 19 – Схема воздействия внешних сил на обледенелый провод

Лобовое давление D' , действующее параллельно результирующей скорости воздушного потока V_g , определяется по формуле (4.2):

$$D' = C_d \frac{\rho_v V_g^2}{2} d, \quad (4.2)$$

где C_d – коэффициент лобового сопротивления;

ρ_v – плотность воздуха;

d – характерный размер сечения.

Подъемная сила L' выражается по следующей формуле (4.3):

$$L' = C_L \frac{\rho_v V_g^2}{2} d, \quad (4.3)$$

где C_L – коэффициент подъемной силы.

Аэродинамический момент M'_a , возникающий из-за смещения аэродинамического центра A относительно O , определяют по формуле (4.4):

$$M'_a = C_m \frac{\rho_v V_g^2}{2} d^2, \quad (4.4)$$

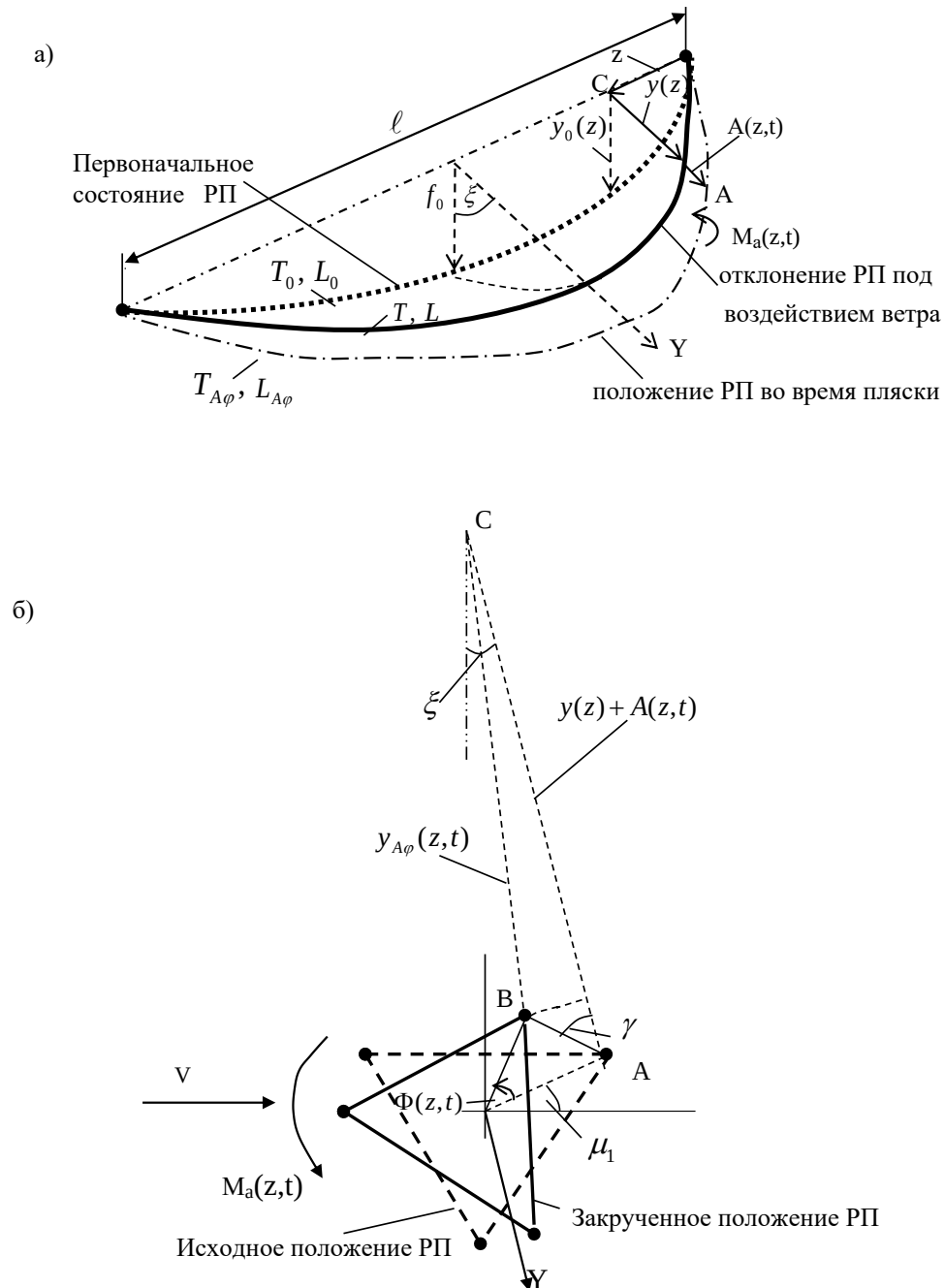
где C_m – коэффициент аэродинамического момента.

Коэффициенты все определяются экспериментально. Для этого образцы профилей продуваются в аэродинамической трубе. К примеру, результаты

испытаний в аэродинамической среде различных профилей провода с гололедом с определением зависимости от угла атаки коэффициентов C_d , C_L , C_m по данным [100, с. 47-56] приведены на (рисунке 5 и 6 [49, с. 3-95]).

4.2 Математическая модель пляски расщепленной фазы без учета движения гирлянды изоляторов

Рассмотрим пляску расщепленного провода расщепленного провода около положения статического равновесия [2, с. 3-150; 49, с. 3-95; 96, с. 3-694; 113]. Расчетная схема приведена на рисунке 20.



а – линейное перемещение; б – крутильное движение (сечение провода на расстоянии z от опоры)

Рисунок 20 – Расчетная схема расщепленного провода ($n=3$)

Уравнения движения определяем исходя из уравнения Лагранжа:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{\Lambda}}{\partial \dot{a}(t)} \right) - \frac{\partial L_{\Lambda}}{\partial a(t)} = - \frac{\partial R_a}{\partial \dot{a}(t)} + F_a \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{\Lambda}}{\partial \dot{\varphi}(t)} \right) - \frac{\partial L_{\Lambda}}{\partial \varphi(t)} = - \frac{\partial R_{\varphi}}{\partial \dot{\varphi}(t)} + M_a - M_u \end{cases} \quad (4.5)$$

где $\alpha(t)$ и $\varphi(t)$ обобщенные координаты;

F_A – аэродинамическая сила;

M_a - аэродинамический момент;

M_u – инерционный момент (возникает при воздействии инерционной силы на односторонний гололед);

$\frac{\partial R_a}{\partial \dot{a}(t)}$ и $\frac{\partial R_{\varphi}}{\partial \dot{\varphi}(t)}$ – обобщенная сила и обобщенный момент сопротивления (R_a и R_{φ} - диссипативные функция);

$L_{\Lambda} = E_k - (E_d - E_{\Pi})$ – функция Лагранжа;

Составляющие функций Лагранжа:

E_k – кинетическая энергия расщепленного провода,

E_d – энергия деформаций расщепленного провода,

E_{Π} - потенциальная энергия силы тяжести.

Определение левой части уравнения движения расщепленного провода.

Для аппроксимации расщепленного провода системой с одной степенью свободы предположим, что конфигурация провода при пляске подчиняются гармоническим законам, что вполне допустимо для решения прикладных вопросов теорий колебаний. В этом случае линейное и угловое перемещения обледененного провода представляется соответствующими уравнениями:

$$A(z, t) = a(t) \sin \frac{\pi z}{\ell} \quad (4.6)$$

$$\Phi(z, t) = \varphi(t) \sin \left(\frac{\pi z}{\ell} \right) \quad (4.7)$$

где $\alpha(t)$ и $\varphi(t)$ - обобщенные координаты линейных и угловых перемещений;

$\sin\left(\frac{\pi z}{\ell}\right)$ – координатная функция, удовлетворяющая граничные условия;
 z – текущая координата;
 t – время.

Составляющие функций Лагранжа.

Кинетические энергии расщепленного провода от линейного и вращательного движения:

$$E_k = n \int_0^{\ell} \frac{P_{\text{вер}}}{2g} \left(\frac{\partial A(z,t)}{\partial t} \right)^2 dz + \int_0^{\ell} \frac{1}{2} J_{\Phi} \left(\frac{\partial \Phi(z,t)}{\partial t} \right)^2 dz \quad (4.8)$$

где n – число проводов в фазе;

J_{Φ} – массовый момент инерции расщепленного провода;

$P_{\text{вер}}$ – вес обледененного провода.

Вес провода с гололедным отложением в основном зависят от плотности льда и от толщины отложения. Эти характеристики изменяются в широком диапазоне. Однако, в подавляющем большинстве случаев (70%) пляска возникает при толщине гололеда от 3 мм до 15 мм. Среднее статистическое значение толщины осадка составляет 10 мм (раздел 2). Такая толщина, как правило, дает небольшую прибавку (не более 10%) собственному весу провода. Поэтому, в дальнейшем будем полагать, что вес льда составляет 10% от собственного веса провода и примем $P_{\text{вер}} \approx 1,1P_0$ (где P_0 – собственный вес провода на единицу длины).

Если пренебречь пологостью расщепленного провода, момент инерции определяется по формуле (3.6).

Интегрируя выражение кинетической энергии (4.8) в пределах пролета с учетом функций (4.6) и (4.7), получим:

$$E_k = \frac{nP_{\text{вер}}\ell}{4g} [\dot{a}^2(t) + R^2\dot{\phi}^2(t)] \quad (4.9)$$

При условии, что зависимость между удлинением и натяжением провода носить линейный характер, энергия деформации i -го провода определяется по формуле (4.10):

$$E_{di} = \frac{1}{2} (T_{A\phi} + T) (\Delta\ell_{A\phi} - \Delta\ell) \quad (4.10)$$

где $T, \Delta\ell$ – натяжение и удлинение провода в положении статического равновесия РФ;

$T_{A\varphi}, \Delta\ell_{A\varphi}$ – натяжение и удлинение i -го расщепленного провода в отклоненном состоянии.

С учетом соотношения:

$$\Delta\ell_{A\varphi} - \Delta\ell = L_{A\varphi} - L = \frac{\ell}{EF}(T_{A\varphi} - T)$$

энергию деформации i -го провода определяем по формуле (22), где L – длина провода в отклоненном положении под воздействием ветра, $L_{A\varphi}$ – длина провода в процессе пляски.

Длину провода в различных состояниях определяем по приближенным формулам (3.8), где $y(z)$ – координатные функций (рисунок 20а), $y(z)$ определено по формуле (3.9) и $y_{A\varphi}(z,t)$ – координатные функций (рисунок 20а).

Интегрирую выражение (3.8) от 0 до ℓ с учетом функции $y(z)$, получим:

$$L = \ell + \frac{P_{веп}^2 \ell^3}{24T^2} \quad (4.11)$$

Функцию $y_{\varphi}(z,t)$ определяем исходя из геометрических расчетов (рисунок 20б). Согласно теореме косинусов (из-за малости квадратами АВ пренебрегли):

$$y_{A\varphi}(z,t) = \sqrt{AC^2 + AB^2 - 2AC \cdot AB \cdot \cos \gamma} \approx AC \sqrt{1 - \frac{2AB}{AC} \cos \gamma}$$

Учитывая известное приближенное соотношение $\sqrt{1-\alpha} \approx 1-0,5\alpha$, а также значения:

$$\begin{aligned} AB &= 2R \sin \frac{\Phi(z,t)}{2}; \\ AC &= y(z) + A(z,t) \\ \gamma &= \frac{\Phi(z,t)}{2} + \mu_i - \xi, \end{aligned}$$

получим

$$y_{A\varphi}(z,t) \approx AC - ABCos \gamma = y(z) + A(z,t) - 2R Sin \frac{\Phi(z,t)}{2} Cos \left(\frac{\Phi(z,t)}{2} + \mu_i - \xi \right)$$

Следует отметить, что при установившемся режиме пляски проводов амплитуда крутильного колебания расщепленного провода, как правило, незначительно. При небольших углах закручивания расщепленного провода можно допускать:

$$Sin \frac{\Phi(z,t)}{2} \approx \frac{\Phi(z,t)}{2}; Cos \left(\frac{\Phi(z,t)}{2} + (\mu_i - \xi) \right) \approx Cos(\mu_i - \xi) - \frac{\Phi(z,t)}{2} Sin(\mu_i - \xi)$$

С учетом упрощения получим:

$$y_{A\varphi}(z,t) = y(z) + A(z,t) + \frac{1}{2} R \Phi^2(z,t) Sin(\mu_i - \xi) - R \Phi(z,t) Cos(\mu_i - \xi)$$

Подставляя значения $A(z,t)$, $\Phi(z,t)$ и $y(z)$ формулы (3.8), (4.6), (4.7) имеем:

$$\begin{aligned} y_{A\varphi}(z,t) = & \frac{P_{\text{веп}}}{2T} z(\ell - z) + a(t) Sin \frac{\pi z}{\ell} + \\ & + \frac{1}{2} R Sin(\mu_i - \xi) \varphi^2(t) Sin^2 \frac{\pi z}{\ell} - R Cos(\mu_i - \xi) \varphi(t) Sin \frac{\pi z}{\ell} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Здесь угол μ_i определяем по (3.11).

С учетом функции $y_{A\varphi}(z,t)$ длина $L_{A\varphi}$ определяется путем интегрирование выражение (3.8). Результаты интегрирования приведены ниже

$$\begin{aligned} L_{A\varphi} = & \ell + \frac{P_{\text{веп}}^2 \ell^3}{24T^2} + \frac{2P_{\text{веп}} \ell}{\pi T} a(t) + \frac{\pi^2}{4\ell} a^2(t) - \frac{2P_{\text{веп}} \ell R}{\pi T} Cos(\mu_i - \xi) \varphi(t) + \\ & + \left(\frac{P_{\text{веп}} \ell R}{4T} Sin(\mu_i - \xi) + \frac{\pi^2 R^2}{4\ell} Cos^2(\mu_i - \xi) \right) \varphi^2(t) - \frac{2\pi R^2}{3\ell} Sin(\mu_i - \xi) Cos(\mu_i - \xi) \varphi^3(t) + \\ & + \frac{\pi^2 R^2}{16\ell} Sin^2(\mu_i - \xi) \varphi^4(t) - \frac{\pi^2 R}{2\ell} Cos(\mu_i - \xi) a(t) \varphi(t) + \frac{2\pi R}{3\ell} Sin(\mu_i - \xi) a(t) \varphi^2(t) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Энергия деформации расщепленного провода определяется путем суммирования энергий деформации отдельных проводов пучка формула (4.10).

Определив разности длин проводов $(L_{A\varphi} - L)$ согласно формулам (4.11), (4.13) и подставляя в выражение (4.10) (энергия деформации i – го провода), затем суммируя определяем полную энергию. Следует отметить, что по ходу преобразования пренебрегли некоторыми членами выражения из-за их малости, кроме того, некоторые суммы тригонометрических коэффициентов обращаются в нуль:

$$E_d = \sum_1^n E_{di} = d_0 a(t) + d_1 a^2(t) + d_2 a^3(t) + d_3 a^4(t) + d_4 \varphi^2(t) + d_5 \varphi^4(t) + \\ + d_6 \varphi^6(t) + d_7 a(t) \varphi^2(t) + d_8 a(t) \varphi^4(t) + d_9 a(t) \varphi^6(t) + d_{10} a^2(t) \varphi^2(t) \quad (4.14)$$

где

$$d_0 = \frac{2nP_{\text{sep}}\ell}{\pi}; \quad d_1 = \frac{\pi^2 nT}{4\ell} \left(1 + \frac{8EFP_{\text{sep}}^2 \ell^2}{\pi^4 T^3} \right); \quad d_2 = \frac{\pi nEFP_{\text{sep}}}{2T\ell}; \quad d_3 = \frac{\pi^4 nEF}{32\ell^3}; \\ d_4 = \frac{\pi^2 R^2 T}{4\ell} \left(1 + \frac{8EFP_{\text{sep}}^2 \ell^2}{\pi^4 T^3} \right) \sum_1^n \text{Cos}^2(\mu_i - \xi); \\ d_5 = \frac{\pi^2 R^2 T}{16\ell} \left(1 + \frac{EFP_{\text{sep}}^2 \ell^2}{2\pi^2 T^3} \right) \sum_1^n \text{Sin}^2(\mu_i - \xi) - \left(\frac{4}{3} + \frac{\pi^2}{16} \right) \frac{EFP_{\text{sep}} R^3}{T\ell} \sum_1^n \text{Sin}^3(\mu_i - \xi); \\ d_6 = \frac{\pi^2 EFR^3 P_{\text{sep}}}{64T\ell} \sum_1^n \text{Sin}^3(\mu_i - \xi) + \left(\frac{\pi^2}{9} + \frac{\pi^4}{64} \right) \frac{EFR^4}{\ell^3} \sum_1^n \text{Sin}^2(\mu_i - \xi) \text{Cos}^2(\mu_i - \xi); \\ d_7 = \frac{3\pi EFR^2 P_{\text{sep}}}{2T\ell} \sum_1^n \text{Cos}^2(\mu_i - \xi); \\ d_8 = \frac{7\pi EFR^2 P_{\text{sep}}}{24T\ell} \sum_1^n \text{Sin}^2(\mu_i - \xi) - \frac{\pi^3 EFR^3}{2\ell^3} \sum_1^n \text{Sin}^3(\mu_i - \xi); \\ d_9 = \frac{\pi^3 EFR^3}{24\ell^3} \sum_1^n \text{Sin}^3(\mu_i - \xi); \quad d_{10} = \frac{3\pi^4 EFR^2}{16\ell^3} \sum_1^n \text{Cos}^2(\mu_i - \xi);$$

Потенциальная энергия от силы тяжести

$$E_{\Pi} = nP_{\text{sep}} \int_0^{\ell} A(z, t) \text{Cos} \xi \, dz \approx \frac{2nP_{\text{sep}}\ell}{\pi} a(t) \quad (4.15)$$

С учетом составляющих (4.8), (4.14) и (4.15), функцию Лагранжа $L_\Lambda = E_k - (E_d - E_\Pi)$ представим следующим образом:

$$L_\Lambda = \frac{nP_{\text{sep}}\ell}{4g} \left[\dot{a}^2(t) + R^2 \dot{\varphi}^2(t) \right] - d_1 a^2(t) - d_2 a^3(t) - d_3 a^4(t) - d_4 \varphi^2(t) - \\ - d_5 \varphi^4(t) - d_6 \varphi^6(t) - d_7 a(t) \varphi^2(t) - d_8 a(t) \varphi^4(t) - d_9 a(t) \varphi^6(t) - d_{10} a^2(t) \varphi^2(t) \quad (4.16)$$

Левые части уравнение движения расщепленного провода (4.5) с учетом функции L_Λ будут равны:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_\Lambda}{\partial \dot{a}(t)} \right) - \frac{\partial L_\Lambda}{\partial a(t)} = c_0 \left\{ \ddot{a}(t) + c_1 a(t) + 3\pi c_2 a^2(t) + \frac{\pi^4 c_3}{4} a^3(t) + 3\pi c_2 R^2 s_1 \varphi^2(t) + \right. \\ \left. + \left[\frac{7\pi c_2 R^2}{12} s_2 - \pi^3 c_3 R^3 s_3 \right] \varphi^4(t) + \frac{\pi^3 c_3 R^3}{12} s_3 \varphi^6(t) + \frac{3\pi^4 c_3 R^2}{4} s_1 a(t) \varphi^2(t) \right\} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_\Lambda}{\partial \dot{\varphi}(t)} \right) - \frac{\partial L_\Lambda}{\partial \varphi(t)} = c_0 R^2 \left\{ \ddot{\varphi}(t) + c_1 s_1 \varphi(t) + \left[c_4 s_2 - \frac{(12 - \pi^2)}{2} c_2 R s_3 \right] \varphi^3(t) + \right. \\ \left. + \left[\frac{3\pi^2 c_2 R}{16} s_3 + \left(\frac{4}{3} + \frac{3\pi^2}{16} \right) \pi^2 c_3 R^2 s_4 \right] \varphi^5(t) + 6\pi c_2 s_1 a(t) \varphi(t) + \right. \\ \left. + \left[\frac{7\pi c_2}{3} s_2 - 4\pi^3 c_3 R s_3 \right] a(t) \varphi^3(t) + \frac{\pi^3 c_3 R}{2} s_3 a(t) \varphi^5(t) + \frac{3\pi^4 c_3}{4} s_1 a^2(t) \varphi(t) \right\} \quad (4.17)$$

где

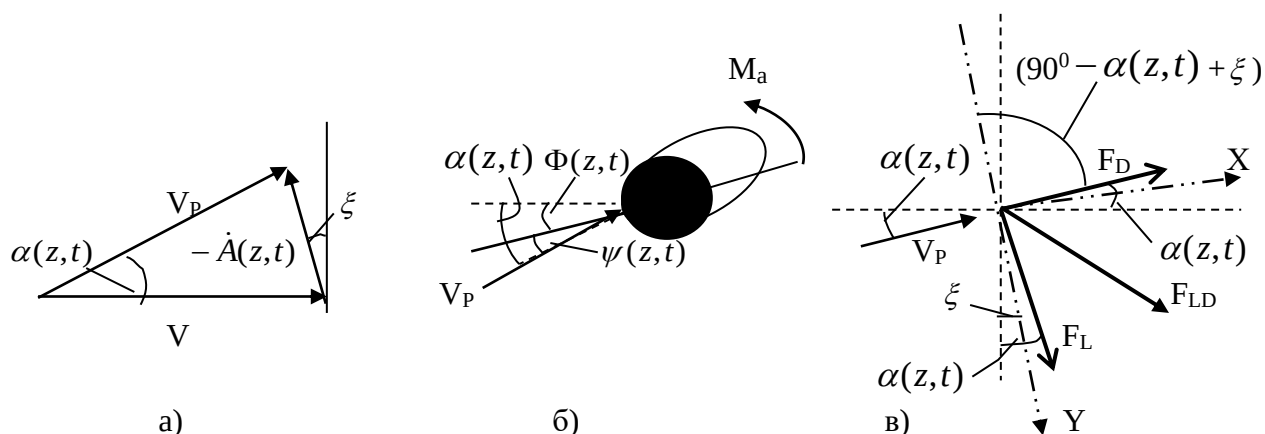
$$c_0 = \frac{nP_{\text{sep}}\ell}{2g}; \quad c_1 = \frac{\pi^2 g T}{P_{\text{sep}} \ell^2} \left(1 + \frac{8EFP_{\text{sep}}^2 \ell^2}{\pi^4 T^3} \right); \quad c_2 = \frac{gEF}{T\ell^2}; \quad c_3 = \frac{gEF}{P_{\text{sep}} \ell^4}; \\ c_4 = \frac{\pi^2 g T}{2P_{\text{sep}} \ell^2} \left(1 + \frac{EFP_{\text{sep}}^2 \ell^2}{2\pi^2 T^3} \right); \quad s_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos^2(\mu_i - \xi); \quad s_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin^2(\mu_i - \xi); \\ s_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin^3(\mu_i - \xi); \quad s_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin^2(\mu_i - \xi) \cos^2(\mu_i - \xi);$$

Определение правой части уравнения движения расщепленного провода.

