

ДИНАМИКА СИСТЕМ, МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

DYNAMICS OF SYSTEMS, MECHANISMS AND MACHINES

Издается с ноября 1995 года
Выходит один раз в год

2019

Том 7, № 1

Учредитель
Омский государственный
технический университет

Главный редактор
А. В. Косых,
ректор ОмГТУ

Редакционная коллегия:
Е. Г. Андреева, доктор технических наук
П. Д. Балакин, доктор технических наук
А. В. Бубнов, доктор технических наук
В. И. Глухов, доктор технических наук
О. Т. Данилова, кандидат физ.-мат. наук
Е. Н. Еремин, доктор технических наук
А. В. Зыкина, доктор физ.-мат. наук
И. А. Кировская, доктор химических наук
А. Г. Козлов, доктор технических наук
В. И. Левченко, кандидат технических наук
В. А. Майстренко, доктор технических наук
А. Г. Михайлов, кандидат технических наук
А. П. Моргунов, доктор технических наук
К. Л. Панчук, доктор технических наук
В. И. Трушляков, доктор технических наук

Ответственный секретарь
О. И. Бабенко, начальник ИПО ОмГТУ

Технический редактор
Ю. И. Тихомирова

Компьютерная верстка
Ю. П. Шелехиной

Язык публикаций:
русский, английский

Дата и номер договора о включении
рецензируемого научного издания
в систему Российского индекса
научного цитирования (РИНЦ):
213-04/2014 от 14.04.2014 г.

Адрес в РИНЦ:
http://elibrary.ru/title_about.asp?id=50500

Адрес редакции:
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, каб. 206
Контактный телефон:
(3812) 65-35-36
e-mail: fap_omsk@omgtu.ru
Телефон для рекламодателей: 65-35-36

© ОмГТУ, 2019

Подписано в печать 15.10.2019 г.
Формат 60×84¹/₈. Усл. печ. л. 14,75.
Бумага офсетная.
Тираж 500 экз. Заказ 470.

Отпечатано на дупликаторе
в типографии ОмГТУ.
644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12.

СОДЕРЖАНИЕ

Динамика механизмов и машин

- М. Е. Агапов, В. В. Михеев, С. В. Савельев**
Обеспечение точности геометрических размеров траншеи
при строительстве трубопроводных объектов3
- П. Д. Балакин, О. С. Дюндик, И. П. Згонник, М. А. Федорова**
Автоуправление жесткостью связей как средство адаптации
механических систем.....12
- П. Д. Балакин, И. П. Згонник, О. С. Дюндик**
Динамическая модель механического привода с автовариатором
на базе уравнений Аппеля15
- А. В. Барис, Ю. В. Ванаг**
Деформация гибкого колеса волновой передачи.....19
- В. В. Бохан, А. Ф. Зелов, В. А. Таран, С. П. Бобров**
Экспериментальная оценка резонансной частоты панелей
звукоизолирующего ограждения по входному механическому
сопротивлению.....27
- Ю. А. Бурьян, Г. С. Русских, Д. П. Давыдов, Т. В. Волкова**
К вопросу об определении модуля объемной упругости
металлической резины.....31
- И. С. Бычков, В. Н. Кузнецова**
Анализ влияния координат установки грунтовых якорей
на устойчивость автомобильного крана.....36
- А. А. Воробьев, О. А. Конограй, А. А. Крутько, И. И. Малахов**
Исследование контакта колеса с рельсом для различных условий
эксплуатации грузового вагона.....41
- С. В. Доронин, Ю. Ф. Филиппова**
Оценка живучести повреждаемых колебательных систем
стержневого типа.....48
- А. В. Занин, В. Е. Щерба, Е. Ю. Носов, А. М. Парамонов,
В. Н. Блинов, С. Ф. Храпский**
Разработка и исследование экспериментального образца
двухступенчатой поршневой гибридной энергетической машины
объемного действия.....54
- С. В. Клишин, Д. В. Ситников, А. В. Зубарев, А. А. Шварц**
Методика экспериментального определения механических
сопротивлений виброизолирующих патрубков с учетом податливости
установки при продольных колебаниях.....61
- А. Н. Кожевников**
Исследование влияния монтажных усилий на динамические
характеристики имитационной модели опоры воздушной линии
электропередачи.....67
- В. С. Корнеев, С. А. Корнеев, И. Н. Квасов**
Экспериментальный метод построения геометрических
характеристик пневматических элементов с резинокордной
оболочкой.....73
- В. С. Корнеев, С. А. Корнеев, В. В. Шалай**
Экспериментальный метод построения изобарных силовых
характеристик пневматического элемента с резинокордной
оболочкой.....77
- В. С. Корнеев, С. А. Корнеев, В. В. Шалай**
Экспериментальный метод проведения испытаний на релаксацию
пневматических элементов с резинокордной оболочкой87

5. Иванов В. С., Петрова В. В. Механические сопротивления ортотропной цилиндрической оболочки для действующих на нее сосредоточенных сил и момента // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. № 61. С. 13–26.

