

Расчет совместных колебаний проводов и опор участка воздушной линии электропередачи при действии периодической ветровой нагрузки

ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ



В данной статье представлены результаты расчетов совместных колебаний проводов и опор для участка линии электропередачи с опорами типа П110-3. Опоры представляются редуцированными конечно-элементными моделями с сохранением внутренней динамики в диапазоне нескольких низших собственных частот и включаются в нелинейную динамику стрессовой системы, моделирующую провода, гирлянды изоляторов и грозотрос. После расчета отклика всей системы на боковой ветровой поток найденные амплитуды перемещений применяются к полноразмерной КЭ-модели опоры и находится распределение напряжений по всей конструкции.

Кравченко А.Я.,
инженер 1 категории сектора по методологии управления электросетевыми активами ПАО «ТРК»

Красноруцкий Д.А.,
к.т.н., доцент кафедры ПЛА НГТУ

Левин В.Е.,
д.т.н., профессор кафедры ПЛА НГТУ

Роденко С.В.,
директор ООО «Институт электроэнергетики НГТУ»

В практике эксплуатации воздушных линий электропередачи известны случаи полной потери несущей способности металлических опор, когда они ломаются либо примерно на трети своей высоты, либо в районе траверс. В качестве причин таких разрушения опор ВЛ указываются экстремальные ветровые нагрузки, налипание снега и образование гололеда, что приводит к увеличению статических и динамических нагрузок на опоры и провода, что в свою очередь снижает ресурс конструкции.

В ПАО «ТРК» в рамках выполнения программы инновационного развития ООО «Институт электроэнергетики НГТУ» выполнил НИОКР «Проведение расчетно-экспериментального исследования колебательных процессов ВЛ на основе анализа динамического взаимодействия проводов и опор с разработкой измерительного комплекса». Основанием для данной работы явилось повреждение в результате кратковременных аномальных погодных условий (резкое похолодание с +10°C до -10°C с усилением ветра до 20 м/с) в сентябре 2010 года 19 металлических опор ВЛ 110 кВ на севере Томской

Ключевые слова:
воздушные линии электропередачи, совместные колебания проводов и опор, динамическое взаимодействие, расчет напряжений в опоре

Keywords:
????? ?????????? ????????????

области. Одной из решенных задач НИОКР была разработка ПО для расчета динамических характеристик пролета существующих ВЛ для прогнозирования возможной потери устойчивости опор как при нормативных ветровых нагрузках, так и в результате воздействия сверхнормативных в предшествующие временные периоды.

В рамках данной работы выполнено первое приближение в исследовании проблемы совместных колебаний проводов и опор ВЛ, что позволило сделать определенные выводы. Разработана программа для моделирования совместных колебаний проводов и опор. Проведены расчеты модельных задач с целью определить наличие или отсутствие резонансных явлений в системе «провода — опоры ВЛ».

В данной статье приведены некоторые результаты выполненных расчетов, сделаны предварительные выводы о необходимости учета при проектировании ВЛ совместных колебаний проводов и опор, а именно — необходимо учитывать, что на опору могут действовать дополнительные циклические напряжения, возникающие при колебаниях проводов, которые не учитываются при расчете долговечности опоры ВЛ, а следовательно, могут приводить к их преждевременному разрушению.

Для расчета совместных колебаний проводов и опор сначала строятся КЭ-модели самих опор, затем выбираются точки, в которых прикрепляются гирлянды изоляторов и грозотрос. Эти точки являются так называемыми узлами динамической конденсации, то есть вся внутренняя динамика модели опоры приводится к этим узлам в рамках выбранного диапазона частот (в данной статье выбраны первые три низших тона собственных колебаний). Производится редуцирование КЭ-модели [1–3], и вместо большой КЭ-модели [4–6] опоры получаем «маленькую» (матрицы 18×18), число степеней свободы которой складывается из степеней свободы выбранных узлов конденсации и количества «оставленных» тонов собственных колебаний. Эта «маленькая» (редуцированная) модель и используется при расчете совместных колебаний с проводами [7–11].

Для тестирования разработанной программы была взята следующая расчетная схема. Участок ВЛ, состоящий из нескольких редуцированных по методу [3] конечно-элементных моделей опор П110-3 (модель построена по методике [4–6]). Расстояние между опорами — 370 м. Тяжение проводов выбрано таким, чтобы расстояние до земли было примерно 6 м, а именно: длины каждого провода, включая грозотрос, взяты 370,9435 м, при этом стрела провеса проводов составила 12,2 м, грозотроса — 12,5 м в силу разной жесткости на растяжение.