Проектируя составляющих аэродинамических сил F_D и F_L в направлении движения расщепленного провода Y , получим силу $dF_a(z,t)$, за счет которой поддерживается движение в наклонной плоскости (рисунок 21в):

$$dF_a(z,t) = n\{F_D \cos[90^\circ - \alpha(z,t) + \xi] - F_L \cos[\alpha(z,t) - \xi]\} = \\ = n\{F_D \sin[\alpha(z,t) - \xi] - F_L \cos[\alpha(z,t) - \xi]\},$$

где $\alpha(z,t)$ – угол между скорости ветрового потока V и результирующей скорости V_P (аэродинамический угол атаки).



а - диаграмма скоростей; б - к определению угла атаки ветрового потока; в - схема сил, действующие на обледенелый провод

Рисунок 21 – Схема воздействия сил на провод

Полагая, что разность углов α и ξ малы, имеем

$$\sin[\alpha(z,t) - \xi] \approx \alpha(z,t) - \xi \quad \text{и} \quad \cos[\alpha(z,t) - \xi] \approx 1$$

С учетом допущений, элементарная аэродинамическая сила преобразуется к виду:

$$dF_{aY} = F_D[\alpha(z,t) - \xi] - F_L \quad (4.18)$$

При известных значениях аэродинамических характеристик подъёмной силы $C_L[\psi(z,t)]$ и силы лобового давления $C_D[\psi(z,t)]$, эти силы вычисляются по формулам (4.2) и (4.3), [2, с. 3-150].

$$F_L = C_L[\psi(z,t)] \frac{\rho V_P^2 d_{\Pi}}{2} dz ; \quad (4.19)$$

$$F_D = C_D[\psi(z,t)] \frac{\rho V_P^2 d_{\Pi}}{2} dz ; \quad (4.20)$$

где $\psi(z,t)$ – фактический угол атаки (рисунок 21б);

d_{Π} – характерный размер сечения обледенелого провода (равен диаметру провода).

Характерный размер сечения обледенелого провода зависят от толщины и профиля льда. Поскольку эти величины зачастую не определены, то при практических расчетах характерный размер сечения приближенно может быть оценен через диаметр провода. Такое допущения существенно не влияет на конечный результат расчета.

С учетом (4.19) и (4.20) выражение (4.18) преобразуется к виду:

$$dF_a(z,t) = n[F_D(\alpha - \xi) - F_L] = \frac{n\rho d_{\Gamma} V^2}{2} [C_D[\psi(z,t)][\alpha(z,t) - \xi] - C_L[\psi(z,t)]] dz \quad (4.21)$$

Зависимости $C_D[\psi(z,t)]$ и $C_L[\psi(z,t)]$ берут на основе аппроксимации экспериментальных данных. Подставляя аппроксимирующие функции в последнее выражение, получим:

$$F_a(z,t) = \frac{n\rho d_{\Gamma} V^2}{2} \int_0^{\ell} \{C_{D0}[\alpha(z,t) - \xi] + C_{L0}\psi(z,t) - C_{L1}\psi^3(z,t)\} dz \quad (4.22)$$

Фактический угол атаки $\psi(z,t)$ представляет собой разность углов (рисунок 21б):

$$\psi(z,t) = \alpha(z,t) - \Phi(z,t) \quad (4.23)$$

С учетом (4.23) аэродинамическая сила (4.22) преобразуется к виду:

$$F_a(z,t) = \frac{n\rho d_{\Gamma} V^2}{2} \int_0^{\ell} ((C_{D0} + C_{L0})\alpha(z,t) - C_{L1}\alpha^3(z,t) - C_{L0}\Phi(z,t) + \\ + C_{L1}\Phi^3(z,t) - 3C_{L1}\alpha(z,t)\Phi^2(z,t) + 3C_{L1}\alpha^2(z,t)\Phi(z,t) - C_{D0}\xi) dz \quad (4.24)$$

Аэродинамический угол атаки $\alpha(z, t)$ определяется исходя из диаграммы скоростей (рисунок 21а):

$$\frac{|\dot{A}(z, t)|}{\sin \alpha(z, t)} = \frac{V_p}{\sin(90^\circ - \xi)}$$

При допущениях $\sin \alpha(z, t) \approx \alpha(z, t)$, $\sin(90^\circ - \xi) \approx 1$ и $V_p \approx V$ находим

$$\alpha(z, t) = \frac{\dot{A}(z, t)}{V_p} \approx \frac{\dot{a}(z, t)}{V} \sin \frac{\pi z}{\ell} \quad (4.25)$$

где V – скорость ветра;

V_p – модуль результирующей скорости ветра.

Интегрируя выражение (4.24) от 0 до ℓ с учетом (4.7) и (4.25), находим суммарную аэродинамическую силу:

$$F_a(t) = -\frac{n\rho d_\Gamma \ell}{\pi} \left(-(C_{D0} + C_{L0})V\dot{a}(t) + \frac{2C_{L1}}{3V}\dot{a}^3(t) + C_{L0}V^2\varphi(t) - \right. \\ \left. - \frac{2C_{L1}V^2}{3}\varphi^3(t) + 2C_{L1}V\dot{a}(t)\varphi^2(t) - 2C_{L1}\dot{a}^2(t)\varphi(t) + \frac{\pi C_{D0}\xi_0 V^4}{2} \right) \quad (4.26)$$

Аналогично находится суммарный аэродинамический момент, действующий на РФ (при преобразованиях учтена аппроксимирующая функция):

$$M_a(z, t) = \frac{\rho d_\Gamma^2 V^2}{2} \int_0^\ell C_M[\psi(z, t)]dz = \frac{\rho d_\Gamma^2 V^2}{2} \int_0^\ell (C_{M0}\psi(z, t) - C_{M1}\psi^3(z, t))dz \quad (4.27)$$

Подставляя значение $\psi(z, t)$ из формулы (4.23), получим:

$$M_a(z, t) = \frac{n\rho d_\Gamma^2 V^2}{2} \int_0^\ell [C_{M0}\alpha(z, t) - C_{M1}\alpha^3(z, t) - 3C_{M1}\alpha(z, t)\Phi^2(z, t) + \\ + 3C_{M1}\alpha^2(z, t)\Phi(z, t) - C_{M0}\Phi(z, t) + C_{M1}\Phi^3(z, t)]dz$$

Интегрируя последнее выражение с учетом (4.7) и (4.25) в пределах от 0 до l , находим:

$$M_a(t) = -\frac{n\rho d_{\Gamma}^2 \ell}{\pi} \left[-C_{M0} V \dot{a}(t) + \frac{2C_{M1}}{3V} \dot{a}^3(t) + 2C_{M1} V \dot{a}(t) \varphi^2(t) - \right. \\ \left. - 2C_{M1} \dot{a}^2(t) \varphi(t) + C_{M0} V^2 \varphi(t) - \frac{2C_{M1} V^2}{3} \varphi^3(t) \right] \quad (4.28)$$

Следует отметить, что при выводе уравнения движения расщепленного провода пренебрегли влиянием инерционного момента на угол закручивания одиночного обледенелого провода. Такое допущение оправдано, поскольку длина участков между жесткими распорками намного меньше по сравнению с длиной пролета. Для таких небольших участков дополнительные углы закручивания гололедного осадка под воздействием инерционного момента ничтожно малы.

Оценка потери энергии при колебаниях провода приведена в работе [2, с. 3-150; 114]. Если декремент затухания известен, то диссипативная функция, характеризующая рассеяние энергии в расщепленном проводе может быть представлена следующим образом

$$R_a = \frac{1}{2} \eta \dot{a}^2(t) = \frac{n P_{\text{вср}} \ell \delta_{\Lambda}}{4\pi g} \tilde{\omega} \dot{a}^2(t) \quad (4.29)$$

где η – обобщенный коэффициент сопротивления;

$\tilde{\omega}$ – частота пляски (за частоту пляски приближенно можем принять частоту свободного линейного колебания расщепленной фазы $\tilde{\omega} \approx \omega_0$);

δ_{Λ} – декремент линейного колебания по основной форме (значение определяется экспериментально).

Обобщенная сила сопротивления линейного движения расщепленного провода:

$$\frac{\partial R_a}{\partial \dot{a}(t)} = \frac{n P_{\text{вср}} \ell \delta_{\Lambda} \omega_0}{2\pi g} \dot{a}(t) \quad (4.30)$$

Аналогично находим обобщенный момент сопротивления при крутильных движениях расщепленного провода. Здесь следует отметить, что в процессе пляски частоты крутильного и линейного движений практически

совпадают. Поэтому диссипативная функция определяется через частоты поперечного колебания расщепленного провода следующим образом:

$$R_{\varphi} \approx \frac{nP_{\text{вep}} \ell R^2 \delta_k \omega_0}{4\pi g} \dot{\varphi}^2(t) \quad (4.31)$$

где δ_k - декремент крутильного колебания по основной форме (значение определяется экспериментально).

Обобщенный момент сопротивления крутильного движения расщепленного провода:

$$\frac{\partial R_{\varphi}}{\partial \dot{\varphi}(t)} = \frac{nP_{\text{вep}} \ell R^2 \delta_k \omega_0}{2\pi g} \dot{\varphi}(t) \quad (4.32)$$

Учитывая составляющие (4.26), (4.28), (5.2.33) и (4.32), определяем правую часть уравнения движения расщепленного провода:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial R_a}{\partial \dot{a}(t)} + F_a = & -\frac{n\rho d_{\Gamma} \ell}{\pi} \left[-(C_{D0} + C_{L0}) V \dot{a}(t) + \frac{2C_{L1}}{3V} \dot{a}^3(t) + 2C_{L0} V^2 \varphi(t) - \right. \\ & \left. -\frac{2C_{L1} V^2}{3} \varphi^3(t) + 2C_{L1} V \dot{a}(t) \varphi^2(t) - 2C_{L1} \dot{a}^2(t) \varphi(t) \right] - \frac{n\rho d_{\Gamma} \ell C_{D0} \xi_0 V^4}{2} - \frac{nP_p \ell \delta_{\Lambda} \omega_0}{2\pi g} \dot{a}(t) \\ -\frac{\partial R_{\varphi}}{\partial \dot{\varphi}(t)} + M_{\varphi} = & -\frac{n\rho d_{\Gamma}^2 \ell}{\pi} \left[-C_{M0} V \dot{a}(t) + \frac{2C_{M1}}{3V} \dot{a}^3(t) + 2C_{M1} V \dot{a}(t) \varphi^2(t) - \right. \\ & \left. -2C_{M1} \dot{a}^2(t) \varphi(t) + C_{M0} V^2 \varphi(t) - \frac{2C_{M1} V^2}{3} \varphi^3(t) \right] - \frac{nP_p \ell R^2 \delta_k \omega_0}{2\pi g} \dot{\varphi}(t) \end{aligned} \quad (4.33)$$

Уравнение движение расщепленного провода.

С учетом левых (4.17) и правых (4.33) частей уравнений движения, математическая модель пляски расщепленного провода представляется следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \ddot{a}(t) + k_1 \dot{a}(t) + k_2 \dot{a}^3(t) + \omega_a^2 a(t) + k_3 a^2(t) + k_4 a^3(t) + k_5 \varphi(t) + k_6 \varphi^2(t) - k_7 \varphi^3(t) + \\ + k_8 \varphi^4(t) + k_9 \varphi^6(t) + k_{10} a(t) \varphi^2(t) + k_{11} \dot{a}(t) \varphi^2(t) - k_{12} \dot{a}^2(t) \varphi(t) + k_{13} = 0 \end{aligned}$$

$$\ddot{\varphi}(t) + \frac{\delta_k \omega_a}{\pi} \dot{\varphi}(t) + k_{14} \varphi(t) + k_{15} \varphi^3(t) + k_{16} \varphi^5(t) - k_{17} \dot{a}(t) + k_{18} \dot{a}^3(t) + k_{19} \dot{a}(t) \varphi^2(t) -$$

$$- k_{20} \dot{a}^2(t) \varphi(t) + k_{21} a(t) \varphi(t) + k_{22} a(t) \varphi^3(t) + k_{23} a(t) \varphi^5(t) + k_{24} a^2(t) \varphi(t) = 0 \quad (4.34)$$

где коэффициенты уравнения определяются следующими выражениями:

$$P_{\text{sep}} = 1,1P_0; \quad \xi_0 = \frac{\rho d_{\Pi} C_{D0}}{2P_{\text{sep}}}; \quad \xi = \xi_0 V^2; \quad b_1 = \frac{gEF}{T\ell^2}; \quad b_2 = \frac{gEF}{P_{\text{sep}}\ell^4}; \quad b_3 = \frac{g\rho d_{\Pi}}{P_{\text{sep}}};$$

$$b_4 = b_3 d_{\Pi}; \quad s_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos^2(\mu_i - \xi); \quad s_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin^2(\mu_i - \xi); \quad s_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin^3(\mu_i - \xi);$$

$$s_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin^2(\mu_i - \xi) \cos^2(\mu_i - \xi); \quad \omega_a^2 = \frac{\pi^2 gT}{P_{\text{sep}}\ell^2} \left(1 + \frac{8EFP_{\text{sep}}^2 \ell^2}{\pi^4 T^3} \right);$$

$$\omega_1^2 = \frac{\pi^2 gT}{2P_{\text{sep}}\ell^2} \left(1 + \frac{EFP_{\text{sep}}^2 \ell^2}{2\pi^2 T^3} \right); \quad k_1 = \frac{\delta_{\Lambda} \omega_a - 2b_3(C_{D0} + C_{L0})V}{\pi}; \quad k_2 = \frac{4b_3}{3\pi V} C_{L1};$$

$$k_3 = 3\pi b_1; \quad k_4 = \frac{\pi^4 b_2}{4}; \quad k_5 = \frac{4b_3}{\pi} C_{L0} V^2; \quad k_6 = 3\pi b_1 R^2 s_1; \quad k_7 = \frac{4b_3}{3\pi} C_{L1} V^2;$$

$$k_8 = \left(\frac{7\pi b_1 R^2}{12} s_2 - \pi^3 b_2 R^3 s_3 \right); \quad k_9 = \frac{\pi^3 b_2 R^3}{12} s_3; \quad k_{10} = \frac{3\pi^4 b_2 R^2}{4} s_1;$$

$$k_{11} = \frac{4b_3}{\pi} C_{L1} V; \quad k_{12} = \frac{4b_3}{\pi} C_{L1}; \quad k_{13} = b_3 \xi_0 C_{D0} V^4;$$

$$k_{14} = \left(\Omega^2 + \frac{2b_4 C_{M0}}{\pi R^2} V^2 \right); \quad k_{15} = \left(\omega_1^2 s_2 - \frac{(12 - \pi^2) b_1 R}{2} s_3 - \frac{4b_4 C_{M1}}{3\pi R^2} V^2 \right);$$

$$k_{16} = \left(\frac{3\pi^2 b_1 R}{16} s_3 + \frac{\pi^2 (64 - 9\pi^2) b_2 R^2}{48} s_4 \right); \quad k_{17} = \frac{2b_4}{\pi R^2} C_{M0} V;$$

$$k_{18} = \frac{4b_4}{3\pi R^2 V} C_{M1}; \quad k_{19} = \frac{4b_4}{\pi R^2} C_{M1} V; \quad k_{20} = \frac{4b_4}{\pi R^2} C_{M1}; \quad k_{21} = 6\pi b_1 s_1;$$

$$k_{22} = \left(\frac{7\pi b_1}{3} s_2 - 4\pi^3 b_2 R s_3 \right); \quad k_{23} = \frac{\pi^3 b_2 R}{2} s_3; \quad k_{24} = \frac{3\pi^4 b_2}{4} s_1.$$

Частота свободного крутильного колебания расщепленного провода Ω определяется согласно формуле (4.34):

$$\Omega = \omega_a \sqrt{s_1} = \frac{\pi}{\ell} \sqrt{\frac{gT}{P_{\text{вер}}} \left(1 + \frac{8EFP_{\text{вер}}^2 \ell^2}{\pi^4 T^3} \right)} \cdot \sqrt{s_1} \quad (4.34)$$

4.3 Математическая модель пляски расщепленной фазы с учетом движения гирлянды изоляторов

Особенности многопролетной системы заключаются в том, что для любого участка ВЛ при равенстве длины пролета и числа полувольт практически всегда существует некоторая разница в натяжении провода различных фаз, возникающая вследствие неточностей регулировки натяжения проводов при монтаже или после ремонта воздушной линии, из-за провеса провода в процессе эксплуатации при воздействии значительных ветровых и гололедных нагрузок, из-за температуры окружающей среды и тд. А еще нужно учитывать разницу в весе гололедного отложения. Отмеченные причины приводят к несинхронности колебаний проводов различных пролетов. При этом может наблюдаться наибольшая интенсивность (размах) колебаний, что крайне нежелательно с точки зрения надежности линии электропередач [96, с. 3-694; 103, с. 3-364; 106, с. 255-260; 113, с. 318-322; 115].

В многопролетной системе взаимное влияние соседних пролетов проявляется в форме передачи дополнительных растягивающих усилий из пролета в пролет. В частности, когда провод в пролете занимает крайнее нижнее положения, повышенное натяжения провода стягивает гирлянды изоляторов внутрь пролета. На перемещение гирлянд изоляторов затрачивается часть энергетических ресурсов данного пролета. При смещениях провода в сторону статического равновесия, гирлянды стремятся отклониться в сторону соседних пролетов вследствие уменьшения натяжения (рисунок 20).

При выводе математической модели предполагаем, что сдвиг фаз между колебаниями смежных пролетов составляет 180° . При таких организациях колебательного процесса отклонения гирлянды изоляторов и интенсивность пляски максимальны, что представляет собой наибольшую практическую ценность.

При выводе уравнений движения расщепленного провода для многопролетной системы необходимо учесть величину обмена энергией смежных пролетов. В качестве функций Лагранжа воспользуемся выражением:

$$L_\Lambda = E_k - [E_d + 2E_\psi - E_\Pi] \quad (4.35)$$

Здесь, составляющие функций Лагранжа – кинетическая E_k и потенциальная E_Π энергии определяются согласно формулам (4.8), (4.15). Величина переданной энергии в смежные пролеты $2E_\psi$ приближенно можно оценить согласно формуле, то есть

$$2E_{\psi} = \frac{2P_{\text{веп}}\ell}{\pi} a(t)$$

Величина энергий деформаций провода в многопролетной системе несколько отличается от анкерного пролета. Это связано за счет движения гирлянды изоляторов. При движениях гирлянды происходят передача некоторой длины провода из пролета в пролет. В результате сглаживается натяжения провода, следовательно, уменьшается энергия деформаций провода. Длину отклоненного провода в многопролетной системе (рисунок 20) можно приближенно определить, используя формулу (4.11) [116]:

$$L_{A\varphi} \approx \ell - 2\Delta z + \frac{P_{\text{веп}}^2 \ell^3}{24T^2} + \frac{2P_{\text{веп}}\ell}{\pi T} K_i + \frac{\pi^2}{4\ell} K_i^2 \quad (4.36)$$

где $K_i = [a(t) - R \cos(\mu_i - \xi) \varphi(t)]$.

