

Роденко Сергей Васильевич, директор ООО «Институт электроэнергетики НГТУ»

Снежков Игорь Иванович, старший научный сотрудник НИЛ «Мосты» СГУПС

Чаплин Иван Владимирович, аспирант кафедры Мосты СГУПС

Кравченко Александр Яковлевич, инженер 1 категории сектора по методологии управления электросетевыми активами ПАО «ТРК»

Сафонов Олег Николаевич, начальник отдела технологического развития и инноваций ПАО «ТРК».

Экспериментальные исследования динамической работы опор линий электропередач при разработке измерительного комплекса «ЛЭПтон» для оценки их технического состояния

Аннотация: В статье приведены результаты экспериментальных исследований динамической работы опор ВЛ. Первоначально, на моделях опор ВЛ были определены оптимальные места установки вибродатчиков и необходимая чувствительность вибродатчиков-акселерометров для фиксации частот собственных колебаний. Также на одной из моделей проанализировано влияния действия проводов на частоты собственных колебаний модели опоры ВЛ. Затем, результаты лабораторных исследований были апробированы на реальных конструкциях. В ходе проведения экспериментов на реальных объектах определено, что для возбуждения частот собственных колебаний наиболее удобно использовать пассивный метод возбуждения (под действием ветра), поскольку опоры с проводами находятся достаточно высоко от уровня земли, а действие ветровой нагрузки постоянно. По результатам исследований разработан измерительный комплекс «ЛЭПтон» для оценки технического состояния опор линий электропередач.

Ключевые слова: опора ВЛ, оценка технического состояния, диагностика, измерительный комплекс, динамические параметры, частоты собственных колебаний.

Оценка технического состояния опор линий электропередач при выполнении требований СТО 56947007-29.240.55.111-2011 «Методические указания по оценке технического состояния ВЛ и остаточного ресурса компонентов ВЛ» является трудозатратным процессом. Тенденция совершенствования методов оценки технического состояния сводится к минимизации трудозатрат на обследование с применением инновационного оборудования на основе «цифровых технологий».

В распределительной электросетевой компании ПАО «ТРК», входящей в состав ПАО «Россети» 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». Был разработан измерительный комплекс «ЛЭПтон» для оценки технического состояния опор линий электропередач. В основе принципа работы комплекса - результаты экспериментальных и натурных исследований динамической работы опоры линии электропередачи как на модели, так и на опорах действующих ВЛ.

Первоначальный эксперимент был выполнен на плоской модели, выполненной в виде 3-хметровой трубы прямоугольного сечения, приваренной к жесткой металлической платформе (рисунок 1). В данном эксперименте была поставлена цель - определить место установки, тип датчика, его чувствительность, а так же наличие в измеряемом спектре частот колебания опоры частот других элементов ВЛ (проводов, гирлянд). Для этого на плоскую модель было установлено по три вибродатчика разного номинала вблизи заделки (на высоте 0.25м) и на высоте 1.7м плоской модели, и приложены импульсные нагрузки в различных точках по высоте модели (рисунок 2). Результаты в виде виброграмм и спектров частот приведены на рисунке 3. В ходе проведенных экспериментов были подобраны необходимая чувствительность вибродатчиков-акселерометров для фиксации частот собственных колебаний вблизи заделки плоской опоры 0.25м.

При проведении экспериментов на плоской модели с подвешенными к ней проводами с большими амплитудами проявились первые две низшие формы с частотой колебания 0,88 Гц и 1,86 Гц.



