



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫЗЫВАЕМЫХ ВЕТРОМ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ. РАСЧЕТЫ ЗАЩИТЫ РАСЩЕПЛЕННОЙ ФАЗЫ ОТ СУБКОЛЕБАНИЙ

Александр А. Виноградов, Иосиф И. Сергей
Белорусский национальный Технический Университет (БНТУ)

Реферат – Воздушные ЛЭП сверхвысокого напряжения (ВЛ СВН), как уникальные инженерные сооружения, отличаются обилием гибких дорогостоящих и весьма протяженных элементов – проводов, открытых всем атмосферным воздействиям. Для защиты провода от усталостных разрушений применяются распорки-гасители. При выборе их параметров и расположения в пролетах ВЛ СВН по условию минимизации ущерба от вызываемых ветром колебаний, авторами разработана и применена комплексная математическая модель, воспроизводящая колебания проводов при ветре и обладающая широкими возможностями. Приведены примеры расчетов.

Ключевые слова – Воздушная линия, Субколебания, Усталостная прочность

MATHEMATICAL MODELING OF THE CONDUCTORS LOW FREQUENCY WIND-INDUCED VIBRATIONS. CALCULATIONS OF BUNDLED CONDUCTORS PROTECTION AGAINST SUBSPAN VIBRATIONS

Vinogradov Alexander A., Sergey Iosif I.
Belarusian National Technical University (BNTU)

Abstract - Overhead Extra High Voltage Transmission Lines (OHTL EHV) as unique engineering structures, are distinguished by the abundance of expensive and highly flexible extended elements - conductors, that are open to all weather conditions. To protect the conductors from fatigue failures, spacer-dampers are used. With the aim to choose their parameters and in-span locations along OHTL EHV due to minimizing the conductors damages caused by wind, the authors developed and implemented a comprehensive mathematical model that simulates in-wind conductors' vibrations and has other ample opportunities. Examples of calculations.

Keywords – Overhead Line, Subspan vibrations, Fatigue

MODELAREA MATEMATICĂ A OSCILAȚILOR DE JOASĂ FRECVENȚĂ A CONDUCTORILOR LEA INDUSE DE VÂNT. CALCULE DE PROTECȚIE A FAZEI SCINDATE ÎMPOTRIVA SUBOSCILAȚILOR

Vinogradov Alexander A. Vinogradov, Serghei Iosif I.
Universitatea Tehnică Națională din Bielorusia

Rezumat – Liniile electrice aeriene de foarte înaltă tensiune (LEA FÎT) ca construcție inginerească unică se disting prin abundența de elemente scumpe și foarte extinse - conductoare, care sunt deschise pentru toate condițiile meteorologice. Pentru a proteja conductoarele de deteriorările datorită oboselei se utilizează , spacer-amortizoarele. La alegerea parametrilor lor și amplasarea în deschideri LEA de TFÎ conform condițiilor de minimizare a daunelor cauzate de oscilațiile vântului, autorii au elaborat și utilizat modelul matematic complex ce redă oscilația firelor la vânturi și posedă posibilități extinse. Sunt aduse exemple de calcul.

Cuvinte cheie – LEA, suboscilații, rezistența de oboseală.

1. НЕОБХОДИМОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ СУБКОЛЕБАНИЙ И ВЫБОР ТИПА МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТОВ

По окончании строительства и начала эксплуатации воздушных ЛЭП 1150 кВ, на них стали наблюдаться ряд вызываемых ветром колебаний (главным образом субколебаний), приводивших к серьезным последствиям (поломки внутрифазных дистанционных распорок, повреждения проводов). Поэтому вскоре было принято решение о массовой (и весьма затратной)

установке дополнительных распорок повышенной прочности во всех пролетах по длине линий (т.е. на протяжении нескольких тысяч км), чтобы уменьшить длины подпролетов и снизить аварийность. Поиск же рациональных технических решений был начат с изыскания наиболее адекватной явлению математической модели.

Для исследования субколебаний – явления, имеющего существенную нелинейность [1,2,3], авторами было признано целесообразным создать численную модель субколебаний путем дополнения и модификации уже

имевшейся в БНТУ модели движения гибких проводов при коротких замыканиях [4].

