

На правах рукописи



БАХРАМИ Мохаммад Реза

**МАШИНА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРОВОДОВ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ: КОНСТРУКЦИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Специальность 05.02.02 — Машиноведение, системы приводов и детали
машин

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Машиноведение и основы конструирования»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор, **Елисеев Владимир Васильевич**

Официальные оппоненты: **Медунецкий Виктор Михайлович**
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», профессор кафедры «Технология приборостроения», г. Санкт-Петербург.
Каратушин Станислав Иванович
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова», доцент кафедры «Механика деформируемого твердого тела», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация ФГБУН «Институт Проблем Машиноведения Российской академии наук» (Ипмаш РАН), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 24 мая 2016г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте (<http://www.spbstu.ru>) и в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.229.12, к.т.н., профессор



Евграфов Александр Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Воздушные линии электропередач (ЛЭП) являются важными элементами инфраструктуры и нуждаются в постоянном мониторинге. Но контроль ЛЭП высокого напряжения, выполняемый человеком, может быть опасен для жизни. В связи с этим в ряде стран ведутся интенсивные разработки специальных диагностических машин-автоматов (ДМА), способных заменить человека. Такие машины (роботы-инспекторы) уже применяются в некоторых энергетических компаниях. Разработка концепции, конструирование и математическое моделирование поведения новой ДМА и являются темой данной диссертации.

Однако работа ДМА на проводах может быть нарушена из-за податливости проводов на прогиб. Как показано в данной диссертации, даже при медленном равномерном движении могут возникнуть опасные колебания чрезмерной интенсивности. На элементы устройства начинают действовать значительные инерционные нагрузки, приводящие к отказам или разрушению. Математическое моделирование движения ДМА по проводам позволяет предотвратить аварии, избежать затратных и опасных экспериментов, а также оптимизировать конструкцию и режимы работы.

Цель работы. Разработка концепции новой машины (ДМА) для диагностики проводов ЛЭП с механизмом обхода препятствий, а также всестороннее математическое моделирование ее движений с выявлением допустимых режимов и работоспособных вариантов.

Задачи исследования

1. Разработка концепции и конструирование новой ДМА с механизмом для перехода препятствий и контактным упругим соединением с проводом;
2. Построение модели провод-ДМА при движении в вертикальной плоскости и расчеты колебаний при различных законах движения;
3. Обоснование модели натянутой струны для провода;
4. Моделирование параметрических поперечных колебаний;
5. Анализ прочности контактного соединения в подвесе ДМА к проводу;
6. Исследование влияния ограниченности мощности двигателя на колебания;
7. Выработка рекомендаций по закону движения и параметрам ДМА.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Концепция и конструкция новой ДМА с механизмом для перехода препятствий и контактным упругим соединением с проводом;
2. Математическая модель провод-ДМА при движении в вертикальной плоскости и методика численного расчета колебаний;
3. Обоснование модели натянутой струны для провода;
4. Метод и результаты расчета параметрических поперечных колебаний;
5. Решение контактных задач для твердых и упругих тел в соединении подвеса ДМА к проводу.
6. Постановка и решение задач динамики ДМА при ограниченной мощности двигателя.

Методы исследования. Основой математического моделирования в диссертационной работе является лагранжева механика твердых и упругих тел в сочетании с компьютерной математикой.

Степень разработанности темы

В истории создания ДМА одной из первых явилась разработка Аошимы (Aoshima S.) и соавт. (1989) машины для инспекции телефонных линий. Савада (Sawada J.) и соавт. (1991) создали машину для осмотра линий волоконно-оптических кабелей. Хигучи (Higuchi M.) и соавт. (1991) представили аппарат для осмотра ЛЭП, способный преодолевать некоторые препятствия. Тсуджимура (Tsujimura T.) и соавт. (1997) спроектировали подвесную машину для осмотра телекоммуникационных кабелей.

Одним из самых современных автоматов для инспекции ЛЭП явился «Разведчик линии» (Line scout), который спроектировали Монтамбаулт и Поулиот (Montambault S., Pouliot N., 2007). Эта машина может пройти различные виды препятствий на проводах.

Был предложен еще целый ряд других инженерных решений для инспекции воздушных ЛЭП.

Но проблемы динамики ДМА, связанные с податливостью проводов, внимания не привлекали. Однако изучались колебания проводов при действии внешних возмущений: это работы Кесельмана Л.М., Ивановой О.А., Соколова А.И., Шалашилина В.И. с соавт., Irvine Н.М. и др.

Вопросам диагностики посвящено много книг, но особый интерес по теме диссертации представляет книга Арбузова Р.С. и Овсянникова А.Г. (2009) о диагностике ЛЭП.

Теоретический фундамент математического моделирования системы провод-ДМА (главы 2-5) разработан усилиями многих авторов хорошо и подробно. Его составляют книги по лагранжевой механике дискретных и континуальных упругих систем (Лурье А.И., Мандельштам Л.И., Бидерман В.Л., Пановко Я.Г. и др.). Классические представления в настоящее время оказываются очень эффективными благодаря средствам компьютерной математики.

Но в целом, судя по литературе, степень разработанности темы диссертации представляется недостаточной.

