

М467042

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ЛУКЬЯНОВА ВАЛЕНТИНА НИКОЛАЕВНА

УДК 531.22.8:531.391.1

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА АБСОЛЮТНО ГИБКИХ
СТЕРЖНЕЙ (ПРОВОДОВ) ПРИ ОБЛЕДЕНЕНИИ И
НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОЛЕБАНИЯХ

01.02.06 - Динамика, прочность машин
приборов и аппаратуры

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1987

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - д.т.н., проф. СВЕТЛИЦКИЙ В.А.

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. АЛФУТОВ Н.А.,
к.т.н., доц. КУРКИН В.И.

Ведущее предприятие - Институт проблем машиностроения
АН УССР, г. Харьков

Защита состоится "19" ноября 1987г. в 14.30ч.
на заседании специализированного Совета Д 053.15.08 при Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005 Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н.Э.Баумана

Авт

СПЕЦИ

БИННИ

Д-451

Тираж 100 экз.

Типог

М467042

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

29.04.94

Актуальность темы. В принятых XXV съездом КПСС "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года", наряду с другими, поставлена задача интенсивного развития энергетики страны. Важное место в решении этой задачи занимает развитие сети линий электропередачи. При этом увеличивается удельный вес мощных и сверхмощных линий, выход которых из строя приводит к нарушению нормальной работы предприятий, транспорта и к значительным экономическим потерям. Механическая часть воздушных линий электропередачи должна иметь определенный уровень надежности, обеспечиваемый их конструктивным выполнением. Выбор параметров линий электропередачи производится из условий прочности элементов конструкций (проводов, опор и т.п.) и предотвращения электрического замыкания. Наиболее тяжелые условия работы линий электропередачи имеют место при обледенении, что характерно для большинства районов СССР, и действии шквального ветра. Большинство случаев выхода из строя воздушных линий электропередачи имеют место именно при этих условиях эксплуатации. Поэтому разработка методов расчета проводов линий электропередачи с учетом их обледенения и порывов ветра является актуальной.

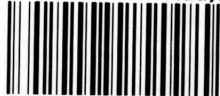
Цель работы. Целью работы является: 1) создание методики расчета на прочность и предотвращение замыканий проводов воздушных линий электропередачи, с учетом обледенения и динамического нагружения нестационарным воздушным потоком; 2) исследование влияния параметров потока, гололедных отложений и основных конструктивных параметров механической части воздушных линий электропередачи на напряженно-деформированное состояние проводов.

Основные задачи работы. Для достижения указанной цели в работе рассмотрены следующие основные задачи:

- 1) определение аэродинамических сил, действующих на провод с заданным или случайным профилем поперечного сечения, находящийся в потоке произвольного пространственного направления;
- 2) расчет напряженно-деформированного состояния в проводе заданного сечения при обдувании стационарным потоком;
- 3) экспериментальное определение области возможных значений аэродинамических коэффициентов проводов с голодным или снежным отложением;

I

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1467042

Лукьянова В.Н. Разработка



4) определение "наихудших" законов изменения аэродинамических сил по длине провода, приводящих к максимальным значениям натяжения или отклонений провода, с последующим расчетом характеристик напряженно-деформированного состояния;

5) расчет спектра собственных частот и соответствующих им собственных векторов проводов, обдуваемых потоком произвольного направления;

6) расчет динамических натяжений и отклонений провода при действии на него нестационарного ветрового потока.

Научная новизна. Получены аналитические выражения для аэродинамических сил, действующих на существенно непологий абсолютно гибкий стержень, обдуваемый потоком произвольного направления. Впервые проведена оценка влияния случайной формы гололедных отложений на напряженно-деформированное состояние проводов при действии стационарного воздушного потока. Показано, что учет случайной формы обледенелого провода приводит к существенному занижению расчетных значений натяжений в проводе и его отклонений от вертикальной плоскости. Получен алгоритм расчета динамических усилий провода и отклонений точек осевой линии провода при нелинейных нестационарных колебаниях.

Проведен анализ влияния различных конструктивных параметров элементов воздушных линий электропередачи на основные статические и динамические характеристики напряженно-деформированного состояния провода.

Практическая ценность диссертации состоит в том, что разработанные методы позволяют проводить расчет и проектирование воздушных линий электропередачи с учетом случайной формы сечений провода при обледенении и нестационарности потока воздуха. Разработанные в диссертации методики расчета проводов и программно-алгоритмическое обеспечение внедрены в практику проектирования и используются в САО "Энергосетьпроект".

Достоверность результатов, полученных в диссертации, вытекает из обоснованности принятых теоретических положений и математических методов и подтверждается положительным опытом внедрения при проектировании и расчете линий электропередачи.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на Всесоюзной школе молодых ученых и специалистов "Оптимизация в машиностроении" (г.Алушта, сентябрь 1983г.); на Всесоюзной кон-

ференции по вибрационной технике (г.Телави, ноябрь 1984г.); на научном семинаре кафедры "Сопротивление материалов, динамика и прочность машин" МВТУ им. Н.Э.Баумана (г.Москва, февраль 1981г., март 1982г., март 1983г., март 1984г., май 1987г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано восемь печатных работ.