6. Корнеев С. А., Корнеев В. С., Пеньков И. А., Трибельский М. И. Методика и результаты статических испытаний резинокордного патрубка для соединения трубопроводов // Омский научный вестник. 2014. № 2 (130). С. 139–145.

УДК 534.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОНТАЖНЫХ УСИЛИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОПОРЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

INVESTIGATION OF MOUNTING FORCES AFFECTING ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF POWER TRANSMISSION LINE PYLON SIMULATION MODEL

А. Н. Кожевников

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

A. N. Kozhevnikov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Аннотация. В данной работе представлена модель учета монтажных усилий в ферменных конструкциях на примере имитационной модели типовой металлической опоры воздушных линий электропередачи. Модифицирован написанный ранее алгоритм автоматизированного построения конечно-элементных моделей для типовых ферменных конструкций. Получены зависимости значений первых частот собственных колебаний модели от величины монтажного усилия. Представлены соответствующие формы собственных колебаний. Кроме того, оценены границы применимости данной модели учета монтажных усилий по величине напряжений, возникающих в конструкции под действием собственного веса. Проведен краткий анализ полученных зависимостей.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи; метод конечного элемента; монтажные усилия; частоты и формы собственных колебаний.

DOI: 10.25206/2310-9793-7-1-67-72

I. ВВЕДЕНИЕ

Ферменные конструкции достаточно давно известны и широко применяются в различных областях техники. Подобные конструкции собираются посредством болтового или сварного соединения. Одним из примеров подобных конструкций являются металлические опоры воздушных линий электропередачи (ВЛ). Основное назначение данных конструкций – это поддержание проводов высоковольтной электрической сети для передачи электроэнергии на большие расстояния (рис. 1). Основными руководящими документами при проектировании и эксплуатации ВЛ остаются достаточно давно опубликованные (более 50 лет назад) нормативные акты и комплекты конструкторской документации [1]. В связи с этим можно предположить, что при разработке проектной документации использовались упрощенные методы расчета, вводились допущения, которые в настоящее время могут быть смоделированы существенно более точно.

В имеющихся учебных пособиях [2] и [3] используется представление типовой металлической опоры ВЛ в виде набора балок, моделирующих основные технологические элементы опоры: основную стойку, каждую траверсу, грозостойку. Однако в литературе не представлены способы и подходы для получения достаточно корректной модели целой траверсы как простого балочного элемента. В зарубежной литературе динамическое поведение опор описывают последовательно соединенным набором масс и пружин, образующих линейную вертикальную систему [4]. Применение подобных аналогов реальных конструкций не позволяет описать поведение объекта исследования с требуемым уровнем точности. Возможным выходом является построение детальной конечно-элементной модели типовой металлической опоры ВЛ для проведения последующих расчетов статического и динамического поведения конструкции. Такой подход позволит не только учесть современные наработки по механике пространственных конструкций в процессе разработки новых видов опор, но и может дать ответы на вопросы о причинах разрушений подобных конструкций, которые, в свою очередь, приводят к значительным экономическим потерям в случае обрыва ВЛ из-за разрушения поддерживающей структуры.



Рис. 1. Пример типовой высоковольтной линии электропередачи

Отдельно стоит отметить тот факт, что в регламентирующих документах по проектированию опор линий электропередачи нет детальной методики учета динамических эффектов, которые обязательно возникнут в участке линии в процессе эксплуатации. Вместо этого рассмотрено статическое деформирование в одном из критичных состояний. Полученные напряжения увеличиваются на величину заданного коэффициента динамичности. Оценки усталостной прочности и живучести конструкции прописаны даже в меньшей степени, чем динамические дополнительные нагрузки.