Рис. 1. Плоская модель опоры ВЛ

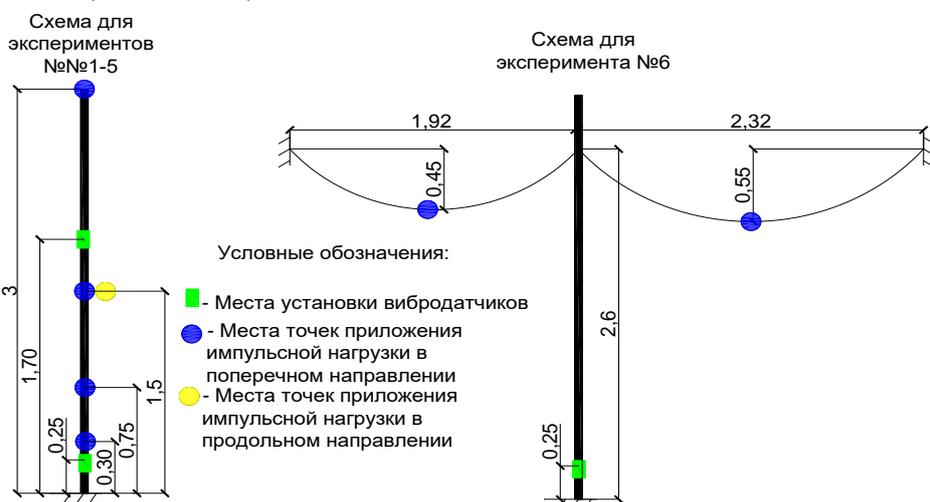


Рис. 2 Схема плоской модели опоры ВЛ при проведении экспериментов

в) виброграмма

г) спектр частот

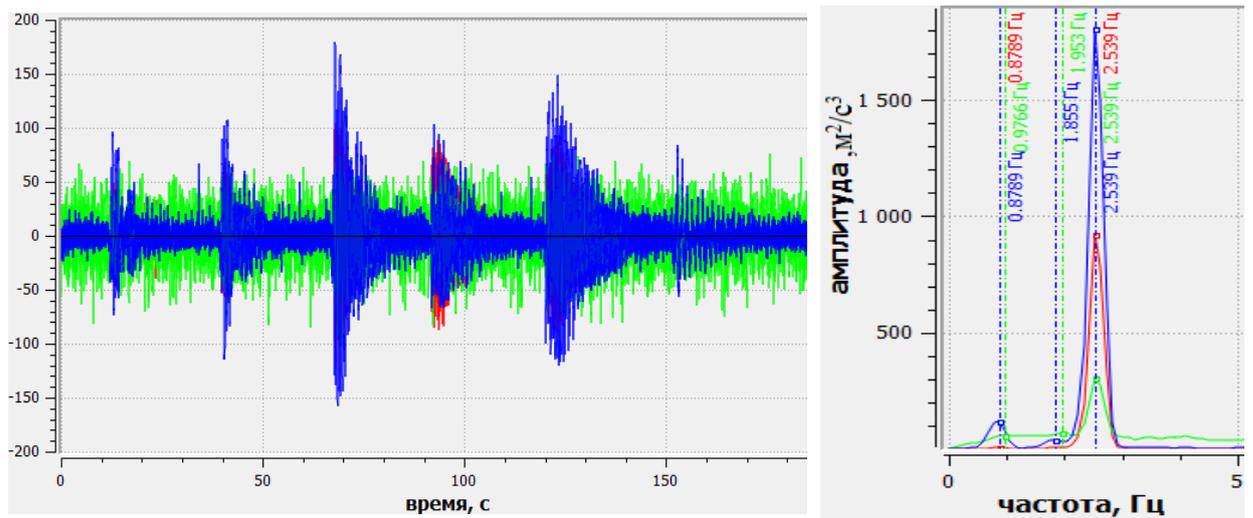


Рис. 3. Пример виброграмм и спектров частот колебаний при проведении экспериментов на плоской модели

С учетом результатов, полученных по первому эксперименту, были проведены аналогичные эксперименты на пространственной модели, выполненной в виде решетчатой П-образной рамы (рисунок 4, красным цветом выделены места установки вибродатчиков-акселерометров). В ходе исследований динамической работы пространственной модели прикладывались импульсные воздействия в различных точках и направлениях для возбуждения различных форм колебаний. При приложении «малых» импульсных воздействий в продольном направлении спектр частот колебаний остается неизменным, что объясняется большой жесткостью пространственной модели в продольном направлении. При приложении аналогичных воздействий в поперечном направлении, наиболее ярко проявляются изгибные и крутильные формы колебаний. Причем, крутильная форма в верхней точке посередине фиксируется на уровне шумов, т.к. в ней находится нулевая точка деформаций. При вынужденных колебаниях (колебаний гирлянды) на пространственной модели на спектрах частот дополнительно фиксируется вынужденная частота с большей мощностью сигнала. Возникают небольшие биения из-за близких собственных и вынужденных частот колебаний элементов модели. По результатам анализа исследований динамической работы пространственной модели подтверждены результаты первого эксперимента (на плоской модели) – место установки вибродатчика в точке узла крепления пространственной модели к основанию является наиболее оптимальной – в ней фиксируются все проявляющиеся частоты собственных колебаний и удобно устанавливать вибродатчик-акселерометр. На рисунке 11 представлен пример «цифрового портрета» пространственной модели.