Объем работы. Диссертация состоит из предисловия, пяти глав, выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, включает 97 рисунков и 1 таблицу. Библиография насчитывает 103 наименования. Приложение занимает 35 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В предисловии обосновывается актуальность темы исследования, формулируется цель работы и приводится краткое содержание диссертации.

В первой главе дается анализ литературы, посвященной исследованию взаимодействия стержневых элементов конструкций с потоком воздуха или жидкости. Анализ начинается с обзора работ, посвященных определению аэродинамических сил, действующих на стержень. Исследованию этого вопроса уделяли внимание как советские авторы, так и зарубежные авторы, среди которых С.М.Горлин, И.Ю.Графский, С.И.Девнин, М.И.Казакевич, Н.С.Марейн, С.Г.Попов, Г.А.Савицкий, Н.Брукс, Р.Кинг, Г.Паркинсон, Я.Чжень и многие другие.

Исследованию движения абсолютно гибких стержней под действием аэродинамических сил посвящены работы В.В.Горбань, Ю.И. Горошкова, М.С.Григорьянца, Н.В.Салтанова, В.А.Светлицкого, Н.Цай, А.П.Чугуева. Статика и динамика проводов воздушных линий электропередачи рассмотрена в работах А.А.Бошняковича, В.В.Бургсдорфа, А.А.Глазунова, А.Гувера, Н.Н.Кастанета, Л.М.Кессельмана, К.П.Крыкова, А.Я.Либермана, С.С.Ржевского. В наиболее общей постановке статика и динамика абсолютно гибких стержней в потоке воздуха изложена в монографии В.А.Светлицкого.

Приведены работы, посвященные расчету абсолютно гибких стержней, находящихся в потоке, в статистической постановке (А.Давенпорт, А.-Э.Ю.Виткуте, А.Иноуэ, Н.Н.Кастанета, К.Мауцио, Т.П.Матеконис, М.Моригава, Л.Паркс, А.П.Чучев). В указанных ра-

ботах принято, что ветровая нагрузка представляет собой пространственно-временной случайный процесс. Получение статистической информации о случайной ветровой нагрузке в полном объеме является крайне трудоемким и длительным, поэтому целесообразно применение методов, использующих ограниченную информацию о случайных аэродинамических силах.

Еще более сложной, по сравнению с ранее отмеченными, является проблема изучения статистики и динамики покрытых снегом или гололедом проводов. Многочисленные исследования, проведенные как в СССР, так и за рубежом (Н.А.Афанасьева, А.Д.Богданович, В.В. Бургсдорф, В.Е.Бучинский, А.Давенпорт, Т.М.Денисенко, Р.Джонсон, М.В.Заварина, И.Г.Заглиев, И.Э.Казанцева, Н.Н.Кастанета) показали, что гололедное покрытие имеет случайную форму и массу. Наиболее достоверной и относительно легко получаемой, является информация о возможных значениях погонной массы гололедных отложений и о типовых формах отложений.

Анализ литературы, посвященной расчету проводов линий электропередач, показал, что многие практически важные задачи исследованы или весьма приближенно, или просто не рассматривались. К таким задачам, в частности, относятся:

расчет проводов, находящихся в потоке произвольного направления при различных расположениях опор;

расчет проводов в условиях обледенения с учетом случайной формы гололедного покрытия и с определением экстремальных значений осевой силы и перемещений;

расчет динамических перемещений и натяжений в проводах, взаимодействующих с нестационарным потоком, преимущественно, характеризующимся импульсным изменением скорости.

Вторая глава посвящена разработке методов статического расчета проводов в потоке произвольного пространственного направления. Провод рассматривается как абсолютно гибкий стержень, шарнирно закрепленный по концам (рис.1). Статика (и динамика) провода рассматривается в неподвижной $\{T_i\}$ и подвижной $\{\tilde{e}_i\}$ системах координат. Принимается, что аэродинамическая нагрузка создается однородным потоком, имеющим скорость

$$\vec{V}_0 = V_0 (\cos\alpha \cdot \cos\beta \cdot \vec{T}_1 + \sin\beta \cdot \vec{T}_2 + \sin\alpha \cdot \cos\beta \cdot \vec{T}_3). \quad (I)$$

Аэродинамическая сила $\vec{Q}_a$ представляется в виде суммы нормальной $\vec{Q}_n$ и касательной $\vec{Q}_t$, составляющих, каждая из которых

принимается пропорциональной квадрату проекции скорости $\bar{V}_0$ соответственно на нормаль V_{0n} и касательную V_{0t} к осевой линии провода в каждой точке. Для некрутлого сечения сила $\bar{Q}_n$ представляется в виде суммы сил лобового сопротивления $\bar{Q}_{\gamma x}$ и подъемной силы $\bar{Q}_{\gamma y}$.

