

«Вибрационная диагностика железобетонных опор воздушных линий электропередачи»

Роденко С.В., Тарасов А.Г., Целебровский Ю.В.

Институт электроэнергетики Новосибирского государственного технического университета (ИЭЭ НГТУ).

Описан метод оценки прочностных характеристик железобетонных опор в условиях эксплуатации, основанный на измерении собственной частоты свободных колебаний опоры. Эта частота является интегральным параметром каждой опоры, характеризующим её несущую способность. Изложены методика и результаты измерений собственной частоты колебаний железобетонных опор в натуральных условиях трассы ВЛ переносным комплексом ЛЭПтон. По значению предельной прочности бетона, установленной действующим нормативом для центрифугированных стоек, определено браковочное значение собственной частоты железобетонных опор.

Вибрационная диагностика зданий и сооружений широко применяется при эксплуатации промышленных и гражданских зданий и таких ответственных сооружений, как, например, мосты. Она является обязательным элементом мониторинга технического состояния зданий и сооружений [1]. Наиболее информативным параметром вибрационной диагностики является частота собственных колебаний конструкции. В ГОСТе [2] предписано определять период колебаний – величину, обратную частоте. Для определения значений периода этим стандартом предписано регистрировать собственные колебания сооружения, вызванные естественным динамическим природно-техногенным фоном, поэтому в процессе измерений дополнительных воздействий на конструкцию не производят.

Воздушная линия электропередачи (ВЛ) является весьма распространенным сооружением электроэнергетики и её надёжность в целом зависит от надёжности трёх главных компонентов ВЛ – опорного (опоры и фундаменты), проводникового (провода и грозозащитные тросы) и изоляционного (линейные изоляторы и арматура). Все эти компоненты подвержены воздействию окружающей среды (природно-климатических факторов), что вызывает коррозию и старение металла, бетона и изоляционных материалов. В результате механические (и электрические) характеристики названных конструктивных элементов снижаются, что приводит к авариям на ВЛ и перерывам в энергоснабжении потребителей электроэнергии. Многие из действующих в России ВЛ высокого напряжения уже превысили амортизационный срок службы (50 лет) и поэтому контроль состояния их компонентов является наиболее актуальной задачей эксплуатации этих сооружений.

В настоящей статье рассматривается опорный компонент ВЛ. В стандарте ПАО «Россети» «Объём и нормы испытаний электрооборудования» [3] эксплуатационный контроль опорного компонента (раздел 36) включает в себя в основном визуальный осмотр опор и фундаментов, а также метрические измерения их положения и размеров выявленных дефектов. Из инструментальных методов предписывается только «неразрушающий контроль марки бетона железобетонных стоек склерометром и ультразвуковыми приборами» (п.36.3). Аналогичный характер обследований предписывается и «Типовой инструкцией по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35-800 кВ» [4], включающей лишь дополнительное (уже устаревшее) указание (п.5.3.2): «Предельная прочность бетона определяется с помощью эталонного молотка Кашкарова, специальных приборов». В более позднем документе [5] (Методические указания по оценке технического состояния ВЛ и остаточного ресурса компонентов ВЛ) опоры предписывается обследовать

лишь визуально, используя при этом только измерения геометрических размеров элементов и положения опоры в целом.

Несмотря на требования ГОСТ 31937-2011 [1] вибрационные обследования опорного компонента (опор и фундаментов) стандартами ПАО «Россети» не предписаны.

Вибрационная диагностика опор ВЛ (как и других сооружений) позволяет интегрально оценить механическое состояние опоры, включая закрепление в грунте, отсутствие или разрушение отдельных элементов, надёжность механических связей между элементами и т.п. Вибрационная диагностика может стать существенным дополнением к визуальным и приборным методам оценки состояния опоры.