Провода марки АС-150 моделировались стержнями [7–9] со следующими характеристиками: площадь поперечного сечения стального стержня — $9,852 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ (алюминиевые витки не учитывались в жесткостях на растяжение и изгиб, но учитывались в погонном весе), модуль упругости стали — $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, плотность — $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$, коэффициент Пуассона — $\nu = 0,3$, жесткость на растяжение — $EF = 2,069 \cdot 10^7 \text{ Н}$, изгибная жесткость — $EJ = 162,204 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$, погонная плотность — $\rho F = 0,554 \text{ кг/м}$, аэродинамический характерный диаметр — 16,8 мм. Для гирлянды использовались такие же характеристики, кроме погонной плотности — $\rho F_r = 30 \text{ кг/м}$. Грозотрос

марки С-50 моделировался стержнями со следующими характеристиками: площадь стального поперечного сечения — $48,64 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, жесткость на растяжение — $EF = 1,021 \cdot 10^7 \text{ Н}$, изгибная жесткость — $EJ = 39,536 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$, погонная плотность — $\rho F = 0,382 \text{ кг/м}$, аэродинамический характерный диаметр — 9,1 мм.

На провода действует сила тяжести (ускорение свободного падения $9,82 \text{ м/с}^2$) и ветровая нагрузка. Начало и конец линии моделируется жестким закреплением проводов (неподвижная опора), а между пролетами находятся модели опор. Точки крепления гирлянд подвижны, так как они являются узлами конденсации редуцированных КЭ-моделей опор.

Рассмотрим расчетную схему с тремя пролетами по 370 метров, с двумя опорами П110-3. Нагрузим такую модель равномерным боковым потоком воздуха в виде обрезаемых осью абсцисс синусоид с амплитудой 30 м/с (рисунок 1) с разной частотой. В результате расчета получены все параметры деформирования модели, такие как перемещения, скорости, ускорения всех точек стержневой системы, внутренние усилия и моменты в каждый момент времени.

На рисунках 2–4 приведены графики боковых колебаний первой точки крепления (на осталь-

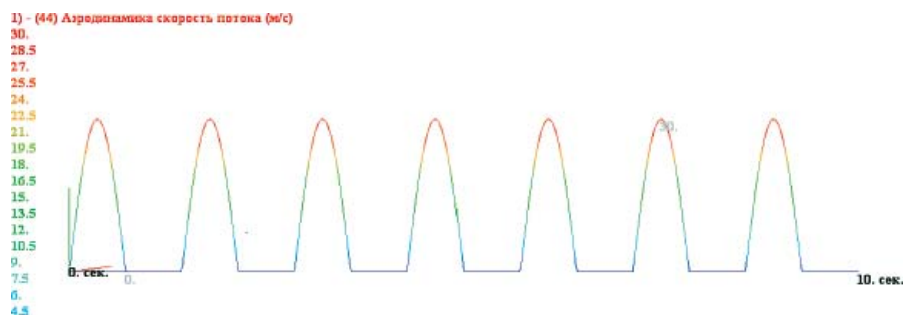


Рис. 1. График изменения скорости воздушного потока (частота 0,7 Гц)

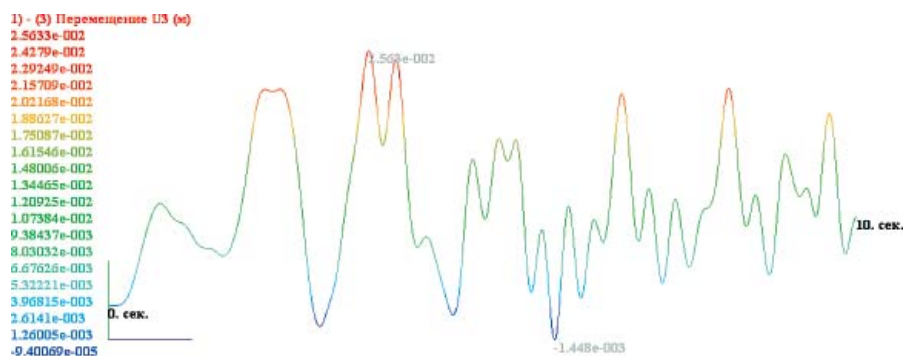


Рис. 2. Боковое перемещение точки крепления гирлянды к опоре (0,7 Гц)

ных точках наблюдается похожая картина).