Если учесть приближенные зависимости, то есть:

$$\Delta z = \lambda_T \sin \psi \approx \lambda_T \psi = \frac{P_{\text{веп}}\ell}{\pi T} a(t)$$

то длина $L_{A\varphi}$ преобразуется к виду:

$$L_{A\varphi} \approx \ell + \frac{P_{\text{веп}}^2 \ell^3}{24T^2} - \frac{2P_{\text{веп}}\ell R}{\pi T} \cos(\mu_i - \xi) \varphi(t) + \frac{\pi^2}{4\ell} [a(t) - R \cos(\mu_i - \xi) \varphi(t)]^2 \quad (4.37)$$

Разность длин проводов с учетом (4.13) и (4.37):

$$L_{A\varphi} - L \approx -\frac{2P_{\text{веп}}\ell R}{\pi T} \cos(\mu_i - \xi) \varphi(t) + \frac{\pi^2}{4\ell} [a(t) - R \cos(\mu_i - \xi) \varphi(t)]^2 \quad (4.38)$$

Энергия деформаций расщепленного провода многопролетной системы определяется согласно формуле (3.7). Опуская промежуточные преобразования, представим энергию деформаций в окончательном варианте:

$$\begin{aligned}
E_d = \sum_{i=1}^n E_{di} = n[\tilde{D}_1 a^2(t) + D_4 a^4(t)] + D_2 R^2 \sum_{i=1}^n \cos^2(\mu_i - \xi) \cdot \varphi^2(t) + \\
+ D_4 R^4 \sum_{i=1}^n \cos^4(\mu_i - \xi) \cdot \varphi^4(t) + 2D_3 R^2 \sum_{i=1}^n \cos^2(\mu_i - \xi) \cdot a(t) \varphi^2(t) + \\
+ 6D_4 R^2 \sum_{i=1}^n \cos^2(\mu_i - \xi) \cdot a^2(t) \varphi^2(t)
\end{aligned} \tag{4.39}$$

где коэффициенты уравнение определяются выражениями:

$$\tilde{D}_1 = \frac{\pi^2 T}{4\ell}; \quad D_2 = \frac{\pi^2 T}{4\ell} \left(1 + \frac{8EFP_{\text{сеп}}^2 \ell^2}{\pi^4 T^3} \right); \quad D_3 = \frac{\pi EFP_{\text{сеп}}}{2T\ell}; \quad D_4 = \frac{\pi^4 EF}{32\ell^3};$$

Подставляя значения E_k , E_{II} , E_d , $2E_\psi$ в функцию Лагранжа, получим:

$$\begin{aligned}
L_\Lambda = \frac{nP_{\text{сеп}}\ell}{4g} [\dot{a}^2(t) + R^2 \dot{\varphi}^2(t)] - n[\tilde{D}_1 a^2(t) + D_4 a^4(t)] - \\
- D_2 R^2 \sum_{i=1}^n \cos^2(\mu_i - \xi) \cdot \varphi^2(t) - D_4 R^4 \sum_{i=1}^n \cos^4(\mu_i - \xi) \cdot \varphi^4(t) - \\
- 2D_3 R^2 \sum_{i=1}^n \cos^2(\mu_i - \xi) \cdot a(t) \varphi^2(t) - 6D_4 R^2 \sum_{i=1}^n \cos^2(\mu_i - \xi) \cdot a^2(t) \varphi^2(t)
\end{aligned} \tag{4.40}$$

Левые части уравнение движения расщепленного провода с учетом функции L_Λ имеет вид:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_\Lambda}{\partial \dot{a}(t)} \right) - \frac{\partial L_\Lambda}{\partial a(t)} = \frac{nP_{\text{сеп}}\ell}{2g} [\ddot{a}(t) + 2b_1 \tilde{D}_1 a(t) + 4b_1 D_4 a^3(t) + \\
+ 2b_1 D_3 R^2 s_1 \varphi^2(t) + 12b_1 D_4 R^2 s_1 a(t) \varphi^2(t)]
\end{aligned} \tag{4.41}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_\Lambda}{\partial \dot{\varphi}(t)} - \frac{\partial L_\Lambda}{\partial \varphi(t)} \right) = \frac{nP_{\text{сеп}}\ell R^2}{2g} [\ddot{\varphi}(t) + 2b_1 D_2 s_1 \varphi(t) + \\
+ 4b_1 D_4 R^4 s_2 \varphi^3(t) + 4b_1 D_3 s_1 a(t) \varphi(t) + 12b_1 D_4 s_1 a^2(t) \varphi(t)]
\end{aligned} \tag{4.42}$$

где

$$b_1 = \frac{2g}{P_{\text{веп}} \ell}; \quad s_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos^2(\mu_i - \xi); \quad s_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos^4(\mu_i - \xi);$$

Отличительная особенность правой части уравнений движения многопролетной системы по сравнению с анкерным пролетом заключается только в членах, содержащих частоты колебаний. Правые части уравнения движения расщепленной фазы многопролетной системы определяется согласно выражениям (4.31) и (4.32). Заменяя в этих уравнениях частоту колебаний провода анкерного пролета ω_a частотой колебаний провода многопролетной системы $\omega_{\text{м.с.}}$, получим:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial R_a}{\partial \dot{a}(t)} + F_a = & -\frac{n\rho d_{\Gamma} \ell}{\pi} \left[-(C_{D0} + C_{L0})V\dot{a}(t) + \frac{2C_{L1}}{3V} \dot{a}^3(t) + 2C_{L0}V^2\varphi(t) - \right. \\ & \left. -\frac{2C_{L1}V^2}{3} \varphi^3(t) + 2C_{L1}V\dot{a}(t)\varphi^2(t) - 2C_{L1}\dot{a}^2(t)\varphi(t) \right] - \frac{n\rho d_{\Gamma} \ell C_{D0} \xi_0 V^4}{2} - \frac{nP_{\text{веп}} \ell \delta_{\Lambda} \omega_{\text{м.с.}}}{2\pi g} \dot{a}(t) \end{aligned} \quad (4.43)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial R_{\varphi}}{\partial \dot{\varphi}(t)} + M_{\varphi} = & -\frac{n\rho d_{\Gamma}^2 \ell}{\pi} \left[-C_{M0}V\dot{a}(t) + \frac{2C_{M1}}{3V} \dot{a}^3(t) + 2C_{M1}V\dot{a}(t)\varphi^2(t) - \right. \\ & \left. - 2C_{M1}\dot{a}^2(t)\varphi(t) + C_{M0}V^2\varphi(t) - \frac{2C_{M1}V^2}{3} \varphi^3(t) \right] - \frac{nP_{\text{веп}} \ell R^2 \delta_k \omega_{\text{м.с.}}}{2\pi g} \dot{\varphi}(t) \end{aligned} \quad (4.44)$$

Приравнявая левых (4.41), (4.42) и правых (4.43), (4.44) частей, получим математическую модель пляски проводов расщепленного провода для многопролетной системы:

$$\begin{aligned} \ddot{a}(t) + \left(\frac{\delta_{\Lambda} \omega_{\text{м.с.}}}{\pi} - k_1 V \right) \dot{a}(t) + \frac{k_2}{V} \dot{a}^3(t) + k_3 V \dot{a}(t) \varphi^2(t) - k_3 \dot{a}^2(t) \varphi(t) + \omega_{\text{м.с.}}^2 a(t) + \\ + k_5 a^3(t) + 2k_7 V^2 \varphi(t) + \frac{2}{3} k_8 \varphi^2(t) - k_2 V^2 \varphi^3(t) + k_6 a(t) \varphi^2(t) + k_9 V^4 = 0 \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}(t) + \frac{\delta_k \omega_{\text{м.с.}}}{\pi} \dot{\varphi}(t) + (\Omega^2 + k_{10} V^2) \varphi(t) + (k_{11} - k_{12} V^2) \varphi^3(t) - k_{10} V \dot{a}(t) + \\ + \frac{k_{12}}{V} \dot{a}^3(t) + k_{13} V \dot{a}(t) \varphi^2(t) - k_{13} \dot{a}^2(t) \varphi(t) + k_{14} a(t) \varphi(t) + k_{15} a^2(t) \varphi(t) = 0 \end{aligned} \quad (4.46)$$

где коэффициенты уравнения определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
P_{\text{веп}} &= 1,1P_0 \quad \xi_0 = \frac{\rho d_{\Pi} C_{D0}}{2P_{\text{веп}}}; \quad \xi = \xi_0 V^2; \quad \tilde{D}_1 = \frac{\pi^2 T}{4\ell}; \quad D_3 = \frac{\pi EFP_{\text{веп}}}{2T\ell}; \\
D_4 &= \frac{\pi^4 EF}{32\ell^3}; \quad b_1 = \frac{2g}{P_{\text{веп}}\ell}; \quad b_2 = \frac{g\rho d_{\Pi}}{P_{\text{веп}}}; \quad b_3 = \frac{b_2 d_{\Pi}}{R^2}; \quad s_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos^2(\mu_i - \xi); \\
s_2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos^4(\mu_i - \xi); \quad k_1 = \frac{2b_2}{\pi} (C_{D0} + C_{L0}); \quad k_2 = \frac{4b_2}{3\pi} C_{L1}; \quad k_3 = 3k_2; \\
k_4 &= 3b_1 D_3; \quad k_5 = 4b_1 D_4; \quad k_6 = 3k_5 R^2 s_1; \quad k_7 = \frac{2b_2}{\pi} C_{L0}; \quad k_8 = k_4 R^2 s_1; \quad k_9 = b_2 \xi_0 C_{D0}; \\
k_{10} &= \frac{2b_3}{\pi} C_{M0}; \quad k_{11} = k_5 R^4 s_2; \quad k_{12} = \frac{4b_3}{3\pi} C_{M1}; \quad k_{13} = 3k_{12}; \quad k_{14} = \frac{2k_8}{R^2}; \quad k_{15} = \frac{k_6}{R^2}.
\end{aligned}$$

Частота свободного поперечного колебания расщепленного провода многопролетной системы:

$$\omega_{m.c}^2 = 2b_1 \tilde{D}_1$$

или

$$\omega_{m.c} = \frac{\pi}{\ell} \sqrt{\frac{gT}{P_{\text{веп}}}} \quad (4.47)$$

Частота свободного крутильного колебания расщепленного провода Ω

$$\Omega = \omega_a \sqrt{s_1} = \frac{\pi}{\ell} \sqrt{\frac{gT}{P_{\text{веп}}} \left(1 + \frac{8EFP_{\text{веп}}^2 \ell^2}{\pi^4 T^3} \right)} \cdot \sqrt{s_1} \quad (4.48)$$

Шаблон MATLAB-кода для построения графика линейного перемещения $\alpha(t)$ и полученные графики, решая уравнение второго порядка с заданными параметрами формула (4.45) показан в (Приложении Б).

С целью проверки адекватности разработанной модели пляски, ниже сравниваются результаты теоретических расчетов параметров пляски с параметрами естественной пляски. В ноябре 1984 г. на опытном полигоне Казахского научно-исследовательского института энергетики (КазНИИЭ) наблюдали одно полуволновую естественную пляску на анкерных пролетах длиной 354 м и 288 м. Расщепленная фаза состояла из 4-х проводов. Марка провода была АС-300/39. Скорость ветра при естественной пляске составляла 4-5 м/сек. Угол атаки ветра к линиям был около 90° . У обоих пролетов форма

осадка каплеобразная, лед прозрачный, толщиной около 5 мм. Измеренный вес льда, приходящего на 1 м провода, составил - 0,1 даН/м. Натяжение провода до пляски в пролете длиной 354 м составило 3218 даН, а в пролете 288 м – 2300 даН.

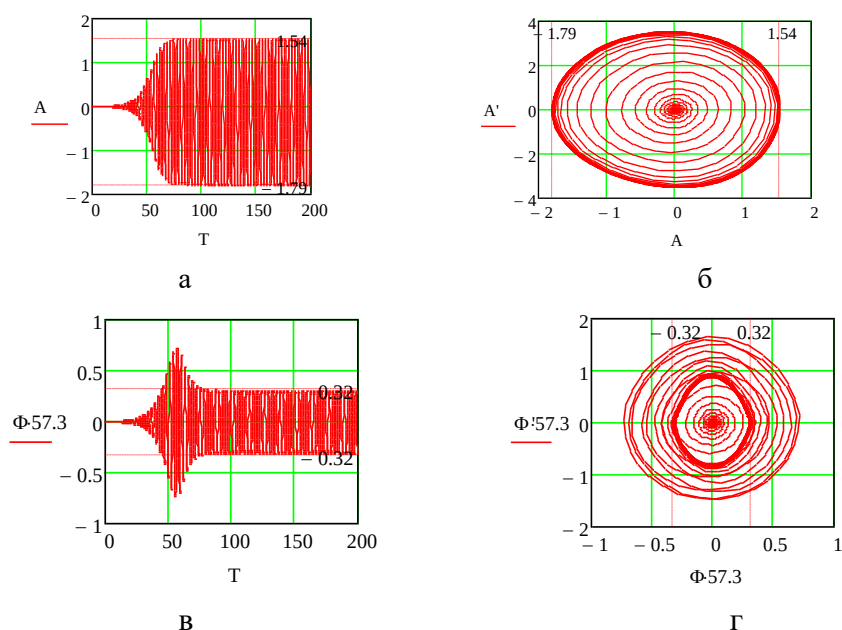
Амплитуды колебаний для пролета длиной 354 м составили: меньшая амплитуда A_H -1,20 м, большая амплитуда A_B - 1,65 м. Интенсивность (размах) пляски была равна $A_H + A_B = 2,85$ м. Частота пляски составила: 0,33 Гц.

Для пролета длиной 288 м измеряли только размах колебаний, который составил $A_H + A_B = 2,27$ м. Частота пляски составила: 0,42 Гц.

Таблица 11 - Результаты сравнения расчетов

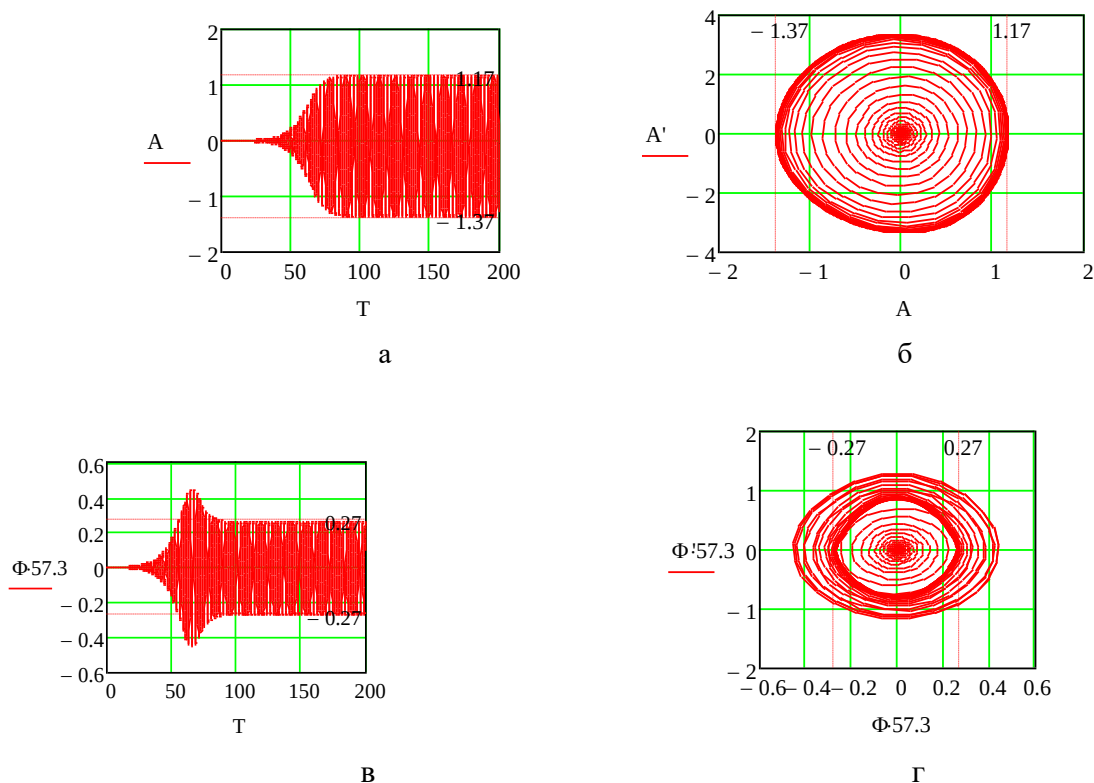
АС-300/39	Характеристики естественной пляски					Результаты моделирования					
	A_H , м	A_B , м	$A_H + A_B$	$\frac{A_B}{A_H}$	f , Гц	A_H , м	A_B , м	$A_H + A_B$	$\frac{A_B}{A_H}$	φ^0	f , Гц
$\ell = 354 \text{ м}$	1,2	1,65	2,85	1,37	0,33	1,54	1,79	3,33	1,16	0,32	0,33
$\ell = 288 \text{ м}$	-	-	2,27	-	0,42	1,17	1,37	2,54	1,17	0,27	0,42

Результаты сопоставления теоретических расчетов с характеристиками естественной пляски приведены в таблице 11. Моделирование системы нелинейных дифференциальных уравнений осуществлено в среде Mathcad при нулевых начальных условиях (использован метод Рунге-Кутты с фиксированным шагом). Расчеты выполнены для скорости ветра 4,5 м/с. Результаты моделирования приведены на рисунках 22, 23.



а, б – временная диаграмма и фазовая траектория линейных движений провода; в, г – временная диаграмма и фазовая траектория крутильных движений

Рисунок 22 – Результаты моделирования. $\ell = 354 \text{ м}$, $V = 4,5 \text{ м/с}$



а, б – временная диаграмма и фазовая траектория линейных движений проводов; в, г – временная диаграмма и фазовая траектория крутильных движений

Рисунок 23 – Результаты моделирования. $\ell = 288 \text{ м}$, $V = 4,5 \text{ м/с}$

Временные диаграммы были построены с использованием математических моделей для представления линейных и крутильных движений проводников в процессе пляски. Эти диаграммы позволили выявить корреляции между амплитудами и частотами колебаний проводников при различных условиях, таких как скорость ветра и длина пролета. Этот анализ позволил глубже понять поведение проводников при пляске при изменениях параметров.

Сопоставления показывают (таблица 10), что результаты теоретического расчета параметров пляски несколько превышают параметры естественной пляски (кроме частоты пляски). Например, интенсивность (суммарная амплитуда) естественной пляски при длине пролета 354 м составляет 2,85 м, что меньше расчетной - 3,33 м (отличие составляет 16,8%). Частота пляски при этом совпадает. Следует отметить, что частота пляски в свою очередь совпадает с частотой свободного колебания проводов.

Аналогично, для пролета длиной 288 м отличие интенсивности естественной (2,27 м) и расчетной (2,54 м) пляски составляет около 12%. Частота пляски тоже совпадает.

При визуальном наблюдении естественной пляски крутильные движения проводов не были замечены. Результаты теоретических расчетов показывают, что амплитуда крутильного колебания провода во время пляски небольшая и составляет: для пролета длиной 354 м – $0,32^\circ$ (рисунок 22в), а для пролета

длиной 288 м – 0,27⁰ (рисунок 23в). Следовательно, при небольшом ветре пляска проводов может проходить без крутильных движений.

В целом, отличия параметров естественной и расчетной пляски незначительны, что дает основание заключить об адекватности математической модели пляски при небольших скоростях ветра.

4.4 Диапазон ожидаемой интенсивности пляски и влияние скорости ветра при изменении длины пролета

Уравнение регрессии одно полуволновой пляски

Амплитуда пляски, как правило, зависит от изменения длины пролета и скорости ветра [114, р. 5-31; 115, р. 85-97; 117]. При анализе в качестве исходных независимых переменных возьмем длину пролета ℓ и перпендикулярную составляющую скорости ветра $V_{\perp} = V \sin \alpha$ (V – величина скорости ветра, α – угол между направлением ветра и воздушной линией). Графическое изображение исходных статистических данных наблюдений для одно полуволновой пляски в координатах $X - A_p$ показано на рисунке 24.

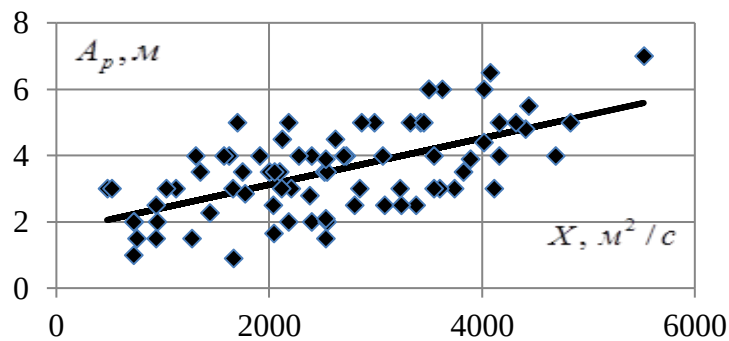


Рисунок 24 – Поле корреляции и линия регрессии (сплошная линия)

Здесь, A_p – интенсивность одно полуволновой пляски проводов (размах колебаний), X – параметр, характеризующее совместное влияние независимых переменных ($X = \ell \cdot V_{\perp}$).

С учетом сказанного, регрессионную модель можно представить в виде

$$A_p = b_0 + b_1 X \quad (4.49)$$

где A_p – предсказанное значение интенсивности пляски;

b_0, b_1 – параметры уравнения.