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для описания динамики каждого из проводов-составляющих расщепленной фазы (рис. 1), используется следующее исходное гиперболическое уравнение второго порядка:

$$\frac{\partial T}{\partial s} \cdot \frac{\partial \bar{R}}{\partial s} + T \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial s^2} + \bar{P} = \rho \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2} \quad (1)$$

где: s – координата вдоль провода, t – время (эти два параметра используются в качестве независимых переменных), T – модуль тяжения; \bar{R} – радиус-вектор, который определяет расположение рассматриваемого сегмента провода; ρ – масса провода на единицу длины; \bar{P} – векторная сумма всех сил, приложенных к проводу на единицу длины. Каждый провод рассматривается как гибкая, однородная, растяжимая нить. Принятое уравнение позволяет учесть реальные свойства проводов, т. е. их несовершенную упругость и (при необходимости) тепловое удлинение.

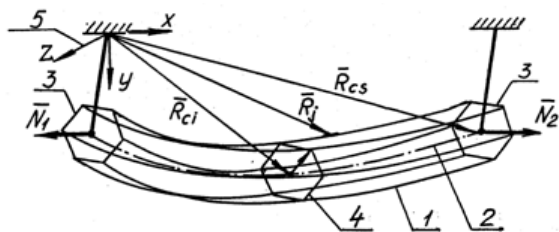


Рис. 1. Расчетная модель пролета воздушной ЛЭП: 1 – расщепленная фаза, 2 – ось пучка, 3 – точки подвески, 4 – распорки, 5 – 3D-координаты

В более общем плане, данное уравнение позволило, меняя воздействующие силы, построить целый ряд важных математических моделей [5].

Использование приведенного выше уравнения для построения математической модели и ряд вычислительных экспериментов показали, что постановка и решение трехмерной задачи являются избыточными при моделировании субколебаний. Учитывая, что колебания тяжения невелики, а стрела провеса обычно не превышает 5% длины пролета, исходные уравнения к настоящему времени сведены к виду:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= T(t) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + P_y, \\ \rho \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} &= T(t) \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + P_z, \end{aligned} \quad (2)$$

где P_y, P_z – проекции вектора суммарной нагрузки, приложенной к единице длины провода, на оси y и z соответственно; y и z – проекции координат точки провода на те же оси. Удлинение провода во всем пролете может быть определено через тяжение, принимаемое при расчете постоянным. Теперь, чтобы получить в модели субколебания, необходимо ввести

в расчеты ветровую нагрузку P_z , принимая также во внимание изменения величины сил, действующих на второй по потоку (подветренный) провод. Этот учет осуществляется посредством введения аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления C_x и подъемной силы C_z , которые изменяются по всему объему аэродинамического следа между наветренным и подветренным проводами. Численно эти коэффициенты определялись многими исследователями; в модели используются данные Diana [6].

Предполагается, что вектор скорости ветра перпендикулярен оси пролета. Направление силы лобового сопротивления совпадает с направлением движения провода относительно воздушного потока. Подъемная сила приложена к подветренному проводу в направлении, перпендикулярном к относительной скорости его движения в потоке. С учетом сказанного, проекции сил на оси координат определяются по следующим соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} F_{wy} &= 0.5 \rho_a D C_{x0} V_w V_{wy}, \\ F_{wz} &= 0.5 \rho_a D C_{x0} V_w V_{wz}, \\ F_{ly} &= 0.5 \rho_a D V_c (V_{ly} C_x + V_{lz} C_y), \\ F_{lz} &= 0.5 \rho_a D V_c (V_{lz} C_x + V_{ly} C_y) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Где V_{wy}, V_{wz} – проекции \bar{V}_w (вектора скорости наветренного провода относительно воздушного потока) на координатные оси OY и OZ ; соответственно, V_{ly}, V_{lz} – проекции \bar{V}_l (вектора скорости подветренного провода относительно воздушного потока).

На основе кратко изложенного метода представления уравнений движения провода, названного векторно-параметрическим, и численного интегрирования выведенных для ансамбля проводов систем дифференциальных уравнений второго порядка, построена трехмерная математическая модель расщепленной фазы. Рассмотрение ведется в пределах одного пролета, движение лучей распорок задает граничные условия для проводов в подпролетах.

3. ПРИМЕРЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СУБКОЛЕБАНИЙ

3.1 Первоначальные пружинно-стержневая и пружинная расчетные модели распорок

На рис. 2а представлены модель пятилучевой распорки и исходные данные для проведения расчетов субколебаний. На рис. 2б даны определенные в результате численного эксперимента траектории движения проводов в середине второго подпролета. Показанные на рис. 2 результаты расчетов процесса субколебаний были одними из первых исследований, выполненных авторами, и первыми, полученными в нашей стране.