Аналитические выражения (в безразмерной форме записи) для аэродинамических сил получены с учетом ограничений, накладываемых на модуль и направление сил

$$\begin{aligned}\bar{Q}_n &= Q_{n0} \cos^2 \varphi_a \operatorname{sign}(\cos \varphi_a) \cdot \bar{e}_1, & (Q_{n0} &= C_n q d v_0^2 / 2 m_0 g); \\ \bar{Q}_{n0} &= Q_{n0} \sin \varphi_a \cdot \bar{V}_{0n} / V_0, & (Q_{n0} &= C_n q d v_0^2 / 2 m_0 g); \\ \bar{Q}_{\gamma x} &= Q_{\gamma x0} \sin \varphi_a \cdot \bar{V}_{0n} / V_0, & (Q_{\gamma x0} &= C_x q d v_0^2 / 2 m_0 g); \\ \bar{Q}_{\gamma y} &= Q_{\gamma y0} \sin \varphi_a \cdot [\bar{V}_{0n} \times \bar{e}_1] / V_0, & (Q_{\gamma y0} &= C_y q d v_0^2 / 2 m_0 g).\end{aligned}\quad (2)$$

где q — плотность воздуха; d — диаметр провода; m_0 — погонная масса провода; C_n, C_x, C_y — аэродинамические коэффициенты; φ_a — местный угол скольжения.

Уравнение равновесия провода в стационарном потоке записывается в безразмерных переменных $\epsilon = S/l$, $x = x^p/l$, $m = m^p/m_0$, $\bar{Q}_0 = \bar{Q}_0^p/m_0 g$, $\bar{Q} = \bar{Q}^p/m_0 g l$ в виде

$$\frac{d\bar{Q}}{d\epsilon} + \bar{Q}_0 - m \cdot l_2 = 0 \quad (3)$$

и интегрируется совместно с условием направленности силы натяжения вдоль осевой линии

$$\bar{Q} = Q_1 \cdot \bar{e}_1 = Q_1 \cdot d\bar{r}/d\epsilon \quad (4)$$

и условием нерастяжимости

$$(\bar{r}^i \cdot \bar{r}^i) = \sum_{j=1}^3 x_j'^2 = 1, \quad (5)$$

где l — длина провода в полете, S — дуговая координата, $\bar{r}$ — радиус-вектор точек осевой линии провода, Q_1 — натяжение в проводе. Интегрирование нелинейного уравнения равновесия проводится итерационным методом при пошаговом малом приращении скорости потока от 0 до V_0 . В качестве начальных при-

нимаются параметры провода, свободно провисающего в покоящейся атмосфере под действием только силы тяжести.

В диссертации приведены результаты расчета провода с круглым поперечным сечением при различных конструктивных параметрах и параметрах потока. В частности, показано, что наличие вертикальной составляющей скорости потока, определяемой углом β , оказывает существенное влияние на равновесную форму и натяжение провода и должно учитываться при расчете и проектировании проводов.

В третьей главе диссертации разработана методика статического расчета проводов с гололедным покрытием на прочность и предотвращение замыканий. Провод в условиях обледенения имеет некруглое сечение, случайное как по форме, так и по размерам. На него действуют случайные аэродинамические силы $\bar{Q}_x^{(c)}$, $\bar{Q}_y^{(c)}$ и $\bar{Q}_z^{(c)}$, для которых остаются справедливыми выражения (2). Отличие заключается только в том, что вследствие случайного характера аэродинамических коэффициентов $C_x^{(c)}$, $C_y^{(c)}$ и $C_z^{(c)}$ и размеров сечения модули сил, а для силы $\bar{Q}_y^{(c)}$ и направление, будут иметь случайный характер.

В диссертации статика обледенелых проводов рассматривается в предположении, что они находятся под действием случайной по величине силы тяжести и случайных аэродинамических сил, ограниченных по модулю

$$Q_{10\min} \leq Q_{10}^{(c)} \leq Q_{10\max}, \quad Q_{x0\min} \leq Q_{x0}^{(c)} \leq Q_{x0\max}, \quad Q_{y0\min} \leq Q_{y0}^{(c)} \leq Q_{y0\max}, \quad (6)$$

$$m_{\min} \leq m^{(c)} \leq m_{\max}.$$

Для выполнения условий прочности необходимо, чтобы максимальная сила натяжения Q_i^{**} в проводе не превышала допустимого значения

$$Q_i^{**} \leq Q_{i\text{доп}}. \quad (7)$$

Величина натяжения определяется из уравнения равновесия (3), которое в случае обледенелого провода может быть записано в виде

$$\frac{d\bar{Q}}{d\varepsilon} + \bar{F} = 0, \quad (8)$$

где

$$\bar{F}(\varepsilon) = \bar{Q}_1^{(c)}(\varepsilon) + \bar{Q}_x^{(c)}(\varepsilon) + \bar{Q}_y^{(c)}(\varepsilon) - m^{(c)}(\varepsilon) \cdot T_2. \quad (9)$$