Для определения параметров линейной парной регрессии необходимо решить систему уравнений:

$$b_0 n + b_1 \sum X_i = \sum A_{pi}$$

$$b_0 \sum X_i + b_1 \sum X_i^2 = \sum A_{pi} X_i$$

Решение данной системы с учетом числовых значений переменных дает следующие коэффициенты регрессии: $b_0=1,7$; $b_1=0,71 \cdot 10^{-3}$.

Окончательное уравнение регрессии с учетом числовых значений коэффициентов имеет вид:

$$A_p = 1,7 + 0,71 \cdot 10^{-3} \cdot X = 1,7 + 0,71 \cdot 10^{-3} V_{\perp} \ell \quad (4.50)$$

Оценка адекватности регрессионной модели выполнена по F – критерию Фишера при уровне значимости $\alpha=0,05$ [114, р. 5-31; 115, р. 85-97]. Результаты сравнения фактического $F_{фак}=124$ и табличного $F_{таб}=3,12$ значений ($F_{фак} > F_{таб}$) показывают о надежности уравнения регрессии.

Оценка значимости коэффициентов b_j выполнена по t –критерию Стьюдента: $t_{b_0} = 5,9$ и $t_{b_1} = 6,8$. Для уровня значимости $\alpha=0,05$ и числа степеней свободы $\nu=76$ табличное значение t_{α} – критерия равно $t_{\alpha}=1,99$. Поскольку $t_{b_0} > t_{\alpha}$ и $t_{b_1} > t_{\alpha}$, то соответствующие коэффициенты уравнения регрессии считаются значимыми.

Уравнение регрессии двух полуволновой пляски.

Графическое изображение исходных статистических данных наблюдений для двух полуволновой пляски проводов в координатах $X - A_p$ показано на рисунке 25.

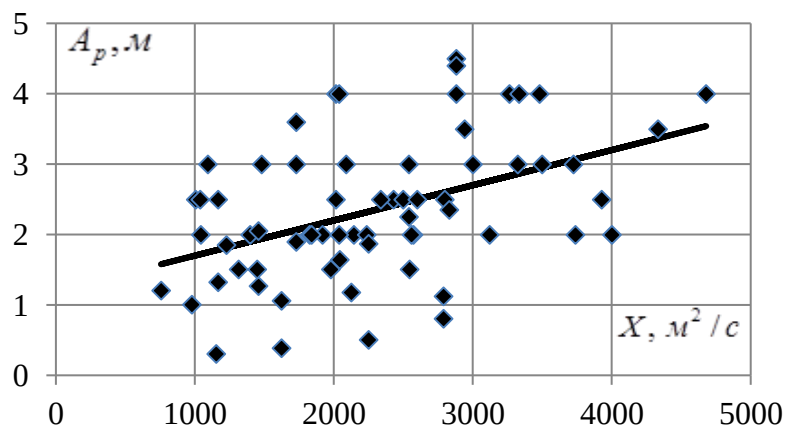


Рисунок 25 – Поле корреляции и линия регрессии (сплошная линия)

Аналогично одно полуволновой пляске, на основе анализа исходных статистических данных установлены регрессионная модель для двух полуволновой пляски проводов в виде:

$$A_p = 1,2 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot X = 1,2 + 0,5 \cdot 10^{-3} V_{\perp} \ell \quad (4.51)$$

Оценка адекватности регрессионной модели выполнена по F – критерию Фишера. Результаты сравнения фактического $F_{фак}=81,1$ и табличного $F_{таб}=4,06$ значений ($F_{фак} > F_{таб}$) показывают о надежности уравнения регрессии.

Оценка значимости коэффициентов b_j выполнена по t –критерию Стьюдента: $t_{b_0} = 3,93$ и $t_{b_1} = 4,02$. Для уровня значимости $\alpha=0,05$ табличное значение t_{α} – критерия равно $t_{\alpha} = 1,99$. Поскольку $t_{b_0} > t_{\alpha}$ и $t_{b_1} > t_{\alpha}$, то соответствующие коэффициенты уравнения регрессии считаются значимыми.

Полученные уравнения регрессии могут обеспечить вполне адекватное представление при определенных диапазонах изменений переменной X , величина которого определяется от исходных обрабатываемых данных. Уравнение, конечно, не применимо для значений X , выходящих за предусмотренных границ, так как в этом случае не может обеспечить за ними разумного предсказания.

Переменная X в нашем случае представляет собой произведения следующих переменных - длины пролета, скорости ветра и угла атаки. Следовательно, ограничения, накладываемые на X , можно достичь путем разумного выбора диапазонов изменения этих переменных.

Согласно материалам наблюдения по пляске проводов [114, р. 5-31; 115, р. 85-97], наименьшая длина пролета равнялась в основном 120 м. Наибольшая длина пролета составляет около 400 м. Диапазон угла атаки ветрового потока к линиям лежит в пределах от 35^0 до 90^0 . Диапазон скорости ветра составляет от 5 м/сек до 20 м/сек. При этом, большей скорости соответствует в основном небольшая длина пролета и наоборот. Так, согласно данным наблюдений, для пролета длиной $\ell=120$ м наибольшая вертикальная составляющая скорости при пляске не превышает $V_{\perp}=17$ м/сек. При увеличении длины пролета до $\ell=400$ м фиксированная скорость составляет $V_{\perp}=13,8$ м/сек. То есть, для конкретной длины пролета должна соответствовать определенная критическая скорость, превышение которого должны привести к исчезновению пляски проводов. В общем случае граничные значения критических скоростей (вызывающих и прекращающих пляску проводов) определяются исходя из математической модели процесса. В нашем случае верхняя граница критической скорости для пролета в диапазоне $120\text{м} \leq \ell \leq 400\text{м}$ может быть ориентировочно установлена методом интерполяции на основе статистических данных наблюдений.

Как известно, при линейной интерполяции на заданной отрезке произвольную функцию приближают линейной функцией, график которой (прямая линия) проходит через две узловые точки. Зная координаты точек, определяем уравнения прямой проходящей через эти точки по известной формуле (4.52):

$$\begin{vmatrix} 120 - 400 & 17 - 13,8 \\ \ell - 120 & V_{\perp} - 17 \end{vmatrix} = 0 \quad (4.52)$$

Раскрывая определитель, получим зависимости критической скорости от длины пролета (расчетные данные приведены в таблице 12) [114, р. 5-31; 115, р. 85-97].

$$V_{\perp}^{kp} = 17 - 0,01 \cdot \ell \quad (4.53)$$

Выражение (4.53) ограничивает скорости ветра по длине пролета, то есть задаваемая максимальная скорость ветра для выбранного пролета не должны превышать критического ($V \leq V_{\perp}^{kp}$).

Таблица 12 - Изменение критической скорости в зависимости от длины пролета

ℓ , м	100	150	200	250	300	350	400	450
$V_{\perp}^{kp}$, м/с	16	15,5	15	14,5	14	13,5	13	12,5

Таким образом, совокупность ограничений накладываемые на переменные уравнения можно представить следующими неравенствами (диапазон длины пролетов несколько увеличены) [114, р. 5-31]:

$$100\text{м} \leq \ell \leq 450\text{м}$$

$$35^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$$

$$V_{\perp} \leq 15,6 - 0,01 \cdot \ell$$

В качестве примера ниже представлены результаты по оценке граничных значений интенсивностей пляски проводов. На рисунках 26 и 27 показаны ожидаемый диапазон изменения интенсивности пляски проводов, соответствующие различным длинам пролетов.

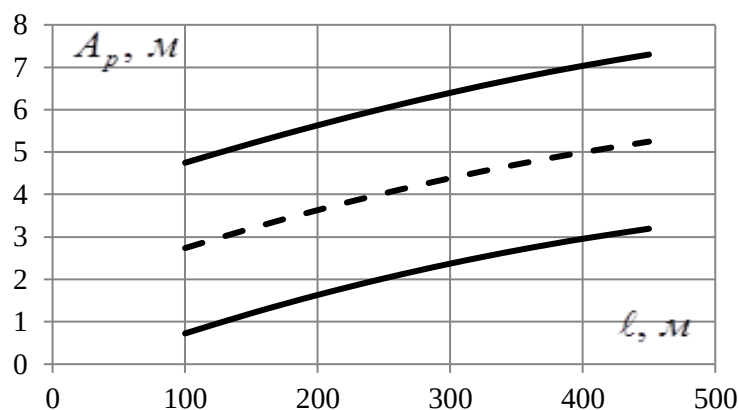


Рисунок 26 – Диапазон ожидаемой интенсивности одно полуволновой пляски при различных пролетах

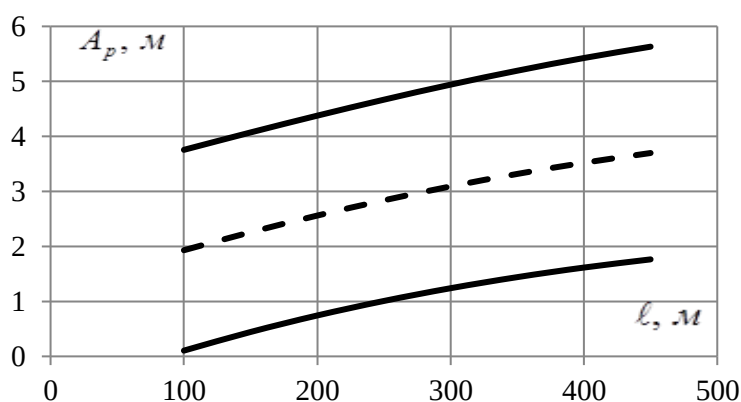


Рисунок 27 – Диапазон ожидаемой интенсивности двух полуволновой пляски при различных пролетах

На рисунке 27 сплошные линии соответствуют граничным (максимальные и минимальные) значениям интенсивности, а пунктирные линии соответствуют средним значениям, построенные по уравнениям регрессии. Расчеты выполнены для критических (максимальных) скоростей, определяемых согласно выражению (4.53).

Таким образом, при критической скорости ветра с 95%-ой вероятностью можно ожидать, что размах пляски проводов будет находится внутри выделенной области (сплошными линиями), если длина пролетов лежит в диапазоне $l = 100 \div 450$ м. Например, в пролете длиной $l = 100$ м при одно полуволновой пляске могут иметь место колебания с размахом двойной амплитуды в диапазоне от 0,8 м до 5 м. С увеличением длины пролета до 450 м диапазон интенсивности составляет от 3 м до 7,5 м.

Для двух полуволновой пляски диапазон интенсивностей несколько уменьшается. Так, для пролета длиной 100 м интенсивность лежит ориентировочно в диапазоне от 0,2 м до 4 м. А для пролета длиной 450 м диапазон несколько расширяется и составляет от 0,75 м до 5,5 м.

Шаблон MATLAB-кода и сам график зависимости критической скорости ветра от диаметра провода показан в (Приложении В). Вкр сильно убывает при увеличении диаметра провода: чем толще провод, тем меньшая скорость ветра приводит к аэродинамической неустойчивости. Это важно при проектировании: провода с большим диаметром более уязвимы к пляске проводов при прочих равных условиях.

Сравнительный анализ показывает, что при одних и тех же условиях, ожидаемый максимальный размах двух полуволновой пляски примерно в 1,32 раза меньше по сравнению с одно полуволновой пляской.

В целом, если сравнивать различные методы по определению интенсивности пляски проводов, то можно отметить надежность прогнозируемых результатов.

Определение критической скорости ветра, приводящие к аэродинамической неустойчивости проводов расщеплённой фазы.

В разделе 4.2 формула (4.34) приведена математическая модель пляски проводов расщепленной фазы с двумя степенями свободы. Пренебрегая в (4.34) обобщенными координатами крутильного движения, получим уравнение движения пляски проводов с одним степенем свободы [117, р. 04019]:

$$\ddot{a}(t) + k_1 \dot{a}(t) + k_2 \dot{a}^3(t) + \omega_a^2 a(t) + k_3 a^2(t) + k_4 a^3(t) + k_{13} = 0 \quad (4.54)$$

Введя такие обозначения: $a(t)=y_0$ и $\dot{a}(t)=y_1$, представим (4.54) в следующей форме:

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_0 &= y_1 \\ \dot{y}_1 &= -k_1 y_1 - k_2 y_1^3 - \omega_a^2 y_0 - k_3 y_0^2 - k_4 y_0^3 - k_{13} \end{aligned} \right\} \quad (4.55)$$

Проведя замену в системе уравнений (4.55) $\dot{y}_0(t)=0$ и $\dot{y}_1(t)=0$, получаем выражение для определения равновесного положения:

$$y_0^3 + q_1 y_0^2 + q_2 y_0 + q_3 = 0 \quad (4.56)$$

где

$$q_1 = \frac{k_3}{k_4}; \quad q_2 = \frac{\omega_a^2}{k_4}; \quad q_3 = \frac{k_{13}}{k_4}.$$

Решение уравнения (4.56) итерационным методом даст следующий результат (ниже приведен результат первого приближения, последующие приближения не дают существенной поправки):

$$y_{01} \approx -\frac{k_{13}}{\omega_a^2} \quad (4.57)$$

Линеаризуем систему уравнений (4.55) в окрестностях точек равновесия $(y_{01}, 0)$, получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_0 &= y_1 \\ \dot{y}_1 &= \left(\frac{2k_3 k_{13}}{\omega_a^2} - \omega_a^2 \right) y_0 - k_1 y_1 \end{aligned} \right\} \quad (4.58)$$

Характеристическое уравнение линеаризованной системы (4.58)

$$\Delta = \begin{vmatrix} -p & 1 \\ \frac{2k_3 k_{13}}{\omega_a^2} - \omega_a^2 & -(k_1 + p) \end{vmatrix} = 0$$

Раскрывая определитель, получим:

$$p^2 + k_1 p + \omega_a^2 - \frac{2k_3 k_{13}}{\omega_a^2} \approx p^2 + k_1 p + \omega_a^2 = 0 \quad (4.59)$$

Характеристическое уравнение (4.59) имеет комплексные сопряженные корни

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2} k_1 \pm j \omega_a \quad (4.60)$$

Решение линеаризованного уравнения с учетом начальных условий $y_0 = a(0) = A_0$ и $y_1 = \dot{a}(0) = 0$ имеет следующий вид:

$$a(t) = A_0 e^{-\frac{k_1}{2} t} \left(\cos \omega_a t + \frac{k_1}{2 \omega_a} \sin \omega_a t \right) \quad (4.61)$$

где

$$k_1 = \frac{\delta \omega_a - 2b_3 (C_{D0} + C_{L0}) V}{\pi}$$

Как следует из формулы (4.61), при условии $k_I=0$ расщепленная фаза совершает незатухающие периодические колебания. Приравняв коэффициент k_I к нулю, находим величину минимальной скорости ветра, при котором расщепленная фаза совершает периодические колебания с постоянной амплитудой A_0 и частотой ω_a (при преобразовании учтено значение коэффициента b_3), [117, р. 04019].

Шаблон MATLAB-кода и сам 3D-график зависимости критической скорости ветра от диаметра провода и расчётного усилия показан в (Приложении Г). Мы видим, что $V_{кр}$ увеличивается с ростом усилия: чем выше натяжение, тем устойчивее провод. И второе, $V_{кр}$ уменьшается с ростом диаметра: толстые провода более подвержены пляске.

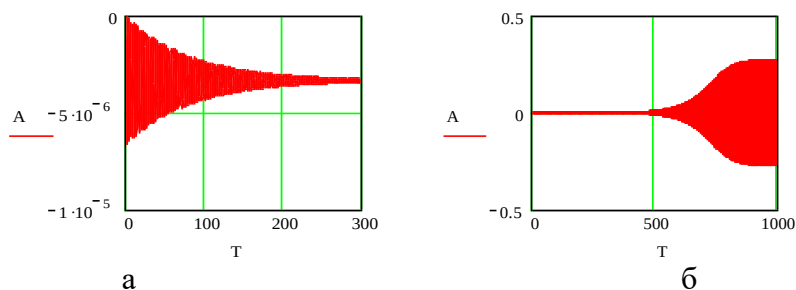
$$V_{кр} = \frac{\delta \omega_a P_{\text{пер}}}{2g\rho d_{\Pi}(C_{D0} + C_{L0})} \quad (4.62)$$

Из формулы (4.62) следует, что на нижнюю критическую скорость оказывает влияние декремент затухания, вес гололёдного осадка, частота собственных поперечных колебаний проводов (следовательно, характеристики линий электропередачи), плотность воздуха, геометрические размеры и стационарные аэродинамические коэффициенты гололёдного отложения.

На величину нижней критической скорости не влияет способ закрепления провода к опоре, то есть жесткое – анкерное крепление или подвижное – через подвесную гирлянду изоляторов.

Результаты моделирования.

Проверка достоверности полученных результатов осуществлена путем моделирования исходной нелинейной системы (4.54) в окрестностях критической скорости. Переходные процессы получены на Mathcad при нулевых начальных условиях (рисунок 28). Расчеты выполнены для расщепленной фазы из 3-х проводов АС-300/39, которые применяются в сетях сверхвысокого напряжения.



а – при $V = 1 \text{ м/с} < V_{кр}$; б – при $V = 1,6 \text{ м/с} > V_{кр}$;

Рисунок 28 – Переходные процессы при длине пролета $\ell = 200$ м и напряжениях провода $\sigma_0 = 10 \text{ даН/мм}^2$

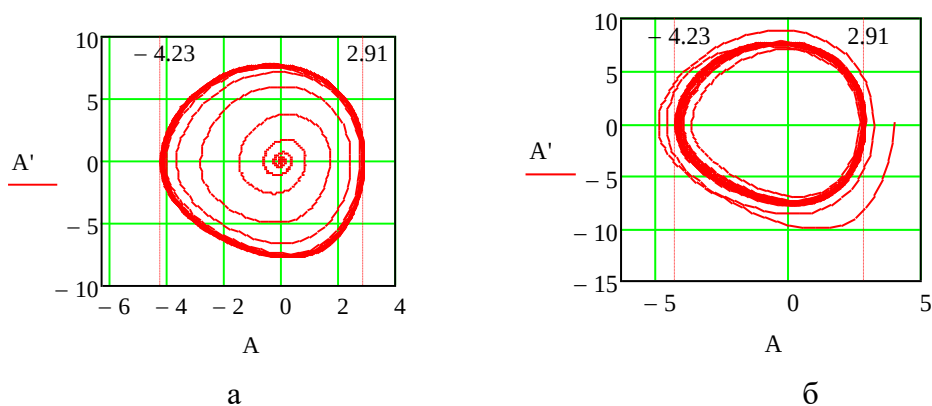
Как следует из полученных данных моделирования, при скорости $V < V_{кр}^H$, наблюдаем переходный процесс, а при $V > V_{кр}^H$ возбуждается устойчивая пляска с амплитудой 0,25 м и частотой, совпадающей с частотой свободного колебания провода.

На величину нижней критической скорости ветра, при котором возбуждается пляска проводов, существенное влияние оказывает частота свободного поперечного колебания провода и длина пролета расщепленной фазы.

Можно отметить, что способ закрепления провода к опоре и шаг расщепления не влияют на величину критической скорости ветра.

В работе [113, с. 318-322] приведена математическая модель применительно к расщепленной фазе воздушной ЛЭП. Ниже приводятся некоторые выводы, сделанные на основе моделирования уравнения движения в среде Mathcad. Все расчеты выполнены для провода АС-300/39 со следующими характеристиками: модуль Юнга $E = 7700 \text{ ДаН/мм}^2$; диаметр провода $d_{\text{л}} = 24 \text{ мм}$; площадь поперечного сечения провода $F = 339,6 \text{ мм}^2$; вес единицы длины провода (без гололеда) $P_{\text{вер}} = 1,132 \text{ ДаН/м}$; Расчеты выполнены для расщепленной фазы из 3-х проводов (шаг расщепления $n=3$).

На характер пляски проводов заметно оказывают влияние скорость ветра ($V, \text{ м/с}$), длина пролета ($\ell, \text{ м}$), начальное механическое напряжение провода ($\sigma_0, \text{ ДаН/мм}^2$). Результаты моделирования показали, что при небольших и средних скоростях ветра наблюдались четко выраженные устойчивые предельные циклы (рисунок 29). Частота автоколебаний совпала с частотой свободного колебания провода.



а – при нулевых начальных условиях; б – начальное отклонение равно 4,0 м

Рисунок 29 – Устойчивый предельный цикл: $\ell = 300 \text{ м}$, $n = 3$,
 $\sigma_0 = 10 \text{ Дан/мм}^2$, $V = 9,0 \text{ м/с}$

С увеличением скорости ветра и длины пролета, уменьшением натяжения провода колебательный процесс становится сложным, наблюдались хаотичные крутильные и линейные движения. Частота поперечных и крутильных колебаний проводов не совпадают. К примеру, такой процесс можно наблюдать при длине пролета 400 м, скорости ветра 10 м/с и начального механического напряжения провода 10 Дан/мм^2 . Увеличение амплитуды крутильных движений приводит к уменьшению амплитуды линейных движений и, наоборот, с уменьшением амплитуды крутильных движений наблюдается увеличение амплитуды линейных колебаний (рисунок 30).