Научная новизна

1. Разработана новая ДМА с механизмом для перехода препятствий и контактным разъемным упругим соединением с проводом;
2. Построена математическая модель провод-ДМА при движении в вертикальной плоскости и созданы численные алгоритмы ее расчета;
3. Обнаружены пилообразные колебания, возникающие даже при равномерном движении ДМА. Исследовано влияние различных факторов: закона движения, натяжения и изгибной жесткости провода, сил сопротивления;
4. Обоснована модель натянутой струны для провода как упругой нити;
5. Рассмотрены параметрические поперечные колебания и выявлена их зависимость от параметров ДМА и закона движения;

6. Разработана методика анализа прочности контактного соединения в подвесе ДМА к проводу и произведены расчеты конкретных вариантов;
7. Исследовано влияние характеристики двигателя с ограниченной мощности на динамику ДМА.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечена корректным применением законов и уравнений механики системы провод-машина, использованием проверенных средств компьютерной математики, выявлением практической сходимости вычислительных алгоритмов и многовариантностью расчетов.

Соответствие паспорту специальности имеет место согласно п. 6 паспорта: «Развитие фундаментальных положений родственных и смежных областей науки применительно к исследованию, проектированию и расчетам объектов машиностроения». Родственными и смежными являются специальности: 01.02.04 (Механика деформируемого твердого тела), 01.02.06 (Динамика и прочность машин), 05.02.18 (Теория машин и механизмов), 05.02.11 (Методы контроля и диагностики в машиностроении).

Практическая ценность состоит в разработке прототипа машины для диагностики проводов воздушных ЛЭП (ДМА), исследовании динамики ДМА, выработке рекомендаций по режимам движения и параметрам конструкции, а также экономии на затратных натуральных экспериментах.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на

1. Науч.-практ. конф. «Неделя науки СПбГПУ. ИММиТ». – 2014;
2. Конф. Современное машиностроение. Наука и образование. – СПб, 2014;
3. Семинаре ИПМаш РАН. – СПб, 2016.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 7 статьях, в том числе в 3-х, изданных в журналах из списка ВАК РФ.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, 5 глав и заключения. Ее суммарный объем 135 с., основной текст занимает 105 с. В списке цитируемой литературы 137 наименований. Работа содержит 52 рисунка, таблицу и 9 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, показана научная новизна исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту. Дан краткий обзор литературы по теме. Приведено описание работы.

В главе 1 изложены требования к новой ДМА, главным из которых является возможность перехода через препятствия (изоляторы, амортизаторы, виброгасители, предупреждающие знаки и др.). Дан обзор существующих схем и их возможностей. Представлена новая ДМА в виде макета и компьютерной модели (рис. 2). Описаны узлы ДМА. Особое внимание уделено подвесу с разъемными контактными соединениями и стяжной пружиной. В проекте технического задания предусмотрена и немеханическая часть (двигатели и датчики).

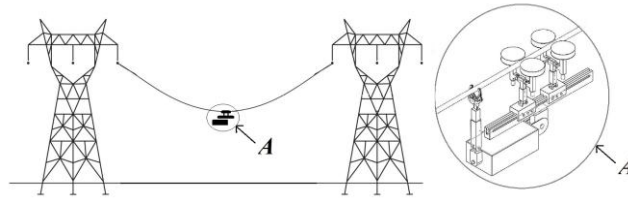


Рисунок 1. Новая ДМА

В главе 2 рассматриваются динамические прогибы в вертикальной плоскости, возникающие при движении ДМА. Глава состоит из следующих частей: динамика струны с подвижной нагрузкой, обоснование модели струны на основе механики упругих нитей, постановка и решение задачи с движущейся массой, учет сил внешнего сопротивления. Методика моделирования во всех частях включает в себя составление уравнений динамики конструкций и решение их средствами компьютерной математики (*Mathcad*).

В п. 2.1 исследуются колебания системы провод-ДМА как струны с подвижной нагрузкой (рис. 2). Закон движения $\xi(t)$ сосредоточенной нагрузки P считается произвольной заданной функцией.

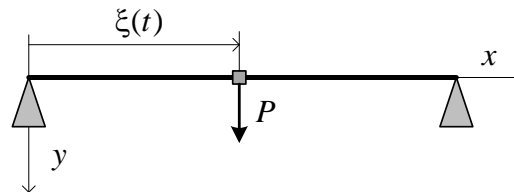


Рисунок 2

Для провода используются модели двух видов: традиционные континуальные (с распределенными параметрами и уравнениями в частных производных) и дискретные (с уравнениями Лагранжа 2-го рода). Последние оказались очень эффективными; результаты в тех и других моделях совпали.

Постановка задачи для прогиба струны $u(x,t)$ известна из курсов математической физики:

$$Tu'' + p(x,t) = \rho \ddot{u}; \quad x=0,l: u=0; \quad t=0: u=0, \dot{u}=0. \quad (1)$$

Обозначено: T – сила натяжения струны, p, ρ – распределенная нагрузка и масса на единицу длины, l – длина струны; штрих и точка означают дифференцирование по координате x и времени t . Для рассматриваемой схемы с движущейся сосредоточенной нагрузкой $p = P\delta(x - \xi(t))$. Граничные условия выражают закрепление концов струны. Начальные условия соответствуют недеформированному состоянию покоя.

Задача (1) решается посредством разложения в ряд Фурье. Результат суммирования ряда Фурье для движения нагрузки с постоянной скоростью ($\xi = vt$) показан на рис. 3. Значения параметров: $T = 10$ кН, $P = 1$ кН, $v = 1$ м/с, $\rho = 5$ кг/м, $l = 200$ м; число членов ряда $N = 500$. Прогиб под силой $u(vt, t)$ является суммой двух составляющих: квазистатической и динамической. На рис. 3 показаны динамическая составляющая $D(t, N)$ на всей

дистанции и в средней ее части. Заметим, что практическая сходимость ряда наступает при числе членов $N \approx 100$.

