

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

о диссертанте Курдюмове Николае Николаевиче и его диссертации на тему «Нелинейные колебания проводов, индуцированные спутным следом», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела»

**Курдюмов Николай Николаевич** является выпускником Московского авиационного института (МАИ), который он окончил в 1993 году по специальности «Космические летательные аппараты и разгонные блоки» с присуждением квалификации инженера-механика по прочности космических летательных аппаратов.

В период 1993-1997 гг. Н.Н. Курдюмов учился в очной аспирантуре МАИ по профилю подготовки 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела». С 1998 г. по 2002 г. Н.Н. Курдюмов работал в должности ассистента, а затем с 2002 г. по 2010 г. в должности старшего преподавателя кафедры 902 «Соппротивление материалов, динамика и прочность машин». С 2010 г. по настоящее время Н.Н. Курдюмов – старший преподаватель кафедры 910-Б МАИ «Механика, наноструктурных материалов и систем», являющейся базовой кафедрой ФГБУН Института прикладной механики Российской академии наук (ИПРИМ РАН). Одновременно он исполняет обязанности заместителя заведующего кафедрой 910-Б МАИ по учебной работе.

С 2010 г. по настоящее время Н.Н. Курдюмов является научным сотрудником ИПРИМ РАН, активно занимающимся научно-исследовательской работой в области нелинейной динамики гибких систем. Им выполнены исследования в области механики деформирования и колебаний тросовых систем, в том числе, проволочных конструкций сложной структуры, подобных проводам воздушных ЛЭП. В частности, Н.Н. Курдюмовым получены оценки жесткостей сталеалюминиевых проводов марки АС, разработаны математические модели колебаний проводов воздушных ЛЭП в различных эксплуатационных условиях. Результаты этих исследований легли в основу его диссертационной работы, посвященной

сложной и малоисследованной проблеме моделирования индуцированных спутным следом нелинейных колебаний проводов расщеплённых фаз воздушных ЛЭП.

С 2017 г. по 2020 г. Н.Н. Курдюмов – соисполнитель проекта «Разработка торсионно-демпферных гасителей пляски проводов воздушных линий электропередачи сверх- и ультравысокого напряжения для обеспечения надёжности и безопасности транспорта электрической энергии» (ID RFMEFI60417X0188), который выполнялся в ИПРИМ РАН в рамках федеральной целевой программы Минобрнауки "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2021 годы". Им разработаны новые математические модели и алгоритмы для задач галопирования (пляски) проводов воздушных ЛЭП в условиях обледенения и наличия демпфирующих устройств гистерезисного типа.

В ходе работы над диссертацией Н.Н. Курдюмов продемонстрировал глубокие знания в области механики деформируемых конструкций и механизмов, отличное владение экспериментальной техникой, а также математическим аппаратом и современной вычислительной техникой.

**Актуальность темы** диссертации обусловлена, прежде всего, малой изученностью колебаний проводов, индуцированных аэродинамическим (спутным) следом. Такие колебания испытывают только провода расщеплённых фаз воздушных ЛЭП, которые стали вводить в эксплуатацию в 30-40 годы прошлого столетия. Опыт эксплуатации выявил новый вид колебаний проводов, составляющих расщеплённую фазу. Такие колебания были названы субколебаниями. В 70-80 годы появились первые научные работы, посвященные субколебаниям. К тому времени были отмечены многочисленные факты износа и разрушения проводов в местах крепления различных устройств (распорок, гасителей колебаний и др.), которые стимулировали исследования в этом направлении.



Установлено, что субколебания возникают тогда, когда один из проводов расположен в аэродинамическом (спутном) следе другого. Изменения аэродинамической подъемной силы и силы лобового сопротивления, воздействующие на подветренный провод, приводят к неустойчивому состоянию этого провода, и он начинает колебаться. Поскольку провода связаны между собой дистанционными распорками, то в процесс колебаний втягивается и наветренный провод. Колебания являются самовозбуждающимися и развиваются преимущественно в горизонтальной плоскости. В этом отношении такие колебания принципиально отличаются от эоловой вибрации.

К настоящему времени опубликовано достаточно много работ по этой теме. В результате исследований, в большей степени экспериментальных, изучены причины возникновения субколебаний и предложены меры снижения их негативного влияния на провода. Предложены также математические модели, которые с различной степенью приближения описывают возникающие аэродинамические нагрузки и собственно субколебания проводов. Однако моделей, претендующих на общность и полноту учёта параметров линии как аэроупругой системы крайне мало. В основном, теоретические модели строятся для упрощенных (редуцированных) конструктивных схем или с использованием коммерческих конечно-элементных комплексов. В последнем случае подготовка к вычислениям и сами вычисления крайне трудоёмки и требуют составления пользовательских программ, которые подключаются к основным кодам через специальный интерфейс. Специализированных программных комплексов, которые позволили бы моделировать субколебания фазных проводов и осуществлять оптимизационные расчёты, нет. Это свидетельствует об **актуальности** темы диссертации Н.Н. Курдюмова и её **практической значимости**.