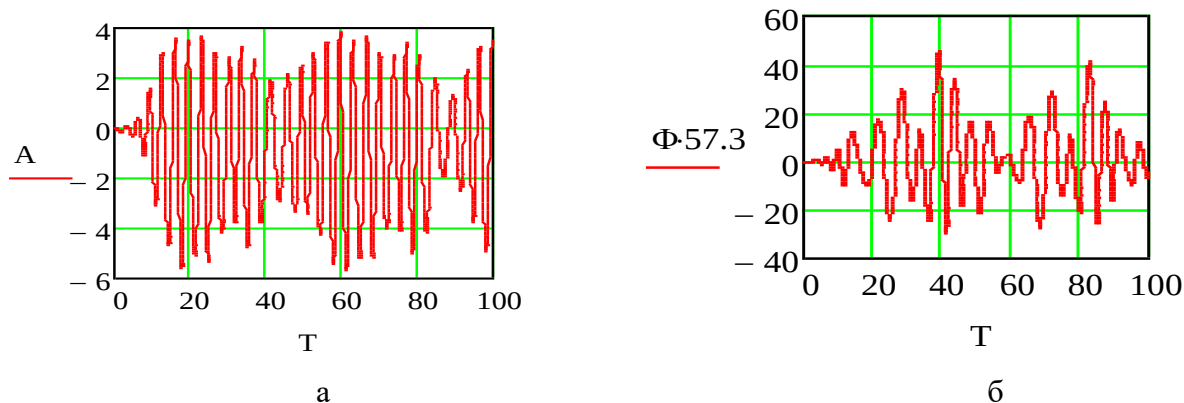


Рисунок 30 – Временные диаграммы линейных (а) и крутильных (б) движений при пляске: $\ell = 400 \text{ м}$, $n = 3$, $\sigma_0 = 10 \text{ Дан/мм}^2$, $V = 10 \text{ м/с}$

Шаблоны MATLAB-кода и сами графики зависимостей критической скорости ветра от диаметра провода и расчётного усилия показаны в (Приложениях Д и Е). Эти графики наглядно показывают влияние одного параметра при фиксированном другом.

4.5 Методы борьбы с пляской проводов

4.5.1 Анализ активных мер по борьбе с пляской проводов

На борьбу с пляской проводов всегда обращали большое внимание [1, с. 4-264; 2, с. 3-150; 4, с. 3-71; 6, с. 22-31; 13, р. 3-396; 61, с. 64-69; 67, р. 3-378; 118]. К сожалению, по многим типам гасителей пляски нет данных об их эффективности. Кроме того, их воздействие и влияние на долговечность и износостойкость провода от других нагрузок, возникающих в процессе подавления пляски. Чтобы определить возможность применения этих методов необходимо проведение их анализа с учетом современных достижений в этой области. К примеру, и использование так называемых, активных и пассивных

методов борьбы с пляской проводов. Пассивные методы борьбы с пляской проводов уже достаточно хорошо изучены и отлично показали себя в условиях эксплуатации воздушных линий. Но применение одних пассивных мер по борьбе с пляской проводов недостаточно, так как они не снижают знакопеременные нагрузки на элементы ВЛЭП, и они неоднократно приводили к тяжелым последствиям с большим объемом обрыва проводов, поломки изоляторов и опор, линейной арматуры.

Имеющиеся методы и предложения по борьбе с пляской проводов условно делят на три класса: мероприятия, направленные на предотвращение гололедного образования на проводах; изменение конструктивных параметров линий с целью недопущения опасного сближения проводов и использование гасителей пляски.

Активные методы борьбы это и есть первый и второй класс по борьбе с пляской и их можно разделить на три направления по способу воздействия на процесс пляски:

1. Воздействие на крутильные колебания провода при пляске; к первому классу относим плавку гололеда. В одних случаях это более экономический способ повышения надежности электроснабжения. Высокая стоимость и перерыв в электроснабжении при применении этого способа, а также другие повреждения и пережоги. Поэтому этот способ имеет ограниченную область применения.

Для предотвращения образования гололеда на проводах используют на определённой длине металлических накладок, что препятствуют образованию гололеда [67, р. 3-380].

2. Увеличение демпфирования колебаний. Использование эффекта чередования пролетов различной длины дают определенный эффект в "мешающем" действии соседних пролетов, так как частота колебаний зависит от длины пролета. Как показали наблюдения, в соседних пролетах колебания будут происходить с разной частотой и это дает снижение интенсивности колебаний. Такой способ считается эффективным при применении его против возникновения самой опасной одно полуволновой пляски. Эффективность такого метода проверена на электрифицированной ж.д., где пролеты нормальной длины чередовались с пролетами сокращенными на 10-15% [1, с. 4-264].

3. Изменения аэродинамических характеристик провода и воздействие на крутильные колебания при пляске. Механические гасители маятникового типа создают крутильные колебания от действия аэродинамического момента с частотой, равной собственной частоте системы провод - грузовой маятник, не равной частоте поступательных колебаний провода, но находящейся сравнительно близко к ней по значению. В этом случае происходит сбой фазового угла между этими колебаниями, и пляска может быть уменьшена и обычно происходит с небольшими амплитудами порядка 1-1,5 м.

Гаситель пляски для ВЛ с расщепленными проводами представляет собой эксцентричный груз, в конструкцию которого внесены элементы гасителя

вибрации - демпфирующий тросик и груз, а элемент крепления на провод взят из конструкции дистанционных распорок. Способ гашения пляски гасителями заключается в воздействии на крутильные колебания фазы проводов.

Вертикальные и крутильные колебания взаимно поддерживают друг друга и при скорости ветра, превышающей некоторое критическое значение, могут развиваться до значительных амплитуд. Основное назначение гасителя – рассогласование частот вертикальных и крутильных колебаний и исключение их близости при обледенении провода. Указанный выше принцип рассогласования частот реализован конструктивно в виде одно- и двухпетлевых гасителей – «Крыло» и «Бабочка». Гаситель состоит из одного или двух жестких грузов в виде куска провода или стального прутка, которые с помощью петель спиральной арматуры крепятся к проводу. Спиральная прядь состоит из 4...8 стальных проволок диаметром 3...5 мм. Диаметр петли одно петлевого гасителя – 0,2...0,5 м, масса груза 3...15 кг. Диаметр петель двух петлевого гасителя должен быть 0,3...0,6 м. Обе петли расположены в одной плоскости. Длина груза – 0,9...1,5 м. Масса гасителя – 3...20 кг.

4. Межфазовые распорки. Межфазовые распорки применяется для удержания проводов фазы и грозозащитных тросов на проектном расстоянии друг от друга посредством установки между ними гирлянды изоляторов, что предотвращает, таким образом, сближение их при пляске проводов. Такая система снижает амплитуду пляски проводов и связанные с ней динамические нагрузки на элементы ВЛ.

5. Использование гасителей, направленных на изменение профиля провода с гололедом и за счет удаления гололеда или уменьшения интенсивности его образования. Стали использовать спиральные гасители пляски провода, которые представляют собой спираль длиной 5 м из одной проволоки с разным шагом свивки. Образующийся гололед из-за влияния спирали имеет непостоянный профиль, из-за чего возникают аэродинамические силы и моменты, разные по значению и направлению. Поэтому пляска не является опасной. Спирали устанавливаются на 25% длины пролета. Еще применяют навивки спиралей из трех проволок. Такой с пиральный протектор против образования гололеда позволяет одновременно гасить и пляску проводов.

6. Применение свободно вращающихся проводов расщепленной фазы. Во многих странах Европы мокрый снег считается основной формой гололёдообразования, вызывающей пляску проводов. Кроме того, при таких условиях пляска проводов расщепленной фазы наблюдается чаще, чем пляска одиночного провода. Поэтому в этих странах применяются распорки с вращающимися зажимами или используются специальные распорки в виде обруча. Данный метод применяется в Нидерландах, Германии и Бельгии.

В настоящее время существует два новых типа проводов, специально разработанных против возникновения пляски: провод Т2 (скрученная пара) и овальный. Провод Т2 представляет собой два обычных провода, спирально скрученных друг с другом. У овального провода круглые проволоки во

внешнем повиве имеют различные диаметры, что дает овальное сечение. Принцип гашения пляски заключается в следующем: обледеневший провод поворачивается к ветру постоянно меняющимся по длине провода аэродинамическим профилем, и этим гасится пляска.

Провод Т2 разработан в США и применялся успешно. Овальный провод – это новая разработка США и в настоящее время проходит испытания.

4.5.2 Анализ пассивных мер по борьбе с пляской проводов

1. Определение максимальной ожидаемой амплитуды пляски проводов. Определение и оценка максимальной ожидаемой амплитуды пляски проводов для воздушных линий с конкретными данными конструктивных параметров при отсутствии специальных устройств защиты от пляски дает возможность определить между фазовые расстояния на промежуточных опорах по условию предотвращения перекрытий между проводами по причине пляски проводов.

Такой способ оценки максимальных ожидаемых амплитуд пляски основан на методе, который впервые был разработан в "Alcoa Conductor Products Company" и автором этого метода является С.В. Rawlins [72, p. 3744-3752; 90].

По мнению автора, параметром, позволяющим определить возможную амплитуду пляски, является параметр M' , характеризующий склонность пролетов различных видов к много полуволновой пляске.

Значение параметра M' для конкретного промежуточного пролета ВЛ вычисляется по формуле (4.63):

$$M' = \frac{10,67f^3}{l_r l^2}, \quad (4.63)$$

где f - стрела провеса провода, м;

l_r – длина поддерживающей гирлянды изоляторов, м;

l – длина пролета, м.

Следующим параметром пролета, влияющим на значение ожидаемой амплитуды пляски, является параметр T/m , где T - тяжесть провода, кгс; m - масса единицы длины провода, кгс/м. Поскольку тяжесть провода в пролете влияет на частоту колеблющегося провода, параметр T/m определяет частоту собственных колебаний пролета, т.е. одну из возможных форм пляски.

По данным конкретного пролета (f , l_r , l , T , m) вычисляются значения параметров M' и T/m . Затем используются представленные на рисунке 31 кривые, с помощью которых при данных значениях M' и T/m определяется значение отношения ожидаемой двойной амплитуды пляски к длине пролета $2A/l$. Смысл каждой кривой, представленной на рисунке 31, состоит в том, что левее каждой из них не ожидается значений отношения $2A/l$, превосходящих значения, указанные на данной кривой. По отношению $2A/l$ для данного пролета может быть легко определено значение максимальной ожидаемой амплитуды пляски пролета $2A$, рисунок 24 для ВЛ 110-220 кВ. Для воздушных ЛЭП сверхвысокого напряжения 500-750 кВ значение максимальной

амплитуды должно быть увеличено в 1,2 раза.

2. Проверка правильности выбора расстояний между проводами (проводами и тросами) из условия недопустимости их схлестывания в пролетах ВЛ.

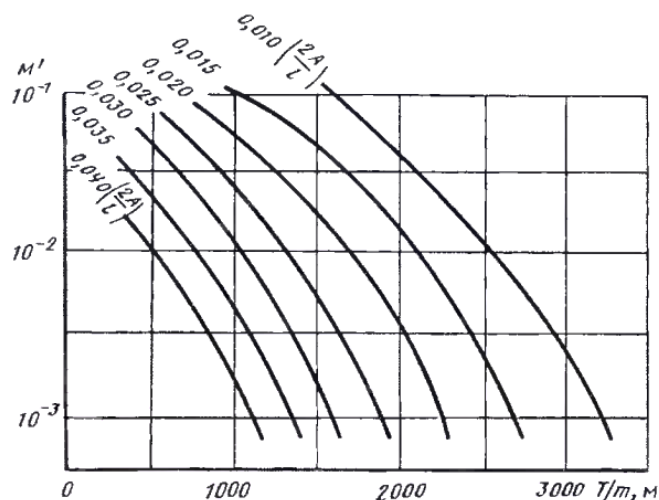


Рисунок 31 – Зависимость отношения максимальной ожидаемой амплитуды пляски к длине пролета от обобщенных параметров пролета M' и T/m

При выборе конструкции ВЛ для районов с частой и интенсивной пляской проводов необходимо принимать меры по предотвращению схлестывания проводов, междуфазных перекрытий, а также перекрытий фазатрос путем увеличения расстояний между проводами (проводами и тросами) с учетом возможных траекторий перемещений проводов при пляске.

Для выбора расстояний между проводами по условию пляски следует принять, что траектории движений провода в пучности волны пляски ограничены площадью эллипса, расположенного в плоскости, перпендикулярной оси линии. Соотношения между размерами эллипса пляски и стрелой провеса провода, угол наклона к вертикали большой оси (рисунок 32) и прочие параметры, необходимые для определения допустимых расстояний между проводами (проводами и тросами) на промежуточных опорах, представлены в таблице 12 [90].

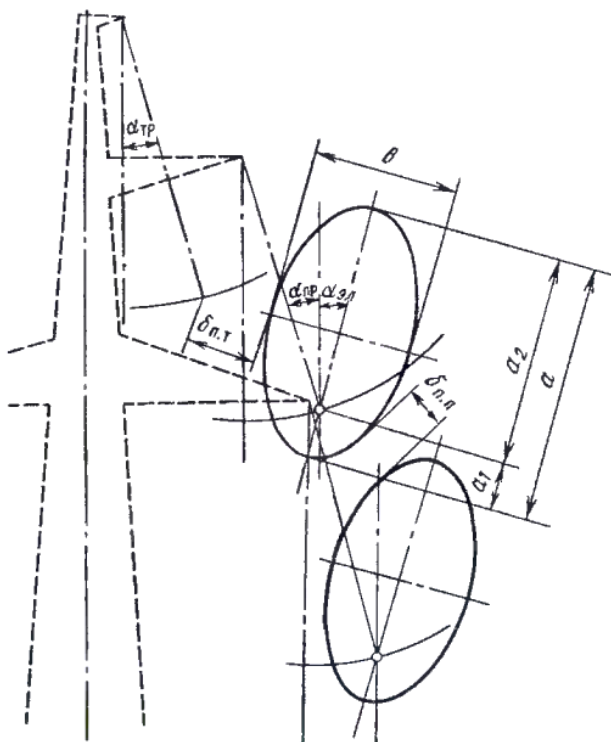


Рисунок 32 – Схема построения эллипсов пляски и отклонения грозозащитного троса на промежуточных опорах для определения возможности опасных сближений проводов и тросов

Таблица 12 – Соотношения между параметрами пляски, используемые при построении эллипсов пляски расщепленного провода сверхвысокого напряжения

Наименование расчетных параметров	Обозначение параметра на рисунке 25	Значение параметра для	
		ВЛ 500 кВ	ВЛ 500 кВ (пример)
1. Большая ось эллипса	a	f	f
2. Малая ось эллипса	$b = 0,5 a$	$0,5f$	$0,5f$
3. Угол отклонения провода	α_{np}	10°	10°
4. Угол отклонения троса по дуге радиуса $R_{np} = f_{np} + l_{u_{np}}$	α_{mp}		
5. Угол наклона большой оси эллипса к вертикали	$\alpha_{эл}$	10°	10°
6. Малая амплитуда колебаний провода	a_1	$0,2a$	$0,2a$
7. Большая амплитуда колебаний провода	a_2	$0,8a$	$0,8a$
8. Допустимые наименьшие расстояния между проводами и тросами*, м	δ_{nm}	1,15	1,15
9. То же между проводами разных фаз*, м	δ_{nn}	2,0	2,0
* – Для ВЛ с расщеплением фаз и грозотросов определяется с учетом размера D - суммы радиусов наименьших окружностей, описывающих пучок проводов (тросов)			

Данные, к примеру, для 500 кВ ВЛЭП:

Длина поддерживающей гирлянды изоляторов.

ПГС – 120 = 4,914 м (28 штук).

Стрела провеса провода = 2,1 м.

Длина пролета между двумя соединениями опорами = 315 м.

Допустимые наименьшее расстояние между проводами и тросами = 6 м.

Допустимые наименьшее расстояние между проводами фаз = 10 м.

Высота опоры тип: ПБ500-5 НУ = 28 м.

Марка провода = (ЗАС330/43).

Марка троса = (2АС 70/72).

Склонность пролетов различных видов к много полуволновой пляске по формуле (4.63):

$$M' = \frac{10.67 * 2.1^3}{4.914 * 315^2} = 2 * 10^{-3}.$$

Масса единицы длины провода для марки ЗАС330/43:

$W = 1.2$ кг/м [95, с. 3-410].

Определение значение тяжение в проводе для марки АС:

Формула тяжения на сечение:

$$\sigma = \frac{T}{F},$$

где T - тяжение в проводе, (Н);

F - площадь поперечного сечения провода, (мм²).

Для марки провода ЗАС330/43, диаметр $D = 25,2$ мм:

Площадь поперечного сечения провода определяется по формуле:

$$F = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{3,14 * 25,2^2}{4} = 498,5 \text{ мм}^2$$

Данная нам марка провода АС, исходя из справочников получаем что $\sigma_{вр}$ - предел прочности равен 29.

Предел прочности зависит от марки провода

α	E	$\sigma_{ер}$	$\sigma_{дн}$	$\sigma_{днб}$	$\sigma_{дс}$	Марка провода
$23 \cdot 10^{-6}$	8450	29	$0.37 \sigma_{ер}$	$0.42 \sigma_{ер}$	$0.25 \sigma_{ер}$	АС

$$\sigma_d = \frac{\sigma_{вр}}{n} * 100 \% = \frac{29}{2} = 14,5 \text{ кг/мм}^2$$

$$\sigma = \sigma_d$$

$$\sigma = \frac{T}{F} \rightarrow T = \sigma * F = 14,5 * 498,5 = 7228,25 \text{ кг}$$

Значение $\frac{T}{W}$ будет равен: $\frac{7228}{1,2} = 6023$ м.

Из графика на рисунке 31 определяем значение максимальной ожидаемой амплитуды пляски пролета 2А, (рисунок 9).

Значение $\frac{2A}{l} = 0,0067$, тогда:

$$2A = 0,0067 * l * 1,2 = 0,0067 * 315 * 1,2 = 2,53 \text{ м}$$

$$A = \frac{2,53}{2} = 1,265 \text{ м}$$

$$2A < D_{\text{допустимое между фазами}}$$

$$2,53 \text{ м} < 10 \text{ м}$$

К примеру, для сравнения расчета, естественная пляска на анкерных пролетах, длиной 354 и 288 метров, была зафиксирована на опытном полигоне КазНИИЭ. У обоих пролетов форма осадка была каплеобразная, лед прозрачный, толщиной около 5 мм. Вес льда, приходящий на 1 м провода - 0,1 даН/м. Марка провода АС-300/39. Натяжение провода в пролете длиной 354 м была равна 3218 даН, а в пролете 288 м – 2300 даН. Фаза расщепленная, число проводов в фазе у обоих пролетов была равна - 4. Скорость ветра при естественной пляске составила 4-5 м/сек. Угол атаки ветра к линиям была около 90°. Колебания происходили с одной полуволной. Амплитуда колебаний для пролета длиной 354 м составила: при движении из нейтрального положения в нижнее (малая амплитуда) - 1,20 м., а в верхнее (большая амплитуда) - 1,65 м. Размах пляски составил 2,85 м. Частота пляски была равна 0,33 Гц. Для пролета длиной 288 м размах пляски составил 2,27 м. Частота пляски составила 0,42 Гц. Угол поворота фазы во время пляски не фиксировался.

Если пляска проводов проходит в районах с повторяемостью более 1 раза в 5 лет (из опыта эксплуатации по данным АО КЕГОК так и выходит) расстояние между проводами и грозозащитными тросами должны быть не менее приведенных в таблице 12 [90]. Выбор этого расстояния всегда связан с учетом требований к надежности ВЛ. Расхождения с ПУЭ 2015 года, которое действует сейчас в РК, сведены к минимуму.

4.5.3 Разработка полезной модели (патент) по борьбе с пляской проводов

Распорка-гаситель для подавления пляски проводов расщепленной фазы воздушной линии электропередачи [119].

Данная полезная модель за счет шарнирного узла и ограничителей позволяет подавлять пляски в начальной стадии возбуждения путем нарушения процесса саморегулирования развития пляски, то есть путем расстройки резонанса (синхронизации) крутильных и вертикальных колебаний расщепленной фазы и уменьшения суммарной аэродинамической подъемной силы вследствие организации хаотичного движения отдельных проводов в пучке. Техническим результатом является упрощенная конструкция распорки-гасителя, возможность эффективного гашения пляски проводов расщепленной фазы.

Полезная модель относится к электроэнергетике и может быть использована в качестве распорки-гасителя для проводов расщепленной фазы

воздушной линии электропередачи. Существует устройство [120], содержащее упругие элементы, на концах которых жестко закреплены корпуса зажимов, в чьих пазах посредством плашек крепятся провода расщепленной фазы воздушной линии электропередачи, тяги, в качестве которых используются многопроволочные стальные канаты (тросы) с числом проволок в пределах 19 штук, металлические втулки, которые одним концом скрепляются между собой в центре, являющемся центром расщепленной фазы линии, втулки отстоят от корпусов зажимов на небольшое расстояние $l=1\div 3$ мм, и их диаметр $d_{вт}$ выбирается больше диаметра упругих элементов на величину $\Delta = 1\div 3$ мм, к одной из плашек зажима распорки крепится консольный элемент с грузом на его конце. Недостатком вышеизложенного устройства является сложная конструкция гасителя за счет демпферного узла, а также низкая эффективность рассеяния энергии при колебаниях, и как следствие, низкая эксплуатационная надежность линии электропередачи. Технической задачей является подавление пляски проводов расщепленной фазы линии электропередачи упрощенной конструкцией распорки-гасителя не содержащего демпферного узла. Для этого в распорку-гаситель, содержащую стандартные тяги, стандартные зажимы, согласно полезной модели, в нее введены ограничители, общий шарнир. Техническим результатом является упрощенная конструкция распорки-гасителя, возможность эффективного гашения пляски проводов расщепленной фазы.