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что при периодическом ветровом возбуждении опоры могут раскачиваться и колебаться на своей собственной частоте (2,95 Гц для опоры П110-3 без проводов) не только при совпадении внешней частоты вынуждающего воздействия, но и при кратных ей. Так, например, при частоте ветра 1,5 Гц (рисунок 3) происходит раскачка опор до амплитуд, сравнимых с амплитудами при действии ветра с резонансной частотой опоры (примерно 2,9 Гц, рисунок 4). Такие колебания приводят к дополнительным периодическим (циклическим) напряжениям, возникающим в опоре. Рассчитаем эти напряжения.

В результате расчета совместных нелинейных колебаний проводов и редуцированных КЭ-моделей опор имеются зависимости от времени всех перемещений точек крепления гирлянд изоляторов и грозотроса к опорам (рисунок 5).

Полученные перемещения (отмеченные крестиком на рисунке 5) прикладываются к полноразмерной модели опоры, чтобы получить картину напряжений и деформаций во всех элементах конструкции и найти наиболее напряженные из них.

На рисунке 6 представлена в увеличенном масштабе деформированная конфигурация полноразмерной КЭ-модели для выбранной точки по времени.

На рисунке 7 представлена фотография разрушенной опоры типа П110-3. Разрушение произошло в районе стыка нижнего и среднего пояса, что совпадает с местом положения наибольших напряжений в модели на рисунке 8, эти места обозначены аббревиатурами МХ и МН (места наибольших и наименьших по знаку напряжений соответственно). Из рисунка 8 видно, что напряжения в конструкции — порядка 39 МПа, на одной стороне — они растягивающие, на другой стороне — сжимающие. Опасность таких напряжений для конструкции

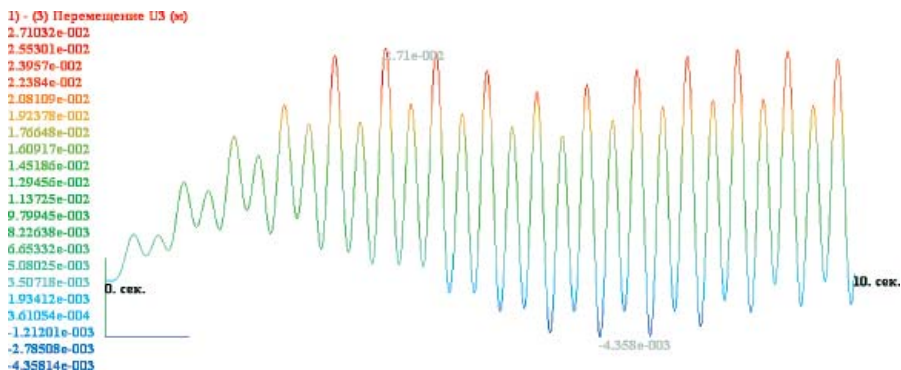


Рис. 3. Боковое перемещение точки крепления гирлянды к опоре (1,5 Гц)

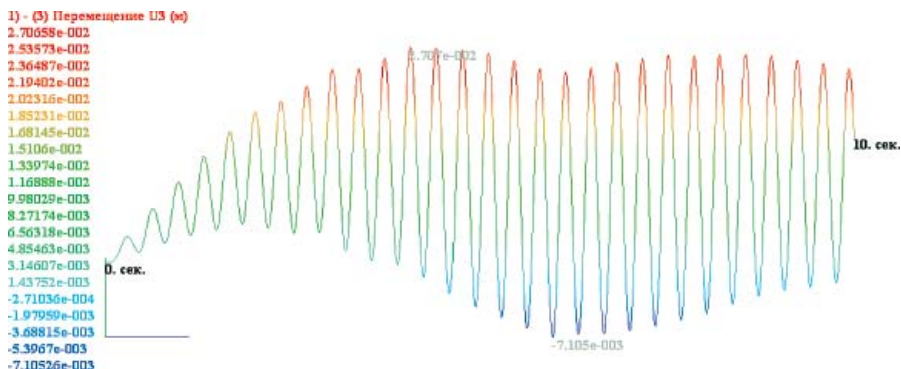


Рис. 4. Боковое перемещение точки крепления гирлянды к опоре (2,9 Гц)