Рис.4. Общий вид пространственной модели, оборудованная вибродатчиками--акселерометрами

Третий эксперимент проводился на отдельно стоящей узкопрофильной опоре решетчатого типа (без проводов) 2ПС110П-2М на полигоне в пос. Линево, НСО. Контроль технического состояния по динамическим параметрам данной опоры начался в 2015 году. В ходе исследований вибродатчики-акселерометры были закреплены на разной высоте опоры (рисунок 5). Возбуждение собственных колебаний данной опоры происходило под действием «малых» импульсных воздействий и под действием ветра. Также были подтверждены полученные результаты о месте установки и чувствительности вибродатчиков-акселерометров, и получены предпосылки для оценки технического состояния опор линий электропередач пассивным методом вибродиагностики. По результатам сравнения и анализа измерений с данными измерений в 2015 году изменений технического состояния опоры не зафиксировано по результатам вибродиагностики и подтверждено осмотром. Значения первых низших частот 1,17 Гц и 5,66 Гц при измерениях 2015 и 2017 годов не изменились.

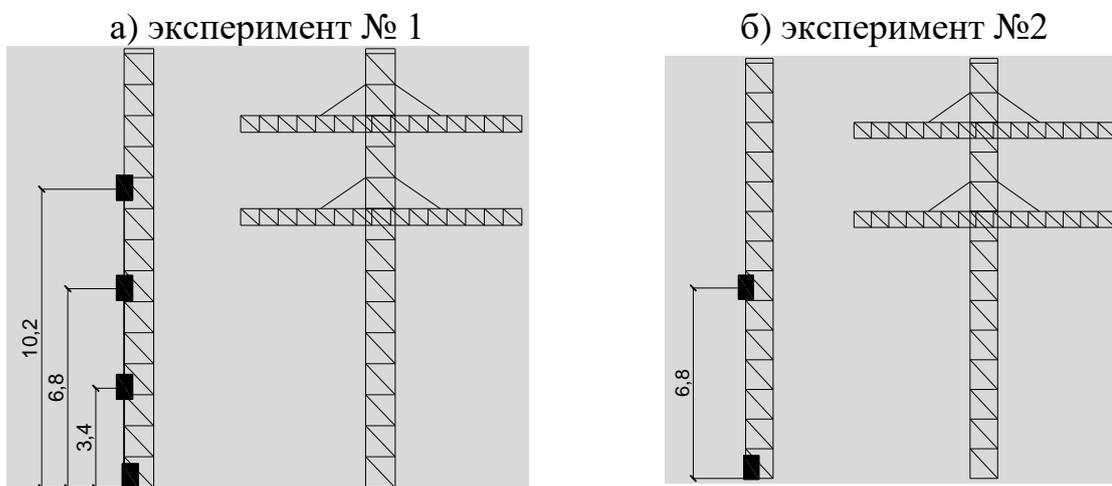


Рис. 5. Схема установки датчиков при проведении экспериментов на отдельно стоящей опоре решетчатого типа (без проводов)

По результатам трех проведенных экспериментов была определена оптимальная высота установки датчиков для определения собственных частот опоры и было подтверждено, что в измеряемом спектре частот опоры есть собственные частоты других элементов ВЛ. Это важно знать при анализе собственных частот опоры для целей диагностики её состояния. Здесь же следует пояснить, что эксперименты проводились с использованием датчиков и других блоков измерительного комплекса, используемого для диагностики мостов (рис.6).

Существуют активный и пассивный методы возбуждения и определения собственных частот колебаний конструкций. При активном методе необходимо специальное оборудование для возбуждения колебаний или приложения импульсной нагрузки при помощи различных приспособлений (например, «малые» импульсные воздействия - раскачивание опоры человеком или при помощи оттяжки и отпускания шнура, прикрепленного к верхней части конструкции). Активные методы трудозатратны, а вышеописанные исследования указывают на возможность применения пассивной вибродиагностики под воздействием ветровых нагрузок на систему опора-провода. Также возбуждение частот собственных колебаний под действием ветра является удобным на линиях электропередач, поскольку элементы опоры и провода находятся достаточно высоко от уровня земли, действие ветровой нагрузки постоянно. Однако для фиксации частот колебаний в штиль (когда уровень амплитуд колебаний низкий) необходимо использовать высокочувствительное оборудование (способное фиксировать даже самые низкие уровни колебаний). Это реализовано в разработанном специализированном измерительном комплексе «ЛЭПтон». Для подтверждения отклика опор именно на ветровые воздействия проведена вибродиагностика отдельно стоящих мачт с анемометрами двух типов. Анемометры, установленные на верху мачт, фиксировали мгновенную скорость ветра, осредненную в течение минуты.