Рисунок 33 – Устройство распорки-гасителя для подавления пляски проводов
расщепленной фазы линии электропередачи

На фигуре рисунка 33 представлено устройство распорки-гасителя для подавления пляски проводов расщепленной фазы линии электропередачи. Распорка-гаситель для подавления пляски проводов расщепленной фазы линии электропередачи содержит N расщепленные провода фазы линии 1-3, N тяги 4-6, $2N$ ограничители 7-9, N корпуса зажимов 10-12, N пазы зажимов 13-15, N плашки 16-18, N болты 19-24, N гайки 25-30, общий шарнир 31, при этом N расщепленные провода 1-3 укладываются в N корпусах зажимов 10-12 и накрываются N плашками 16-18 с помощью N болтов 19-21 и N гаек 25-27, N корпуса зажимов 10-12 жестко соединены с одной стороной N тяг 4-6, вдоль N тягам 4-6 соединены $2N$ ограничители 7-9 с помощью N болтов 22-24 и N гаек 28-30, образуя свободные промежутки, другие стороны N тяг 4-6 соединены с общим шарниром 31 в центре распорки-гасителя, являющимся центром расщепленной фазы линии. Устройство работает следующим образом: Распорка-гаситель монтируется на проводах расщепленной фазы воздушной линии электропередачи, для чего в пазы 13-15 корпусов 10-12 зажимов укладываются расщепленные провода 1-3, накрываются плашками 16-18 и затягиваются болтами 19-21 с гайками 25-27 с заданным значением усилия затяжки зажима распорки-гасителя на проводе линии, ограничители 7-9 крепятся к тягам 4-6 болтами 22-24 с гайками 28-30 обеспечивают расстояние между проводами 1-3. Тяги распорки-гасителя 4-6 из-за наличия свободных промежутков за счет шарнирного соединения 31 допускают некоторую свободу движения отдельных проводов 1-3 пучка вокруг состояния статического равновесия, за счет этого производятся хаотичные, независимые крутильные движения проводов 1-3 относительно шарнирного узла в силу неодинаковости собственных частот крутильных колебаний. Хаотичные крутильные движения проводов 1-3 фазы приводит, в свою очередь, к неупорядоченным ориентациям сечения профиля обледенелого провода относительно ветрового потока, как следствие, к уменьшению суммарной аэродинамической подъемной силы и нарушению процесса саморегулирования развития пляски, то есть к расстройке резонанса крутильных и вертикальных колебаний расщепленной фазы в целом. В результате пляски проводов подавляются в начальной стадии в своем развитии..

Формула полезной модели

Распорка-гаситель для подавления пляски проводов расщепленной фазы линии электропередачи, содержащий тяги, закрепленные одним концом в зажимах, установленных на проводах расщепленной фазы, отличающаяся тем, что дополнительно введены $2N$ ограничители (N – число, указывающее количество соответствующих элементов, равное количеству проводов расщепленной фазы воздушной линии), закрепленные к N тягам, и общий шарнир, установленный в центре расщепленной фазы воздушной линии и соединенный с N тягами в центре распорки-гасителя.

Выводы по четвертому разделу:

1. Разработанная математическая модель пляски проводов расщепленной фазы с двумя степенями свободы позволяет определить параметры пляски проводов для конкретной линии электропередачи, если известны аэродинамические коэффициенты профиля осадка и скорость ветра.

2. Особенности разработанной математической модели в том, что:

- колебательный процесс рассматривается на наклонной плоскости (в плоскости отклонения проводов под действием ветрового напора), что соответствует реальной физической модели;

- уравнение динамики легко моделируется в среде Mathcad и Matlab;

- модель пляски допускает разработку инженерных методов расчета характеристик пляски, что позволяет проводить качественный анализ колебательного процесса;

- модель позволяет исследовать пляску проводов без крутильных движений (модель с одной степенью свободы), если исключить из уравнения движений обобщенную координату крутильного движения;

3. Адекватность математической модели проверена сопоставлением параметров естественной пляски с расчетными параметрами.

4. Работы, связанные с нарушением однородности налипания гололеда и нарушения аэродинамической однородности за счет вращения провода и изменения его сечения по длине в данное время считают перспективным и активно ведутся разработки.

5. Еще одним из наиболее перспективных методов по борьбе с пляской являются методы и способы, основанные на использовании крутильных колебаний, причем во всех случаях борьба с пляской осуществляется за счет снижения амплитуд поступательных колебаний. Полного гашения пляски достичь невозможно, но можно достичь снижения амплитуды колебаний при пляске и динамических нагрузок, действующих на провод до значений, являющихся безопасными для ВЛЭП.

6. Гасители, работающие на принципе эксцентричных грузов, при установке на расщепленную фазу имеют массу от 2,4 до 4 кг и монтируются в местах распорок по четыре, шесть и восемь грузов на пролет в зависимости от длины пролета.

7. Разработанная полезная модель может быть использована в качестве распорки-гасителя пляски проводов расщепленной фазы ВЛЭП. Данная полезная модель может подавлять пляску в начальной стадии возбуждения путем нарушения процесса саморегулирования развития пляски, то есть путем расстройки крутильных и вертикальных колебаний расщепленной фазы, и в итоге, уменьшением суммарной аэродинамической подъемной силы.

8. Регрессионные модели пляски проводов, позволяют оценить среднее значение и интенсивности пляски A_p с учетом наложенных ограничений на переменные уравнения регрессии.

9. Оценочные формулы для оценки ожидаемых диапазонов интенсивности пляски с заданной 95%-ой доверительной вероятности (при

заданных длинах пролета, скорости ветра и угла атаки ветра к воздушной линии) могут быть использованы: проектными организациями – при обоснованном выборе междупазных расстояний и габаритов пролета; службами эксплуатации ЛЭП – при разработке мероприятий по повышению надежности в воздушных линиях.

Понимание аэродинамических аспектов нестабильности покрытых гололедом проводов имеет большое значение для предотвращения аварий и повышения безопасности линий электропередачи, особенно в регионах с холодным климатом и частым обледенением. Эти исследования помогают определить, как образование гололеда может повлиять на функционирование энергосистем, и способствуют разработке мер по повышению надежности и предотвращению возможных отказов. Результаты этих исследований используются при проектировании систем электропередачи. Воздушные линии электропередачи и опоры позволяют учитывать аэродинамические факторы и обеспечивать их устойчивость в различных климатических условиях. Понимание того, как обледенение влияет на работу линий электропередачи, также способствует оптимизации работы энергосистемы и повышению ее энергоэффективности. Исследования в этой области стимулируют разработку новых технологий и методов борьбы с аэродинамической нестабильностью и обледенением проводов. Важно отметить, что эти исследования имеют важное практическое значение для обеспечения бесперебойного электроснабжения в сложных метеорологических условиях и во время проектирования играют решающую роль в повышении надежности и безопасности систем передачи электроэнергии. Аэродинамическая теория, объясняющая происхождение скачкообразного движения проводов, основана на аэродинамической нестабильности профилей с некруглыми поперечными сечениями. Эта теория показывает, как воздушные потоки могут вызывать колебания в проводниках, которые могут иметь негативные последствия, включая повреждение или поломку. Профили проводников с нестандартным поперечным сечением, такие как плоские или овальные, способствуют аэродинамической нестабильности из-за неровностей воздушного потока, что приводит к различиям в давлении и скорости вокруг этих проводников. Неравномерности в воздушном потоке создают аэродинамические силы, способные инициировать колебания проводника. Эти колебания могут быть усилены ветром и другими метеорологическими факторами. Если амплитуда колебаний достигает определенного значения, это может вызвать резонанс, при котором вибрации становятся более интенсивными. Это представляет потенциальную угрозу для надежности проводников и энергосистемы. Диапазон колебаний может быть достаточно значительными, чтобы привести к повреждению проводов, в том числе к их обрыву. Это, в свою очередь, может привести к отключению электроэнергии и потребовать дорогостоящих восстановительных работ. Понимание этой аэродинамической нестабильности позволяет инженерам и проектировщикам учитывать этот фактор при проектировании систем линий электропередачи. Также разрабатываются меры безопасности и методы

предотвращения скачкообразного движения проводников, такие как уникальные аэродинамические обтекатели и системы управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных данных подчёркивает необходимость в комплексном подходе к проектированию и эксплуатации воздушных линий электропередачи. Уроки прошлого показывают, что применение готовых решений без учёта местных условий и факторов будет неэффективно. Будущее надежности линий сверхвысокого напряжения связано с развитием компьютерного моделирования и искусственного интеллекта, с использованием новейших прочных материалов и совершенствованием конструкций элементов ВЛ. Это позволит повысить надёжность и экономичность работы воздушных линий в различных климатических условиях.

В ходе проведенного исследования была проанализирована природа пляски проводов, которая представляет собой самовозбуждающиеся колебания, включающие вертикальные, горизонтальные и крутильные движения. Установлено, что фазовый угол между этими видами колебаний зависит от формы гололеда и направления ветра.

Результаты анализа показали, что пляска проводов может приводить к значительным повреждениям элементов воздушных линий электропередачи, включая обрывы проводов, разрушение арматуры и ослабление механической прочности опор.

Разработанная математическая модель пляски проводов с двумя степенями свободы позволила определить параметры пляски для различных условий эксплуатации линий электропередачи. Данная модель подтверждена экспериментальными данными и может быть использована для прогнозирования поведения проводов в условиях ветровых нагрузок.

Основные **выводы** исследования:

Установлены статистико-вероятностные связи между частотой возникновения пляски и различных сопутствующих факторов (скорость ветра, его угла атаки к воздушной ЛЭП, толщины гололеда, рельеф местности, температура воздуха, сезонные распределения и т.д.)

Разработанная математическая модель позволяет определять параметры пляски проводов при известных аэродинамических коэффициентах профиля осадка и скорости ветра. В частности, учтен наклонный характер колебательного процесса, что повышает реалистичность модели.

Регрессионные модели пляски проводов, позволяют оценить среднее значение ожидаемой интенсивности пляски проводов с учетом длины пролета.

Исследования перспективных методов борьбы с пляской показали, что наиболее эффективны способы, снижающие амплитуды поступательных колебаний проводов. Полное подавление пляски невозможно, но можно добиться значительного уменьшения динамических нагрузок.

Одним из перспективных методов борьбы с пляской является использование крутильных колебаний для снижения амплитуды поступательных движений. Разработанные гасители, работающие на принципе эксцентричных грузов, могут существенно уменьшить динамические нагрузки

на провода. Разработанная полезная модель распорки-гасителя пляски проводов позволяет эффективно подавлять пляску в начальной стадии за счет нарушения процесса саморегулирования. Это достигается расстройкой резонанса крутильных и вертикальных колебаний, а также уменьшением суммарной аэродинамической подъемной силы. Предложенная конструкция распорки-гасителя способна подавлять пляску на ранних стадиях, что способствует повышению надежности воздушных ЛЭП.

Проведенное исследование позволило глубже понять механизмы возникновения пляски проводов, определить факторы, влияющие на ее развитие, и предложить решения для ее минимизации, что особенно важно для эксплуатации высоковольтных линий электропередачи сверхвысокого напряжения.

Таким образом, данная работа подтвердила актуальность изученной темы и, предложенная математическая модель и разработанная конструкция гасителя могут быть использованы в инженерной практике для повышения надежности воздушных линий электропередачи и уменьшения последствий пляски проводов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Ванько В.И. Колебания проводов расщепленной фазы воздушных ЛЭП: линейная теория, эксперимент: дис. ... док. техн. наук: 05.14.02. – М., 1993. – 267 с.
- 2 Бекметьев Р.М., Жакаев А.Ж., Ширинских Н.В. Пляска проводов воздушных линий электропередачи. – Алма-Ата: Наука, 1979. – 151 с.
- 3 Keutgen R. Galloping phenomena: a finite element approach: thes. ... doc. PhD. – Liege, 1998. – 202 p.
- 4 Глебов Э.С. Пляска проводов на воздушных линиях электропередачи 500 кв. – М., 1965. – 72 с.
- 5 Стрелюк М.И., Сергей И.И., Блалыко В. и др. Расчет динамических нагрузок на дистанционные распорки воздушных линий сверхвысокого напряжения // Энергетика. - 1995. - №1-2. - С. 17-25.
- 6 Ширинских Н.В. Экспериментальная оценка мероприятий по борьбе с колебаниями проводов расщеплённой фазы на участках между распорками // Ветровые и гололёдные нагрузки на провода воздушных линий электропередачи: тр. ин-та Энергосетьпроект. – М., 1985. - С. 22-32.
- 7 Conseil International des Grands Réseaux Électriques // <https://www.cigre.org/>. 12.04.2025.
- 8 Tunstall M.J. et al. State of the Art of Conductor Galloping: A complementary document. – Tokyo, 2005. – 146 p.
- 9 Альт К., Бауэр К.-Х., Боос К.-В. Динамические явления на линиях электропередачи // Линии электропередачи. Подстанции переменного тока (СИГРЭ - 84): матер. междунар. конф. - М., 1987. - С. 160-171.
- 10 Кларен Р., Диана Дж., Николини П. Колебания проводов в расщеплённых фазах // Воздушные линии электропередачи (СИГРЭ - 74): матер. междунар. конф. - М.: Энергия, 1977. - С. 36-63.
- 11 Винантс В., Риец М. Пляска проводов воздушных линий // Воздушные линии электропередачи (СИГРЭ - 70): матер. междунар. конф. - М.: Энергия, 1972. - С. 47-57.
- 12 Transmission Line Reference Book: Wind-induced Conductor Motion / Electrical Power Research Institute. – Palo Alto, CA, 1979. – 244 p.
- 13 Transmission Line Reference Book: Wind-induced Conductor Motion / Electrical Power Research Institute. – Palo Alto, CA, 2006. – 399 p.
- 14 Стрелюк М.И., Сергей И.И., Виноградов А.А. и др. Динамические нагрузки на распорки при субколебаниях ВЛ СВН // Энергетическое строительство. – 1986. - №1. - С. 68-71.
- 15 Hartog J.P.D. Transmission Line Vibration Due to Sleet // Transactions of the American Institute of Electrical Eng. – 1932. – Vol. 51, №4. – P. 1074-1076.
- 16 Заглиев И.Г. Оценка форм и размеров гололедного осадка на проводах ВЛ // В кн.: Ветровые и гололедные нагрузки на провода воздушных линий электропередачи. – М., 1985. – С. 32-39.

- 17 Ржевский С.С. Профиль гололеда и максимальная скорость ветра при пляске ВЛ // Электрические станции. - 1972. - №4. - С. 44-46.
- 18 Glauert H. The Rotation of Aerofoil about a Fixed Axis // Reports and Memoranda of Advisory Committee for Aeronautics. - Edinburgh, 1919. - P. 8.
- 19 Марчевский И.К. Математическое моделирование обтекания профиля и исследование его устойчивости в потоке по Ляпунову: дис. ... канд. ф. из.-мат. наук: 05.13.18. - М., 2008. - 119 с.
- 20 Alonso G., Meseguer J., Perez-Grande I. Galloping oscillations of two dimensional triangular cross-sectional bodies // Experimental Fluids. - 2005. - Vol. 38. - P. 789-795.
- 21 Alonso G. et al. On the galloping instability of two-dimensional bodies having elliptical cross-sections // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. - 2010. - Vol. 98, Issue 8-9. - P. 438-448.
- 22 O Chabart J.L. Lilien Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. - 1998. - Vol. 74-76. - P. 967-976.
- 23 Nigol O., Buchan P.G. Conductor Galloping Part I - Den Hartog Mechanism // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. - 1981. - Vol. PAS-100, Issue 2. - P. 699-707.
- 24 Novak M. Galloping oscillations of prismatic structures // Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE. - 1972. - Vol. 98. - P. 27-46.
- 25 Parkinson G.V., Brooks N.P.H. On the aeroelastic instability of bluff cylinders // Journal of Applied Mechanics. - 1961. - Vol. 28, Issue 2. - P. 252-258.
- 26 Бекметьев Р.М., Джаманбаев М.А. Методика расчета характеристик движения провода при пляске // Ветровые и гололедные нагрузки на провода воздушных линий электропередачи: сб. - М., 1985. - С. 3-21.
- 27 Бошнякович А.Д. Механический расчет проводов и тросов линий электропередачи. - Л.: Энергия, 1971. - 254 с.
- 28 Бургсдорф В.В. Новые исследования воздушных линий электропередачи // Воздушные линии электропередачи: сб. ст. - М., 1975. - С. 3-12.
- 29 Бучинский В.Е. Атлас обледенения проводов - Л.: Гидрометеиздат, 1966. - 115 с.
- 30 Винантс В., Риец М. Пляска проводов воздушных линий // Воздушные линии электропередачи: сб. ст. - М., 1972. - С. 47-56.
- 31 Григорьянц М.С., Лукьянова В.Н. Определение частот и форм колебаний абсолютно гибкого стержня, нагруженного аэродинамическими силами // Расчеты на прочность: сб. ст. - М., 1982. - Вып. 23. - С. 222-226.
- 32 Гувер А., Хокс Р. Роль турбулентности и явления галопирования линий электропередачи, обусловленном влиянием следов // Ракетная техника и космонавтика. - 1976. - Т. 14, №12. - С. 72-77.
- 33 Паркинсон Г., Брукс Н. Аэроупругая неустойчивость плохообтекаемых цилиндров // Тр. Американского общества инженеров механиков. Прикладная механика / пер. с англ. - М., 1961. - Т. 28, вып. 2. - С. 115-123.

- 34 Ржевский С.С. Физико-математическая модель пляски проводов воздушных линий электропередачи без крутильных колебаний // Известия вузов. Энергетика. - 1975. - №7. - С. 3-7.
- 35 Яковлев Л.В. Физическая сущность пляски проводов // Электрические станции. - 1971. - №10. - С. 45-49.
- 36 Lacarbonara W., Paolone A., Vestroni F. Galloping Instabilities of Geometrically Nonlinear Nonshellow Cables Under Steady Wind Flows // Proceed. of ASME 2005 internat. Design Engineering Technical conf. and Computers and Information in Engineering conf. - LongBeach, 2005. - P. 1565-1574.
- 37 Novak M. and Tanaka H. Effect of Turbulence on Galloping Instability // J. of the Engineering Mechanics Div. - 1974. - Vol. 100. - P. 27-47.
- 38 Yu P., Shah A.H., Popplewell N. Inertially Coupled Galloping of Ice Conductors // Journal of Applied Mechanics. - 1992. - Vol. 59. - P. 141-145.
- 39 Ванько В.И. Математическая модель пляски провода ЛЭП // Известия вуза. Энергетика. - 1991. - №11. - С. 36-42.
- 40 Яковлев Л.В., Цветков Ю.Л. Исследование пляски проводов воздушных линий // Управляемые электропередачи. - 1992. - №6 - С. 57-63.
- 41 Ланда П.С. Автоколебания провода, нагреваемого электрическим током, с учетом тензорезистивного эффекта // Известия вуза. Прикладная нелинейная динамика. - 2008. - №1. - С. 19-32.
- 42 Ланда П.С. Срывной флаттер как один из механизмов возбуждения а ВТО колебаний линий электропередачи // Известия вуза. Прикладная нелинейная динамика. - 2009. - №2. - С. 3-15.
- 43 Desai Y.M. et al. Perturbation-based finite element analyses of transmission line galloping // Journal of Sound and Vibration. - 1996. - Vol. 191, Issue 4. - P. 469-489.
- 44 Fu G. et al. Simulations of the controlling effect of interphase spacers on conductor galloping // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 2012. - Vol. 19, Issue 4. - P. 1325-1334.
- 45 Liu X. et al. Nonlinear numerical simulation method for galloping of iced conductor // Applied Mathematics and Mech. - 2009. - Vol. 30, Issue 4. - P. 489-501.
- 46 Wang X., Lou W.-J. Numerical approach to galloping of conductor // Proceed. the 7th Asia-Pacific conf. on Wind Engineering. - Taipei, 2009. - P. 1-8.
- 47 Lilien J.L., Dubois H. Overhead line vertical galloping on bundle configurations: stability criterions and amplitude prediction // Proceed. the internat. conf. on Overhead Line Design and Construction: Theory and Practice. - London, 1988. - P. 65-69.
- 48 Wang L., Lilien J.-L. Overhead electrical transmission line galloping // IEEE Transactions on Power Delivery. - 1998. - Vol. 13, Issue 3. - P. 909-916.
- 49 Яковлев Л.В. Пляска проводов на воздушных линиях электропередачи и способы борьбы с нею. - М.: НТФ Энергопрогресс, 2002. - 96 с.
- 50 Ланда М.Л., Лукьяненко Ю.Д. Обследование и анализ гололедно-ветровых аварий на воздушных линиях электропередачи // Электрические станции. - 1981. - №6. - С. 44-48.