В течение последних лет с высокой периодичностью стали возникать перебои с транспортировкой электрической энергии, вызванные не обрывами проводов, а полноценными разрушениями не только отдельно стоящих опор, но и целых участков ВЛ. Традиционно причинами подобных аварий указывают нерасчетные ветровые нагрузки, гололедные явления и общий износ конструкций. Однако подобные инциденты происходят на относительно новых линиях не только в зимнее время и без зафиксированных шквалистых порывов огромной силы (рис. 2). Попытки оценить фактическое напряженно-деформированное состояние конкретной марки опор не представляется возможным в силу того, что проектная документация не содержит подобной информации и нет возможности получить искомые величины на основе суперпозиции имеющихся результатов.



Рис. 2. Пример разрушенной металлической опоры

На кафедре прочности летательных аппаратов Новосибирского государственного технического университета разработан алгоритм автоматизированного построения конечно-элементных моделей типовых металлических опор воздушных линий электропередачи [5]. Данный алгоритм позволяет достаточно оперативно полу-

чать геометрические и расчетные модели для выполнения любых видов последующих расчетов в пакете ANSYS. При наличии математической модели отдельной опоры и дифференциальной стержневой модели для описания поведения проводов электросети или грозотроса можно описать поведение отдельного участка высоковольтной линии или даже нескольких последовательных участков [6]. Заметим, что описанный выше подход позволяет получить набор узловых перемещений и усилий под достаточно произвольным внешним воздействием. Однако для корректного использования конечно-элементных моделей необходимо верифицировать математическую модель опор ВЛ.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для верификации расчетной модели предполагалось провести экспериментальное исследование реальных опор в процессе эксплуатации. Отдельной самостоятельной задачей можно выделить фиксацию внешнего возбуждения в отдельном участке ВЛ для более точного моделирования поведения системы опор и проводов. Возникающие проблемы не ограничиваются достаточно малым количеством метеорологических станций для фиксации действующего ветрового возбуждения и отслеживанием фактических параметров бетонных оснований каждой отдельной металлической опоры. Особенностью закрепления реально эксплуатируемых конструкций является существенная зависимость параметров бетонных свай от качества грунта: чем менее надежен грунт, тем большей должна быть глубина залегания фундамента, и наоборот. В связи с этим появляется задача корректного введения данных оснований в математическую модель опор ВЛ.

Для того чтобы избежать достаточно большого количества описанных выше вопросов, необходимо упростить объект исследований. Данная цель достигается использованием имитационной модели типовой металлической опоры воздушной линии электропередачи (рис. 3) в качестве объекта для верификации конечно-элементной модели, построенной посредством автоматизированного алгоритма [7].

