

## ОТЗЫВ

официального оппонента Фельдштейна Валерия Адольфовича на диссертационную работу Курдюмова Николая Николаевича «Нелинейные колебания проводов, индуцированные спутным следом» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела»

### АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа Н.Н. Курдюмова посвящена исследованию одного из наименее изученных видов колебаний проводов высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП) с расщепленными фазами, возникающих при обтекании ветровым потоком пары проводов фазы, один из которых наветренный, а другой подветренный. В механическом отношении это сложная нелинейная задача автоколебаний аэродинамически и конструктивно связанных упругих стержней (проводов расщепленной фазы), один из которых находится в аэродинамическом следе другого. В практическом отношении этот тип колебаний (по принятой в эксплуатационной практике терминологии - субколебаний) – одна из основных причин повреждений и снижения эксплуатационного ресурса проводов ЛЭП. Отсутствие удовлетворительного решения механической задачи и возникающие из-за этого проблемы практической энергетики определяют актуальность и практическую значимость диссертации.

### СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (138 наименований). Работа изложена на 115 страницах, включая 38 рисунков и 9 таблиц.

**Во введении** сформулирована цель и определены задачи работы. Определяется объект исследования: провода расщепленной фазы высоковольтных ЛЭП, и предмет исследования: автоколебания проводов, индуцированные специфическим характером аэродинамических сил в спутном следе. Обосновывается актуальность темы, перечисляются основные

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«07» 09 2021 г.

результаты и оценивается их практическая значимость. Формулируются положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведены необходимые сведения о конструкции высоковольтных ЛЭП, о традиционных и перспективных типах проводов, о видах арматуры – жестких и демпфирующих внутрифазных дистанционных распорках. Дана классификация основных видов колебаний проводов, возбуждаемых ветровым потоком: эолова вибрация, галопирование (по распространенной терминологии - пляска) и субколебания, являющиеся предметом исследований в диссертации. Анализируются проблемные стороны математического моделирования ветровых колебаний: модель провода как гибкой нити, случаи необходимости (и трудности) учета изгибной и крутильной жесткости, сложная аэродинамика спутного следа, линейность и нелинейность моделей. Необходимо отметить широту (по задачам) и глубину (по времени) охвата литературных источников, свидетельствующую о погруженности автора в научные и практические стороны проблемы.

**Во второй главе** рассматривается вопрос о расчетном определении изгибной и крутильной жесткостей провода. Эта задача, являющаяся тривиальной для «сплошных» стержней, применительно к многожильным проводам становится весьма сложной, так как силы трения между повивами многожильного провода сильно зависят от натяжения. В результате отдельные проволоки по-разному включаются в процесс изгиба. Экспериментальное определение жесткости сильно растянутого провода также нетривиально, так как в традиционном опыте (например изгиб двухопорной балки поперечной силой с измерением прогиба) трудно разделить эффект изгибной жесткости и эффект «веревочного треугольника». Автором предлагается модель провода как системы вложенных друг друга слоев (повивов), которые рассматриваются как эквивалентные оболочки. При этом считается, что отдельные оболочки не проскальзывают относительно друг друга. Коэффициенты жесткости оболочек определяются, исходя из равенства энергий деформирования оболочки и

проволоки – винтовой спирали. Модель является усовершенствованием элементарных способов расчета жесткостей провода как системы невзаимодействующих винтовых спиралей (нижняя оценка) и сплошного стержня (верхняя оценка). Поэтому ожидаемо, что предложенная модель дает результаты, лежащие внутри этого диапазона. Интересным является результат, свидетельствующий о том, что вычисленная крутильная жесткость лежит ближе к нижней границе, чем к верхней, и при этом она близка к экспериментальному значению ин-та Montefiore.

**В третьей главе** рассматриваются аэродинамические силы на провода с учетом образования спутного следа за наветренным проводом. Эта часть работы опирается на опубликованные данные аэродинамических исследований, в частности, на результаты Диана, полученные специально для проводов; это существенно, так как провод обладает периодической неровностью поверхности в отличие от гладких цилиндров, привычного объекта исследований аэродинамиков. Проанализированы опубликованные результаты экспериментальных и теоретических исследований и построены аппроксимации аэродинамических коэффициентов для подветренного цилиндра, находящегося в аэродинамическом следе наветренного цилиндра, применительно к характерным условиям обтекания проводов расщепленной фазы.

**В четвертой главе** излагается основная методическая часть диссертации: модель расщепленной фазы и метод решения уравнений. Провод моделируется гибкой нитью, работающей на растяжение и кручение; нить разбивается на ряд участков - конечных элементов, положение которых задается координатами полюса и эйлеровыми углами. Принимается, что среди этих обобщенных координат конечными являются только перемещения полюса и угол поворота вокруг оси (закручивание провода). Такое допущение оправдано для анализа субколебаний и позволяют существенно упростить задачу. Функции формы конечного элемента задаются в виде суммы линейных слагаемых и локальных Фурье-разложений. Деформация растяжения учитывает конечность

перемещений в квадратичном приближении. В силу принятых аппроксимаций вычисляются вариации энергии деформации, кинетической энергии, работы аэродинамических и гравитационных сил. При этом учитываются зависимости между вариациями обобщенных координат, обусловленные наличием жестких безинерционных внутрифазных распорок, налагающих голономные связи на провода. Окончательная разрешающая система нелинейна и относится к классу жестких, что существенно затрудняет численное интегрирование. Вначале статический вариант полученных уравнений используется для определения начального равновесного состояния методом продолжения по параметру. После этого решается собственно задача возбуждения колебаний. Предложена эффективная разностная неявная схема интегрирования уравнений, модифицированных путем перехода от физического времени к параметру, представляющему собой длину интегральной кривой в расширенном фазовом пространстве.