В Институте электроэнергетики НГТУ был разработан измерительный комплекс «ЛЭПтон» для оценки технического состояния опор линий электропередачи на основе измерения их собственных частот. Использование в «ЛЭПтоне» высокочувствительных датчиков позволяет измерять собственные частоты опор при возбуждении опоры слабым ветром, вибрацией проводов или грунта. Первоначально метод разрабатывался для решетчатых металлических опор [6]. Проведённые исследования на действующих линиях электропередачи [7] показали его эффективность.

У металлических решетчатых опор в исправном состоянии первая (низкая) частота собственных колебаний составляет примерно 2,5 Гц. Если жёсткость конструкции ослабевает за счет, например, слабой затяжки некоторых болтовых соединений или наличия оторванного раскоса, то собственная частота снижается на 0,1...0,3 Гц. При большем снижении частоты (на 0,3...0,8 Гц) было зафиксировано неплотное прилегание пяты опоры, а полностью «зависшая» над фундаментом пята даёт снижение 0,8 Гц [7].

В России на железобетонных опорах построено около половины всех существующих воздушных линий электропередачи (ВЛ) напряжением 35-500 кВ. Для железобетонных опор существенное влияние на частоту собственных

колебаний могут оказывать механические свойства бетона, в первую очередь – его марка, определяемая значением прочности бетона при сжатии. Это в первую очередь должно быть явным для новых опор, когда природно-климатические воздействия ещё не вызвали старения и коррозии их элементов и потери механических свойств конструкции в целом.

Для проверки этого предположения были проведены вибрационные испытания недавно установленных железобетонных опор одновременно с определением прочности бетона ультразвуковым методом [8]. Для вибрационного диагностирования в трёх местах нижней части железобетонной опоры закреплялись вибродатчики (рис.1), два из которых – диаметрально противоположно, на одной высоте. Снятые при помощи этих датчиков виброграммы показаны на рисунке 2.



Рис 1. Расположение вибродатчиков на центрифугированной железобетонной опоре

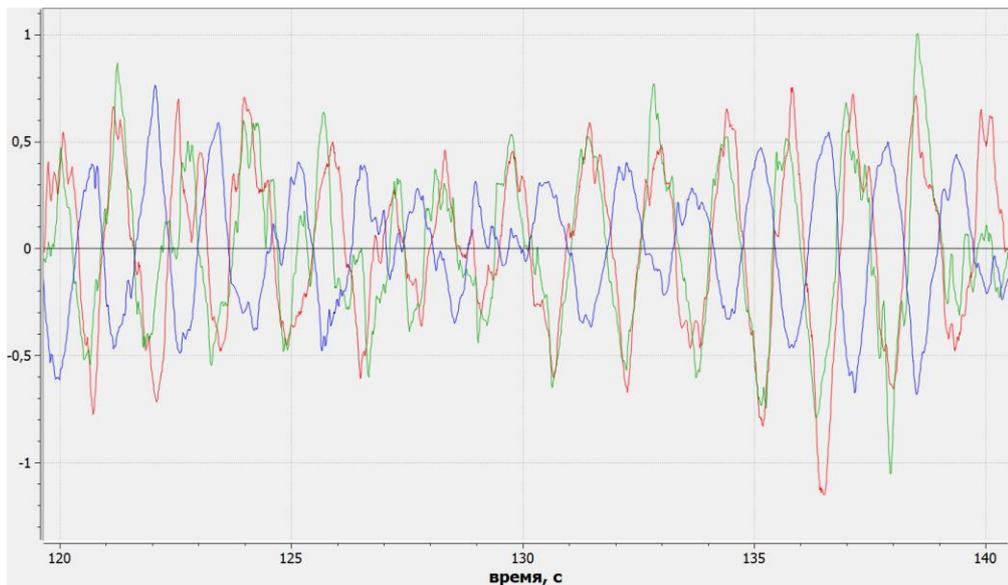


Рис.2. Фрагмент виброграммы опоры. Синий датчик расположен диаметрально противоположно зеленому и красному датчику.