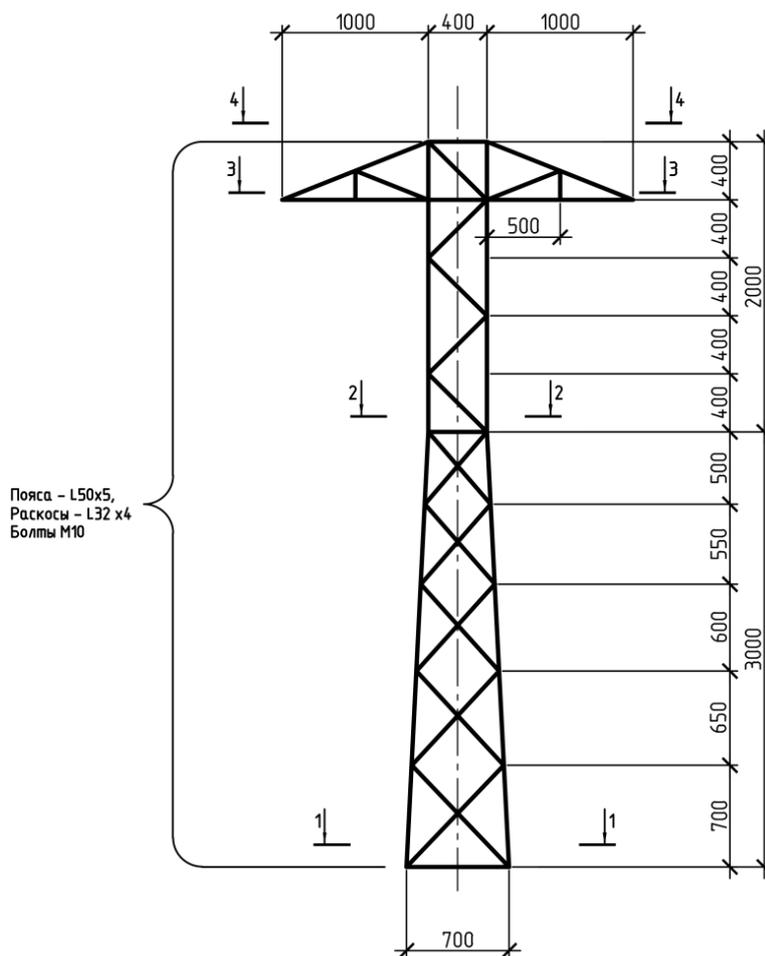


Рис. 3. Геометрическая схема имитационной модели типовой опоры ВЛ

Конечно-элементная модель имитационной модели была построена в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL посредством автоматизированного алгоритма [5]. Рассчитанные первые частоты собственных колебаний данной конструкции составили 14.598 и 14.793 Гц [7].

При экспериментальном исследовании имитационной модели значения первых частот собственных колебаний были существенно ниже расчетных, поэтому при работе с конструкцией было выполнено несколько итераций по модификации закрепления конструкции к силовому полу лаборатории (рис. 4). При изменении способа крепления отмечался рост величин частот собственных колебаний вплоть до значений в 11.4 и 13.4 Гц соответственно. Описанный эффект можно объяснить тем, что первоначальное основание недостаточно хорошо моделировало жесткое защемление опорных точек модели. В свою очередь, финальная версия опорных балок гораздо лучше моделирует жесткое закрепление анкерных болтов. Следствием этого и стал рост значений частот до указанных величин.

Однако удовлетворительного совпадения достичь не удалось. Расчетная модель имеет существенно более высокую жесткость, чем сам объект исследований, следовательно, необходимо внести в конечно-элементную модель механизм уменьшения жесткости для того, чтобы реализовать возможность подстройки математической модели под экспериментальные данные.



Рис. 4. Моделирование основания модели: исходное (слева) и финальное (справа)

При достаточно обширном изучении имеющейся литературы не удалось обнаружить сколько-нибудь правдоподобной модели, позволяющей учитывать монтажные усилия, возникающие при сборке конструкции. Основное внимание уделяют точности описания поведения узла, корректной передаче напряжений и деформаций между сопрягаемыми элементами. Отдельно стоит отметить подход к уточнению расчетов методом конечных элементов посредством усложнения типа используемого конечного элемента: замена ферменного элемента балочным или даже твердотельным, однако подобные подходы часто слишком сильно увеличивают время расчета, в то время как увеличение точности не соответствует затраченной вычислительной мощности [8].

III. ТЕОРИЯ

В рамках данной работы предлагается внести в силовые уголки наполнения секций модели имитационной опоры возможность уменьшения жесткости в местах присоединения элементов решетки заполнения к вертикальным поясным элементам. Корректировать характеристики будем только у двух конечных элементов, расположенных на концах силового элемента. Предположим, что площадь поперечного сечения и моменты инерции модифицируемых элементов будут изменяться в процентном соотношении от исходных значений геометрической характеристики сечения. Данная корректировка может потенциально описывать недостаточно затянутое болтовое соединение, которое является основным способом соединения уголков в опорах воздушных линий электропередачи.

Построение математической модели до модификации жесткости будем выполнять с помощью автоматизированного алгоритма построения, как и ранее. Затем в модель будет вноситься уменьшенная жесткость, что приведет к соответственному уменьшению массы конструкции. Следовательно, поведение модифицированной конструкции нельзя сопоставить с исходной конструкцией. Для того чтобы выполнить корректное сравнение двух моделей, необходимо уравнивать массы конструкций. Данный подход можно реализовать посредством увеличения плотности материала имитационной модели на величину, компенсирующую локальное уменьшение площади силовых элементов.

Шаг изменения геометрических характеристик ослабляемых сечений составляет 5%: исходная модель имеет коэффициент, равный единице (100%), а максимально поврежденная – 0,05 (5%). При изменении коэффициента целостности имитационной модели будем отслеживать изменение значений частот собственных колебаний конструкции и возникающие максимальные напряжения под действием собственного веса. Отметим, что в качестве допустимых напряжений следует принять величину предела текучести материала имитационной модели опоры ВЛ с учетом коэффициента безопасности, равного 2,5 для подобного типа сооружений. Следовательно, величина максимально допустимых напряжений для стали С245 по ГОСТ 27772-2015 не превышает 100 МПа, так как предел текучести для данной стали составляет 245 МПа.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

После реализации описанного выше подхода, были получены таблицы значений частот двух первых балочных форм колебаний и максимальных напряжений в конструкции в зависимости от того, насколько снизились характеристики концевых элементов балок наполнения имитационной модели типовой металлической опоры воздушных линий электропередачи. Данные результаты удобно представить в виде графических зависимостей: зависимости уменьшения частот представлены на рисунке 5; график роста максимальных напряжений показан на рис. 6.