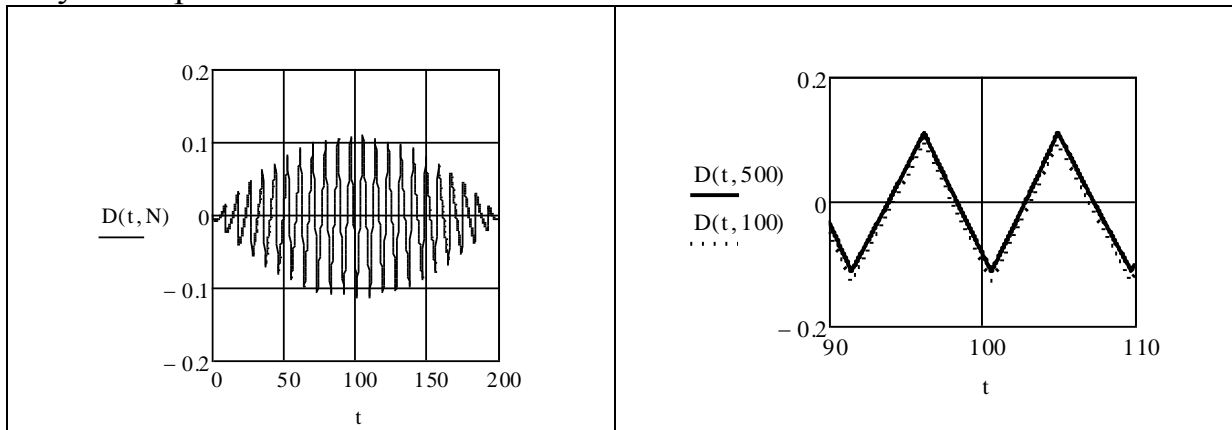


Рисунок 3

Видно, что даже при равномерном медленном движении нагрузки возникают пилообразные колебания значительной амплитуды. Эти колебания нельзя отнести ни к одному из известных видов (свободные, вынужденные, автоколебания, параметрические).

В п. 2.2 рассматривается иной, более эффективный, метод Лагранжа-Ритца-Канторовича с аппроксимацией прогиба

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^n U_i(t) \varphi_i(x) = U(t)^T \varphi(x). \quad (2)$$

Здесь столбец U состоит из обобщенных координат, а столбец φ – из заданных нами функций (используем синусоиды из ряда Фурье). Число степеней свободы n определяется желаемой точностью и возможностью вычислений средствами компьютерной математики (*Mathcad*).

Для составления уравнений Лагранжа 2-го рода определим кинетическую энергию K и потенциальную энергию Π :

$$2K(\dot{U}) = \int_0^l \rho \dot{u}^2 dx = \dot{U}^T M \dot{U}, \quad M = \int_0^l \rho \varphi \varphi^T dx;$$

$$2\Pi(U) = T \int_0^l u'^2 dx = U^T C U, \quad C = T \int_0^l \varphi' \varphi'^T dx.$$

Появились матрицы инерции M и жесткости C . Далее найдем столбец дополнительных обобщенных сил Q (по виртуальной работе) и запишем уравнения Лагранжа:

$$\delta A = \int_0^l p \delta U^T \varphi dx = Q^T \delta U \Rightarrow \int_0^l p \varphi dx = Q = \underbrace{\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{U}} \right)^{\bullet} - \frac{\partial K}{\partial U} + \frac{\partial \Pi}{\partial U}}_{=} = M \ddot{U} + C U. \quad (3)$$

Подчеркнутая система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) решается в *Mathcad* встроенными функциями *Rkadapt* или *Radau*.

В методе с уравнениями Лагранжа закон $\xi(t)$ может быть произвольным; например, допускать остановки – результат на рис.4:

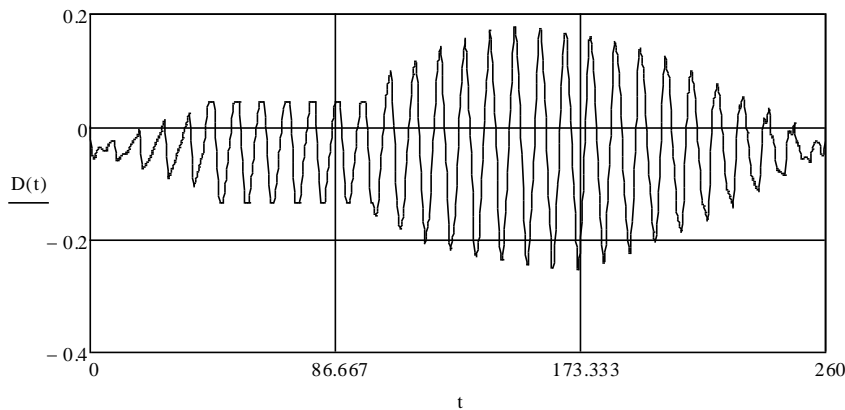


Рисунок 4

Этот расчет не подтверждает то предположение, что развитие колебаний прекращается с остановкой нагрузки. Объяснить это можно включением переходного процесса.

В п. 2.3 представлено обоснование модели струны для провисающего провода ЛЭП. Исходными являются следующие уравнения упругой нити

$$\mathbf{Q}' = -\mathbf{q}, \quad \mathbf{Q} = Q\mathbf{r}' / |\mathbf{r}'| \Rightarrow \mathbf{r}' = \mathbf{Q}(b^{-1} + |\mathbf{Q}|^{-1}). \quad (4)$$

Здесь имеем векторные функции материальной координаты s : силу \mathbf{Q} , распределенную нагрузку \mathbf{q} , радиус-вектор \mathbf{r} ; штрих означает дифференцирование по s . Жесткость на растяжение b определяет связь силы с относительным удлинением: $Q = Q_0 + b\varepsilon$, $\varepsilon = |\mathbf{r}'| - 1$. Материальная координата является дуговой в начальном состоянии, которое растянуто с силой Q_0 .

