

ОТЗЫВ

официального оппонента Паймушина Виталия Николаевича
на диссертационную работу

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»

Актуальность темы диссертации. Диссертация Н.Н. Курдюмова "Нелинейные колебания проводов, индуцированные спутным следом" посвящена решению аэроупругой задачи о нелинейных нестационарных колебаниях проводов, один из которых находится в спутном следе другого. Такой вид колебаний свойственен проводам расщеплённых фаз воздушных ЛЭП, являющихся ключевыми системами энергетического оборудования для передачи электроэнергии высокого, сверх- и ультравысокого напряжения практически на любые расстояния

В конце прошлого столетия в научно-технической литературе были описаны многочисленные случаи износа и разрушения фазных проводов в местах их крепления и присоединения различных элементов высоковольтной арматуры. Исследования этих фактов выявил новый вид колебаний проводов, которые возникают тогда, когда один провод располагается в аэродинамическом (спутном) следе другого. В этом случае характер влияния аэродинамических сил на подветренный провод в следе приводит к зарождению и развитию автоколебательного процесса.

Существующие к настоящему времени математические модели строятся, как правило, для упрощенных (линейных или редуцированных) конструктивных схем (Lilien J.-L., Snegovski D.V., Платонова И.А. и др.). Такие модели удобны для инженерных оценок, но не обладают полнотой и не позволяют учитывать конструктивные особенности линии (нерегулярность

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«07 09 20 21»

расположения распорок, наличие гасителей колебаний и др.). Для расчётов используются также вычислительные комплексы, основанные на методе конечных элементов. Однако такие расчёты весьма трудоёмки и требуют значительных вычислительных ресурсов. Несмотря на универсальность конечно-элементного подхода такие расчёты сопровождаются большой подготовительной работой, результаты которой в значительной степени зависят от качества подготовленной конечно-элементной модели с учётом описания аэродинамических сил в спутном следе.

В этой связи, разработка специализированных математических моделей для описания нелинейных колебаний проводов, индуцированных спутным следом, с учётом сложного характера аэродинамических нагрузок и наличия кинематических связей представляет собой **актуальную научную и практически значимую проблему.**

Разработанная в диссертационной работе математическая модель позволяет исследовать колебания фазных проводов ЛЭП, взаимодействующих между собой через дистанционные распорки, и опосредованно через аэродинамические силы, возникающие в спутном следе и воздействующие на подветренный провод. Модель обладает общностью и позволяет учитывать конструктивные особенности и параметры ЛЭП как аэроупругой системы.

Таким образом, разработанные в представленной диссертационной работе математическая модель субколебаний, вычислительные алгоритмы и решенные задачи, являются полностью **оригинальными и актуальными** как с научной, так и практической точек зрения.

Научная новизна. Впервые предложена математическая модель автоколебательного процесса для системы (пучка) фазных проводов ЛЭП, связанных распорками. Колебания являются следствием возникновения в следе от наветренного провода аэродинамических сил, воздействующих на

подветренный провод и вызывающих его квазипериодические колебания в области следа относительно его условной оси.

Наиболее значимыми являются следующие результаты, определяющие **научную новизну** диссертационной работы:

- на основе принципа возможных перемещений разработана новая конечно-элементная модель субколебаний проводов расщеплённых фаз воздушных ЛЭП с кинематическими связями в виде связанной системы дифференциальных уравнений с учётом нелинейностей упругих, инерционных и аэродинамических сил;

- для построения функций формы использован метод Ритца с выбором линейных и тригонометрических функций в качестве базисных, позволяющих описывать колебания проводов в заданных частотных диапазонах. Коэффициенты тригонометрических рядов представляют собой дополнительные для конечного элемента обобщенные координаты, которые включаются в общую систему обобщенных координат, включающую абсолютные перемещения и углы закручивания узловых сечений конечных элементов;