На рисунках 6 приведен общий вид решетчатой мачты с установленными на ней вибродатчиками-акселерометрами, а на рисунке 7 - виброграммы и спектры частот колебаний. На рисунке 8 приведен график мгновенной скорости фактический и график изменения ускорений, построенный по данным, полученным с вибродатчика. Кривые этих графиков похожи. Воздействие ветровой нагрузки находится в прямой связи с откликом конструкции на воздействие этой ветровой нагрузки, а значит может быть использовано для вибродиагностики опор линий электропередач.

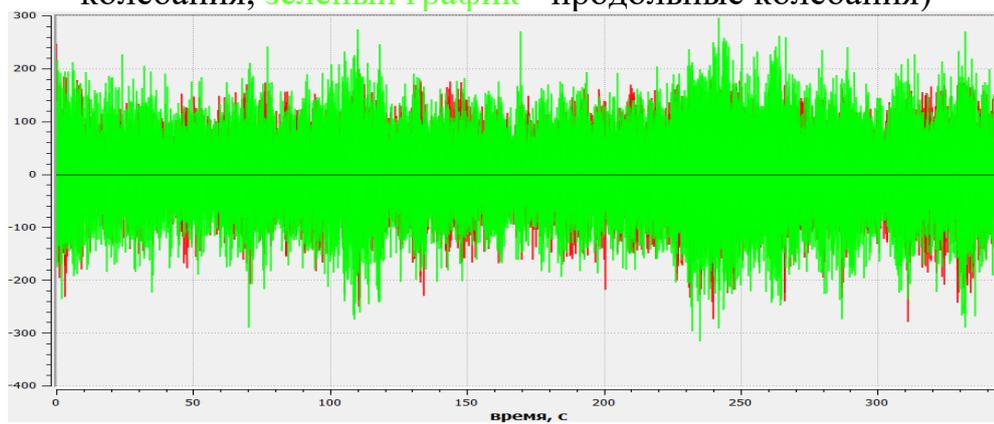
а) общий вид опоры анемометра

б) установка измерительного комплекса на опору анемометра



Рис. 6. Мачта анемометра, оборудованная вибродатчиками

в) виброграмма ускорений мачты (красный график – поперечные колебания, зеленый график - продольные колебания)



г) спектр частот колебаний мачты (красный график – поперечные колебания, зеленый график - продольные колебания)