- 51 Джонсен Р., Шетне К., Эрвик М. и др. Оценка гололедных нагрузок на воздушные линии // Воздушные линии электропередачи: сб. ст. - М., 1978. - С. 106-115.
- 52 Ванько В.И. О расстановке распорок в пролете расщепленной фазы линии электропередачи// Электричество. – 1996. - №11. - С. 25-28.
- 53 Transmission Line Reference Book: Wind-induced Conductor Motion: Based on EPRI Research Project 792 / Electric Power Research Institute. - Palo Alto, 1979. – 244 p.
- 54 Rowbottom M.D., Aldham-Hughes R.B. Subspan oscillation: A review of the existing knowledge. - Paris. 1972. – 18 p.
- 55 Lilien J.L., Dubois H. Overhead line vertical galloping on bundle configurations: stability criterions and amplitude prediction // Proc. the internat. conf. on Overhead Line Design and Construction: Theory and Practice. – London, 1988. - P. 65-69.
- 56 Ванько В.И. Колебания расщепленной фазы проводов ЛЭП // Известия вузов. Энергетика. – 1991. - №2. - С. 11-17.
- 57 Графский И.Ю., Казакевич М.И. Аэродинамика плохобтекаемых тел. - Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1983. – 112 с.
- 58 Ванько В.И., Виноградов А.А., Яковенко Г.М. Колебания проводов расщепленной фазы воздушных ЛЭП в подпролетах // Известия вузов. Энергетика. – 1989. - №9. - С. 27-33.
- 59 Ванько В.И., Платонова И.А. Математическое моделирование колебаний проводов высоковольтных ЛЭП // Тез. 7-й междунар. конф. "Математика, компьютер, образование". - Дубна, 2000. - С. 65.
- 60 Ванько В.И., Яковенко М.Г., Виноградов А.А. Линейная вязкоупругая модель колебаний провода в подпролетах расщепленной фазы // Известия вузов. Энергетика. – 1989. - №10. - С. 16-21.
- 61 Пустыльников Л.Д., Шерешевский В.А., Шкапцов В.А. и др. Метод ограничения пляски проводов воздушных линий // Управляемые электропередачи. – 1992. - №6. - С. 64-70.
- 62 Ржевский С.С. Физико-математическая модель пляски провода воздушной линии // Известия вузов. – 1975. - №7. - С. 3-7.
- 63 Ризон Д. Пляска проводов - трудноразрешимая проблема // Мировая электроэнергетика. – 1994. - №1. - С. 45-46.
- 64 Claren R., Diana G, Giordana F. The vibrations of transmission line conductor bundles // IEEE Transactions on PAS. - 1971. - Vol. 90. - P. 1796-1809.
- 65 Ryle P.I. Conductor vibration // Journ. inst. Electr. Engin. – 1931. - Vol. 69. - P. 811-819.
- 66 Simpson A. Subconductor oscillation: Summary of results of recent research at the University of Bristol// Proc. IEE. - 1970. - Vol. 117. - P. 751-752.
- 67 Farzaneh M. Atmospheric Icing of Power Networks. – Dordrecht, 2008. – 381 p.

- 68 Сергей И.И., Виноградов А.А. Численное моделирование эксплуатационных статических и динамических режимов проводов ВЛ и кабелей // Электрические станции. – 1998. - №1. - С. 41-48.
- 69 Ржевский С.С., Хволес Е.А. Пляска проводов на ВЛ 500 кВ Бугульма-Бекетово // Науч. тр. Всес. проект.-изыскат. и НИИ Энергосетьпроект. – М., 1977. - Вып. 9. - С. 197-202.
- 70 Baenziger M.A. et al. Dynamic loads on transmission line structures due to galloping conductors // IEEE Transactions on Power Delivery. - 1994. – Vol. 9. - P. 40-49.
- 71 Lilien J.L., Havard D. Galloping data base on single and bundle conductors' prediction of maximum amplitudes // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2000. - Vol. 15, Issue 2. - P. 670-674.
- 72 Rawlins C.B. Analysis of conductor galloping field observations - single conductors // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. - 1981. - Vol. 100, Issue 8. - P. 3744-3753.
- 73 Linfei X., Bin Z., Sihang Z. et al. Analysis of Wire Breakage Fault Caused by Galloping on 66kV Debao A and B Line in November 2023 // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2731, Issue 1. – P. 012010-1-012010-6.
- 74 He Y., Zhang B., Chen L. et al. Analysis of Typical Galloping Shandong 500kV Wendeng Line in 2021 // In book: Advances in Machinery, Materials Science and Engineering Application IX. – Amsterdam, 2023. – P. 674-680.
- 75 Chen Z., Cai W. et al. Aerodynamic Force and Aeroelastic Response Characteristics Analyses for the Galloping of Ice-Covered Four-Split Transmission Lines in Oblique Flows // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – P. 16650-1-1650-24.
- 76 Zhang Z., Zhang H., Yue S. et al. A Review of Icing and Anti-Icing Technology for Transmission Lines // Energies. – 2023. – Issue 2. – P. 10-19.
- 77 Talib E., Shin Ji-H., Kwak M.K. et al. Dynamic modeling and simulation for transmission line galloping // Journal of Mechanical Science and Technology volume. – 2023. - №33. – P. 4173-4181.
- 78 Zhamanbaev M., Ilieva D., Abitaeva R. et al. Determination of the minimum wind speed leading to the galloping of conductors // E3S Web Conf. – 2020. – Vol. 180. – P. 7-14.
- 79 Dzhamanbaev M.A., Tokenov N.P. Research of statistical materials on the dance of wires in the conditions of Kazakhstan // Energy. – 2014. – Vol. 3. – P. 81-85.
- 80 Chen Zha., Cai W. et al. Aerodynamic Force and Aeroelastic Response Characteristics Analyses for the Galloping of Ice-Covered Four-Split Transmission Lines in Oblique Flows // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – P. 166-175.
- 81 Desai Y.M., Yu P., Shan A.H. et al. Perturbation-based finite element analyses of transmission line galloping // IEEE Journal of Sound and Vibration. – 1996. - Vol. 191, Issue 4. – P. 469-489.
- 82 Desai Y.M., Yu P., Popplewell N. et al. Finite element modelling of transmission line galloping // IEEE Computrs & Strucrum. - 1995. - Vol. 57, Issue 3. - P. 407-420.

83 Zhao Q., Liu Zh., Yu P. et al. Review of Transmission Line Icing and Anti-icing Technologies // Proceed. of the 16th Annual conf. of China Electrotechnical Society. – Singapore: Springer, 2022. – P. 1224-1232.

84 Hu J., Yan B., Zhou S. et al. Numerical Investigation on Galloping of Iced Quad Bundle Conductors // IEEE Transactions on power delivery. – 2012. - Vol. 27, Issue 2. – P. 784-792.

85 McComber P., Paradis A. A cable galloping model for thin ice accretions // Atmospheric Research. – 1998. - Vol. 46. - P. 13-25.

86 Zhou X., Zhu Y., Zhang Y. et al. A Review of Anti-icing and De-icing Technology of Overhead Ground Wire // Proceed. internat. sympos. on Electrical, Electronics and Information Engineering. – Chiang Mai, 2022. – P. 282-286.

87 Sheng W. Wave Energy Converters // Encyclopedia of Ocean Engineering. – 2022. – Vol. 8. – P. 2121-2128.

88 Biswas S.K., Riaz H., Ahmed N.U. Modal Dynamics and Stabilizer Design for Galloping Transmission Lines // IEEE Electric Power Systems Research. - 1987. - Vol. 12, Issue 2. - P. 175-182.

89 Piccardo G., Pagnini L.C., Tubino F. Some research perspectives in galloping phenomena: critical conditions and post-critical behavior // Continuum Mechanics and Thermodynamics. – 2015. – Vol. 27, Issue 1-2. – P. 261-285.

90 РД 34.20.184-91.1991. Методические указания по районированию территорий энергосистем и трасс ВЛ по частоте повторяемости и интенсивности пляски проводов / Всесоюзным научно-исследовательским институтом электроэнергетики // https://ohranatruda.ru/ot_biblio. 10.04.2025.

91 Джаманбаев М.А., Абитаева Р.Ш. Повторяемость пляски проводов в зависимости от рельефа местности и метеоусловий // Сатпаевские чтения «Конкурентоспособность технической науки и образования»: матер. междунар. конф. – Алматы: КазННТУ, 2016. - С. 916-920.

92 Джаманбаев М.А., Абитаева Р.Ш., Малдыбаева Т.С. Условия возникновения пляски проводов и характер повреждения ЛЭП // Сатпаевские чтения «Конкурентоспособность технической науки и образования»: матер. междунар. конф. – Алматы: КазННТУ, 2016. - С. 49-51.

93 Джаманбаев М.А., Абитаева Р.Ш., Зарипбаев М. Анализ продолжительности пляски проводов // Вестник КазННТУ им. К.И. Сатпаева. – 2017. – №2(120). – С. 219-223.

94 Джаманбаев М.А., Абитаева Р.Ш., Касымов А. Оценка благоприятного диапазона скорости ветрового потока для возникновения пляски проводов // Вестник КазННТУ им. К.И. Сатпаева. – 2017. – №2(120). – С. 72-76.

95 Александров Г.Н. Передача электрической энергии. – СПб., 2009. – 412 с.

96 Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы / под ред. А.Ф. Дьякова. – М., 2012. – Т. 1. – 696 с.

97 Типовые варианты распорок // www.gig-group.com

98 Edwards A.T., Madeyski A. Progress report on the investigation of galloping of transmission line conductors // AIEE Transaction Distribution, Winter Meeting. New York, 1958. -P. 84-130.

99 Анио К., Ямасаки С. и др. Экспериментальные исследования пляски расщепленных проводов магистральных линий электропередачи на опытной линии в Касатории-Яма: докл. // СИГРЭ. – 1974. – №22-04.

100 Винантс В., Риец М. Пляска проводов воздушных линий // Воздушные линии электропередачи (СИГРЭ 70): сб. ст. - М.: Энергия, 1972. - С. 47-57.

101 Wind Effects on Buildings and Structures: Proceedings of the Conference Held at the National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, on 26th, 27th and 28th June, 1963 / H.M. Stationery Office. – London, 1965. – 852 p.

102 Abitayeva R., Bekbayev A., Dzhamanbayev M. et al. Equation of motion of split conductor of anchor section at icing in wind flow // International Journal of Renewable Energy. – 2024. – Vol. 13, Issue 6. – P. 1005-1014.

103 Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е. Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 367 с.

104 Бочаров Ю.Н., Титков В.В., Абитаева Р.Ш. и др. Свободное крутильное колебание расщепленного провода линий электропередач // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета. – 2017. – Т. 23, №1. - С. 84-91.

105 Джаманбаев М.А., Абитаева Р.Ш., Касымов А. Аэродинамические характеристики профиля сечения провода с гололедным осадком // Сатпаевские чтения «Научное наследие Ш. Есенова»: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Алматы, 2017. – С. 56-60.

106 Бекбаев А.Б., Джаманбаев М.А., Абитаева Р.Ш. Крутильная частота и крутильная жесткость расщепленной фазы линии электропередачи // Матер. всемир. конгр. инженеров и ученых WSEC-2017 «Энергия будущего: инновационные сценарии и методы их реализации». – Астана, 2017. – С. 255-261.

107 Пустыльников Л.Д., Шкапцов В.А. Аэродинамически неустойчивые колебания проводов в воздушных линиях электропередачи с гололедными отложениями // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1991. – №2. - С. 103-106.

108 Крылов С.В., Шкапцов В.А. Улучшенная система подвески проводов для больших воздушных переходов с промежуточными опорами // Электрические станции. - 1999. - №3. - С. 36-42.

109 Wang I., Lilien J.L. Overhead electrical transmission line galloping. Afullmulti-Span 3-DOF-Model, some Application and design recommendations // IEEE Transactions on Power Delivery. - 1998. - Vol. 13, Issue 3. - P. 909-916.

110 Бекметьев Р.М., Джаманбаев М.А. Методика расчета динамических нагрузок при пляске проводов // Сб. докл. советских специалистов на международном совещании по проблемам пляски проводов ЛЭП. – Сочи, 1985. - С. 56-68.

111 Бекбаев А.Б., Джаманбаев М.А., Акпанбетов Д.Б. и др. Исследование влияние амплитуды колебаний проводов линий электропередач на собственную частоту // Вестник Казахской Национальной академии естественных наук. - 2012. - №1. - С. 64-66.

112 Светлицкий В.А., Стасенко И.В. Сборник задач по теории колебаний. М.: Высшая школа, 1973. – 454 с.

113 Джаманбаев М.А., Абитаева Р.Ш. Математическая модель пляски расщепленной фазы (многопролетная система) // Матер. 7-й междунар. науч.-практ. конф. Дулатовские чтения: «Наука и инновации-стратегические приоритеты развития экономики государства». – Кустанай, 2016. – С. 318-323.

114 Abitayeva R., Dzhamanbayev M., Bekbayev A. et al. Problems of increasing the reliability of electrical energy transmission via high-voltage power lines in conditions of increased climate risk // Polityka energetyczna – Energy policy journal. - 2025. - Vol. 28, Issue 1. - P. 5-32.

115 Bekbaev A.B., Djamanbaev M.A., Abitayeva R. Development of the engineering method of the conductors galloping characteristics calculation for the split phase of the power transmission line (anchor span) // World Scientific and Engineering Congress WSEC-2017 «Future energy: innovation scenarios and methods of their implementation». - Astana, 2017. - P. 85-98.

116 Крюков К.П., Новгородцев Б.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. – Изд. 2, перер. и доп. – Л., 1979. – 312 с.

117 Zhamanbaev M., Ilieva D., Abitayeva R. et al. Determination of the minimum wind speed leading to the galloping of conductors // E3S Web of Conferences: procced. 9th internat. conf. on Thermal Equipments, Renewable Energy and Rural Development (TE-RE-RD 2020). – Constanta, 2020. – P. 04019.

118 Абитаева Р.Ш. Способы борьбы с пляской проводов // Байконуровские чтения «Наука, образование и инновация-факторы реализации стратегии Казахстан-2050»: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Жезказган, 2015. – С. 64-68.

119 Пат. 108828 РК. Распорка-гаситель для подавления пляски проводов расщепленной фазы воздушной линии электропередачи / Джаманбаев М.А., Бекбаев А.Б., Абитаева Р.Ш. и др.; 06.05.20, Бюл. №18.

120 Пат. 2331147 РФ. Распорка-гаситель для проводов расщепленной фазы воздушной линии электропередачи / Дубинич Л.А., Каверина Р.С., Яковлев Л.В.; опубл. 10.08.08, Бюл. №22. – 12 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

**АВТОРДЫҢ КУӘЛІГІ
УДОСТОВЕРЕНИЕ АВТОРА**

№ 108828

Джаманбаев Мураткали Абенович (KZ)

және/и Бекбаев Амангельды Бекбаевич (KZ); Ақпанбетов Дархан Берикович (KZ);
Абитаева Рахима Шанракбаевна (KZ)

*пайдалы модельдің авторы(лары) болып табылатындығы осымен куәландырылады
является(ются) автором(ами) полезной модели*

(11) 4918

(54) Электр беріліс әуе желісінің таралған фазасы сымдарының толқуын басуға арналған
кергіш-бәсеңдеткіш
Распорка-гаситель для подавления пляски проводов расщепленной фазы воздушной линии
электропередачи

(73) Джаманбаев Мураткали Абенович (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП

Е. Қуантыров
Е. Қуантыров

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМҚ директоры
Директор РПІ «Национальный институт интеллектуальной собственности»



Қазақстан Республикасы Әділет министрлігінің
«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМҚ
Нұр-Сұлтан қаласы, Мәңгілік Ел даңғылы, ғимарат 57А

РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Министерства юстиции Республики Казахстан
Город Нур-Султан, проспект Мангилик Ел, здание 57А

«National Institute of Intellectual Property» RSE,
Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan
Nur-Sultan, 57A Mangilik El Avenue

E-mail: kazpatent@kazpatent.kz
[http:// www.kazpatent.kz](http://www.kazpatent.kz)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Шаблон MATLAB-кода для построения графика линейного перемещения $\alpha(t)$, решая уравнение второго порядка с заданными параметрами

```
% Параметры модели
L = 300;           % длина пролета, м
w = 1.5;           % вес на единицу длины, Н/м
T = 1000;          % натяжение, Н
E = 7e10;          % модуль упругости, Па
F = 3e-4;          % площадь поперечного сечения, м^2
delta = 0.05;      % декремент затухания
rho = 1.225;        % плотность воздуха, кг/м^3
D = 0.03;          % диаметр провода, м
V = 15;            % скорость ветра, м/с
CD0 = 1.0;          % коэффициент лобового сопротивления
CL0 = 0.2;          % коэффициенты подъемной силы
CL1 = 0.1;

% Производные параметры
m = w / 9.81;      % масса на единицу длины, кг/м
k = (E * F) / L;    % жесткость
c = 2 * delta * sqrt(k * m); % коэффициент демпфирования

% Сила от ветра (упрощенная модель)
faero = @(a, v) 0.5 * rho * V^2 * D * (CL0 + CL1 * a); % пример

% ОДУ: a'' + (c/m) * a' + (k/m) * a = faero/m
odefun = @(t, y) [y(2); (faero(y(1), V) - c * y(2) - k * y(1)) / m];

% Начальные условия: [a0, a0']
y0 = [0; 0];

% Решение
tspan = [0 0.2]; % секунды
[t, y] = ode45(odefun, tspan, y0);

% График
plot(t, y(:,1), 'LineWidth', 1.5)
xlabel('Время, с')
ylabel('Отклонение a(t), м')
title('Колебания провода при действии ветра (пляска проводов)')
grid on
```

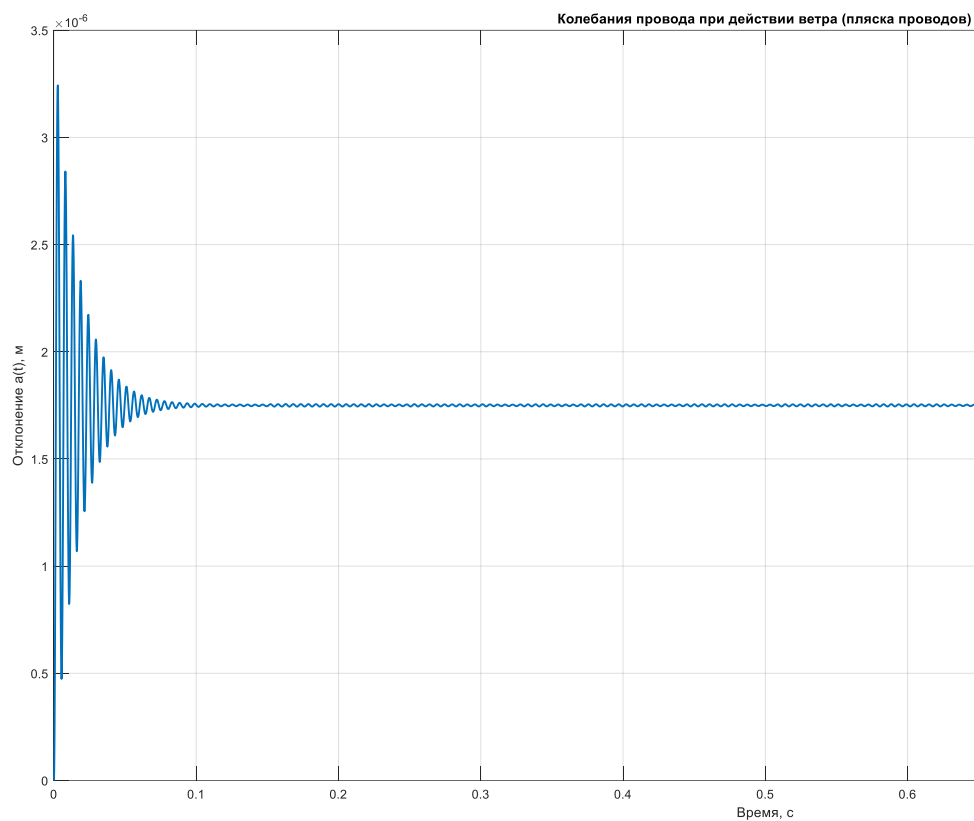


Рисунок Б.1 – Колебания провода при длине пролета $L=100$ м, при скорости ветра $V=10$ м/с