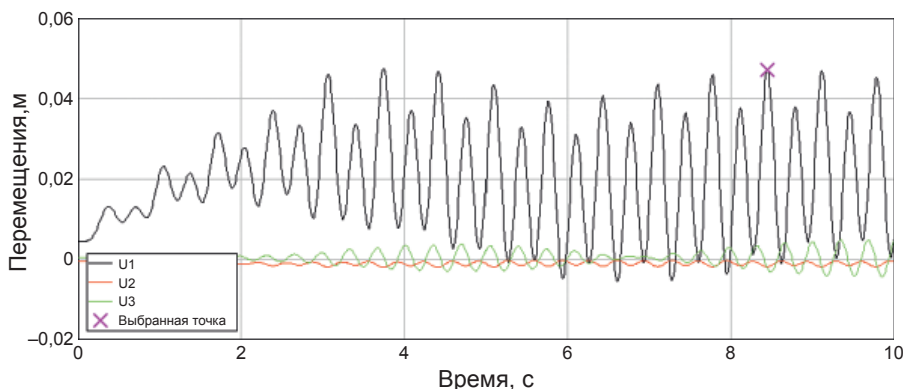


Рис. 5. Проекция перемещения точки крепления грозотроса (1,5 Гц)

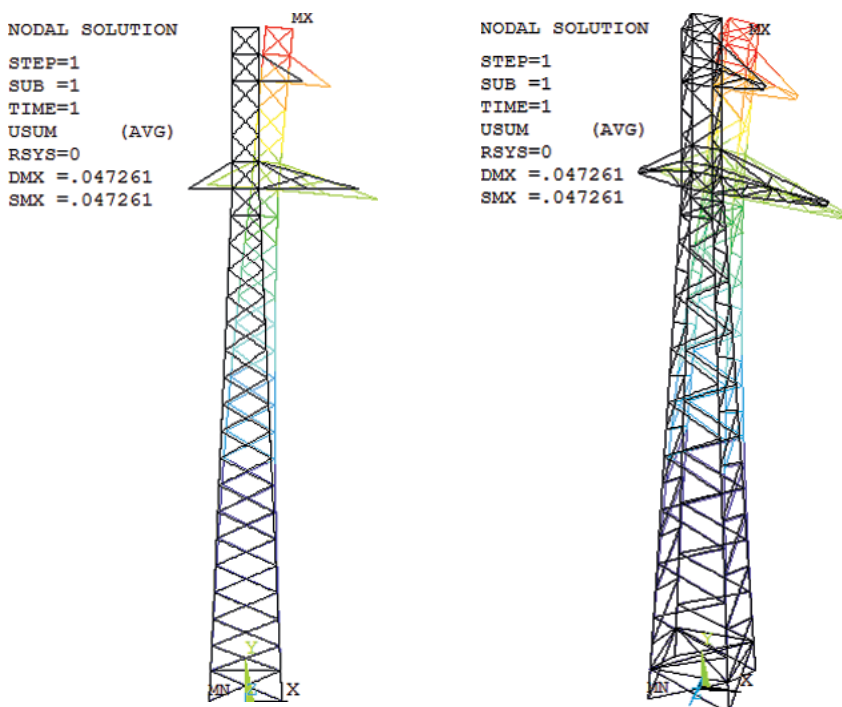


Рис. 6. Перемещения (масштаб увеличен) (1,5 Гц)