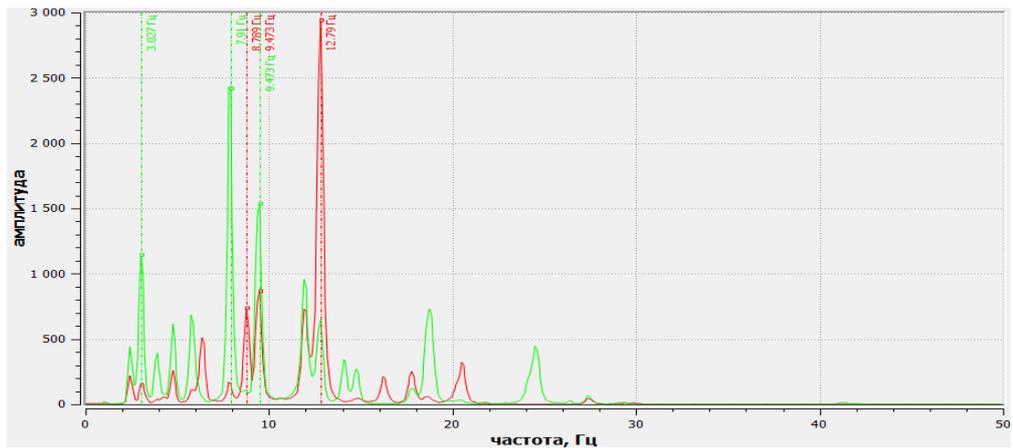


Рис. 7. Измерение виброускорений на мачте анемометра решетчатого типа

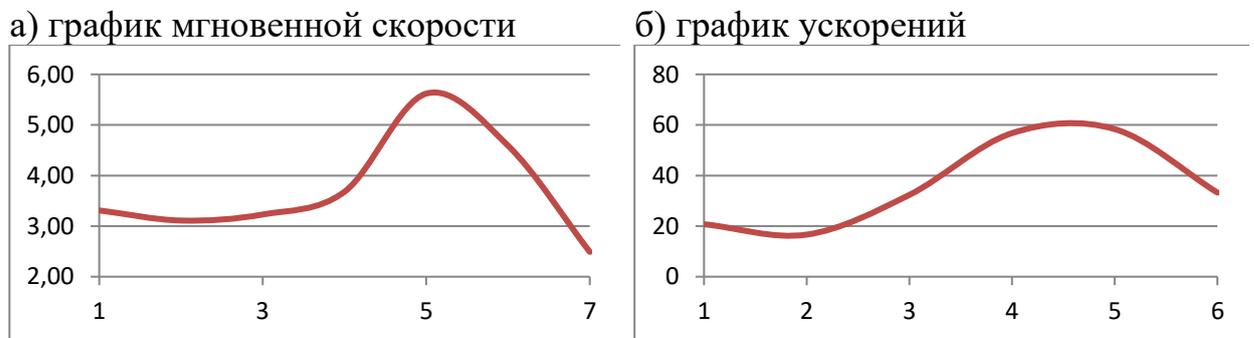


Рис. 8. Графики мгновенной скорости ветра по данным анемометра и измерения виброускорений мачты, выполненной из круглой трубы

С наработанной методикой, полученной по результатам вышеперечисленных и других (не вошедших в статью) экспериментов, были выполнены измерения на действующих опорах линии электропередач 110кВ СВ-5 в г. Стрежевом Томской области. Эта линия была выбрана, поскольку именно на этой линии произошло одновременное повреждение нескольких опор в 2010г. Измерения проводились дважды – в октябре 2016 года и в апреле 2017 года. Периоды выездов выбраны для фиксации возможного влияния промерзания грунтов (выпучивание фундаментов и др.) основания опор на частоты собственных колебаний. Было исследовано 60 промежуточных одноцепных опор типа П110-3. На каждой опоре проведена вибродиагностика и диагностическое обследование посредством визуального осмотра. По результатам диагностического обследования и вибродиагностики зафиксировано два характерных места возможной потери локальной устойчивости главных несущих уголков в месте стыковки уголков через накладку из уголка под нижней траверсой и стыковкой первого и второго поясов. По результатам расчета напряжений на конечно-элементной модели данной опоры получены максимальные концентрации нагрузки именно в этих

точках при воздействии ветровой нагрузки. Здесь следует отметить, что такие повреждения уголков в описанных выше местах появляются иногда при монтаже опор.

В результате выполненных исследований определены конкретные параметры для определения существенных дефектов, возникающих в опорах.

1. Первая собственная частота характеризует общее состояние опоры. При снижении первой частоты на 0,2-0,3 Гц в опоре присутствуют дефекты несущих уголков опоры. Снижение первой собственной частоты колебаний опоры на значения от 0,3 до 0,8 Гц может говорить о неплотном прилегании одной пяты опоры.

2. Высокие частоты характеризуют состояние связей опоры (недостаточное натяжение болтов или дефекты в сварных соединениях) и находятся в определенном диапазоне частот, определяемом по результатам расчетов. На рис. 9 и 10 приведены примеры спектров частот и «цифровые портреты» собственных колебаний целых и дефектных опор ВЛ.

При реализации мониторинга может быть выявлена явная тенденция снижения собственных частот, что позволит определять появление дефекта. Степень критического состояния дефектов опор оценивается по результатам расчетов на конечно-элементных моделях (определяются критические частоты).

Оценка технического состояния опор ЛЭП с помощью разработанного измерительного комплекса проводится в следующем порядке:

1. Измерительный комплекс «ЛЭПтон» устанавливается на одну из стоек диагностируемой опоры ВЛ и осуществляется замер собственных частот опоры. Данные по замерам передаются на смартфон по каналу связи Bluetooth (рис.11).

2. Дальнейшая оценка состояния опор производится после обработки данных со смартфона с помощью программы, установленной на ноутбуке, входящем в комплект измерительного комплекса.

Измерительный комплекс «ЛЭПтон» способен фиксировать виброперемещения в трех плоскостях, температуру. Диапазон фиксируемых частот 0,1-50 Гц. Ориентировочная длительность работы Измерительного комплекса «ЛЭПтон» составляет порядка 8 часов без подзарядки. В полевых условиях для увеличения длительности работы смартфон и измерительный комплекс «ЛЭПтон» подзаряжаются с помощью внешнего аккумулятора.

На рис. 12 изображено оборудование, входящее в измерительный комплекс:

1. ноутбук ASUS;
2. измерительный комплекс «ЛЭПтон»;
3. внешняя аккумуляторная батарея;
4. смартфон BlackView.