- для вычисления жесткостей проводов использована новая модель провода в виде слоистой (многоповивной) проволочной конструкции спирального типа, в соответствии с которой повивы (проволочные слои) представляются как эквивалентные по упругим свойствам анизотропные цилиндрические оболочки. Их эквивалентность повивам устанавливается с использованием энергетического осреднения;

- разработан новый подход к моделированию аэродинамических нагрузок на подветренный провод на основе модифицированной теории Симпсона с использованием эмпирических данных Блевинса и Прайса;

- на основе метода продолжения решения по параметру разработан новый подход к получению статических решений, определяющих начальную конфигурацию аэроупругой системы с учётом монтажной длины проводов, воздействия температуры и наличия закреплённых на проводах грузов;

- для численного интегрирования системы уравнений колебаний предложен алгоритм, основанный на параметризации уравнений с выбором в качестве аргумента длины интегральной кривой решения. Для параметризованной задачи предложена неявная схема, основанная на методе линейного ускорения с использованием простых итераций;

- исследованы новые задачи о нелинейных нестационарных колебаниях проводов расщеплённых фаз воздушных ЛЭП. Дано решение аэроупругих задач о колебаниях двух закреплённых по концам проводов с учётом аэродинамических нагрузок, индуцированных спутным следом. Для модельной задачи сделано сопоставление численного решения с известными экспериментальными данными.

Практическая значимость состоит в разработке метода исследования нелинейных нестационарных колебаний сложной аэроупругой системы – воздушной линии электропередачи с расщеплёнными фазами. Представленная математическая модель пригодна не только для исследования процесса возникновения и развития колебаний проводов, но и для задач оптимизации с целью выбора оптимальных мест установки дистанционных распорок и гасителей колебаний.

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

Апробация. Результаты исследования доложены на ряде авторитетных всероссийских научных конференциях и всероссийских конференциях с международным участием. Имеется достаточное число публикаций в

журналах, рекомендованных ВАК и цитируемых базами данных Scopus и Web of Science.

Автореферат даёт чёткое представление о диссертации и в полной мере отражает её содержание.

Диссертация хорошо оформлена, написана понятным языком, содержит для понимания достаточное число иллюстраций и таблиц.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы как теоретическая база для реализации средств компьютерного анализа процесса возникновения и развития субколебаний проводов, а также для решения задачи оптимизации с целью выбора оптимальных мест установки дистанционных распорок и гасителей колебаний, что способствует повышению ресурса элементов ЛЭП и обеспечению энергетической безопасности.

Краткая характеристика диссертационной работы. Диссертация Н.Н. Курдюмова состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении обосновывается актуальность диссертационного исследования; формулируется цель и основные задачи работы; описывается предлагаемый автором подход к решению поставленных задач; характеризуется степень новизны полученных результатов и их апробация. Кроме того, дается краткое изложение содержания диссертации.

В первой главе даётся характеристика воздушных ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения с описанием типовых конструкций их основных элементов – проводов и внутрифазных дистанционных распорок, дана классификация и характеристика колебаний проводов и тросов воздушных ЛЭП. В главе представлен также аналитический обзор публикаций,

посвященных рассматриваемой в диссертации проблеме, отмечены особенности задач об аэроупругих колебаниях проводов, в том числе, индуцированных спутным следом.

Вторая глава посвящена оценке жесткостей проводов воздушных линий электропередач. В ней рассмотрена новая модель деформирования проволочных конструкций, подобных проводам ЛЭП. В соответствии с этой моделью каждый проволочный слой (повив) представляется с позиции энергетического осреднения как эквивалентная по упругим свойствам анизотропная цилиндрическая оболочка, а сам провод рассматриваются как система вложенных друг в друга цилиндрических оболочек, между которыми допускается проскальзывание с учетом сил давления и трения. На основе этой модели получены формулы для определения матриц податливости и жесткости проводов, даны оценки их жесткостей в виде конечных выражений, удобных для практического применения.