При закрепленных (на опорах) концах провода имеем нелинейную краевую задачу для четырех неизвестных функций: x, y, Q_x, Q_y . Она решается в *Mathcad* методом стрельбы. Результаты расчета координат и натяжения представлены на рис. 5.

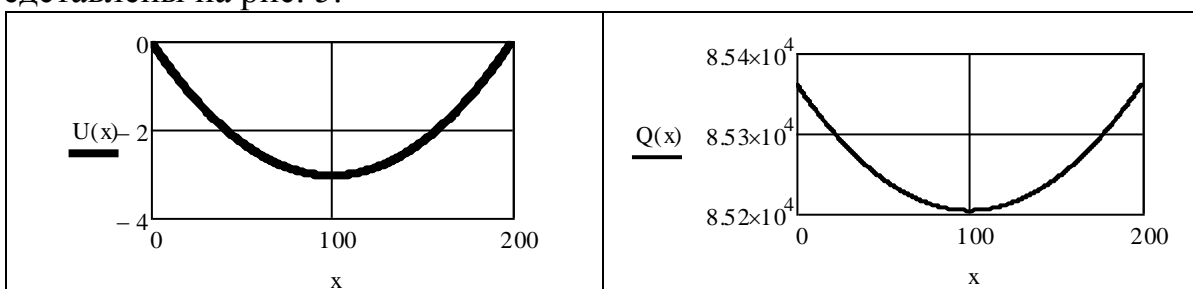


Рисунок 5

Сила натяжения практически постоянна, а форма провода под действием собственного веса оказалась такая же, как у струны. Следовательно, моделью натянутой струны можно и ограничиться.

Проводились расчеты и растянутого стержня с конечной изгибной жесткостью. Обнаружено, что влияние последней незначительно.

В п.2.4 рассматривается более сложная модель струны с подвижной массой (при произвольном законе движения). Применяется метод с уравнениями Лагранжа. Сохраняя аппроксимацию (1), определим сначала кинетическую энергию:

$$\begin{aligned} 2K(\dot{U}, U, t) &= m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \rho \int_0^l \dot{u}^2 dx = \\ &= m\dot{\xi}^2 + \dot{U}^T [M + \mu(\xi)] \dot{U} + 2\dot{\xi} U^T \eta(\xi) \dot{U} + \dot{\xi}^2 U^T \sigma(\xi) U. \end{aligned} \quad (5)$$

Появились дополнительные матрицы инерции

$$\mu(\xi) = m\varphi(\xi)\varphi^T(\xi), \quad \sigma(\xi) = m\varphi'(\xi)\varphi'^T(\xi), \quad \eta(\xi) = m\varphi'(\xi)\varphi^T(\xi);$$

они являются заданными функциями времени. Определив далее потенциальную энергию, найдем обобщенные силы и составим систему уравнений Лагранжа:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{U}}\right) \cdot - \frac{\partial K}{\partial U} &= - \frac{\partial \Pi}{\partial U} \Rightarrow \underline{(M + \mu)\ddot{U} +} \\ &+ \underline{[C + \dot{\xi}^2(\eta'^T - \sigma) + \dot{\xi}\eta^T]U} + \underline{\dot{\xi}[\mu' + \eta^T - \eta]U} = F. \end{aligned} \quad (6)$$

Подчеркнутая система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) решается в *Mathcad* даже при большом числе степеней свободы. Рассмотрены движения с различными законами, включая вариант с остановкой. пилообразный характер колебаний сохранился, но острота пиков снизилась (рис. 6):

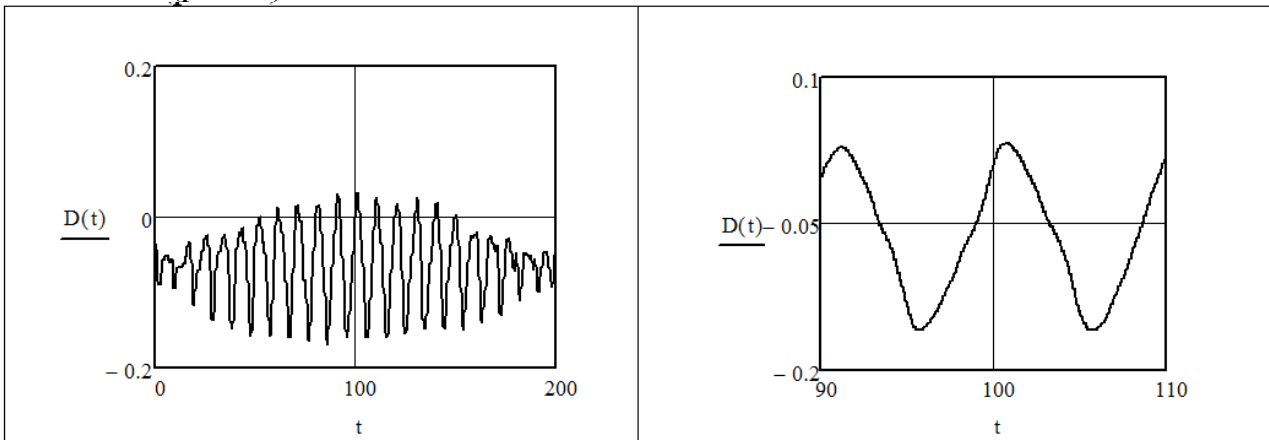


Рисунок 6

В следующем п.2.5 рассматривается влияние сил сопротивления. Рассмотрено два случая: с линейной зависимостью от скорости и с квадратичной. В первом случае вычислительных трудностей не было, а во втором они оказались значительны. На рис. 7 показана динамическая составляющая прогиба при линейном сопротивлении. К распределенной нагрузке на струну добавлено слагаемое $-\beta_1 \dot{u}$, $\beta_1 = 0.1$; число степеней свободы $n = 30$.