Выводы

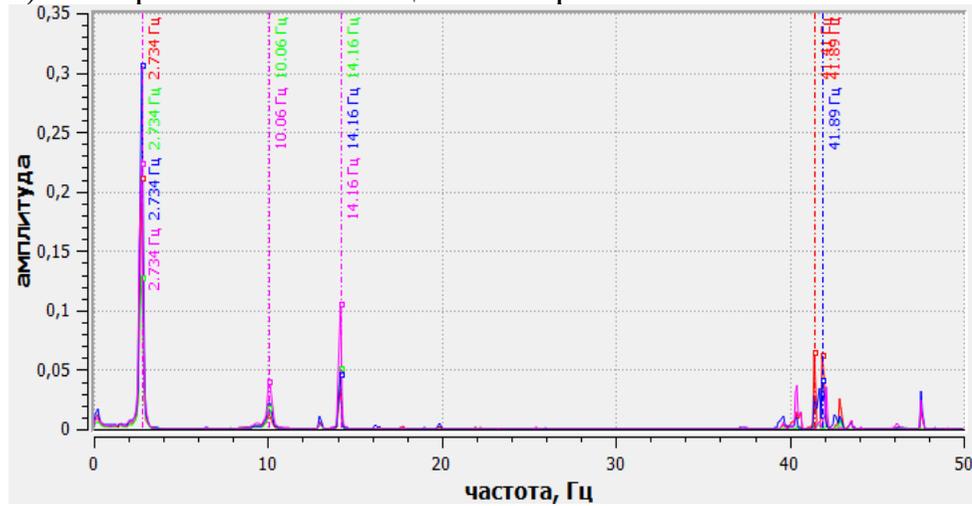
Измерительный комплекс позволяет определить состояние опоры, не проводя стандартные инструментальные измерений элементов (измерения степени коррозии элементов опоры, сварных, болтовых соединений и др.). По конструктивным решениям измерительный комплекс имеет следующие преимущества по сравнению с аналогичными приборами по частотной диагностике:

-Для проведения измерения используется один датчик и одно место присоединения к опоре, что позволяет сократить время измерения на одну опору;

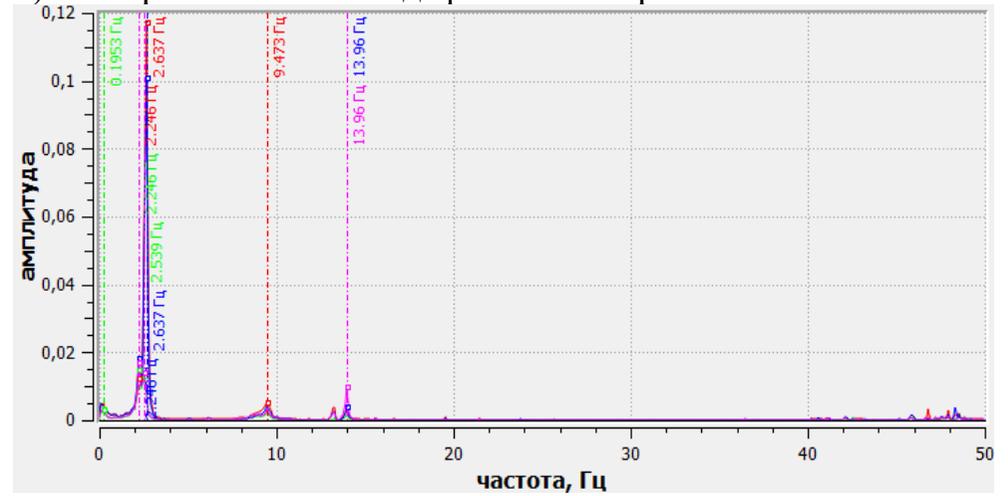
-Высокая чувствительность прибора позволяет регистрировать естественные колебания опоры от небольшой силы ветра и проводить измерения без использования дополнительного внешнего источника колебаний, что упрощает проведение измерений.

В данный момент в ПАО «ТРК» совместно с ООО «Институтом электроэнергетики НГТУ» ведется работа по накоплению базы данных измерений, проведенных на ВЛ 35-110 кВ для дальнейшей обработки с целью улучшения качества оценки состояния опор.