Рис. 7. Разрушение опор в районе стыка нижнего и среднего пояса

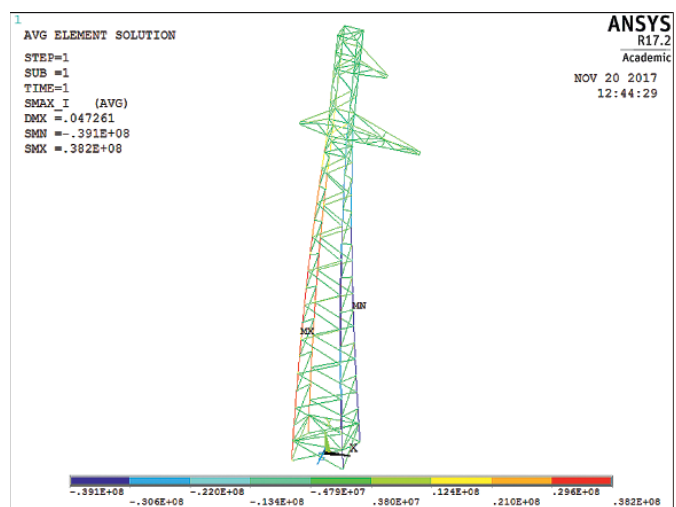
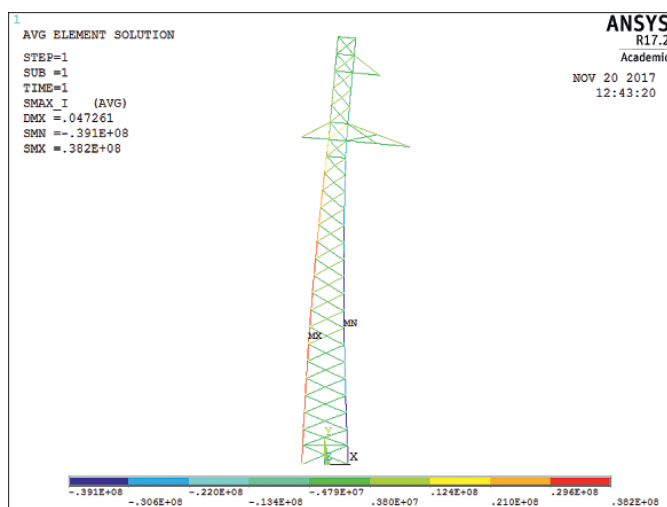


Рис. 8. Распределение напряжений (1,5 Гц)

представляется в том, что они циклические, и при длительном периодическом воздействии они могут приводить к накоплению внутренних повреждений в материале (усталость металла).

Рассмотрим другое ветровое возбуждение: график изменения скорости ветра имеет П-образный вид (меандр), изменение скорости потока происходит скачками от 5 до 25 м/с. На рисунке 9 представлен один из рассмотренных графиков изменения скорости ветра. Был проведен расчет совместных колебаний проводов и опор. На рисунке 10 представлены перемещения точки крепления грозотроса к опоре.

Рассмотрим расчет напряжений для случая изменения скорости ветра в виде меандра с частотой одна восьмая от резонансной частоты опоры 2,95 Гц (0,36875 Гц). На рисунке 11 пред-

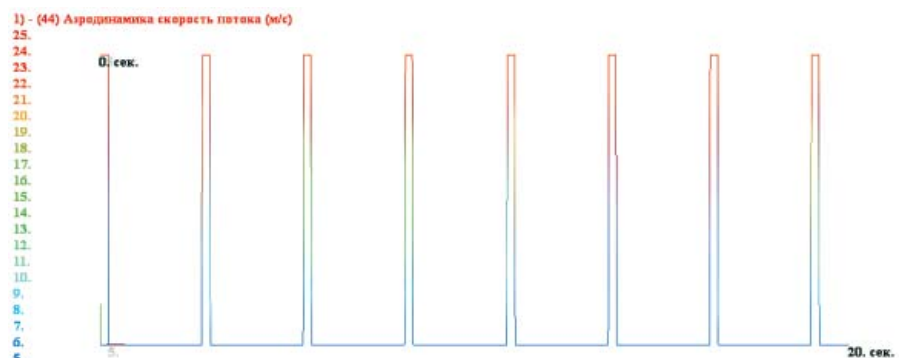


Рис. 9. График изменения скорости воздушного потока (0,36875 Гц)