Так как функция нагрузки $\bar{F}(\epsilon)$ является случайной функцией, ограниченной по модулю, то возможны такие ее реализации, которые приведут к появлению максимально возможных значений натяжения $Q_1^*(\epsilon_k) = \max Q_1^{(c)}(\epsilon_k)$ в сечении провода с фиксированной координатой $\epsilon = \epsilon_k$. Определение максимально возможных значений $Q_1^*(\epsilon_k)$ во всех точках провода, дает возможность найти гарантированное значение натяжения $Q_1^{**} = \max Q_1^*(\epsilon_k)$ в проводе и провести расчет на прочность. Для вычисления натяжений $Q_1^*(\epsilon_k)$ сначала находятся те "наихудшие" законы изменения функции нагрузки $\bar{F}^*(\epsilon, \epsilon_k)$, при которых будут реализовываться экстремальные условия нагружения.

Представление силы натяжения на n -ном шаге интегрирования в виде интеграла уравнения равновесия (8)

$$\bar{Q}_1^{(n)}(\epsilon) = \bar{Q}_1^{(n)}(0) - \int_0^\epsilon \bar{F}^{(n)}(\eta) \cdot d\eta$$

позволяет с учетом выражений (4) и (5) и малости приращений функций за шаг, записать для натяжения $Q_1^{(n)}(\epsilon_k)$, а затем и приращения радиуса-вектора $\Delta \bar{F}^{(n)}(\epsilon_k)$, следующие выражения

$$Q_1^{(n)}(\epsilon_k) = (\bar{Q}_1^{(n)}(0) \cdot \bar{r}^{(n-1)}(\epsilon_k)) - \int_0^{\epsilon_k} (\bar{F}^{(n)}(\epsilon) \cdot \bar{r}^{(n-1)}(\epsilon_k)) d\epsilon, \quad (10)$$

$$\Delta \bar{F}^{(n)}(\epsilon_k) = \int_0^{\epsilon_k} \frac{1}{\bar{r}_1^{(n-1)}(\epsilon)} \left[\bar{Q}_1^{(n)}(0) \cdot \bar{r}^{(n-1)}(\epsilon) - \bar{r}^{(n-1)}(\epsilon) \right] d\epsilon - \int_0^{\epsilon_k} \frac{1}{\bar{r}_1^{(n-1)}(\epsilon)} \left[\bar{F}^{(n)}(\eta) \cdot \bar{r}^{(n-1)}(\epsilon) - \bar{r}^{(n-1)}(\epsilon) \right] d\eta d\epsilon.$$

Постоянная интегрирования $\bar{Q}_1^{(n)}(0)$ определяется из краевого условия $\Delta \bar{F}^{(n)}(1) = 0$ путем подстановки в него выражения (10). В результате выражение для натяжения в сечении провода с фиксированной координатой принимает вид

$$Q_1^{(n)}(\epsilon_k) = \int_0^1 (\bar{F}^{(n)}(\epsilon) \cdot \bar{r}^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k)) d\epsilon$$

или, с учетом (9) и (2), вид

$$Q_1^{(n)}(\epsilon_k) = \int_0^1 [Q_{10}^{(c)}(\epsilon) Q_1^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) + Q_{x0}^{(c)}(\epsilon) Q_x^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) + Q_{y0}^{(c)}(\epsilon) Q_y^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) + m^{(c)}(\epsilon) Q_m^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k)] d\epsilon, \quad (11)$$

где $\bar{r}^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k)$, $Q_1^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k)$, $Q_x^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k)$, $Q_y^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k)$, $Q_m^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k)$ — известные функции предыдущего $(n-1)$ -го шага интег-

рирования. Натяжение $Q_1^{(n)}(\epsilon_k)$ достигает максимально возможного значения $Q_1^*(\epsilon_k)$ только в том случае, когда подынтегральная функция в выражении (II) имеет максимально возможное значение в каждой точке провода. Из выражений (2) и ограничений (6) следует, что это будет реализовываться при функции нагрузки

$$\bar{F}^*(\epsilon, \epsilon_k) = Q_{10}^* \cos^2 \varphi_a \cdot \text{sign}(\cos \varphi_a) \cdot \bar{E}_1 + Q_{x0}^* \sin \varphi_a \cdot \frac{\bar{V}_{en}}{V_0} + Q_{y0}^* \sin \varphi_a \cdot \frac{[\bar{V}_{en} \bar{E}_1]}{V_0} - m^* \cdot \bar{L}_2, \quad (I2)$$