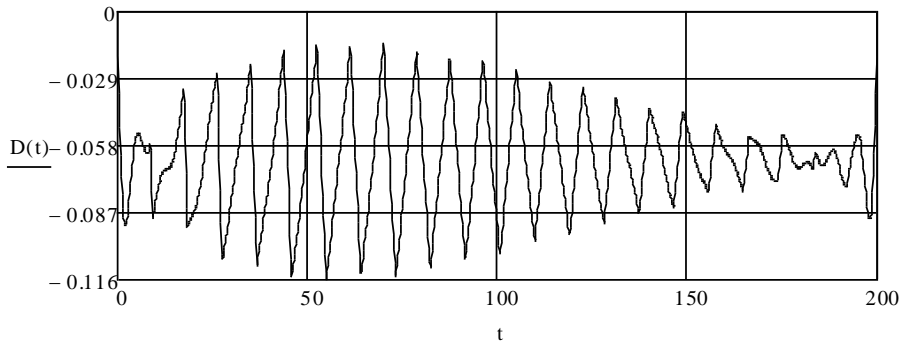


Рисунок 7

Видим существенное отличие от случая без сопротивления. Максимум колебаний теперь не в середине пролета. Острота пиков сохранилась, но сами колебания уменьшились: максимальный размах – ровно вдвое (0.113 м вместо 0.226 без сопротивления).

Результаты главы дают представление о нежелательных динамических явлениях при движении ДМА и позволяют предотвратить их после соответствующих расчетов с разными законами движения.

Глава 3 является логическим продолжением предыдущей, если представить маятник с колеблющейся точкой подвеса. Центр массы ДМА находится ниже места подвеса, которое колеблется по пилообразному закону. Имеем случай параметрического возбуждения колебаний маятника – но не в «чистом» классическом виде. Можно предположить, что эти параметрические колебания окажутся еще более нежелательными и опасными, чем пилообразные (в вертикальной плоскости). Вся глава 3 – об этих колебаниях.

В п. 3.1 ДМА рассматривается как физический маятник с колеблющейся по заданному закону точкой подвеса:

$$J\ddot{\theta} + ml(g - a(t))\sin\theta = 0. \quad (7)$$

Здесь θ – угол отклонения от вертикали, J, m, l – момент инерции, масса и длина маятника. Ускорение $a(t)$ точки подвеса определяется из задач о струне из п. 2 (не как вторая производная, а с использованием ОДУ). Численное решение уравнения (7) при различных параметрах выявило случаи «слабого» параметрического резонанса.

В п. 3.2 и 3.3 изучаются параметрические колебания в значительно более сложной модели на рис. 8. Вместо массы (п. 2.4) на проводе установлен маятник.

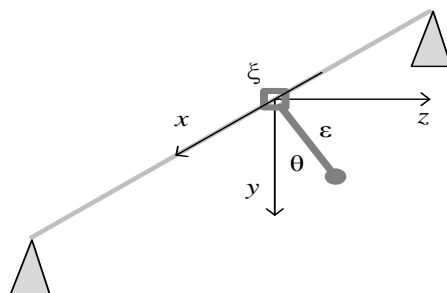


Рисунок 8

Очевидно, теперь необходимо учитывать и горизонтальный прогиб в плоскости xz . Поскольку трудности рассмотрения пространственных колебаний в этом случае велики, исходное движение в плоскости xu считается заданным. Обобщенными координатами являются коэффициенты аппроксимации горизонтального прогиба и угол маятника. Система уравнений Лагранжа имеет вид:

$$\begin{aligned} (M + \mu)\ddot{U} + 2v\eta\dot{U} + (v^2\kappa + C)U + m\varepsilon\ddot{\varphi} &= 0, \\ (m\varepsilon^2 + I_c)\ddot{\theta} + m\varepsilon[\varphi^T\ddot{U} + 2v\varphi'^T\dot{U} + v^2\varphi''^TU + (g - a_m)\theta] &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Скорость $\dot{\xi} = v$ считается постоянной. Обозначено: I_c – момент инерции относительно оси, проходящей через центр массы, ε – эксцентриситет, матрица $\kappa = m\varphi\varphi'^T$.

Проводились расчеты (*Mathcad, Rkadapt*) без начальных скоростей и горизонтального прогиба, но с отклоненным маятником. Параметрический резонанс возникает или нет в зависимости от параметров системы. Рис. 9 соответствует значениям $\varepsilon = 0.02 = \sqrt{I_c/m}$