В третьей главе рассматриваются аэродинамика провода в воздушном потоке, физика возникновения спутного следа и его характеристики, а так же аппроксимации скорости потока и аэродинамических сил в области спутного следа. В данной главе представлен разработанный автором новый подход к моделированию аэродинамических нагрузок на подветренный провод на основе модифицированной теории Симпсона с использованием эмпирических данных Блевинса и Прайса.

В четвёртой главе даётся описание дискретной математической модели субколебаний фазных проводов, которая формулируется на основе метода конечных элементов. Для аппроксимации локальных перемещений в пределах конечного элемента использован метод Ритца с выбором линейных и тригонометрических функций в качестве базисных.

Деформирование проводов описывается в рамках гипотезы плоских сечений. Распорки моделируются как абсолютно жесткие невесомые стержни. Сила натяжения провода (тяжение), так же как и его деформация растяжения, считаются в пределах элемента постоянными величинами.

Зависимость деформации от поперечных перемещений определяется квадратичным приближением.

Результирующие уравнения колебаний проводов получены в обобщённых координатах на основе принципа возможных перемещений с нелинейностями упругих, инерционных и аэродинамических сил. В качестве обобщённых координат использованы абсолютные перемещения и углы закручивания узловых сечений, а также коэффициенты тригонометрических разложений для локальных перемещений и углов закручивания в пределах каждого элемента.

Заключительный параграф главы посвящен описанию вычислительного алгоритма, позволяющего преодолеть трудности интегрирования жестких систем уравнений задачи Коши, к которым относятся задачи динамики гибких конструкций. Для таких систем явные методы либо не работают, либо их работа неэффективна. В диссертации показано, что при численном решении задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка возможно построение простых и экономичных неявных вычислительных алгоритмов пошагового интегрирования. Предварительно исходная задача должна быть преобразована к новому аргументу – длине ее интегральной кривой. Такое преобразование осуществляется с использованием уравнения, связывающего параметр времени с длиной интегральной кривой решения.

В пятой главе предлагаемой диссертационной работы представлены численные результаты решения тестовых задач и приведено сравнение полученных результатов с экспериментальными исследованиями, опубликованными в открытой печати.

По содержанию работы могут быть сделаны следующие **замечания**:

1. В работе отсутствует анализ динамической неустойчивости системы с определением критических скоростей ветрового потока, при которых начинаются субколебания проводов. Такой анализ желательно привести для

полноты исследования, например, на основе теоремы Ляпунова об устойчивости движения линеаризованных систем уравнений колебаний.

2. В пятой главе, в решении всех тестовых задач при аппроксимации локальных перемещений в пределах конечного элемента автор использует только два члена тригонометрического ряда для функций формы конечного элемента. Если использование данного количества членов ряда достаточно, то должно быть приведено сравнение полученных результатов при различном количестве членов ряда в представлении Ритца.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования Н.Н. Курдюмова.

Общее заключение. Основные результаты диссертации опубликованы в 20 научных работах, в том числе 7 научных статьях в рецензируемых журналах, включенных ВАК РФ в перечень ведущих периодических изданий, в том числе в 3 журналах из списка Scopus.

Результаты диссертационного исследования прошли апробацию на нескольких конференциях и научных семинарах. Имеется патент на изобретение.

Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают основное содержание диссертации, характеризуют результаты проведенных исследований.

Уровень решаемых задач представляется соответствующим требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Содержание диссертации соответствует специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Диссертация Курдюмова Николая Николаевича "Нелинейные колебания проводов, индуцированные спутным следом" является завершенной научно-квалификационной работой, которая по критериям

актуальности, научной новизны, обоснованности и достоверности выводов соответствует требованиям п.7 "Положения о порядке присуждения учёных степеней". Ее автор, Курдюмов Николай Николаевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прочность конструкций» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ, г. Казань)

В.Н. Паймушин
01.09.21г.

В.Н. Паймушин

420126, г.Казань, ул.Четаева, д.13, кв.159,

Тел.: (843)2366613, e-mail: vpajmushin@mail.ru

Подпись *Паймушина В.Н.*
заверяю. Начальник управления
делами КНИТУ-КАИ *В*