где

$$Q_{10}^*(\epsilon, \epsilon_k) = \begin{cases} Q_{10\max}^* - \text{при } Q_1^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) \geq 0, \\ Q_{10\min}^* - \text{при } Q_1^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) < 0, \end{cases} \quad Q_{x0}^*(\epsilon, \epsilon_k) = \begin{cases} Q_{x0\max}^* - \text{при } Q_x^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) \geq 0, \\ Q_{x0\min}^* - \text{при } Q_x^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) < 0, \end{cases} \quad (13)$$

$$Q_{y0}^*(\epsilon, \epsilon_k) = \begin{cases} Q_{y0\max}^* - \text{при } Q_y^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) \geq 0, \\ Q_{y0\min}^* - \text{при } Q_y^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) < 0, \end{cases} \quad m^*(\epsilon, \epsilon_k) = \begin{cases} m_{\min}^* - \text{при } Q_m^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) \geq 0, \\ m_{\max}^* - \text{при } Q_m^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) < 0. \end{cases}$$

Интегрирование уравнений равновесия (8) итерационным методом с подстановкой значения $\bar{F}^*(\epsilon, \epsilon_k)$ позволяет найти искомую величину натяжения $Q_1^*(\epsilon_k)$, а также и соответствующую равновесную форму провода.

Подход к определению экстремальных значений отклонений от вертикали точек провода с фиксированной координатой, необходимых для расчета на предотвращение замыканий, аналогичен рассмотренному в случае максимизации натяжения.

Для приращения координаты $\Delta X_3^{(n)}(\epsilon_k) = (\Delta \bar{F}^{(n)}(\epsilon_k) \cdot \bar{L}_3)$ точки осевой линии провода после подстановки в (10) значений $\bar{Q}_{(0)}^{(n)}$ можно записать выражение

$$\Delta X_3^{(n)}(\epsilon_k) = \int_0^l [Q_{10}^{(c)}(\epsilon) \cdot \beta_1^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) + Q_{x0}^{(c)}(\epsilon) \cdot \beta_x^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) + Q_{y0}^{(c)}(\epsilon) \cdot \beta_y^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k) - m^{(c)}(\epsilon) \cdot \beta_m^{(n-1)}(\epsilon, \epsilon_k)] d\epsilon, \quad (I4)$$

аналогичное по структуре ранее полученному (II), и получить выражение для функции $\bar{F}^{**}(\epsilon, \epsilon_k)$, обеспечивающей максимально (или минимально) возможное отклонение провода от вертикали.

В диссертации приведены результаты расчета максимально возможных натяжений, а также экстремальных отклонений провода с гололедным покрытием овалобразной формы при различных параметрах провода и потока. Показано, что учет формы гололедного покрытия приводит к значительному занижению экстремальных зна-

чений натяжения и отклонения. На рис. 2 приведены графики изменения натяжения $Q_1(\epsilon_n)$ в обледенелом проводе, полученные с учетом случайной формы гололедного отложения (кривая 1) и при представлении гололедного отложения в виде цилиндрической муфты (кривая 2).

Четвертая глава посвящена разработке методики расчета динамических перемещений и натяжения в проводе, находящемся в нестационарном воздушном потоке, преимущественно с импульсным изменением скорости.

Уравнение движения провода в безразмерных переменных записывается в виде

$$\frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial \tau^2} + \alpha_g \frac{\partial \vec{r}}{\partial \tau} = \frac{\partial \vec{Q}}{\partial \epsilon} + \vec{Q}_a - \vec{L}_2, \quad (15)$$

где $\vec{r}(\epsilon, \tau)$ — радиус-вектор точек осевой линии провода, τ — безразмерное время, $\vec{Q}$ — сила натяжения, $\vec{Q}_a$ — расчетная аэродинамическая сила, α_g — коэффициент демпфирования, учитывающий гистерезисные явления в проводах.

Движение рассматривается относительно равновесного состояния провода в стационарном потоке. Представление векторов $\vec{r}$, $\vec{Q}$ и $\vec{Q}_a$ в виде суммы статических и $\vec{r}_0$, $\vec{Q}_0$, $\vec{Q}_{a0}$ и динамических $\vec{u}$, $\vec{Q}_g$, $\vec{Q}_{ag}$ составлющих позволило с учетом условий (4) и (5) получить систему двух векторных уравнений движения

$$\vec{L}_1(\epsilon, \tau) = \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial \tau^2} + \alpha_g \frac{\partial \vec{u}}{\partial \tau} - \frac{\partial \vec{Q}_g}{\partial \epsilon} - \vec{Q}_{ag} = 0, \quad (16)$$

$$\vec{L}_2(\epsilon, \tau) = \vec{u}' - (\vec{r}' \cdot \vec{u}') \cdot \vec{r}' - \frac{(\vec{Q}_g \cdot \vec{r}') \cdot \vec{r}' - \vec{Q}_g}{Q_{10}} = 0. \quad (17)$$

Никаких ограничений на векторы перемещений $\vec{u}$ и динамической силы $\vec{Q}_g$ при выводе уравнений (16), (17) не накладывалось.

