

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и цифровому развитию
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»,
д.ф.-м.н., профессор Алексей Александрович Корюновский



2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Курдюмова Николая Николаевича
«Нелинейные колебания проводов, индуцированные спутным следом»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

Диссертация Курдюмова Н.Н. посвящена актуальной и важной в практическом отношении проблеме моделирования нелинейного динамического поведения проводов расщеплённых фаз воздушных ЛЭП высокого, сверх- и ультравысокого напряжения, которые являются ключевыми системами энергетического оборудования. В этой связи, обеспечение защиты проводов и других элементов линии от механических повреждений является важнейшей задачей обеспечения безопасности транспортировки электрической энергии.

Одним из видов колебаний фазных проводов являются субколебания, которые возникают в случае расположения одного провода в аэродинамическом (спутном) следе другого. Спутный след имеет выраженные границы и достаточно сложную внутреннюю структуру, меняющуюся в зависимости от скорости набегающего потока. Средняя скорость потока в следе меньшей скорости ветрового потока. В следе профиль скорости воздушного потока переменный, тем не менее, его можно считать симметричным относительно продольной оси следа. В таком потоке аэродинамические нагрузки также переменны. Изменения аэродинамической подъемной силы и силы лобового сопротивления, воздействующие на подветренный провод, приводят к неустойчивому состоянию этого провода, и он начинает колебаться. Из-за связей между проводами в виде дистанционных распорок в процесс колебаний вовлекается и наветренный провод. Колебания являются самовозбуждающимися и развиваются преимущественно в

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«07 09 2021 г.

горизонтальной плоскости. В этом отношении такие колебания принципиально отличаются от эоловой вибрации.

В 70-80 годы прошлого столетия появились первые научные работы, посвященные субколебаниям. К тому времени уже были известны случаи износа и разрушения фазных проводов в местах крепления распорок, гасителей колебаний и др. высоковольтной арматуры. Большое число фактов повреждения стимулировали исследования субколебаний, свойственных только проводам расщеплённых фаз воздушных ЛЭП.

Субколебания – до сих пор малоизученный феномен, хотя известно немало работ в этом направлении исследований. К настоящему времени изучены причины возникновения субколебаний, разработаны меры снижения их негативного влияния на ресурс проводов. Предложены также математические модели, которые приближенно описывают возникающие аэродинамические нагрузки и собственно субколебания проводов. Однако специализированных математических моделей и программных комплексов, которые позволили бы численно моделировать субколебания фазных проводов и осуществлять оптимизационные расчёты, нет. Это свидетельствует об **актуальности** темы диссертации Н.Н. Курдюмова и её **практической значимости**.

Разработанные Н.Н. Курдюмовым математические модели и алгоритмы претендуют на общность и применимость к другим проблемам колебаний проводов воздушных ЛЭП. Предложенные в диссертации алгоритмы и решенные в диссертации задачи являются полностью оригинальными, имеют научную новизну и практически востребованы в большой энергетике.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованных источников, включающего 138 наименований. Текст диссертации изложен на 115 страницах, включает 38 рисунков и 9 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, представлены объект и предмет научны исследований, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные результаты, выносимые на защиту и краткое содержание диссертационной работы по главам.

В первой главе дана краткая характеристика воздушных ЛЭП с расщеплёнными фазами с описанием типовых конструкций их основных элементов – проводов и внутрифазных дистанционных распорок. В главе дана классификация колебаний проводов воздушных ЛЭП, представлен аналитический обзор публикаций, посвященных рассматриваемой в диссертации проблеме, отмечены особенности и проблемы в задачах об аэроупругих колебаниях проводов воздушных ЛЭП.

Вторая глава посвящена описанию модели деформирования проволочной конструкции спирального типа, позволяющей вычислить жесткости проводов с учётом их слоистой проволочной структуры. В соответствии с этой моделью каждый провод представляется с позиции энергетического подхода как эквивалентная по упругим свойствам анизотропная цилиндрическая оболочка, а проволочная конструкция в целом рассматривается как система вложенных друг в друга цилиндрических оболочек, между которыми допускается проскальзывание с учетом сил давления и трения. В главе приведены результаты вычислений жесткостей проводов и сравнения с известными экспериментальными данными.

В третьей главе кратко рассмотрена аэродинамика обтекания провода с образованием спутного следа, описана физика возникновения периодических сил, генерирующих колебания. На основе гипотез Симпсона и экспериментов Блевинса представлена аппроксимация скорости потока в области спутного следа. Основным результатом главы является аналитическая аппроксимация распределений аэродинамических коэффициентов в следе с использованием полиномиальных представлений на основе экспериментальных данных Прайса.

В четвёртой главе даётся описание дискретной математической модели субколебаний фазных проводов, которая формулируется на основе метода конечных элементов. Натянутый провод рассматривается как упругий стержень, обладающий жесткостями на растяжение и кручение, которые вычисляются с учётом слоистой проволочной структуры провода согласно второй главе диссертации. Распорки моделируются как абсолютно жесткие невесомые стержни и поэтому рассматриваются как голономные связи, наложенные на упругую систему.