**В пятой главе** приводятся результаты применения разработанной методики к исследованию колебаний пары проводов расщепленной фазы в ветровом потоке. Рассмотрен ряд расчетных схем: вначале – отдельный подпролет между распорками; для которого имеются экспериментальные данные. Сравнение расчетных и экспериментальных данных указывает на соответствие основного параметра, характеризующего субколебания – соотношения вертикальной и горизонтальной амплитуд (эллиптичность траектории точек провода). Это сравнение можно считать валидацией методики, подтверждающей достоверность и точность результатов. Далее анализируется самовозбуждение колебаний в реальных пролетах несколькими (три и семь) подпролетами. Приведенные результаты весьма интересны с точки зрения прояснения механизма самовозбуждения, который, в зависимости от структуры пролета, может быть различным. Установлено в частности, что развитие автоколебаний может проходить стадию хаотичности. Эти результаты указывают на существенно нелинейный характер субколебаний проводов расщепленной фазы и имеют важное практическое значение.

**В заключении** сформулированы основные выводы по диссертационной работе. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

### ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность результатов обеспечивается корректностью принятой расчетной модели, использованием эффективных методов интегрирования уравнений, сопоставлением с экспериментальными данными.

### НАУЧНАЯ НОВИЗНА ДИССЕРТАЦИИ

Научная новизна диссертации обусловлена тем, что в ней впервые построена корректная модель самовозбуждения колебаний пары аэродинамически и конструктивно взаимодействующих проводов в пролете линии высоковольтной линии электропередачи, разделенном на ряд подпролетов межпроводными распорками, в ветровом потоке и разработан эффективный метод решения задачи.

### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Результаты решения рассмотренной в диссертации задачи могут использоваться в качестве методической основы исследования одного из наиболее существенных типов колебаний, реализующихся на высоковольтных линиях электропередачи с расщепленными фазами (по терминологии, принятой в энергетике – субколебаний). В частности, разработанная методика может использоваться для верификации более простых инженерных методик расчета субколебаний проводов ЛЭП.

### ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 20 научных статьях, из них 7 в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, 3 статьи в журналах из списка SCOPUS и цитируемых интернет-платформой Web of Science, в 12 тезисах докладов; получен 1 патент на изобретение.

## ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Результаты расчета коэффициентов изгибной и крутильной жесткости провода должны рассматриваться, как оценочные (что и отражено в названии соответствующего раздела диссертации), так как такой важный фактор, как эффект фрикционного взаимодействия повивов, не учитывается предложенной моделью.

2. В целом выбранная автором механическая модель проводов вполне адекватна поставленной задаче, однако методика решения уравнений представляется переусложненной, в частности:

- для определения начальной статической конфигурации пролета достаточно линейной модели слабо провисающего провода, допускающей элементарное решение, обычно используемое на практике;

- было бы проще, как это обычно делается в теории колебаний, за отсчетную конфигурацию принимать равновесное состояние; при этом не требуется вычислять работу силы тяжести и, что особенно важно, не требуется знание монтажной длины провода, часто не известной на практике;

- выбор базисных функций для конечных элементов в виде рядов Фурье сильно усложняет разрешающую систему уравнений при том, что по смыслу задачи применение ряда Фурье не к отдельному элементу, а к пролету в целом, было бы существенно проще и физически прозрачнее.

3. Было бы желательно, следуя традиционному подходу теории аэроупругих автоколебаний, получить условия их самовозбуждения, исходя из линеаризованной модели.

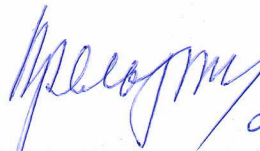
Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации, выполненной на высоком научном уровне, и вносящей существенный вклад в теорию одного из наименее изученных типов аэроупругих колебаний проводов высоковольтных ЛЭП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация выполнена на высоком научном уровне и соответствует всем требованиям положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.

Автор диссертации Н.Н. Курдюмов заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Главный научный сотрудник  
Акционерного общества «Центральный  
научно-исследовательский институт  
машиностроения»,  
доктор технических наук

 В.А. Фельдштейн  
27.02.2024

Адрес места работы: 141070, Моск. обл., г. Королев, ул. Пионерская, д.4.  
тел. +7 (910) 455-61-30;  
e-mail: dinpro@mail.ru.

Подпись Фельдштейна Валерия Адольфовича заверяю

И.о. Главного ученого секретаря АО «ЦНИИмаш»,  
доктор технических наук, с.н.с.



В.Ю. Ключников

М.П.