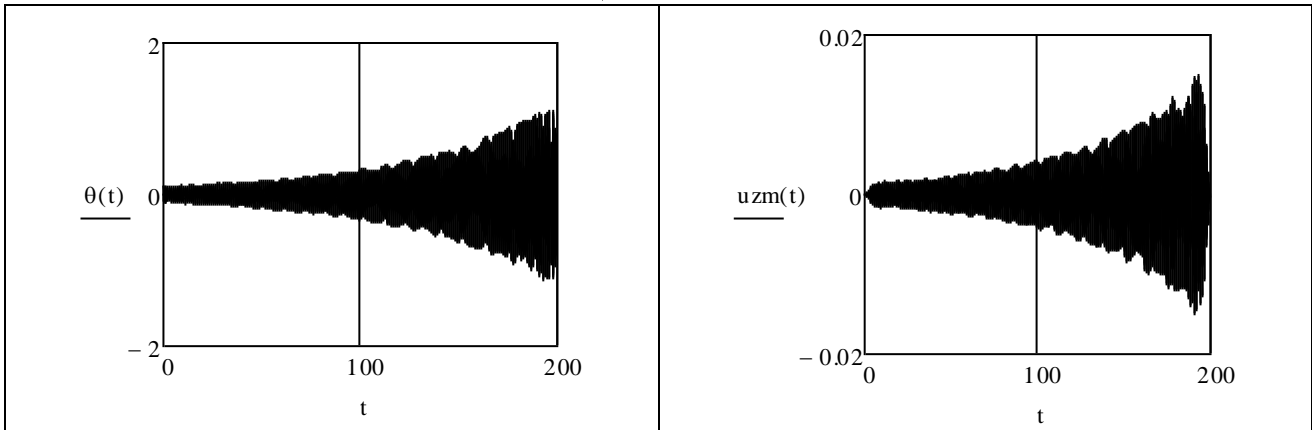


Рисунок 9

Видим ярко выраженный параметрический резонанс. По углу он значительный, а по горизонтальному прогибу – лишь порядка сантиметра.

Глава 4 значительно отличается от всех других. В ней рассматривается механика оригинального подвеса новой ДМА к проводу ЛЭП. Пара шкивов с желобом прижимается к проводу посредством натяжения пружинной стяжки (рис. 10):

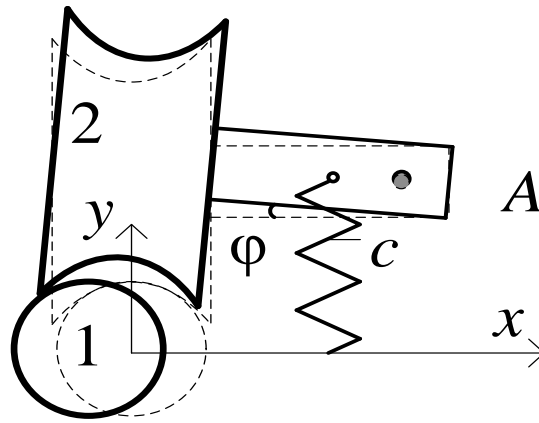


Рисунок 10

Здесь возникают две контактные задачи – для твердых и для упругих тел. «Твердотельная» задача рассматривается в п. 4.1. Выводятся геометрические уравнения для контактирующих линий при смещении шкива относительно провода на некоторое расстояние h (рис. 10)

$$v_1(\xi + h) = V_2(\xi, \varphi), v_1'(\xi + h) = \partial_\xi V_2(\xi, \varphi). \quad (9)$$

Исходное очертание границ провода и шкива задается функциями $y = v_1(x)$, $y = v_2(x)$. При смещении и повороте (вокруг шарнира A) они меняются в зависимости от угла $\varphi(h)$. Определив функцию V_2 , решаем систему (9) средствами *Mathcad* и находим координату точки контакта $\xi(h)$ и угол поворота $\varphi(h)$.

Далее вычисляем силу P , «вырывающую» провод из соединения. Для этого используем принцип виртуальной работы:

$$P\delta h = \delta\Pi = \Pi'(\varphi)\delta\varphi, \varphi = \varphi(h) \Rightarrow P = \Pi'(\varphi)\varphi'(h). \quad (10)$$

Здесь $\Pi(\varphi)$ – потенциальная энергия пружины.

Очертания контактирующих линий и зависимость силы $P(h)$ от перемещения показаны на рис. 11. Экстремум на графике соответствует максимальной силе P_* , определяющей прочность соединения. В проведенном расчете оказалось $P_* = 837 \text{ Н}$ ($h = 0.014 \text{ м}$). Этого достаточно для статического удержания ДМА на проводе, но в динамике из-за сил инерции необходимо увеличить жесткость пружины c . Отметим, что P_* прямо пропорциональна c .

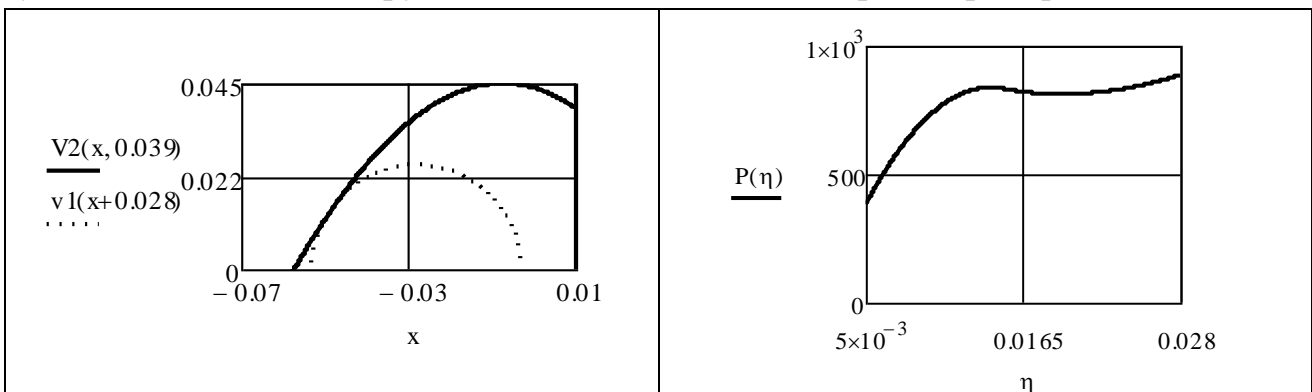


Рисунок 11

В п. 4.2 и 4.3 ставится и решается по классической схеме Герца контактная задача с учетом податливости шкивов и провода. Для описания геометрии поверхностей контакта используются средства дифференциальной геометрии.