На раннем этапе работ, расчеты требовали значительного, до нескольких часов, времени работы «больших» компьютеров. Возможности исследования поведения распорок различных конструкций оказались невелики. Поэтому работа по совершенствованию пакета программ была продолжена.

На втором этапе численного моделирования была разработана пружинная модель распорки-гасителя, показанная на рис. 3а. Эта модель позволила поставить вопрос о влиянии радиальной подвижности лучей на амплитуды субколебаний. Результаты расчета амплитуд для двух отношений радиальной и тангенциальной жесткости показаны на рис. 3б и 3в. Можно видеть, что амплитуды субколебаний несколько уменьшаются с увеличением радиальной подвижности лучей (исследовалось отношение жесткости радиальных связей α_{rad} даН/м, к жесткости тангенциальных, α_{tang} , в пределах $\alpha_{rad}/\alpha_{tang} = 1 \div 10$); этот эффект невелик, но он использован в одной из авторских конструкций [7] демпферного узла распорок (рис. 4).

Для снижения времени расчетов, уравнения движения были модифицированы – провода расщепленной фазы было решено рассматривать как струну, которая не растягивается под действием колебаний тяжения. Аэродинамические характеристики подветренного провода при модификации программы стали вводиться в расчет в аналитической форме [8]. Указанные изменения привели к значительному сокращению времени счета: даже на персональных компьютерах типовая модельная задача стала считаться не более 30 – 40 минут. Несмотря на значительное упрощение, результаты расчетов по обеим версиям программы давали практически одинаковые результаты, а устойчивость работы программы повысилась, расширился диапазон доступных для численных экспериментов исходных данных.

3.2 Модельное представление современных распорок-гасителей

Одна из современных конструкций распорки-гасителя с несимметричным расположением лучей, ее модельное представление и расположение по длине пролета показаны на рис. 5. Усложнение расчетной схемы и введение дополнительных уравнений, описывающих все происходящие в конструкции деформации, привели и к усложнению поиска статического положения всей расщепленной фазы перед началом колебательного процесса для $t = 0$. Расчет статического положения организован с использованием последовательных вложенных друг в друга итераций, он занимает теперь заметную часть всего времени счета задачи.

Наши расчеты подтвердили, что рекомендуемая разработчиком схема монтажа распорок-гасителей (рис. 5,в) действительно эффективна. В расчетах модельных задач с обычным и шахматным расположением распорок амплитуды субколебаний снижались для рекомендуемой схемы монтажа, при прочих равных условиях, примерно на 20 %.

3.3 Бенчмаркинг-оценки амплитуд субколебаний в рамках серии сопоставительных расчетов, организованных Рабочей Группой B2-06 CIGRE

Этот пример для расчетов заимствован из отчета института *Institut de recherche d'Hydro-Quebec (IREQ)* для фирмы **DAMP S.p.a.** (Италия). Отчет был предоставлен профессором Миланского Университета

Дж. Диана. Благодаря приведенным в отчете результатам полевых измерений, имеется возможность провести сопоставление данных расчёта и натуральных субколебаний.

Исходные данные для расчета. Общая длина пролета составляла 366 м (подпролеты 35-56-64-57-65-55-35 м), диаметр проводов 33,32 мм, тяжение $T = 29,1$ кН×4.

Четырехлучевые распорки-гасители схематически показаны на рис. 6а, вместе с их параметрами. Здесь же на рис 6б показаны данные расчёта для всех семи подпролётов (круглые точки – наветренный провод, ромбы – подветренный провод). Для каждого подпролёта приведены амплитуды колебаний для скорости ветра 10; 12; 14; 16 м/с. Данные измерений на полигоне IREQ показаны в виде увеличенных точек той же формы. Хотя индивидуальные амплитуды отличаются, общая колебательная активность пролета по результатам измерений примерно соответствует расчету. Важно отметить также, что при расчетах в ряде случаев имело место возбуждение одновременно колебаний в подпролетах как таковых (субколебаний) и колебаний фазы в целом (твердотельных колебаний), что целиком соответствует современному представлению об инициации этих форм колебаний [2,7].