Получены аналитические выражения для аэродинамических сил, действующих на движущийся провод. Модуль скорости потока рассматривается как функция времени. Принимается, что аэродинамические силы зависят от относительной местной скорости потока

$$\vec{V}_{от} = \gamma_p(\tau) \cdot \vec{V}_0 - \vec{u}.$$

Кроме нормальной $\vec{Q}_n$ и касательной $\vec{Q}_t$, аэродинамических сил, на движущийся провод дополнительно действует подъем-

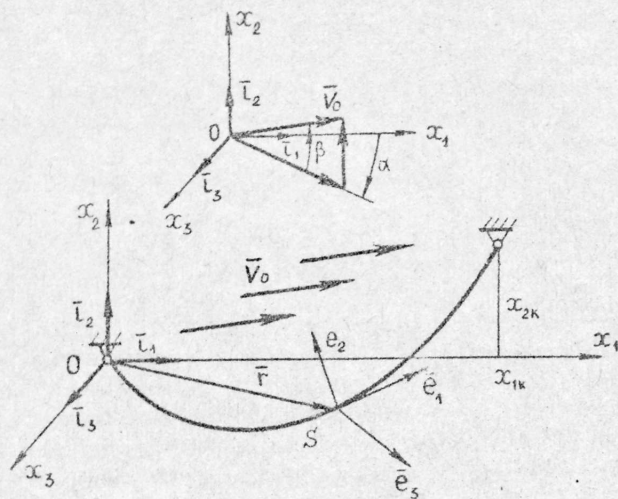


Рис. 1

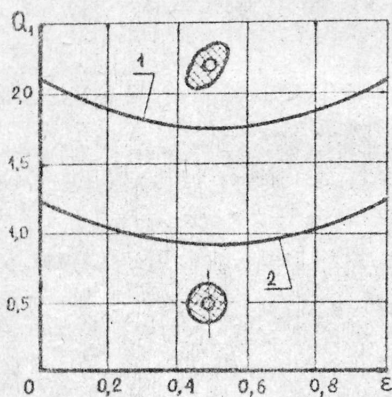


Рис. 2

$d = 10 \text{ мм}$
 $Q_M = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
 $V_0 = 15 \text{ м/с}$
 $\alpha = 90^\circ$
 $\beta = 0^\circ$
 $m_n = 0,2 \text{ кг/м}$
 $x_{1K} = 0,8 \text{ л}$
 $x_{2K} = 0$

ная сила, обусловленная скоростью $\dot{\bar{u}}$ движения стержня, и периодическая сила $\bar{q}_k$, обусловленная срывом вихрей при обтекании провода. Приведенные в диссертации сценки показали, что высокочастотная сила $\bar{q}_k$ не оказывает существенного влияния на движение провода. В результате динамическая сила $\bar{q}_{ог}$ представляется в виде

$$\bar{q}_{ог} = (\bar{q}_1 - \bar{q}_{10}) + (\bar{q}_n - \bar{q}_{n0}) + \bar{q}_k, \quad (18)$$

где члены с индексом "0" соответствуют силам, действующим на провод при его равновесном положении в стационарном потоке со скоростью $\bar{V}$, а члены, соответствующие динамике, определяются выражениями

$$\bar{q}_1 = q_{10} \cdot (V_{от}/V_0) \cdot \cos^2 \varphi_g \cdot \text{sign}(\cos \varphi_g) \cdot \bar{e}_1, \quad (19)$$

$$\bar{q}_n = \gamma_p \cdot q_{n0} \cdot (V_{от}/V_0) \cdot \sin \varphi_g \cdot \bar{V}_{отn} / V_0, \quad (\bar{V}_{отn} = \bar{V}_{от} - (\bar{V}_{от} \cdot \bar{e}_1) \cdot \bar{e}_1),$$

$$\bar{q}_k = \gamma_p \cdot q_{k0} \cdot c_k \cdot (V_{от}/V_0) \cdot \sin \varphi_g \cdot [\bar{V}_{отk} \times \bar{e}_1] / V_0.$$

Для определения собственных частот и форм колебаний решена задача о свободных малых колебаниях провода относительно равновесного состояния. Нелинейные уравнения (16) и (17) при малых $\bar{u}$ и $\Delta \bar{q} = \bar{q}_g$ при $\bar{q}_{ог} = 0$ имеют следующий вид

$$\bar{L}_1(\epsilon, \tau) = \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \tau^2} - \frac{\partial \Delta \bar{q}}{\partial \epsilon} = 0,$$

$$\bar{L}_2(\epsilon, \tau) = \bar{u}' - C_{0i} \Delta \bar{q} = 0, \quad (C_{0ij} = (x'_{i0} x'_{j0} - \delta_{ij}) / q_{10}).$$

Представление решений в виде $\bar{u} = \bar{u}_0 \cdot e^{i\omega\tau}$, $\Delta \bar{q} = \Delta \bar{q}_0 e^{i\omega\tau}$ и применение метода начальных параметров позволило определить собственные частоты и собственные функции.