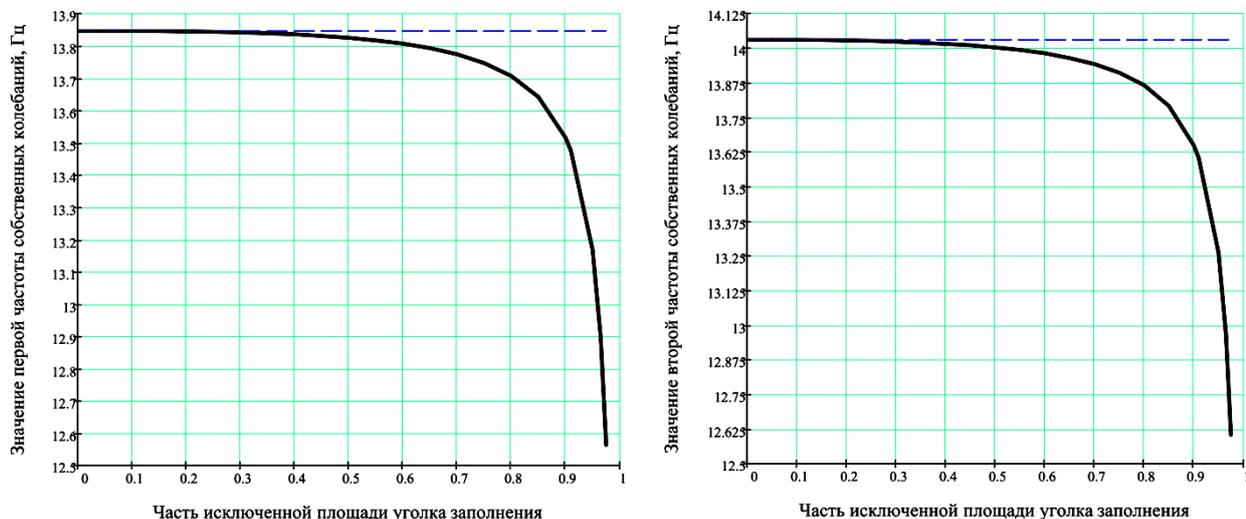


Рис. 5. Зависимости первой (слева) и второй (справа) частот от исключенной площади сечения уголков

Можно отметить, что при относительно небольших корректировках жесткости силовых элементов частоты изменяются гораздо более значительно, чем напряжения. Это может свидетельствовать о том, что в конструкции имитационной модели заложены дополнительные коэффициенты запаса прочности относительно ее несущей способности.

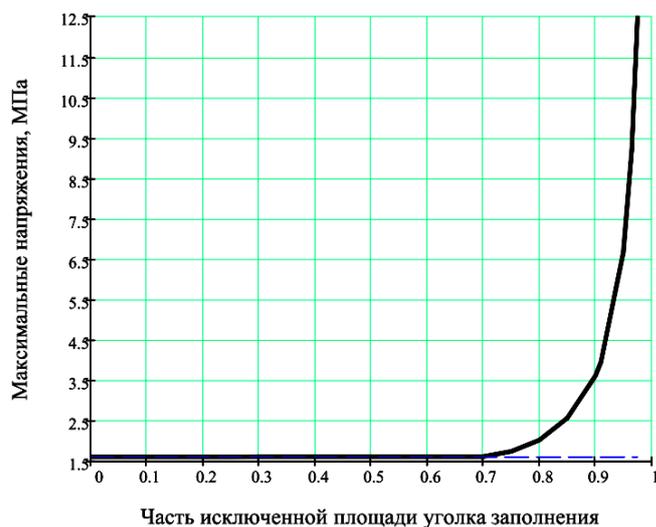


Рис. 6. Зависимость напряжений в конструкции от величины исключенной жесткости

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные зависимости показали, что рассматриваемая методика учета монтажных усилий позволяет изменять жесткость всей конструкции в достаточно больших пределах. Равномерное уменьшение жесткости оказывает существенное влияние на значения частот собственных колебаний. При существенном уменьшении жесткости соединений меняется характер деформирования конструкции: первая балочная форма колебаний замещается формой движения, описывающей вращательное движение всей конструкции. Дальнейшее снижение геометрических характеристик приводит к двум первым крутильным формам колебаний.