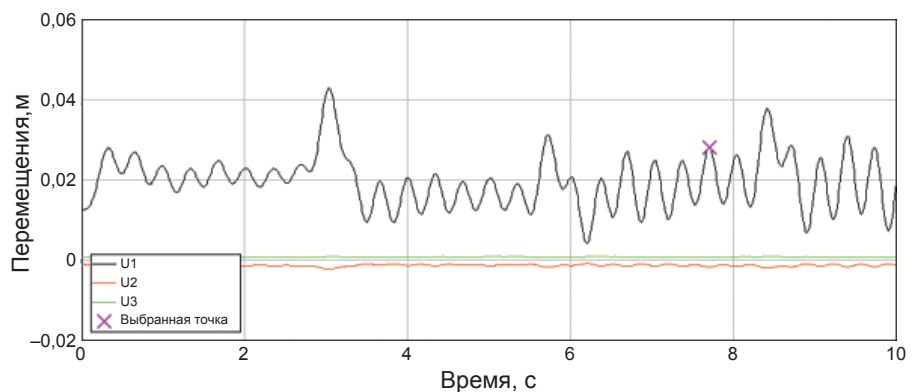


Рис. 10. Перемещения точки крепления грозотроса («Меандр» 0,369 Гц)

ставлено распределение напряжений по КЭ-модели. Из рисунка видно, что максимальные циклические напряжения возникают в районе траверсы, что, по всей видимости, приводит к потере несущей способности изломом в этом месте (рисунок 12).

По совокупности проделанной работы можно заключить, что на данном этапе работы создана работоспособная программа для расчета совместных нелинейных колебаний проводов и опор ВЛ (участка электросети) при действии ветровой нагрузки. Разработана и протестирована методика создания и редуцирования КЭ-моделей опор для их использования в расчете колебаний с проводами и гирляндами изоляторов. Результаты рассчитанных перемещений точек конденсации (узлов крепления гирлянд изоляторов к опоре) используются для определения напряжений во всей конструкции опоры по ее полно-размерной КЭ-модели. Это позволяет определять наиболее нагруженные элементы и выяснять уровень возникающих напряжений при определенных скоростях и периодичностях ветра.

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о наличии резонансных явлений в системе «провода — опоры» при периодическом внешнем ветровом на-

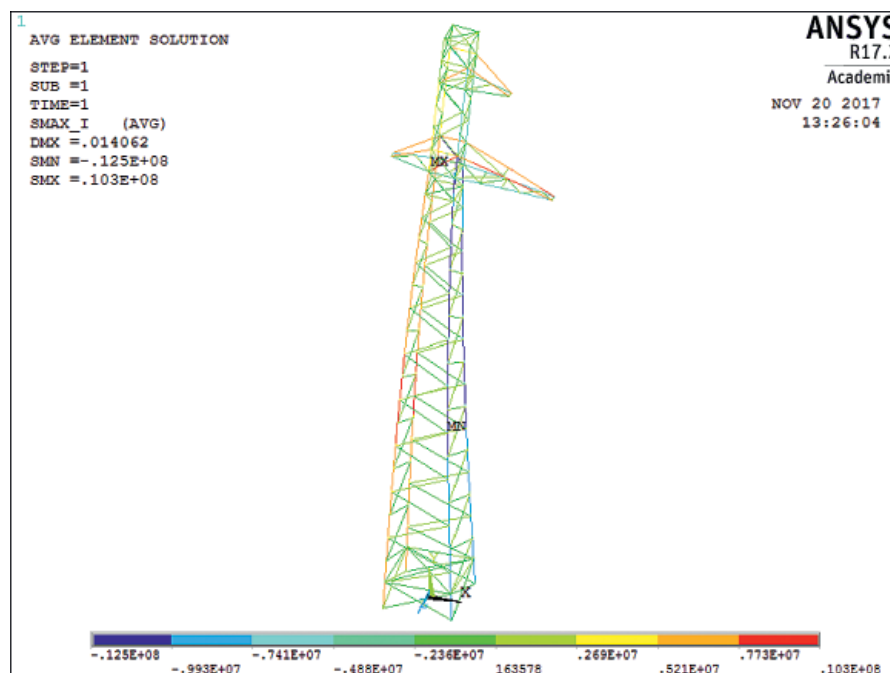


Рис. 11. Распределение напряжений («Меандр» 0.369Гц)

гружении с частотами, кратными частотам собственных колебаний опор. Возникающие напряжения при этом не имеют больших и опасных значений, однако их периодичность/циклическость может приводить к эффекту накопления внутренних повреждений в материале, более известному как усталость металла. Поэтому рекомендуется проводить расчеты участков ВЛ, особенно если линия находится определенных ландшафтных условиях с перепадами высот, где возможны срывы воз-

душных потоков и, как следствие, циклические ветровые нагрузки, приводящие к неучитываемым до сих пор колебаниям опор. При этом надо рассчитывать уровень циклических напряжений и оценивать, как они повлияют на ресурс, возможно, усиливать конструкцию в местах максимальных циклических напряжений или ставить демпфирующие устройства на провода. Для более точных рекомендаций требуются дополнительные исследования с помощью разработанных программ. 