Решение нелинейных уравнений (16) и (17) ищем в виде

$$\bar{u} = \sum_{j=1}^n f_j(\tau) \cdot \bar{\varphi}_{(\epsilon)}^{(j)}, \quad \bar{q}_g = \sum_{j=1}^n g_j(\tau) \cdot \bar{\psi}_{(\epsilon)}^{(j)}, \quad (20)$$

где $\bar{\varphi}_{(\epsilon)}^{(j)}$, $\bar{\psi}_{(\epsilon)}^{(j)}$ — собственные функции; $f_j(\tau)$, $g_j(\tau)$ — известные функции времени.

Применительно к рассматриваемой задаче принцип возможных перемещений дает две системы уравнений

$$\int_0^1 (\bar{L}_1 \cdot \bar{\Psi}^{(4)}) d\varepsilon = 0, \quad \int_0^1 (\bar{L}_2 \cdot \bar{\Psi}^{(4)}) d\varepsilon = 0, \quad (21)$$

где $\bar{L}_1$ и $\bar{L}_2$ определяются выражениями (16) и (17).

Подстановка (20) в первое уравнение (21) дает возможность записать систему дифференциальных уравнений в полных производных

$$\sum_{j=1}^n (\ddot{f}_j A_{ij} + \dot{f}_j \alpha_{ij} A_{ij} - q_j B_{ij}) = B_i, \quad (22)$$

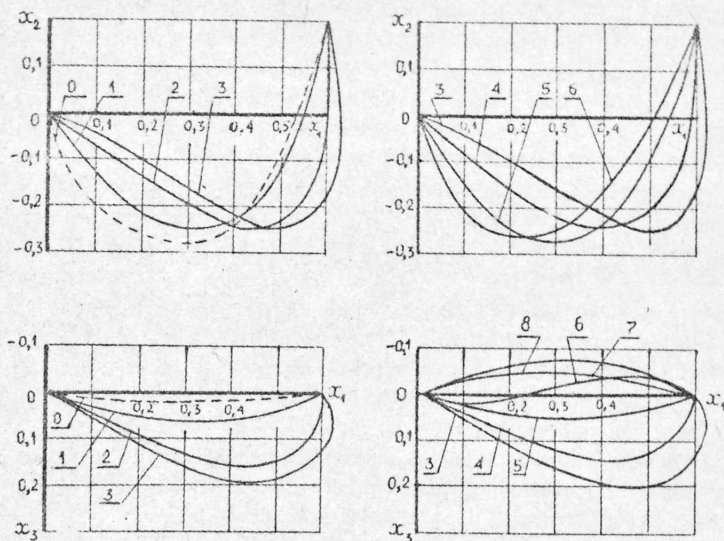
где

$$A_{ij} = \int_0^1 (\bar{\Psi}^{(4)} \bar{\Psi}^{(4)}) d\varepsilon, \quad B_{ij} = \int_0^1 (\bar{\Psi}^{(4)} \bar{\Psi}^{(4)}) d\varepsilon, \quad B_i = \int_0^1 (\bar{q}_{0i} \bar{\Psi}^{(4)}) d\varepsilon.$$

Подстановка (20) во второе уравнение (21) позволяет получить систему алгебраических уравнений, из которой можно выразить функции $q_j(\tau)$ через функции $\dot{f}_j(\tau)$. В результате уравнения (22) будут содержать только неизвестные функции $\dot{f}_j(\tau)$. Уравнения следует интегрировать при соответствующих начальных условиях. При импульсном изменении скорости потока начальные координаты $\dot{f}_j(0) = \dot{f}_{j0}$ принимаются равными нулю, а начальные скорости $\ddot{f}_j(0) = \ddot{f}_{j0}$ определяются из теоремы о изменении количества движения. При переменной скорости потока или при длительном порыве ветра начальные значения $\dot{f}_{j0}$ и $\ddot{f}_{j0}$ принимаются равными нулю.

В работе использовались двух- и трехчленные приближения при интегрировании уравнений движения. Решение проводилось методом Рунге-Кутты с автоматическим выбором шага. В диссертации приведены результаты расчета при различных параметрах линии электропередачи и потока.

На рис. 3 показаны проекции осевой линии провода на вертикальную и горизонтальную плоскости в некоторые последовательные моменты времени. Пунктирной линией показано положение провода в стационарном потоке. На рис. 4 приведены графики изме-



$d=10\text{ mm}; g_M=2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3; V_0=5 \text{ m/c}; \alpha=60^\circ; \beta=45^\circ; \ell=100 \text{ m};$
 $x_{1K}=0,6\ell; x_{2K}=0,2\ell; V_p=25 \text{ m/c}; \Delta t_p=2 \text{ c};$

Рис. 3

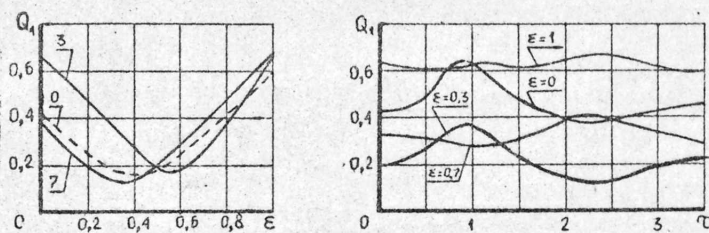


Рис. 4

нения во времени натяжения $Q_*(\varepsilon)$. Подобные результаты позволяют определить максимальные значения натяжения и перемещения точек провода в процессе неустановившегося движения и провести расчет проводов на прочность и надежность.