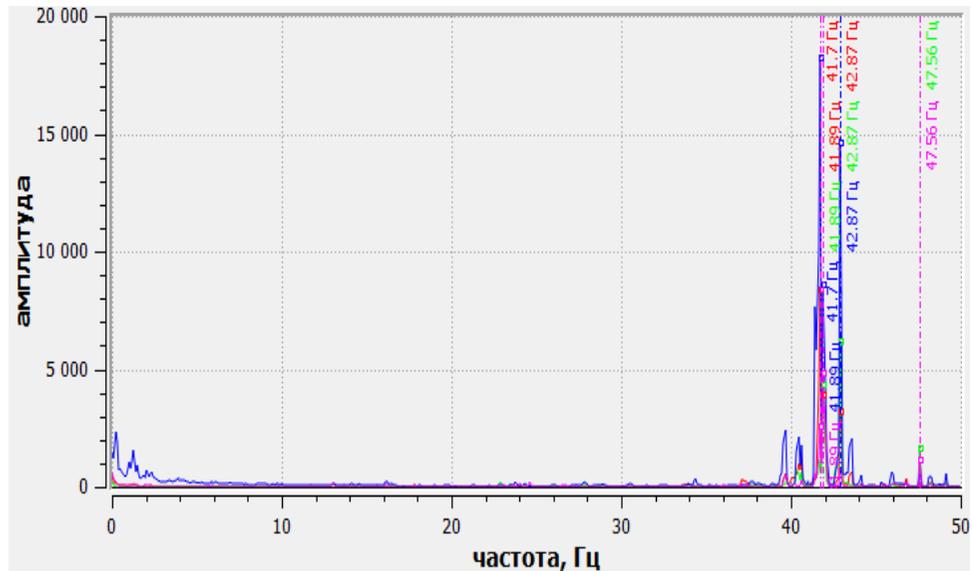
а) спектр низких частот целой опоры



б) спектр низких частот дефектной опоры



в) спектр высоких частот целой опоры



г) спектр высоких частот дефектной опоры

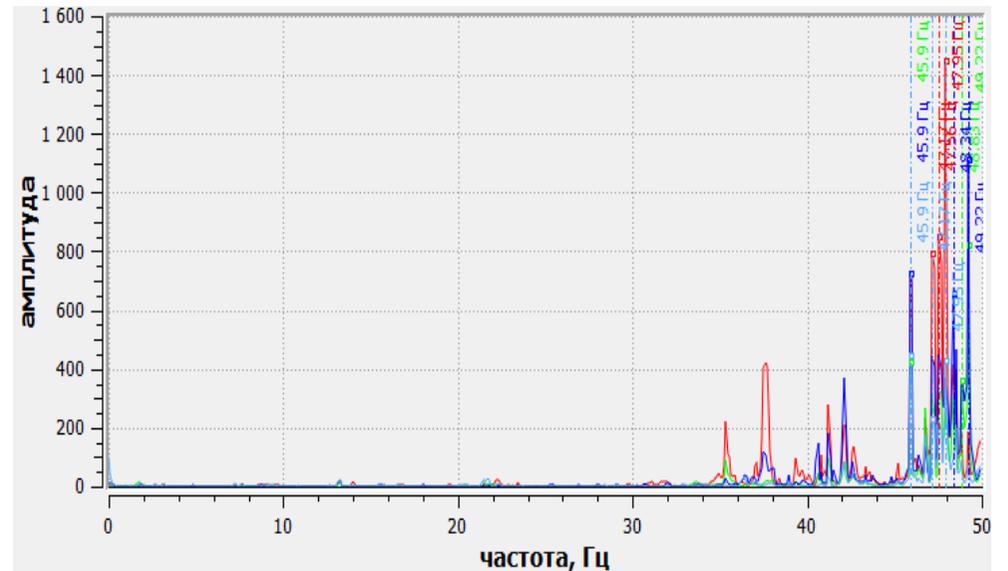
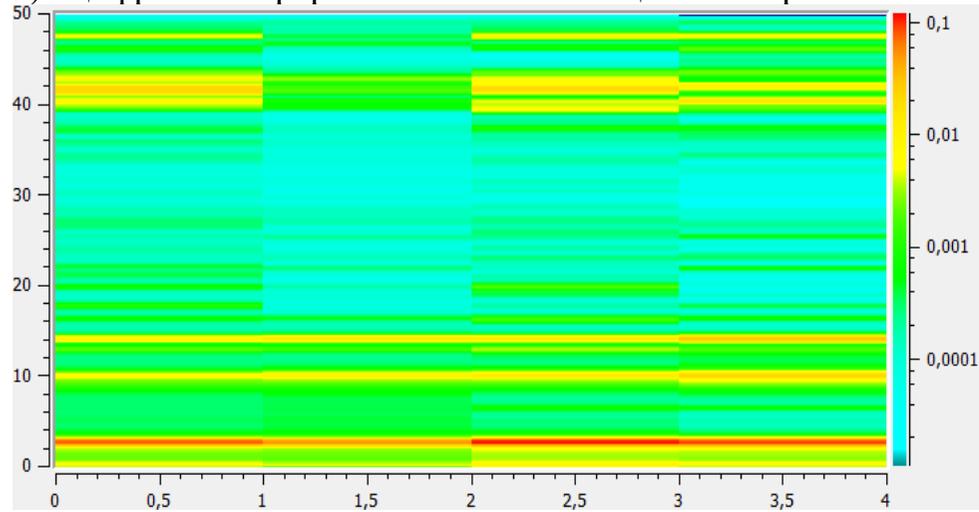
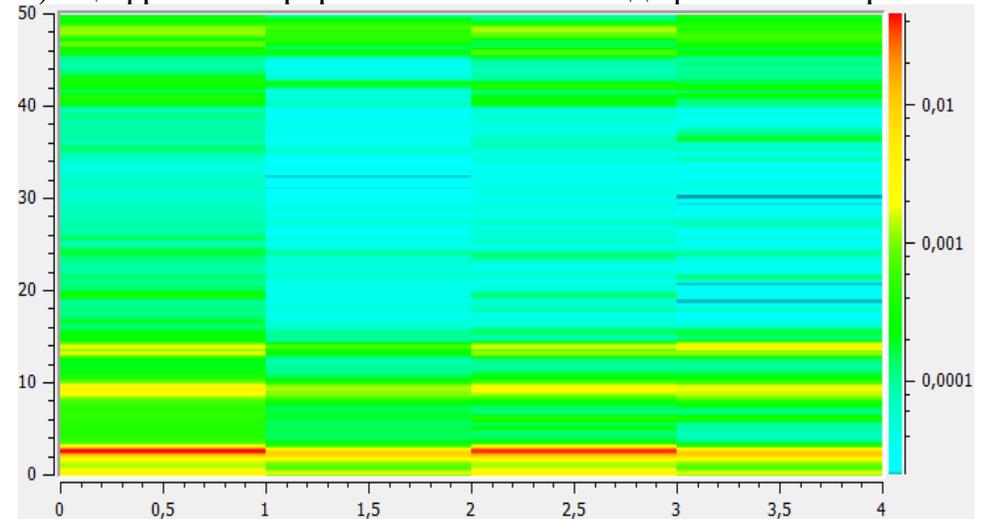