Спектральный анализ виброграмм позволяет построить спектрограмму опоры, показанную на рисунке 3.¹ Из рисунка 3 можно видеть, что максимальное значение частоты собственных колебаний опоры лежит в районе 0,7 Гц. При этом это значение фиксируют все три датчика, независимо от их местоположения на опоре.

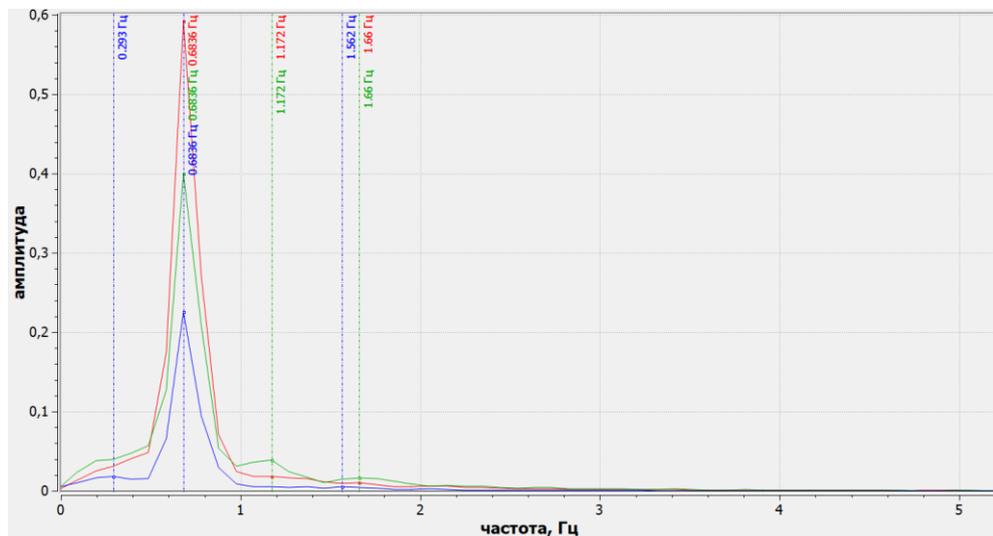


Рис 3 Спектрограмма бездефектной железобетонной центрифугированной опоры

¹ Амплитуда показана в условных единицах, зависящих от мощности сигнала, вызывающего вибрацию, например, ветра.

Определение прочности бетона ультразвуковым методом проводят на бетоне без дефектов. Нами были обследованы опоры ВЛ 220 кВ, трассы которых расположены в Самарской и Ульяновской областях, а также в Республике Татарстан. Опоры этих ВЛ были выполнены на центрифугированных стойках типа СН-220, СК-22, СК-26 и др. Ультразвуковое диагностирование совместно с вибрационными испытаниями позволили установить для бездефектных опор прямую корреляционную зависимость между частотой собственных колебаний и прочностью (маркой) бетона. Эта зависимость показана на рисунке 4.