В пятой главе изложена методика экспериментального определения области возможных значений аэродинамических коэффициентов обледенелых проводов и приведены результаты эксперимента по обдуву моделей обледенения овалообразной формы.

В Приложении приведены исходные тексты программ расчета на алгоритмическом языке Фортран-4 и краткое их описание.

Основные выводы по работе

1. Получены аналитические выражения для аэродинамических сил, действующих на абсолютно гибкий существенно непологий стержень, как круглого, так и некруглого профиля, находящийся в равновесном состоянии в потоке произвольного пространственного направления. Результаты распространены на стержень со случайным профилем. Реализован на ЭВМ алгоритм расчета натяжения и отклонений провода с круглым поперечным сечением. Показано, что наличие вертикальной составляющей скорости потока, что характерно для горных линий электропередачи, оказывает существенное влияние на статические характеристики провода.

2. Разработана методика экспериментального определения области возможных значений аэродинамических коэффициентов для провода со случайной формой поперечного сечения при гололедных отложениях. Для одного из типов формы гололедных покрытий определены максимально и минимально возможные значения аэродинамических коэффициентов силы лобового сопротивления и подъемной силы.

3. Сформулированы задачи статического расчета на прочность и на предотвращение замыканий проводов линий электропередачи в условиях обледенения. Разработан и реализован на ЭВМ алгоритм численного расчета. Показано, что случайная форма гололедного покрытия проводов линий электропередачи может привести к реализации значений натяжения и отклонения провода, значительно превышающих значения, получаемые в предположении круговой формы гололедного покрытия. Проведено численное исследование влияния механических параметров линий электропередачи и потока на

параметры равновесного состояния обледенелого провода в потоке.

4. Получены аналитические выражения для аэродинамических сил, действующих на неполютый абсолютно гибкий стержень круглого поперечного сечения, движущийся в нестационарном потоке произвольного пространственного направления.

5. Разработан и реализован на ЭВМ алгоритм определения частот и форм собственных колебаний провода в потоке произвольного пространственного направления. Показано, что наличие вертикальной составляющей скорости потока приводит к изменению частот и форм собственных колебаний провода. Проведено численное исследование влияния параметров провода и потока на частотные характеристики.

6. Разработан и реализован на ЭВМ алгоритм расчета динамических натяжений и перемещений провода при неустановившихся колебаниях под действием порыва ветра и нестационарного потока. Показано, что импульсная модель нагружения применима при действии кратковременных по сравнению с периодом колебаний провода на первой собственной частоте порывах ветра. Проведено исследование влияния параметров провода и потока на динамические натяжения и перемещения. Показано, что экстремальные значения могут достигаться при обдувании проводов потоком, ориентированным в направлении, отличном от перпендикулярного к плоскости провисания в покоящейся атмосфере.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Григорьянц М.С., Лукьянова В.Н., Светлицкий В.А. Определение формы и натяжения провода (нити), находящегося в потоке воздуха // Расчеты на прочность. - 1981. - Вып. 22.- С.204-207.

2. Григорьянц М.С., Лукьянова В.Н. Определение частот и форм колебаний абсолютно гибкого стержня, нагруженного аэродинамическими силами // Расчеты на прочность. - 1982. - Вып.23.- С.222-226.

3. Лукьянова В.Н. Определение максимальных отклонений абсолютно гибкого стержня, находящегося в потоке воздуха // ИВУЗ. Машиностроение. - 1983. - № II. - С. 25-29.

4. Лукьянова В.Н., Светлицкий В.А. Статика абсолютно гибких стержней с плохообтекаемым профилем в потоке // Расчеты на прочность. - 1984. - Вып. 25. - С. 252-259.

5. Графский И.Ю., Казакевич М.И., Лукьянова В.Н. Экспериментальное определение аэродинамических сил, действующих на стержень с плохообтекаемым сечением // ИВУЗ. Машиностроение. -1985. № 1. - С. 17-20.

6. Лукьянова В.Н., Светлицкий В.А. Нелинейные задачи динамики абсолютно гибких стержней // Расчеты на прочность.-1985. - Вып.26. - С.196-204.

7. Лукьянова В.Н. Определение осевого усилия и перемещений при внезапном нагружении // ИВУЗ. Машиностроение.-1985. - № 1. - С.6-9.

8. Светлицкий В.А., Лукьянова В.Н. Нелинейные колебания абсолютно гибких стержней при внезапно приложенных внешних нагрузках // Тезисы докладов Всесоюзной конференции по вибрационной технике. - Телави, 1984. - С.224.

