

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗЕРНИСТОЙ ИЗМОРОЗИ НА СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Фоминцев Л. А.

научный руководитель канд. техн. наук Кудрявцев И.В.

*Сибирский федеральный университет*

Воздушные линии электропередач (ЛЭП) сооружаются на открытой местности и подвержены различным атмосферным воздействиям, которые в зависимости от географического расположения проявляются в разных степенях. Условия работы ЛЭП во многом зависят от природных климатических условий, поэтому они обязательно учитываются при их проектировании. В настоящей работе проведено исследование влияния гололедно-изморозевых образований на частоты собственных колебаний ЛЭП.

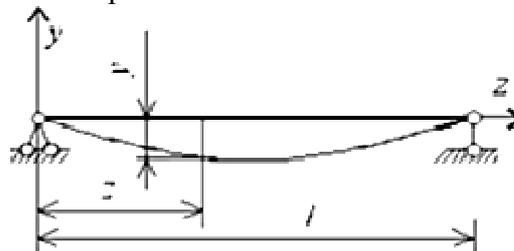


Рисунок 1 – Расчетная схема провода

Стрела провеса проводов действующих в настоящее время ЛЭП, как правило, не превышает 5% длины пролета, при этом длина провода и протяженность пролета отличаются не более чем на 1%. Поэтому для упрощения расчетной схемы в дальнейших рассуждениях начальным прогибом проводов пренебрегаем, а длины пролета и проводов считаем равными.

В качестве расчетной модели проводов ЛЭП примем балку, закреплённую на шарнирных опорах (рис.1). Дифференциальное уравнение колебаний (Бидерман В.Л. «Теория механических колебаний»), такой балки, с учетом зависимостей теории изгиба, имеет вид:

$$EJ \frac{\partial^4 w(z, t)}{\partial z^4} + \rho F \frac{\partial^2 w(z, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

где  $w(z, t)$  – прогиб балки,  $E$  – модуль Юнга,  $J$  – момент инерции поперечного сечения балки,  $\rho$  – плотность материала балки,  $F$  – площадь поперечного сечения балки.

Выражение, определяющее первую собственную частоту колебания для шарнирно опертого стержня, имеет вид:

$$\omega_i = \lambda_i^2 \sqrt{\frac{EJ}{M \cdot l^3}}, \quad (2)$$

где  $i$  – номер собственной частоты колебаний,  $M$  – полная масса провода,  $\lambda_i$  – коэффициент формы колебаний.

Для определения форм собственных колебаний для уравнения (1) применим метод разложения в ряд Фурье, в результате получим функцию прогибов в виде бесконечного ряда:

$$w_i(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \left[ a_i \cos \left( \sqrt{\frac{m_z \pi^2 i^2}{EJ}} \frac{\pi^2 i^2}{l^2} t \right) + b_i \sin \left( \sqrt{\frac{m_z \pi^2 i^2}{EJ}} \frac{\pi^2 i^2}{l^2} t \right) \right] \cdot \sin \left( \frac{\pi i}{l} z \right)$$

где  $i$  – номер гармоники,  $m_z = \rho F$  – удельная масса провода.

Значение коэффициентов  $a_i$  и  $b_i$  определяются исходя из условий закрепления: для шарнирных опор условиями будут являться отсутствие прогибов и изгибающих моментов в шарнирных опорах по краям балки:

$$y(0) = \frac{\partial^2 y(0, t)}{\partial z^2} = 0; \quad y(l) = \frac{\partial^2 y(l, t)}{\partial z^2} = 0.$$

В этом случае коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  будут равны

$$a_i = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \cdot \sin\left(\frac{\pi i}{l} z\right) dx; \quad b_i = \frac{2l}{\pi^2 i^2} \sqrt{\frac{m_z}{EJ}} \int_0^l g(x) \cdot \sin\left(\frac{\pi i}{l} z\right) dx.$$

В процессе гололедно-изморозевых образований будет изменяться линейная плотность  $\rho$ , сечение провода  $F$ , момент инерции  $J$ . Примем, что кристаллы льда не соединены друг с другом, что соответствует зернистым изморозным отложениям, и не оказывают влияние на модуль упругости самого провода.

Форма гололедно-изморозевых образований на проводе имеет различные очертания, наиболее распространенные случаи показаны на рис.2.

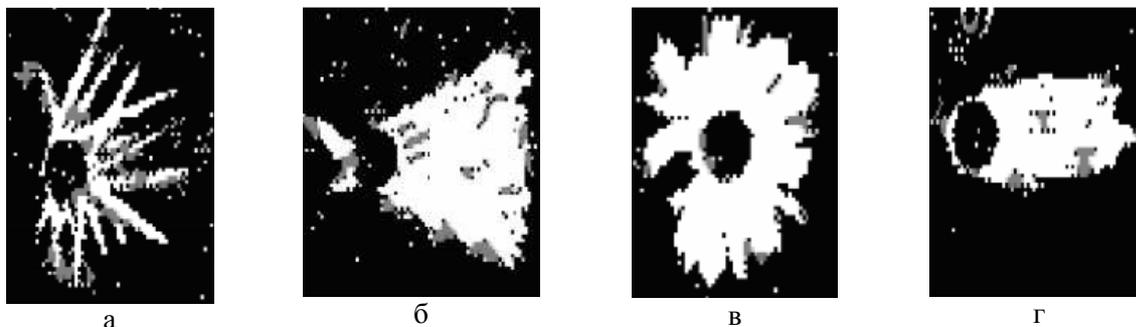


Рисунок 2 – Зернистая изморозь  
а) иглообразная; б, в) веерообразная; г) пластинчатая

Учет неравномерности распределения изморози по сечению провода при его большой протяженности не будет оказывать существенного влияния. Поэтому для упрощения расчетной схемы, примем, что провод будет иметь форму изморози в виде равномерного отложения по всей его поверхности (рис.3). Значение толщины изморози  $b$  зависит от номинального напряжения провода и климатического района.