Трудности математического моделирования субколебаний обусловлены несколькими причинами. Прежде всего, субколебания – это нелинейные

колебания проводов, взаимодействующих между собой через дистанционные распорки, и опосредованно через аэродинамические силы, возникающие в спутном следе и воздействующие на подветренный провод. В диссертационной работе разработана новая дискретная модель колебаний фазных проводов на основе сочетания метода конечных элементов и метода Рунге. Получены конечные выражения для аэродинамических сил на основе полиномиальных аппроксимаций известных экспериментальных данных. Деформация растяжения записана в квадратичном приближении, что позволяет ограничиваться относительно небольшим набором конечных элементов без потери точности вычислений. Итоговая система уравнений колебаний содержит нелинейности как упругих и инерционных сил, так и нелинейности аэродинамических сил, воздействующих на подветренный провод в спутном следе.

Разработанные Н.Н. Курдюмовым математические модели и решенные в диссертации задачи являются полностью оригинальными, имеют научную новизну и большую практическую значимость для большой энергетики.

#### **Новые результаты, полученные в диссертационной работе:**

1. На основе метода конечных элементов разработана дискретная математическая модель нелинейных колебаний проводов расщеплённой фазы воздушной ЛЭП со связями в виде дистанционных распорок. Для аппроксимации локальных перемещений в пределах конечного элемента используется метод Рунге с выбором тригонометрических функций в качестве базисных, позволяющий с различной степенью «детализации» описывать колебания в заданных частотных диапазонах. Зависимость деформации от поперечных перемещений определяется квадратичным приближением.

2. Уравнения колебаний проводов получены в обобщённых координатах на основе принципа возможных перемещений с нелинейностями упругих, инерционных и аэродинамических сил. В качестве обобщённых координат принимаются абсолютные перемещения и углы закручивания узловых



сечений, а также коэффициенты тригонометрических разложений для локальных перемещений и углов закручивания в пределах каждого элемента.

3. Разработана 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.

4. Разработан новый подход к моделированию аэродинамических нагрузок на подветренный провод на основе модифицированной теории Симпсона с использованием эмпирических данных Блевинса и Прайса.

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

6. 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.

7. 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. Разработанная 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, что способствует повышению ресурса элементов ЛЭП и обеспечению энергобезопасности.

**Достоверность** полученных результатов основывается на корректности математических моделей и строгости математических решений, а так же на сравнении теоретических результатов с результатами экспериментальных исследований.

**Основные результаты**, полученные в диссертационной работе, опубликованы в 20 публикациях автора, в 7 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, в том числе в 3 журналах из списка Scopus, в 12 тезисах докладов на всероссийских и международных конференциях и 1 патенте на изобретение.

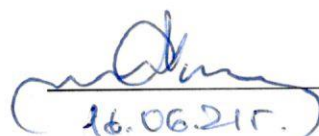
Диссертация Н.Н. Курдюмова является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработаны новые математические модели и алгоритмы для описания нелинейных нестационарных колебаний проводов, индуцированных спутным следом, рассмотрены частные задачи о колебаниях проводов расщеплённых фаз воздушных ЛЭП. Полученные результаты имеют существенное значение для механики деформируемого твёрдого тела в области динамики гибких систем, к которым относятся воздушные ЛЭП. Таким образом, диссертационная работа Н.Н. Курдюмова соответствует критериям, установленным Положением ВАК о порядке присуждения ученых степеней и званий.

**Курдюмов Николай Николаевич** является квалифицированным специалистом в области механики деформируемого твёрдого тела и заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-



математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук, заместитель директора ИПРИМ РАН по научной работе, заведующий кафедрой 910-Б Института № 9 «Общеинженерной подготовки» МАИ

  
А.Н. Данилин  
16.06.21г.

Подпись А.Н. Данилина заверяю.

Учёный секретарь ФГБУН Института прикладной механики Российской академии наук, кандидат физико-математических наук



Ю.Н. Карнет

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной механики Российской академии наук  
ИНН 7736038013 КПП 771401001  
ОГРНЮЛ 1037700153182 от 25.01.2012  
Юридический и почтовый адрес : 125040, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 7, стр. 1  
Тел.: +7 495 946-18-06  
Эл. почта: iam@iam.ras.ru  
Сайт: <https://iam.ras.ru/>