



Analysis of Extending Strains in the Insulated Conductors of Power Transmission Lines

Alexey TADZHIBAЕV, Yury SOLOVYOV

Petersburg power engineering institute of professional development, Saint-Petersburg, Russia;
e-mail: iecc@peipk.spb.ru

Abstract

An analysis was carried out concerning the changes of the technical status of insulated power transmission line conductors affected by extending strain factors. Dependences were obtained which allow to determine the values of maximum forces acting upon conductor insulation. Approaches were substantiated which allow to reduce the probability of flaws emergence in insulated conductors caused by icing and wind loads.

Keywords: overhead power transmission lines, insulated conductors, extending strain in insulation.

Анализ растягивающих напряжений на изолированные провода линий электропередачи

Алексей И. ТАДЖИБАЕВ, Юрий В. СОЛОВЬЕВ

Исследования показывают, что перенос моделей, описывающих поведение неизолированных проводов, на линии с изолированными проводами приводят к неточностям определения нагрузок, приводящих к разрушению [1]. Опыт эксплуатации выявил существенную деформацию вследствие изгиба в области крепления защищенных проводов и большие по сравнению с традиционными моделями напряжения. Поэтому необходимы исследования, которые бы более корректно учитывали особенности изолированных проводов при оценке технического состояния линий электропередачи. Одной из составляющих воздействий на техническое состояние являются растягивающие напряжения, анализу которых и посвящена работа.

Существенные погрешности расчетных значений коэффициента лобового сопротивления защищенного провода по отношению к экспериментальным привели к необходимости проведения дополнительного исследования. В частности, анализ результатов численного и натурного экспериментов позволил определить причину возникновения столь существенных расхождений: установка элементов линейной арматуры на провода меняет аэродинамические показатели исследуемых проводов, что затруднительно учесть в модели. С одной стороны, это приводит к невозможности создания универсальной совершенной модели изменения состояния проводов, которая бы точно учитывала все существующие на сегодняшний день конструкции элементов линейной арматуры. С другой стороны, не представляется возможным сформулировать критерий предельной устойчивости элементов линейной арматуры к износу при ветровых нагрузках, так как необходимо учитывать их инерционные характеристики. Установка элементов линейной арматуры на защищенные провода приводит к существенному изменению их аэродинамических показателей вследствие изменения как условий обтекания проводов ветровым потоком, так и характера их вибрации из-за

изменения массы и жесткости системы, а также коэффициента аэродинамического сопротивления проводов, что и отражено на рис. 1.

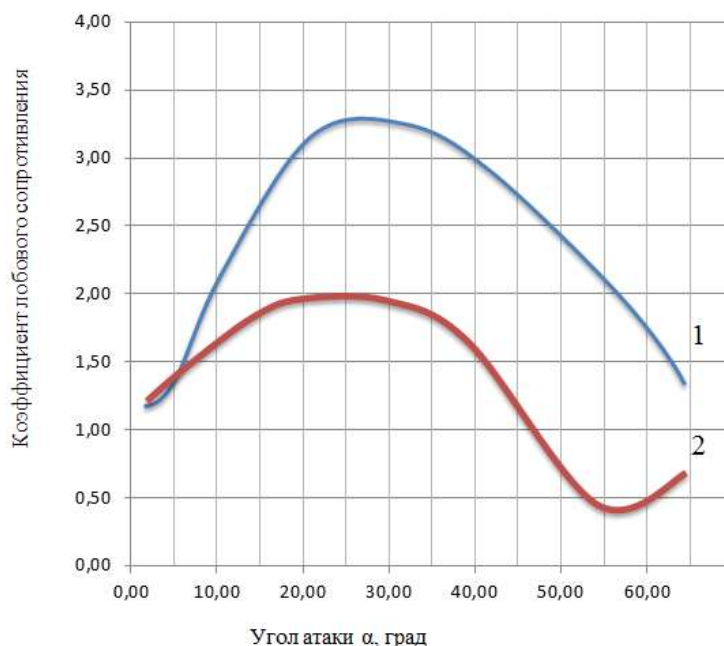


Рис. 1. Результаты экспериментов по определению коэффициента лобового сопротивления:
1 – результаты натурального эксперимента;
2 – результаты численного эксперимента на модели

Коэффициент лобового сопротивления защищенного провода при натуральных испытаниях определялся из условия равновесия моментов от аэродинамической и весовой нагрузок относительно точки крепления провода по измеренному углу наклона. При изгибе провода с учетом реальных тяжений провода и веса присоединяемой арматуры нормальная составляющая скорости набегающего ветрового потока меняется вдоль длины вследствие изменения угла α . В результате этого в каждой точке провода с координатой l соответствующее значение числа Струхала определяется согласно соотношению

$$Sh(l) = \frac{Sh}{\sqrt{1 + (ctg(\alpha) + l \cdot D)^2}},$$

$$D = \frac{(c_{\phi} + c_T) \cdot \rho \cdot V^2 \cdot d}{2 \cdot T_0 \cdot G},$$

$$G = \left(\frac{c_{\phi}}{c_T} + 1\right) \cdot \left(\frac{c_{\phi}}{c_T} + \frac{1}{\sin(\alpha_0)}\right)^{-1},$$