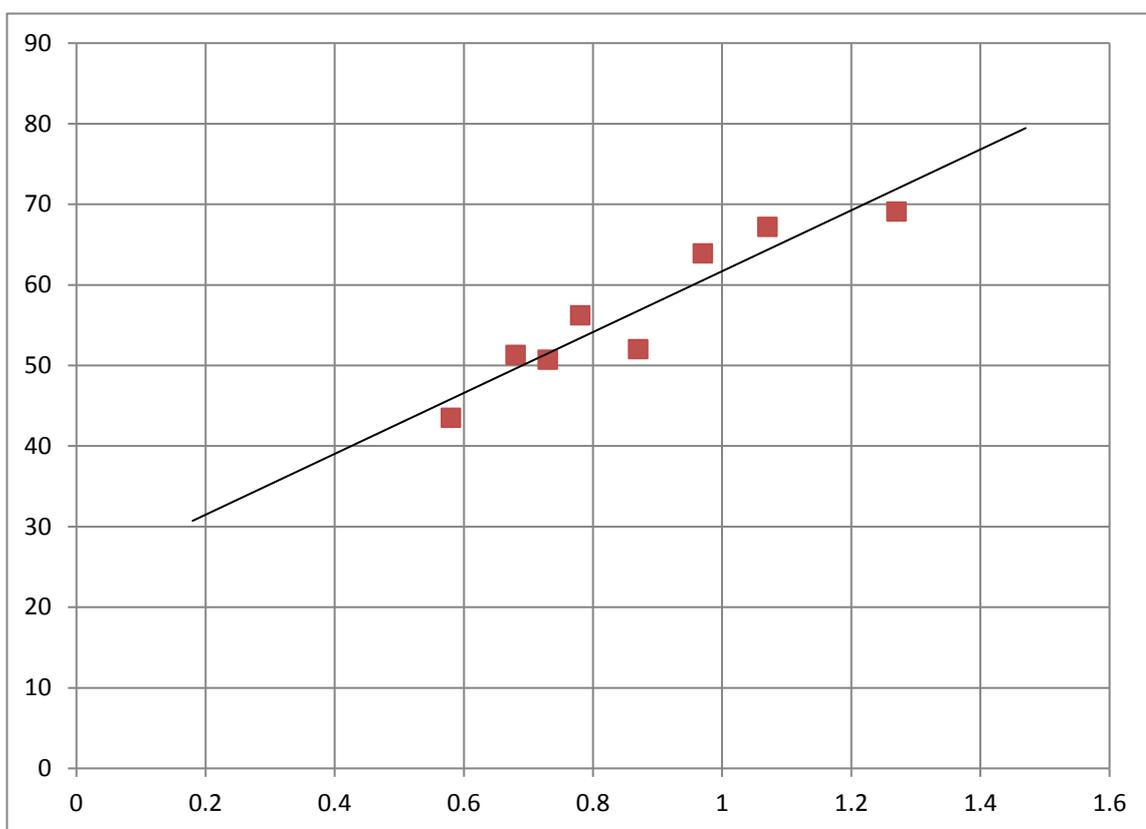


Рис.4. Корреляционная связь между собственной частотой колебания опоры и прочностью бетона

Зависимость прочности бетона σ от частоты собственных колебаний ν железобетонной центрифугированной стойки описывается прямой с достаточно высоким коэффициентом корреляции, равном 0,94:

$$\sigma = 37,775\nu + 23,92$$

По найденной эмпирической зависимости между собственной частотой опоры и прочностью её неповреждённого бетона, было найдено предельное

значение этой частоты для железобетонных опор ВЛ 220 кВ, Согласно требованиям [3], которые устанавливают предельное значение прочности бетона центрифугированных стоек не ниже 500 кгс/см^2 (это примерно 50 МПа), собственная частота опор не должна быть ниже 0,65 Гц.

В условиях эксплуатации в бетоне стоек железобетонных опор ВЛ появляются и развиваются с разной скоростью продольные, поперечные и косые трещины. Мелкие и короткие трещины приводят к снижению прочности бетона, а крупные и длинные - способствуют появлению коррозии арматуры и ослабляют несущую способность всей конструкции. Таким образом, в результате процессов растрескивания бетона и коррозии арматуры происходит постепенная утрата материалами, из которых создана железобетонная конструкция, своих полезных свойств. Сама центрифугированная стойка опоры при этом снижает свою основную несущую функцию в системе элементов ВЛ, тем самым приближая опору к предельному физическому состоянию.

Снижение механических свойств опоры в целом, безусловно, должно сказаться и на её вибрационных свойствах. На рисунке 5 показаны два спектра колебаний железобетонных опор новой (а) и старой (б). Значения амплитуд приводятся в условных единицах, связанных с мощностью источника возбуждения сигнал (ветер).

Сравнение спектральных кривых показывает, что у старой опоры с дефектами:

- спектры смещаются в область более низких частот;
- спектры каждого из датчиков, расположенных в разных местах опоры различны, а не совпадают, как у бездефектной опоры (см. рис. 5а и рис.3).