Предсказуемым результатом от внесения недостаточной жесткости в крепежные узлы является рост возникающих в конструкции максимальных напряжений в 10 раз относительно первоначальных значений. Достижение около нулевой величины площади поперечного сечения раскоса, участвующей в работе болтового соединения, приводит к увеличению внутренних силовых факторов, однако несущей способности мощных поясных уголков оказывается вполне достаточно для того, чтобы воспринимать массовую нагрузку от всей модели.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ учета монтажных усилий позволяет подстроить расчетную модель под результаты экспериментального исследования с требуемой точностью. Введение в математическую модель локальных ослаблений не приводит к существенному росту возникающих напряжений, что противоречит физическому поведению конструкции: масса всей конструкции воспринимается основными поясными уголками, однако в узловых точках нет сингулярных перемещений в уголках наполнения имитационной модели. Следовательно, можно сделать вывод, что предлагаемая методика позволяет достичь требуемой точности при модификации математической модели относительно результатов эксперимента. Однако в литературе показывается, что на жесткость подобных соединений могут оказывать влияние не только локальные ослабления самих элементов, но и зазоры в болтовых соединениях [9], проскальзывания болтов и несоосность отверстий [10].

Как показано выше, верификация методики учета монтажных усилий только по значениям частот собственных колебаний и максимальным напряжениям является недостаточной. В связи с этим для дальнейшей проверки предлагаемого подхода необходимо обязательно выполнить проверку по перемещениям в модели и на реальном объекте для подбора параметров локальных ослаблений под имеющиеся экспериментальные данные. Одним из дальнейших шагов можно предположить внесение подобных дефектов сборки конструкции не во всю имитационную модель, а только лишь в отдельные поясные уголки. Кроме того, необходимо рассмотреть и другие способы коррекции жесткости конечно-элементной модели и провести их верификацию.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит коллективы филиала АО «НТЦ ФСК ЕЭС» за разработку проекта имитационной модели опоры, кафедры «Прочность летательных аппаратов» Новосибирского государственного технического университета и ООО «Институт Электроэнергетики НГТУ» за помощь в организации экспериментальных исследований на имитационной модели типовой металлической опоры воздушных линий электропередачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бошнякович А. Д. Механический расчет проводов и тросов линий электропередачи. М.–Л., Госэнергоиздат, 1962. 254 с.
2. Вязьменский М. Б., Ишкин В. Х., Крюков К. П. [и др.]. Справочник по проектированию линий электропередачи / Под ред. М. А. Реута и С. С. Рокотяна. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1980. 296 с., ил.
3. Крюков К. П., Новгородцев Б. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. 312 с.
4. Desai Y. M., Punde S. Simple model for dynamic analysis of cable supported structures // Eng. Struct. 2001. Vol. 23. P. 271–279.
5. Kozhevnikov A. N., Krasnorutskiy D. A., Levin V. E. Development of subroutine for automatic building of finite-element models of typical metal pylons of air power transmission lines // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (ME-ACS), Tomsk, 2015. P. 1–4. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414897. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7414897&isnumber=7414853> (дата обращения 03.06.2019).
6. Kozhevnikov A. N., Krasnorutskiy D. A., Levin V. E., Pustovoy N. V. The method of analyzing vibrations of air power transmission lines using reduced finite-element models of pylons and differential model of thin elastic rod system // 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST), Novosibirsk, 2016. P. 200–203. DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884227.
7. Запысова Е. А., Кожевников А. Н., Красноруцкий Д. А. Исследование влияния дефектов в элементах конструкции на спектр частот собственных колебаний на примере имитационной модели опоры ВЛ // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 19 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 18–20 апр. 2018 г. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. Т. 1. С. 40–44.
8. Langlois S., Prud'homme S., Légeron F., Poursharh F. Review of advanced modelling methods for lattice steel towers // CIGRE-IEC Colloquium, May 9-11, 2016. Montréal, Canada. URL: <http://www.cigre.org> Montréal, QC, Canada.
9. Kitipornchai S., Al-Bermani A., Peyrot A. H. Effect of bolt slippage on ultimate behavior of lattice structures // Journal of Structural Engineering (ASCE). 1994. Vol. 120. P. 2281–2287.
10. Jiang W. Q., Wang Z. Q., McClure G., Wang G. L., Geng J. D. Accurate modeling of joint effects in lattice transmission towers // Engineering Structures. 2011. Vol. 33. P. 1817–1827.