где c_{ϕ} и c_T — соответственно коэффициенты сопротивления формы и трения защищенного провода при обтекании ветром, что зависит от шероховатости его поверхности, которую невозможно учесть в расчетной модели, так как она будет отличаться для защищенных проводов одного типа и одной партии. Для испытуемого защищенного провода сечением 70 мм^2 принято $c_T = 0,055$, $c_{\phi} = 1,84$. Изменение числа $Sh(l)$ по длине защищенного провода означает, что в условиях вибрации происходит некоторое возрастание кажущегося диаметра, а значит, амплитуды колебаний провода. Результаты натуральных исследований позволили получить соотношение для определения коэффициента лобового сопротивления вибрирующего защищенного провода при резонансных колебаниях:

$$c_{хв} = c_{х0} \cdot \left[1 + a \cdot \left(\frac{\rho \cdot d^2}{\mu + \rho_T} \right)^{1+\beta} \right],$$

где $c_{х0} = 1,2$ – коэффициент аэродинамического сопротивления защищенного провода при отсутствии колебаний, $a = 28$, $\beta = 1,2$.

Из полученных результатов следует вывод о том, что в реальных условиях сам процесс вибраций защищенного провода будет вносить соответствующие изменения в условия обтекания провода воздушным потоком. Эту сложную связь невозможно отразить в расчетной модели. Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о том, что в условиях опасных вибраций защищенных проводов, когда амплитуда колебаний достигает максимально возможных значений, при расчетах нагрузок некорректно применять значение $c_{х0} = 1,2$ [2].

В результате проведенного натурного эксперимента определен характер пульсации тяжения защищенного провода при различных скоростях ветрового потока в условиях вибрации. В частности, для защищенного провода сечением 70 мм^2 получена связь между изменением тяжения и коэффициента аэродинамического сопротивления при различных скоростях ветра: одновременное возрастание коэффициента $c_{хв}$ и силы натяжения объясняется ростом пульсаций натяжения, когда удлинение провода происходит за счет роста амплитуд вибраций. При этом следует отметить, что возрастание силы натяжения с ростом амплитуд вибрации является признаком целостности защитной оболочки провода при испытаниях, отсутствия нарушения адгезии защитной оболочки провода. Однако следует учитывать, что воздействие гололедно-ветровых нагрузок в условиях эксплуатации с учетом срока службы защищенных проводов будет приводить к накоплению усталостных изгибных напряжений в материале защитной оболочки провода, снижению его прочностных характеристик, которые являются показателями для оценки остаточного ресурса провода. Усталостные изгибные напряжения в узлах крепления провода будут приводить к износу и нарушению целостности защитной оболочки при возникновении напряженных очагов, трещин разрушения и т.д. Рост трещины разрушения, в свою очередь, будет сопровождаться нарушением адгезии защитной оболочки к жиле провода и последующему ее отрыву с поверхности жилы.

Переменные напряжения, вызываемые вибрацией защищенных проводов в потоке, связаны не только с их изгибом, но и с удлинением при колебаниях. Натурные эксперименты позволили учесть как свойства материалов провода, так и механические свойства используемой при испытаниях арматуры для крепления провода:

$$\sigma_{pu} = \frac{\pi \cdot A_n \cdot E \cdot d}{2 \cdot \lambda_n \cdot \chi} \sqrt{\frac{T}{E_* \cdot I}},$$

$$\lambda_n = \frac{L}{n}$$

где E – модуль упругости материала токопроводящей несущей жилы (для испытуемого провода $E = 6,3 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2$); I – момент инерции площади сечения; E_* – приведенный модуль упругости, не совпадающий с модулем упругости материала жилы, а учитывающий механические свойства адгезионного соединения на границе «металлическая жила – полимерная защитная оболочка»; E_*I – изгибная жесткость защищенного провода, зависящая от силы трения между отдельными проволоками, температуры на границе раздела «металлическая жила – полимерная защитная оболочка» и возрастающая с ростом тяжений и амплитуд вибраций; χ – коэффициент, учитывающий механические свойства линейной арматуры; A_n – амплитуда вибрации; λ_n – длина полуволны n -й формы колебаний, L – длина пролета.

Выводы

Исследования показали, что максимальные пульсационные растягивающие напряжения возникают в проводах при их поперечной вибрации за счет растяжения. Анализ на модели позволил приблизительно оценить величину максимальных растягивающих усилий:

$$\sigma_{pp} \approx E \cdot \frac{\pi^2}{8\lambda_n} \cdot A_n^2$$

Таким образом, растягивающие усилия будут пропорциональны квадрату амплитуды вибрации или диаметру защищенного провода в четвертой степени.

Полученные соотношения подтверждают тот факт, что защищенные провода будут испытывать большие растягивающие напряжения по сравнению с неизолированными проводами, что требует учета при эксплуатации.

Литература

1. Tadzhibaev A., Solovyev Y. The influence of power network performance and service conditions on insulation ageing, Proceedings of the 5th International scientific symposium Elektroenergetika-2009, Stara Lesna, Slovakia, September 23–25, 2009.
2. Соловьев Ю.В., Таджибаев А.И. Метод учета аэродинамических свойств проводов при оценке технического состояния линий электропередачи // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 61: Проблемы исследования и обеспечения надежности либерализованных систем энергетики/Отв. ред. Н.И. Воропай, А.Д. Тевяшев. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. – 31–35 с.