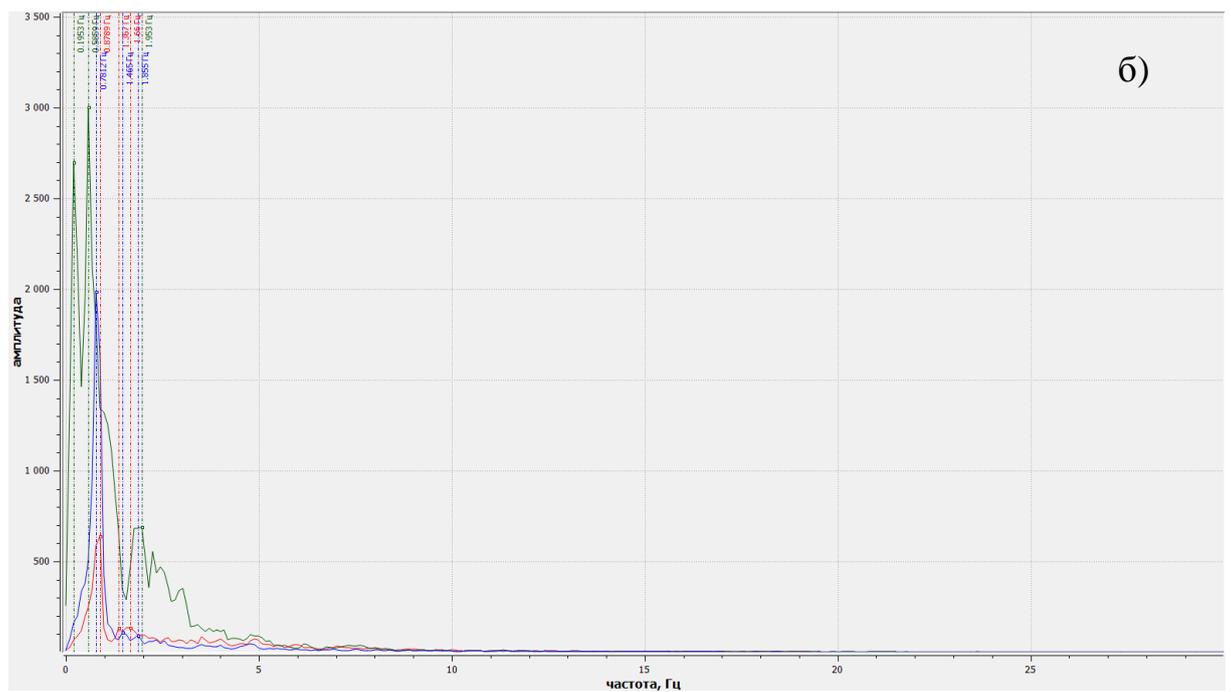
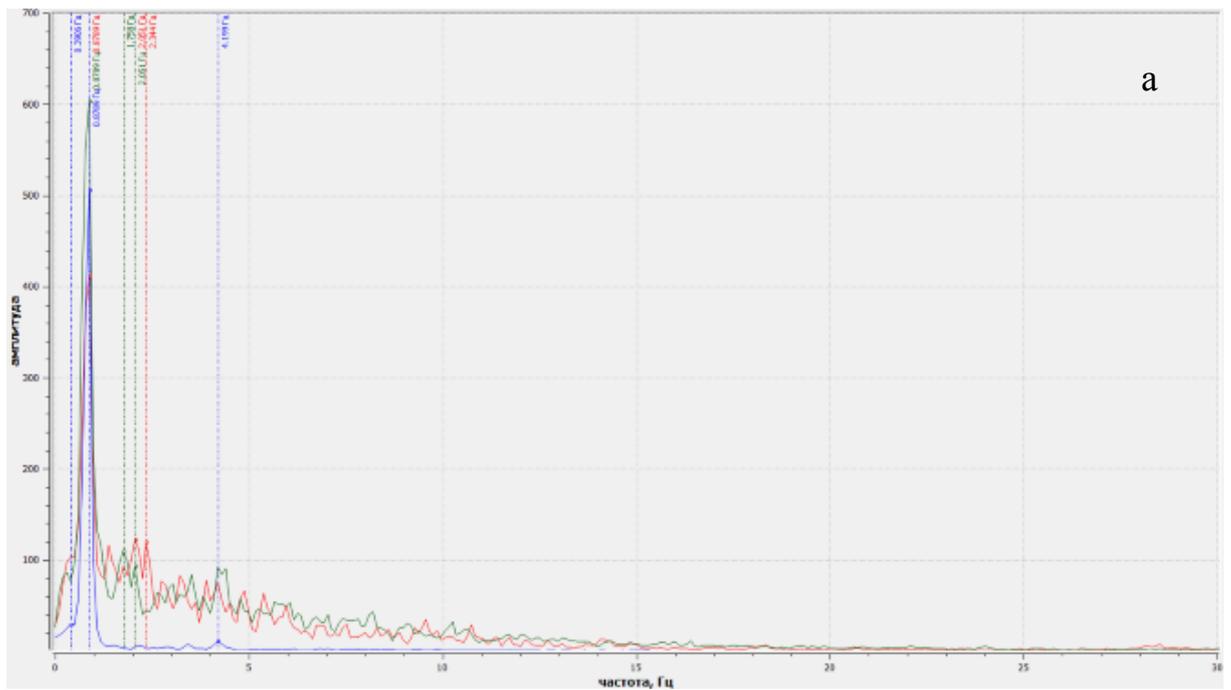