Для описания локальных перемещений в пределах конечного элемента используется метод Ритца с выбором тригонометрических функций в качестве базисных. В качестве обобщенных координат принимаются абсолютные

перемещения и углы закручивания узловых сечений, а также коэффициенты тригонометрических разложений по синусам для локальных перемещений и углов закручивания в пределах каждого элемента.

Для вычисления аэродинамических сил используются полиномиальные аппроксимации известных экспериментальных данных, а также линеаризация выражений для этих сил, записанных в локальных (элементных) координатах.

Уравнения движения проводов записываются в обобщенных координатах с нелинейными упругими, инерционными и аэродинамическими силами. Начальная конфигурация определяется из решения статических уравнений равновесия с использованием метода продолжения решения по параметру.

В четвёртой главе также описывается алгоритм численного интегрирования полученных уравнений колебаний, которые относятся к жесткому типу. Вместо параметра времени вводится новый аргумент – параметр длины интегральной кривой решения. Для преобразованной к новому аргументу задачи строится неявная численная схема второго порядка точности на основе метода линейного ускорения с использованием простых итераций.

В пятой главе приводятся результаты численного моделирования субколебаний двух проводов, натянутых и закреплённых шарнирно по концам между двумя абсолютно жёсткими опорами. В практическом плане это соответствует двухпроводной расщеплённой фазе воздушной ЛЭП высокого напряжения в пролёте между двумя анкерными опорами с основанием в одной горизонтальной плоскости и с закреплением проводов на одной высоте. Приводятся результаты сравнительного анализа полученных решений и экспериментальных данных.

В общих выводах автором приводятся основные результаты диссертационной работы.

В целом рассматриваемая диссертационная работа Курдюмова Н.Н. выполнена на **высоком** уровне, как в **научном**, так и **практическом** отношении.

В результате проведенных исследований диссертантом разработана новая конечно-элементная модель индуцированных спутным следом колебаний проводов расщеплённых фаз воздушных ЛЭП с кинематическими связями в виде жестких распорок с учётом нелинейностей упруги, инерционных сил и аэродинамических сил; предложен новый подход к моделированию аэродинамических нагрузок в

спутном следе на подветренный провод на основе модифицированной теории Симпсона с использованием эмпирических данных Блевинса и Прайса; на основе метода продолжения решения по параметру сформулирован метод сведения уравнений статики к задаче Коши для определения начальной конфигурации аэроупругой системы с учётом монтажной длины проводов, воздействия температуры и наличия дистанционных распорок; решены новые задачи об аэроупругих колебаниях двух закреплённых по концам проводов с учётом аэродинамических нагрузок, индуцированных спутным следом.

Результаты исследований автора имеют как **теоретическое значение** для развития прикладных задач механики деформируемого твёрдого тела, так и **практическую значимость** в задачах о взаимодействии тросовых систем с воздушным или жидкостным потоком.

Достоверность и обоснованность результатов научных положений и полученных результатов подтверждается использованием строгих математических методов и сравнениями теоретических результатов с результатами экспериментальных исследований.

По диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. Отсутствуют выводы по главам диссертации, чем снижается и значимость содержания отдельных этапов исследований.

2. На иллюстрациях во второй главе, в дополнение к приведенным графикам, желательно привести графические зависимости жесткостей проводов, полученные на основе двух инженерных гипотез с целью наглядности полученных результатов.

3. Для описания продольной деформации используется квадратичное выражение. Почему не достаточно линейного выражения, которое удобнее для аналитических вычислений и упрощает вычислительный алгоритм?

4. Малое внимание уделено новым композитным материалам, но это тема для отдельных исследований.

Сделанные замечания не снижают общей ценности работы. По теме диссертации автором опубликовано 20 работ, из них 7 в изданиях из перечня ВАК РФ, в том числе 3 статьи в журналах, цитируемых интернет-платформами Scopus и Web Of Science. Диссертация написана грамотным русским языком, оформлена в соответствии с требованиями к научным работам. Автореферат по своему содержанию полностью соответствует основному тексту диссертации.

Заключение по диссертационной работе

Диссертация на тему «Нелинейные колебания проводов, индуцированные спутным следом» является законченным научным исследованием, соответствует требованиям п.п. 9-11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней» утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842., а её автор Курдюмов Николай Николаевич заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Диссертационная работа и отзыв рассмотрены и одобрены на расширенном заседании кафедры математического и компьютерного моделирования протокол № 1 от 2 сентября 2021г.

Заведующий кафедрой математического
и компьютерного моделирования
ФГБОУ ВО «Саратовский национальный
исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского»
д.ф. -м.н., доцент

Блинков Юрий Анатольевич

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Саратовский национальный
исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского»
410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.
Тел. +7 (8452) 26 - 16 - 96
Электронная почта: rector@sgu.ru