Рис. 12. Разрушение опор в районе траверсы

ЛИТЕРАТУРА

1. Craig R.R. Coupling of substructures for dynamic analysis / R.R. Jr. Craig, M.C.C. Bampton // AIAA Journal, 1968. Vol. 6, № 7, pp. 1313–1319.
2. Craig R.R. Jr. Coupling of substructures for dynamic analysis: an overview // AIAA Dynamics Specialists Conference. Atlanta, 2000.

3. Herting D.N. A General Purpose, Multi-stage, Component Modal Synthesis Method. Finite Elements in Analysis and Design. 1985. Vol. 1, pp. 153–164.
4. Кожевников А.Н., Жукова Ю.А., Красноруцкий Д.А., Левин В.Е. Построение редуцированной КЭ-модели методами покомпонентного модального синтеза в среде ANSYS. Наука Промышленность Оборона: труды XVI Всероссийской научно-технической конференции. Под редакцией К.А. Матвеева. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. С. 418–422.
5. Кожевников А.Н., Красноруцкий Д.А., Левин В.Е. Автоматизированное построение геометрии металлических опор ЛЭП для расчета их статического и динамического деформирования в среде ANSYS / Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций: сб. материалов 3-й Всерос. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения академика Ю.Н. Работнова, Новосибирск, 26–30 мая 2014 г. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. С. 47–48.
6. Кожевников А.Н., Красноруцкий Д.А., Левин В.Е. Разработка программы автоматизированного построения конечно-элементных моделей металлических опор линий электропередач / Доклады 3-й Всероссийской конференции «Проблемы оптимального проектирования сооружений», Новосибирск, 15–17 апреля, 2014 г. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2014. С. 205–207.
7. Пустовой Н.В., Левин В.Е. Механика деформирования криволинейных стержней : монография. Новосибирск, изд. НГТУ, 2008. 208 с.
8. Пустовой Н.В. Алгоритм численного решения нелинейной краевой задачи динамического деформирования тонкого стержня = The numerical algorithm for solving nonlinear boundary problem of thin rod's dynamic deformations / Н.В. Пустовой, В.Е. Левин, Д.А. Красноруцкий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика = PNRPU Mechanics Bulletin, 2014, № 2. С. 168–199.
9. Красноруцкий Д. А. Методика расчета механики систем связанных тонких упругих стержней по дифференциальной модели = The method for analyzing mechanics of thin elastic rod systems using the differential approach // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика = PNRPU Mechanics Bulletin, 2016, № 2. С. 69–88.
10. Пустовой Н.В., Левин В.Е., Красноруцкий Д.А., Кожевников А.Н. Методика расчета колебаний участка воздушных ЛЭП с помощью редуцированной КЭ-модели металлических опор и дифференциальной модели системы стержней / 11-й Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики : аннотации докл., Казань, 20–24 авг. 2015 г. Казань: Изд-во Акад. наук Респ. Татарстан, 2015. С. 234.
11. Kozhevnikov A.N., Krasnorutskiy D.A., Levin V.E., Pustovoy N.V. The method of analyzing vibrations of air power transmission lines using reduced finite-element models of pylons and differential model of thin elastic rod system / 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016) : proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. Novosibirsk: NSTU, 2016. Pt. 2, pp. 200–203.



**Изоляторы «ЮМЭК» –
отечественная продукция
мирового уровня!**

Изоляторы линейные подвесные с гидрофобным покрытием



- гидрофобное покрытие уменьшает загрязняемость поверхности изолятора;
- резко снижается вероятность перекрытия гирлянды даже в условиях сильных загрязнений;
- исключается необходимость чистки и мойки гирлянд изоляторов, значительно снижаются затраты на эксплуатацию линий электропередачи;
- изоляторы приобретают стойкость к актам вандализма (расстрелам);
- срок службы не менее 45 лет.

 **ЮМЭК ГРУПП**

г. Южноуральск, ул. Заводская, 3
тел.: +7 (351) 344-05-33 e-mail: info@ug74.ru www.umek.su