3.4 Адаптация программы к расчетам ресурсной стойкости проводов при субколебаниях

Для прогнозных оценок ресурсной стойкости проводов по рассчитанным амплитудам субколебаний, необходимо иметь более устойчивый и быстрый запуск процесса колебаний. Это удалось обеспечить путем наложения, на начальном этапе численного эксперимента, дополнительного ветрового импульса, амплитуду и длительность которого можно было произвольно изменять. Для примера, на осциллограмме для тестового случая IREQ, рис. 6в, показаны горизонтальные перемещения проводов, м, от времени, сек, в 3-м подпролете ($l = 64$ м). Скорость ветра 12 м/с, жесткость лучей 25 даН·м/рад.

Начиная с отметки времени 30 с, субколебания носят установившийся характер. Эта часть осциллограмм и используется для оценки срока жизни проводов по известным методикам [2].

3.5 Путь к выбору оптимальных длин подпролетов

Высокая чувствительность созданной расчетной модели к длинам подпролетов позволила поставить и начать решение общей задачи оптимизации. На основании построенных процедур расчета субколебаний представляется возможным организовать расчеты оптимальных длин подпролетов для расстановки распорок-гасителей по длине пролетов воздушных ЛЭП СВН. На рис. 7 показано, насколько эффективным инструментом защиты проводов может быть рационально проведенный выбор длин подпролетов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставлена и решена задача создания комплексной математической модели для численных расчетов

субколебаний проводов расщепленных фаз воздушных ЛЭП СВН.

Модель находит применение при разработке конструкций распорок-гасителей, а также для сравнительных оценок эффективности тех или иных схем их расстановки в пролетах ВЛ.

Показана, на примере бенчмаркинг-оценки (в рамках Рабочей Группы В2-06 CIGRE), неплохая адекватность разработанной модели наблюдаемым в полевых условиях колебаниям.

Модель снабжена блоком прогнозной оценки срока службы проводов при произвольно заданном расположении распорок-гасителей любой конструкции по длине пролета. Имеется реальная перспектива дополнения созданной модели блоком оптимизации расстановки распорок в пролетах воздушной ЛЭП по условию, например, максимального срока службы проводов расщепленной фазы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.Ja. Liberman, "Subspan Oscillations and Conductor Galloping on HV Overhead Lines", in *Proceedings of the 1974 CIGRE Session*, CIGRE, 1974, Report 22-09.
- [2] *Wind-Induced Conductor Motion: Transmission Line Reference Book*, EPRI, Palo Alto; Jacson: Gilbert, 1979. – 244 pp.
- [3] M.I. Streljuk, I.I. Serguey, A.A. Vinogradov, V.A. Krasnov, "Dynamic Loads in UHV Transmission Line Spacers at Subspan Vibrations", *Energ. Project Constr.*, 1986, n° 1, pp. 68 – 71 (in Russian)
- [4] И.И. Сергей, М.И. Стрелюк, *Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях. Теория и вычислительный эксперимент* – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.
- [5] Сергей И.И., Виноградов А.А., Климкович П.И. Вычислительный эксперимент для различных видов динамики проводов электроустановок энергосистем, *Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования*, вып.3, Конф. 5-9 апреля 2004 г., Минск, Изд-во ПЭИПК, С-Петербург, 2004. –с. 226-235
- [6] Кларен, Диана,Николини. Колебания проводов в расщепленных фазах. – *Воздушные линии электропередачи (СИГРЭ-74)*.- М.: Энергия, 1977. – с. 36-67.
- [7] I.I. Serguey, H.K. Lee, A.A. Vinogradov, M.C. Shin, "Study of the UHV TL Bundled Conductors Dynamics in Spacer-Dampers Designing *Energ. Project Constr.*, 1995, n° 5, pp. 66 – 71 (in Russian)
- [8] G. Diana, M. Gasparetto, G. Digiacomo, P. Nicolini, "Analytical Method for Computing Subspan Oscillation. Analytical and Experimental Results", *IEEE Conf. Pap. C 74 493 3*, N.Y., 1974. – 9 p.

Сведения об авторах

Александр А. Виноградов, окончил Московский Энергетический ин-т в 1959 г., инж-электрик, к.т.н., консультант; Проблемы колебаний проводов ВЛ, применение спиральной арматуры, защита линий от пляски

Иосиф И. Сергей, окончил Белорусский Политехнический ин-т в 1974 г., д.т.н., проф., зав. кафедрой Электр. Станций БНТУ Применение математических методов при исследовании динамики проводов электроустановок энергосистем