Расчет ведется по известным формулам теории упругости:

$$\delta = \frac{3Q\Omega}{2a} K(\varepsilon), \varepsilon \equiv \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}, \Omega \equiv \frac{1}{\pi} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right),$$

$$\frac{1}{R_1} = \frac{3Q\Omega}{a^3} D(\varepsilon), \frac{R_1}{R_2} = \frac{B(\varepsilon)}{(1 - \varepsilon^2)D(\varepsilon)}. \quad (11)$$

Здесь δ – сближение тел, Q – прижимающая сила, a – большая полуось эллиптической площадки контакта, $R_{1,2}$ – радиусы кривизны поверхности, $E_{1,2}, \nu_{1,2}$ – модули Юнга и коэффициенты Пуассона тел, K, D, B – эллиптические интегралы.

В системе (11) сначала находим эксцентриситет ε , решая (численно) подчеркнутое уравнение. Заметим, что он не зависит от нагрузки Q . Далее находим a, δ . Контактное давление в центре $p_0 = 3Q/2\pi ab$.

В численном примере при радиусах $R_1 = 0.833, R_2 = 0.15$ из (11) получено $\varepsilon = 0.946$. Принимая для материалов провода и ролика $E_1 = 7 \cdot 10^{10}, E_2 = 2 \cdot 10^{11}, \nu_1 = 0.33, \nu_2 = 0.25$ и считая нагрузку $Q = 10^3$, найдем $a = 2.82 \cdot 10^{-3}, b = 9.12 \cdot 10^{-4}, \delta = 7.54 \cdot 10^{-6}, p_0 = 1.86 \cdot 10^8$. Сближение ничтожно, но контактное давление велико и может вызвать неупругие деформации. Заметим, что по размерам площадки контакта можно оценить трение качения.

Глава 5 является продолжением глав 2 и 3 (о колебаниях). В ее основе – вопрос об энергетике колебаний: хватит ли мощности двигателя на раскачку системы и не заглохнет ли он? Закон движения ДМА по проводу в этой главе не считается заданным, а определяется дополнительной обобщенной координатой ξ .

В п. 5.1 выводятся уравнения Лагранжа при следующих выражениях энергии и виртуальной работы:

$$2K(\dot{U}, U, \dot{\xi}, \xi) = m\dot{\xi}^2 + \dot{U}^T [M + \mu(\xi)] \dot{U} + 2\dot{\xi} U^T \eta(\xi) \dot{U} +$$

$$+\dot{\xi}^2 U^T \sigma(\xi) U, \Pi(U, \xi) = \frac{1}{2} U^T C U - P U^T \varphi(\xi); \quad (12)$$

$$\delta A = -\delta \Pi + \underline{H \delta \xi / r} = Q^T \delta U + Q_\xi \delta \xi \Rightarrow$$

$$Q = -C U + P \varphi, Q_\xi = P U^T \varphi'(\xi) + H / r.$$

Подчеркнутое слагаемое является работой момента двигателя H ; поскольку радиус шкива равен r , то угловая скорость на выходе двигателя $\omega = \dot{\xi} / r$. Должна быть задана динамическая характеристика двигателя в виде

$H = H(\omega, t)$, где явная зависимость от времени означает программное управление или действия оператора.

Следующий п. 5.2 посвящен решению уравнений Лагранжа в *Mathcad* (*Rkadapt*). Динамическая характеристика двигателя принята в линейной форме с двумя константами

$$H(\omega) = H_0 - H_1\omega \quad (13)$$

Такая характеристика широко использовалась ранее многими авторами для «систем с ограниченным возбуждением». Она не вполне соответствует действительности, однако приемлема для выявления качественных закономерностей.

На рис. 12 представлены результаты: скорость $\xi = v(t)$ и динамическая составляющая прогиба $\Delta(t)$. Как начальное условие задано $v(0) = 1$ (м/с). Определено время прохода дистанции – увеличилось на 2.94 с. Пилообразный характер колебаний сохранился, но острота пиков исчезла.

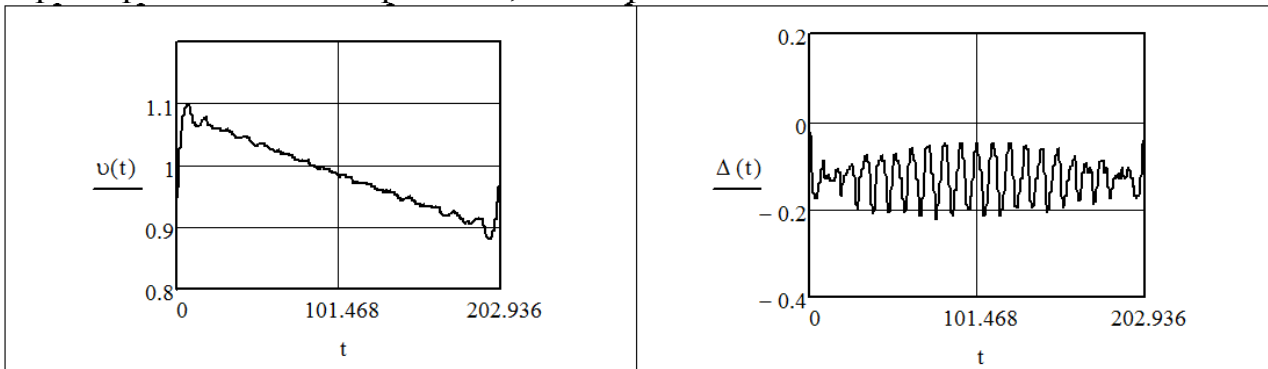


Рисунок 12

Качественный результат расчетов: ограниченность мощности двигателя не привела к исчезновению колебаний.