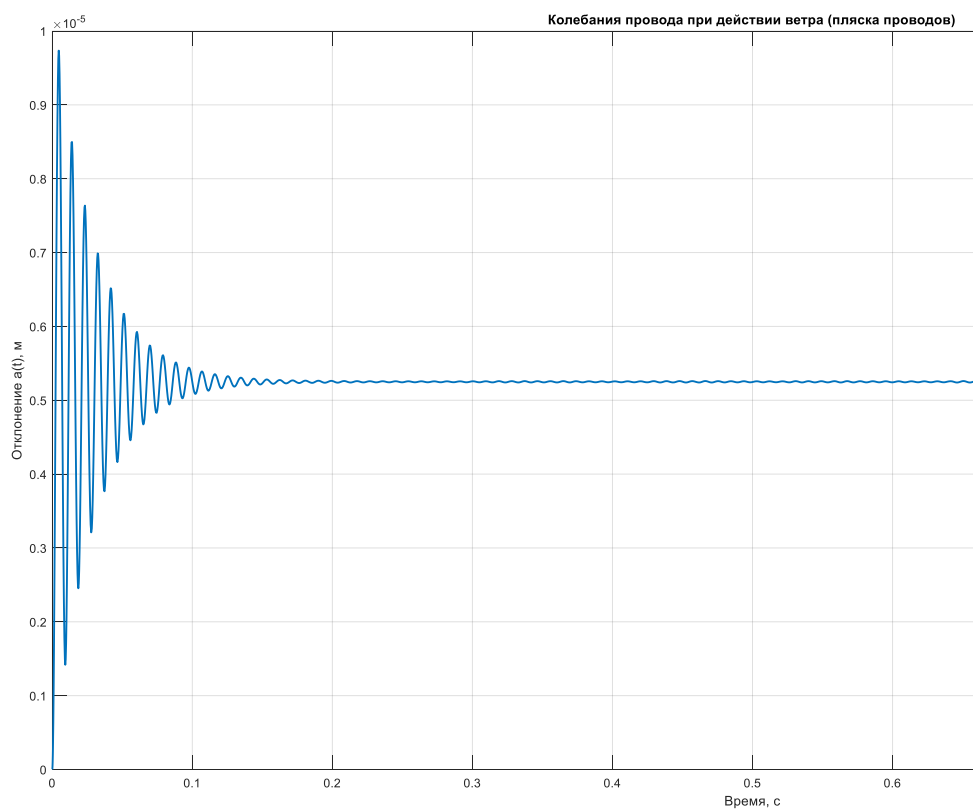


Рисунок Б.2 – Колебания провода при длине пролета $L=300$ м, при скорости ветра $V=10$ м/с

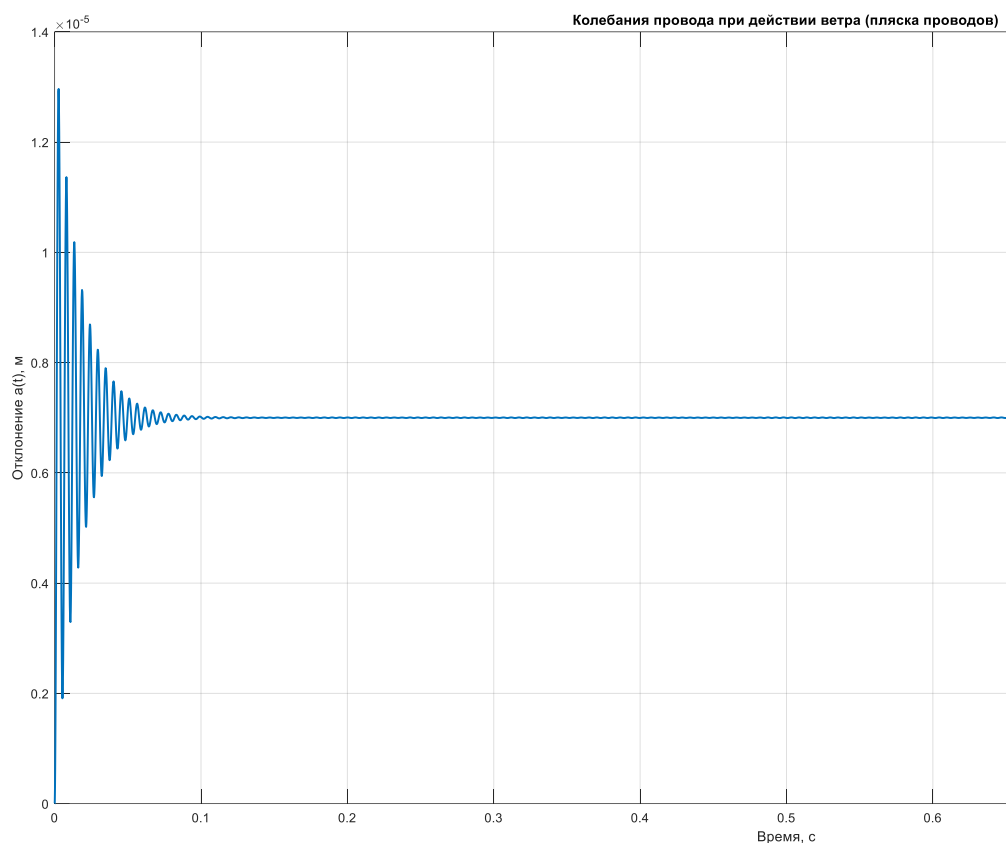


Рисунок Б.3 – Колебания провода при длине пролета $L=100$ м, при скорости ветра $V=20$ м/с

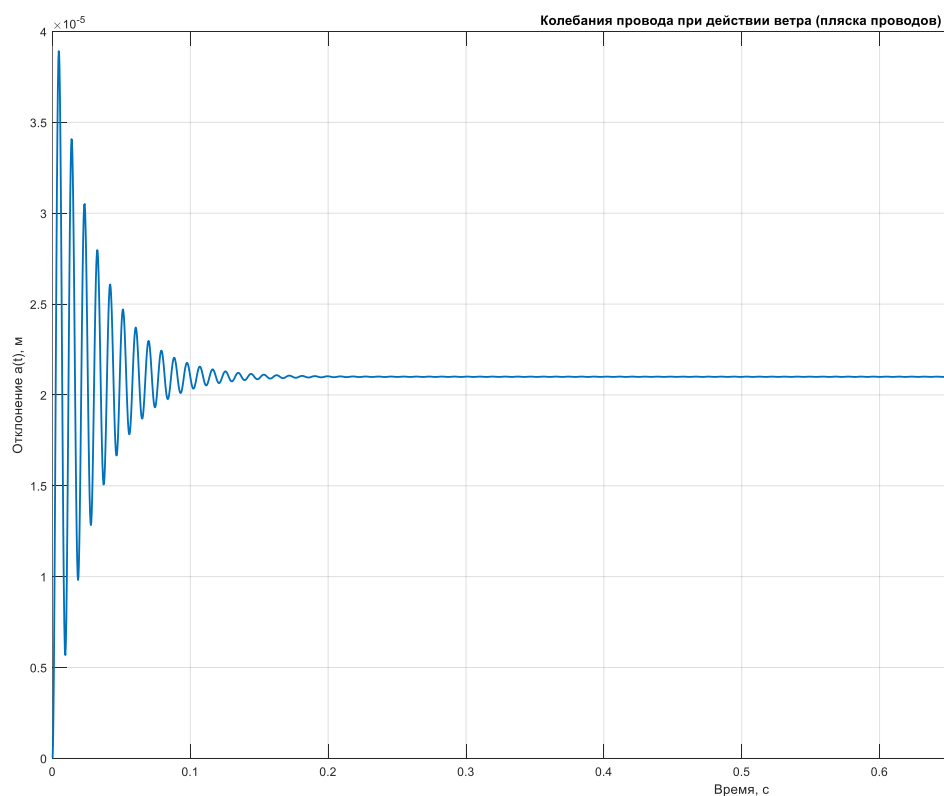


Рисунок Б.4 – Колебания провода при длине пролета $L=300$ м, при скорости ветра $V=20$ м/с

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Шаблон MATLAB-кода, график зависимости критической скорости ветра от диаметра провода

% Исходные параметры

```
delta = 0.05;           % декремент затухания
omega_a = 5;            % частота, рад/с
Pesp = 1200;            % расчётная сила (например, вес пролёта), Н
g = 9.81;               % ускорение свободного падения, м/с^2
rho = 1.225;            % плотность воздуха, кг/м^3
CD0 = 1.0;              % коэффициент лобового сопротивления
CL0 = 0.3;              % коэффициент подъёмной силы
```

```
% Диапазон диаметров провода (в метрах)
```

```
d_pi = linspace(0.005, 0.05, 500); % от 5 мм до 50 мм
```

```
% Расчёт критической скорости
```

```
V_crit = (delta * omega_a * Pesp) ./ (2 * g * rho .* d_pi * (CD0 + CL0));
```

```
% Построение графика
```

```
plot(d_pi * 1000, V_crit, 'LineWidth', 2) % переводим d_pi в мм
```

```
xlabel('Диаметр провода d_pi, мм')
```

```
ylabel('Критическая скорость ветра V_{кр}, м/с')
```

```
title('Зависимость V_{кр} от диаметра провода')
```

```
grid on
```

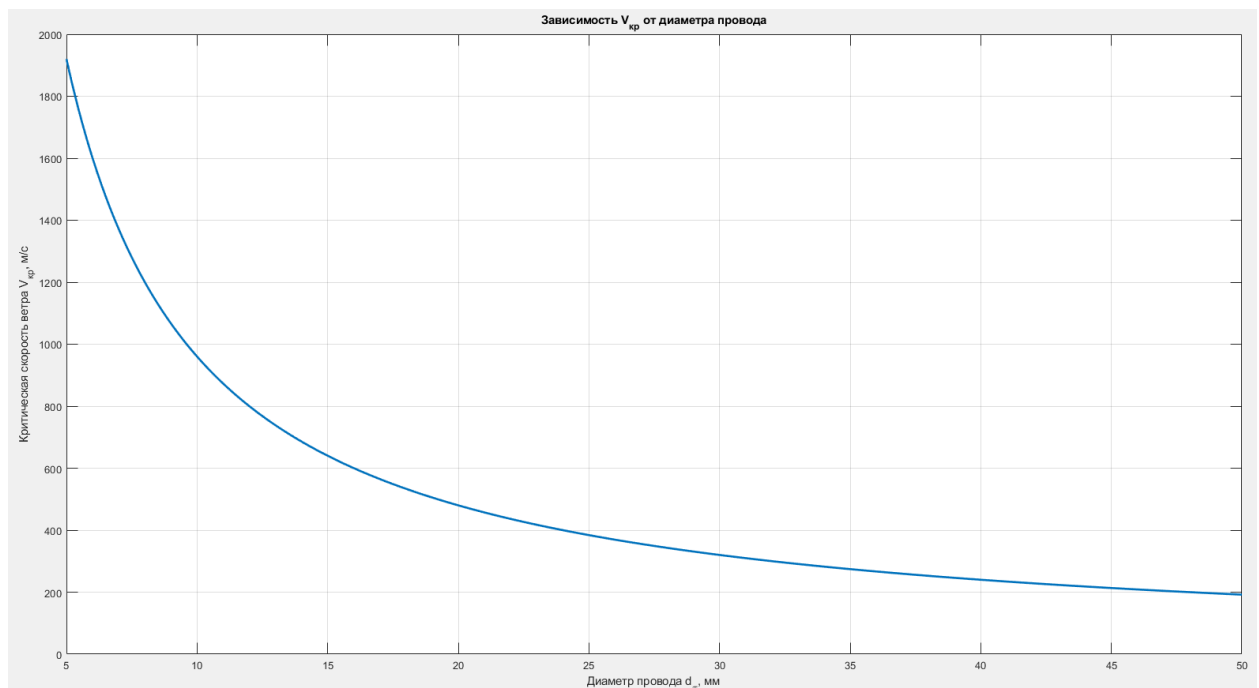


Рисунок В.1 – График зависимости критической скорости ветра от диаметра провода

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Шаблон MATLAB-кода и сам 3D-график зависимости критической скорости ветра от диаметра провода и расчётного усилия

```
% Физические и аэродинамические параметры
delta = 0.05; % декремент затухания
omega_a = 5; % частота, рад/с
g = 9.81; % ускорение свободного падения, м/с^2
rho = 1.225; % плотность воздуха, кг/м^3
CD0 = 1.0; % коэффициент лобового сопротивления
CL0 = 0.3; % коэффициент подъемной силы

% Диапазоны переменных
d_pi = linspace(0.005, 0.05, 100); % диаметр, м (5 мм - 50 мм)
Pesp = linspace(10, 50, 100); % расчётное усилие, Н

% Создание сетки
[D, P] = meshgrid(d_pi, Pesp);

% Расчёт V_кр по формуле
V_crit = (delta * omega_a .* P) ./ (2 * g * rho .* D * (CD0 + CL0));

% Построение 3D графика
figure
surf(D * 1000, P, V_crit) % d_pi переводим в мм
xlabel('Диаметр провода d_\pi, мм')
ylabel('Расчётное усилие P_{esp}, Н')
zlabel('Критическая скорость ветра V_{кр}, м/с')
title('3D-график зависимости V_{кр} от d_\pi и P_{esp}')
colorbar
shading interp
grid on
```

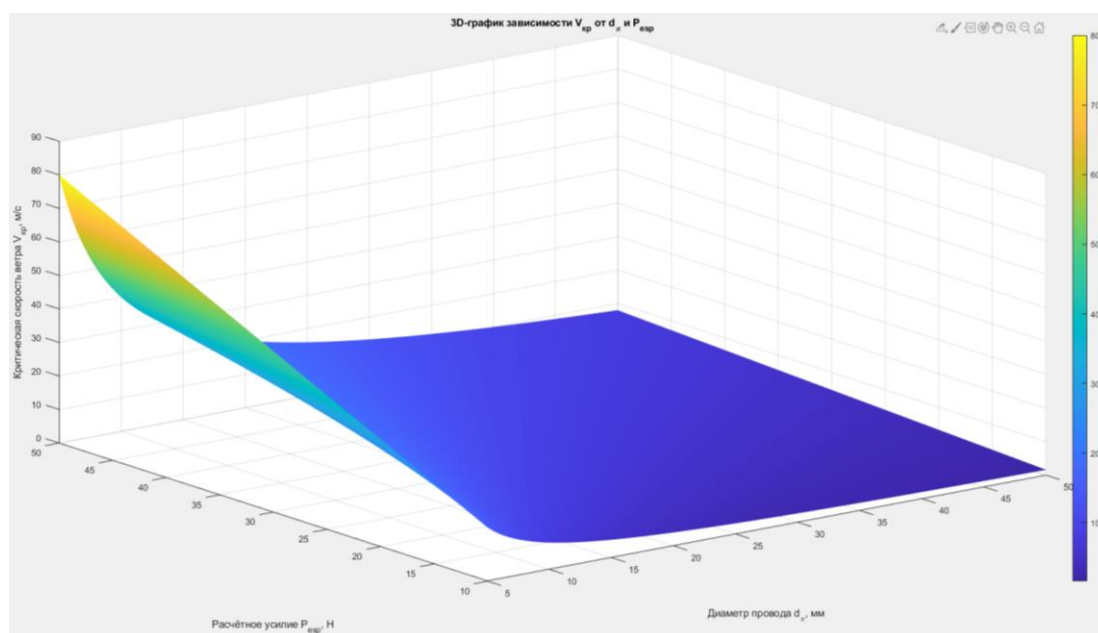


Рисунок Г.1 – 3D-график зависимости критической скорости ветра от диаметра провода и расчётного усилия

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Шаблон MATLAB-кода, графики зависимостей критической скорости ветра от диаметра провода и расчётного усилия

```
% Параметры
delta = 0.05;
omega_a = 5;
g = 9.81;
rho = 1.225;
CD0 = 1.0;
CL0 = 0.3;

% Диаметр
d_pi = linspace(0.005, 0.05, 200); % м

% Несколько значений Pesp
Pesp_values = [400, 800, 1200, 1600]; % Н

% Построение
figure
hold on
for i = 1:length(Pesp_values)
    Pesp = Pesp_values(i);
    V_crit = (delta * omega_a * Pesp) ./ (2 * g * rho .* d_pi * (CD0 + CL0));
    plot(d_pi * 1000, V_crit, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', sprintf('P_{esp} = %d Н', Pesp))
end
xlabel('Диаметр провода d_{\pi}, мм')
ylabel('Критическая скорость ветра V_{кр}, м/с')
title('V_{кр} в зависимости от d_{\pi} при разных P_{esp}')
legend('Location', 'northeast')
grid on
hold off
```

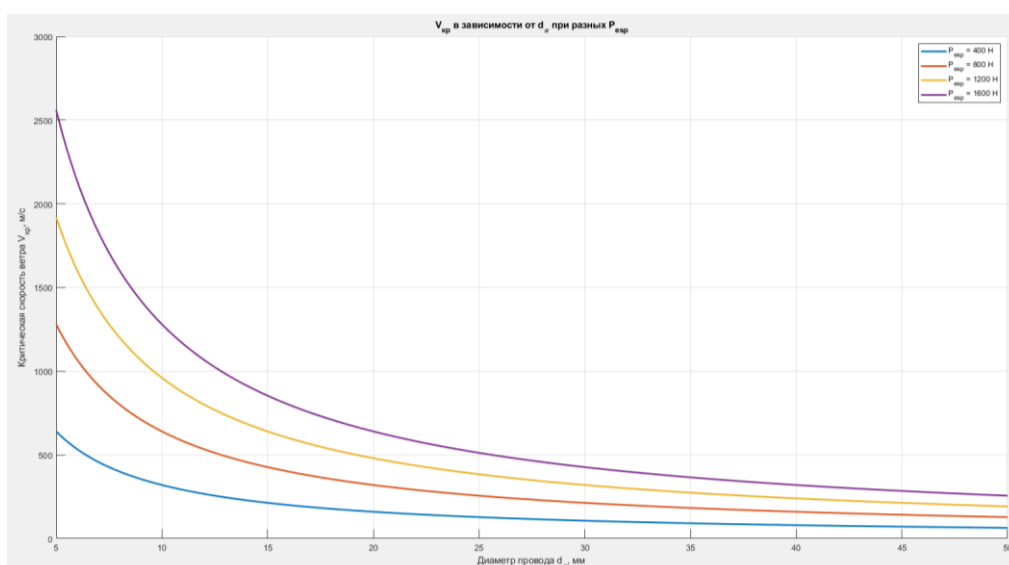


Рисунок Д.1 – График зависимости критической скорости ветра от диаметра провода при фиксированном значении расчётного усилия

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Шаблоны MATLAB-кода, график зависимости критической скорости ветра от расчётного усилия при фиксированном значении диаметра провода

```
% Pesp
Pesp = linspace(200, 2000, 200); % Н

% Несколько значений диаметра
d_pi_values = [0.01, 0.02, 0.03, 0.04]; % м

% Построение
figure
hold on
for i = 1:length(d_pi_values)
    d_pi = d_pi_values(i);
    V_crit = (delta * omega_a * Pesp) ./ (2 * g * rho * d_pi * (CD0 + CL0));
    plot(Pesp, V_crit, 'LineWidth', 2, ...
        'DisplayName', sprintf('d_\pi = %.0f мм', d_pi * 1000))
end
xlabel('Расчётное усилие P_{esp}, Н')
ylabel('Критическая скорость ветра V_{кр}, м/с')
title('V_{кр} в зависимости от P_{esp} при разных d_\pi')
legend('Location', 'northwest')
grid on
hold off
```

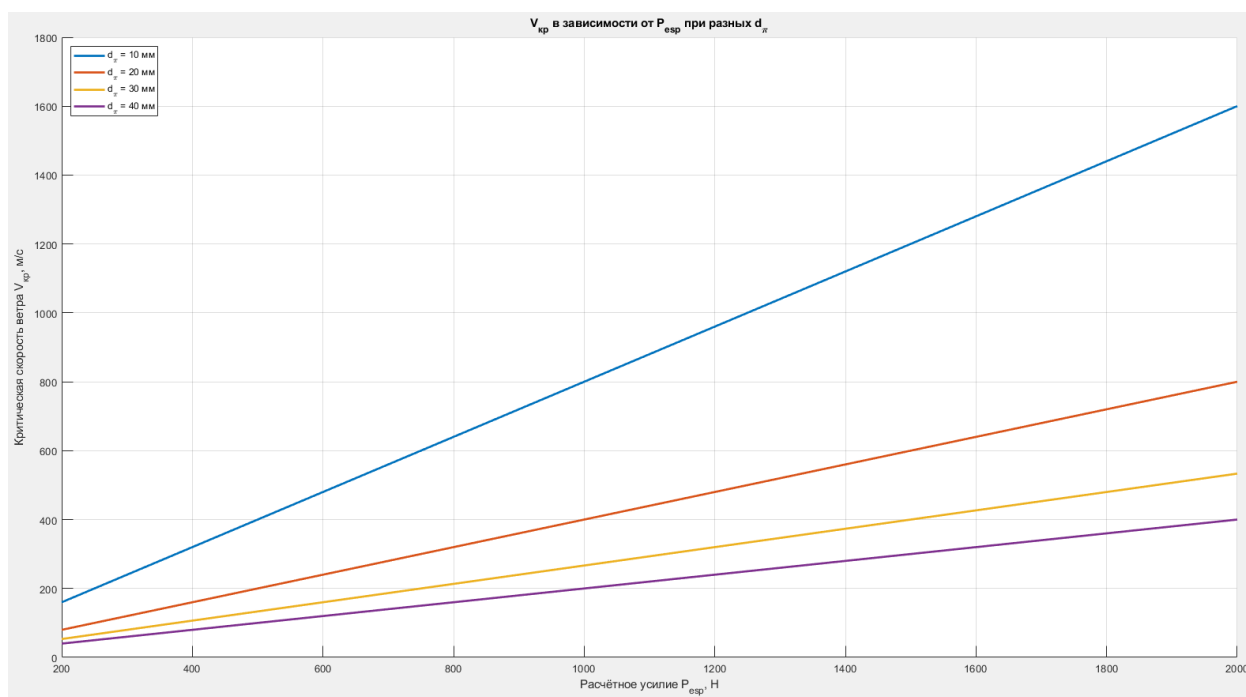


Рисунок Е.1 – График зависимости критической скорости ветра от расчётного усилия при фиксированном значении диаметра провода