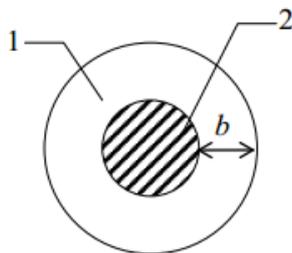


Рисунок 3. Модель отложений изморози на проводах  
1 – отложения изморози; 2 – провод

Для расчетов примем район г.Красноярска, в котором нормативная толщина стенки гололеда для линий 6-330 кВ составляет 5 мм. В качестве линии ЛЭП возьмем данные провода марки АС120 ГОСТ 839-80 площадь сечения  $120/19 \text{ мм}^2$  с массой провода  $471 \text{ кг/км}$  и модулем упругости  $E = 8,25 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ .

Определим значение массы изморози на проводе длиной 1 км. Моделируя изморозь в виде полого цилиндра, его масса будет равна:

$$m_l = \pi(D - b) \cdot b \cdot l \cdot \rho_l$$

где  $D$  – внешний диаметр для выбранного провода 25.2мм,  $b$  – толщина стенки 5мм,  $l$  – длина проводника 1000 м.,  $\rho_l$  – плотность изморози примем равную плотности снега при -20 С равной 200кг/м<sup>2</sup>.

При подстановке данных получим значение для массы изморози  $m_l = 64$  кг/км. Таким образом, изморозь толщиной 5мм увеличит начальную массу провода длиной 1 км с 471кг до 535 кг или на ~12%. Момент инерции провода считаем при этом неизменным, поскольку сопротивлением изморози изгибу пренебрегаем.

Тогда значения первых трех собственных частот будет равно:

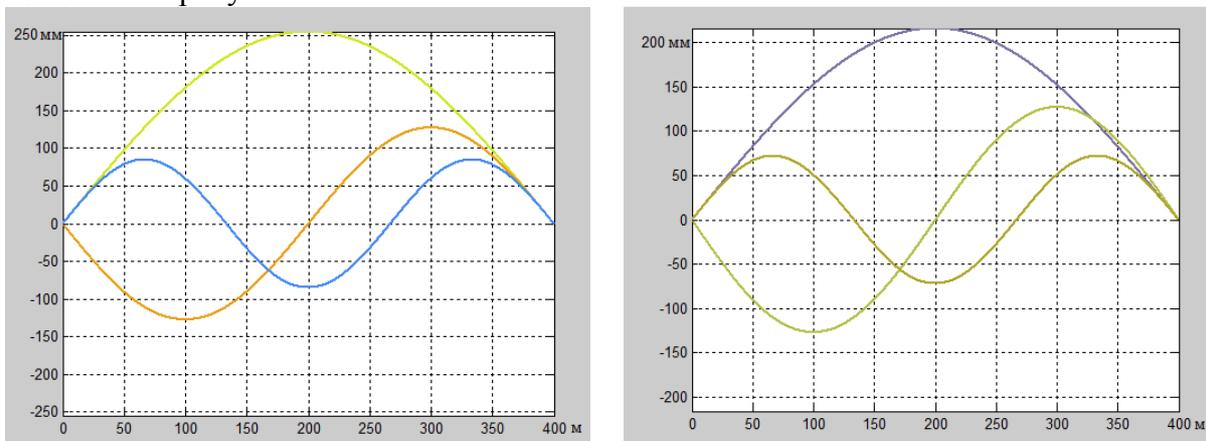
- для провода без изморози: 0,00021; 0,00085; 0,0019 Гц
- для провода с изморозью: 0,0002; 0,0008; 0,0018 Гц.

Результаты расчетов показывают, что изморозь несколько изменяет значения собственных частот колебаний провода в сторону снижения за счет увеличения их массы согласно выражению (2). При сравнении значений собственных частот для провода без изморози и с ней можно определить, что согласно аналитической зависимости (2) при увеличении массы провода на 12% частота уменьшится на 5,5%.

Моделирование форм собственных колебаний провода для двух случаев (с изморозью и без нее) проведем в среде MATLAB, при следующих начальных условиях:

$$\begin{cases} f(x) = x, x \in [0, 1000] \\ g(x) = 1 \text{ если } x \in [0.2, 0.3] \end{cases}$$

Результаты расчета собственных колебаний провода для первых трех гармоник показаны на рисунке 4.



а) отсутствие изморози  
 б) наличие изморози  
 Рисунок 4 –Результаты расчета собственных колебаний провода

Из рисунка 4 видно, что рассмотренное изменение массы незначительно повлияло на форму собственных колебаний системы. Такой результат следует ожидать, поскольку из теории колебаний известно, что форма собственных колебаний определяется только геометрией конструкции и ее жесткостью.

#### Заключение

По существующим руководствам, изморозь считается только статической нагрузкой на ЛЭП. Проведенные исследования показывают, что учет изморози влияет на собственные частоты колебаний. Поэтому следует ожидать, что в случае вынужденных колебаниях проводов изморозь изменит амплитуду колебаний системы за счет роста массы провода. Следовательно, необходимо проверить эффективность существующих устройств гашения колебаний с учетом изморози.