Разъяснению этого несколько неожиданного результата посвящен п. 5.3. Здесь рассматривается энергетика колебаний. Кинетическая энергия всей системы $K(t)$ является суммой трех слагаемых:

$$\begin{aligned} K &= K_{m0} + K_{m1} + K_w; 2K_{m0} = mv^2, \\ 2K_{m1} &= V^T \mu V + 2vU^T \eta V + v^2 U^T \sigma U, 2K_w = V^T M V. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь первое слагаемое K_{m0} – энергия движения машины со скоростью v , второе – остальная часть энергии машины, а третье – энергия провода.

По результатам вычислений в п. 5.2 можно построить графики этих слагаемых как функций времени. Они на рис. 13:

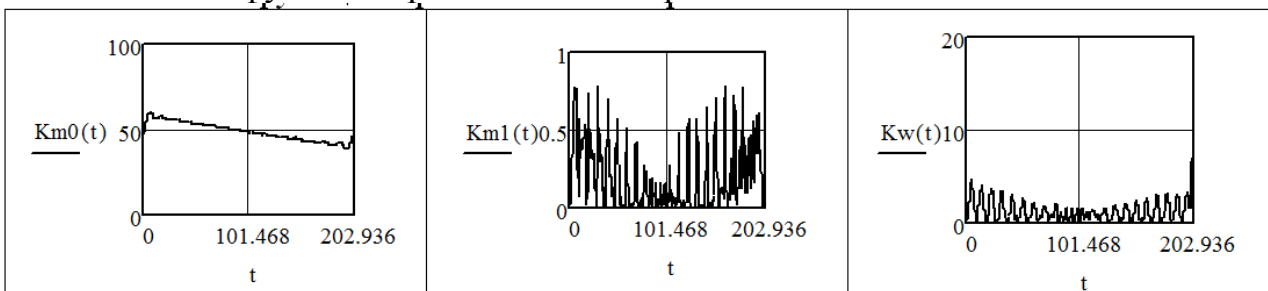


Рисунок 13

Видим, что энергия колебаний всего провода составляет лишь около 10% от K_{m0} . Поэтому возбуждение колебаний не перегружает двигатель. Однако для окончательных выводов необходимы расчеты с параметрами реальной машины.

В заключении перечислены основные результаты работы:

1. Предложена концепция, сформулированы требования к прототипу и разработана конструкция новой диагностической машины-автомата (ДМА) с механизмом для перехода препятствий и контактным упругим соединением с проводом.
2. Построена математическая модель ДМА-провод при движении в вертикальной плоскости. Составлены уравнения и построены их численные решения средствами компьютерной математики. Выявлено влияние различных факторов: скорости и неравномерности движения, изгибной жесткости провода и сил сопротивления.
3. Обоснована модель натянутой струны для провода, изначально рассматриваемого как нелинейно-упругая нить.
4. Построены математические модели для расчета маятниковых колебаний ДМА при параметрическом возбуждении. Обнаружена возможность параметрического резонанса неклассического типа. Решена и более сложная связанная задача о колебаниях ДМА и провода.
5. Поставлена и решена контактная задача о взаимодействии роликов подвеса ДМА и провода ЛЭП как твердых тел. Выведены необходимые геометрические соотношения. Построен алгоритм расчета предельной нагрузки при любых значениях параметров подвеса.
6. В задаче о контакте роликов и провода учтены упругие деформации. Классическая схема Герца дополнена средствами компьютерной математики. Определено контактное давление, размеры площадки контакта и сближение тел.
7. Поставлена задача динамики системы ДМА-провод при заданной характеристике двигателя колес-шквивов. Получено решение соответствующей системы ОДУ средствами компьютерной математики. Установлено, что при ограниченной мощности двигателя колебания пилообразного типа сохраняются.

Список публикаций по теме диссертации

В изданиях из перечня ВАК:

1. Елисеев В.В., Бахрами М.Р. Диагностическая машина на проводах ЛЭП: устройство и проблемы механики // Научно-техн. ведомости СПбПУ. Сер. Наука и образование. 2015. 1 (214). – С. 200-207.
2. Елисеев В.В., Бахрами М.Р. Динамика проводов ЛЭП при движении по ним диагностической машины // Известия вузов. Приборостроение. 2015. № 3. Том 58. – С. 229-235.
3. Елисеев В.В., Бахрами М.Р. О прочности подвеса робота-инспектора на проводе ЛЭП // Вестник машиностроения. 2016. № 5.(в печати)

В изданиях, индексируемых Scopus:

4. Bahrami M.R. A Novel Design of an Electrical Transmission Line Inspection Machine // Lect. Notes Mechanical Engineering: Advances in Mechanical Engineering. – ISBN: 978-3-319-29578-7.

В прочих изданиях:

5. Bahrami M.R. A novel design of electrical transmission line inspection machine // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. № 4. – С. 292 – 298.
6. Елисеев В.В., Бахрами М.Р. Динамика провода ЛЭП с роботом-инспектором при ограниченной мощности двигателя // Теория механизмов и машин. 2015. № 4 (28). Т. 13. – С. 6-11.
7. Елисеев В.В., Бахрами М.Р. Saw-tooth oscillations of electrical transmission line conductor as the result of moving inspection robot / Научный форум «Неделя науки СПбПУ»: материалы науч.-практ. конференции ИММиТ СПбПУ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015.– С. 101–105.