Рис. 5. Спектрограммы новой (а) и старой (б) железобетонных центрифугированных опор.

Заключение

1. Вибрационное диагностирование железобетонных опор ВЛ позволяет выявить бездефектные опоры, бетон которых имеет предел прочности при сжатии равный или выше 50 Мпа. Собственная частота колебаний таких опор составляет более 0,65 Гц. Датчики, установленные в разных местах бездефектной опоры, фиксируют одинаковую частоту.

2. Опоры с дефектами (в том числе и скрытыми) имеют более низкие частоты колебаний. При этом датчики, расположенных в разных местах дефектной опоры, фиксируют разные частоты.

3. В соответствии с требованиями ГОСТ 31937-2011 и ГОСТ Р 54859-2011 вибрационное диагностирование опор ВЛ следует включить в Нормы испытаний электрооборудования.

Литература

1. **ГОСТ 31937-2011** Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния

2. **ГОСТ Р 54859-2011** Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний

3. **СТО 34.01-23.1-001-2017** Объем и нормы испытания электрооборудования. ПАО «Россети», Дата введения: 29.05.2017

4. **РД 34.20.504-94** Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35-800 кВ // М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.

5. **СТО 50947-007- 29.240.55.111-2011** Методические указания по оценке технического состояния ВЛ и остаточного ресурса компонентов ВЛ. ОАО ФСК ЕЭС. Дата введения: 30.12.2011.

6. **Патент № 184535 Российская Федерация, МПК G01M 7/100 (206/01)** Устройство для оценки технического состояния металлических решетчатых конструкций : № 2017143250; заявл.11.12.2017; опубл.30.10.18 / Снежков И.И., Роденко С.В., Чаплин И.В. : заявитель ПАО «Томская распределительная компания» (RU) / - 1 с.

7. Кравченко А.Я. Экспериментальные исследования динамической работы опор линий электропередачи при разработке измерительного комплекса «ЛЭП тон» для оценки их технического состояния / Кравченко А.Я., Роденко С.В., Сафонов О.Н., Снежков И.И., Чаплин И.В. / ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ Передача и распределение, 2018, №5 (50). С. 44-49

8. ГОСТ 17624-2012 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности // М.: Стандартинформ, 2014.