Рис. 9. Примеры спектров частот собственных колебаний целых и дефектных опор

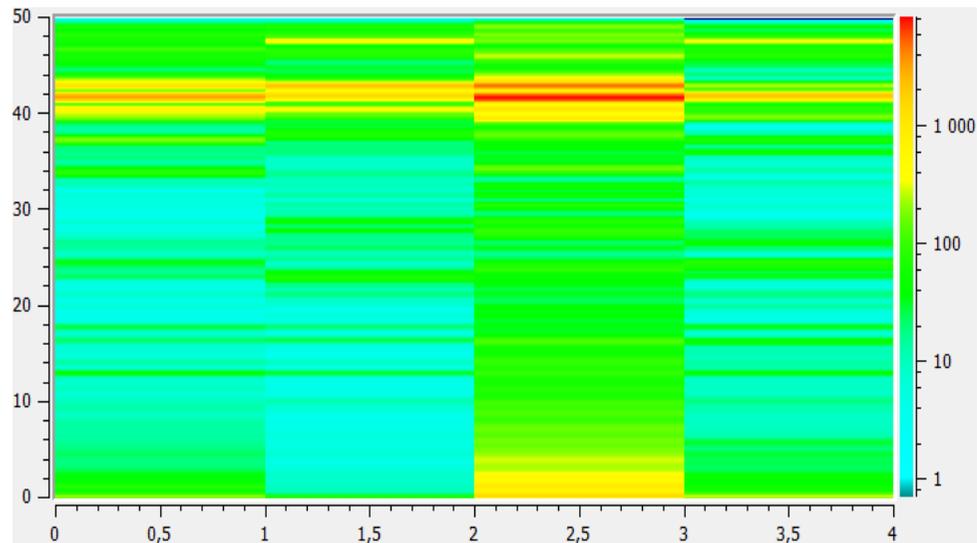
а) «цифровой портрет» низких частот целой опоры ВЛ



б) «цифровой портрет» низких частот дефектной опоры ВЛ



в) «цифровой портрет» высоких частот целой опоры ВЛ



г) «цифровой портрет» высоких частот дефектной опоры ВЛ

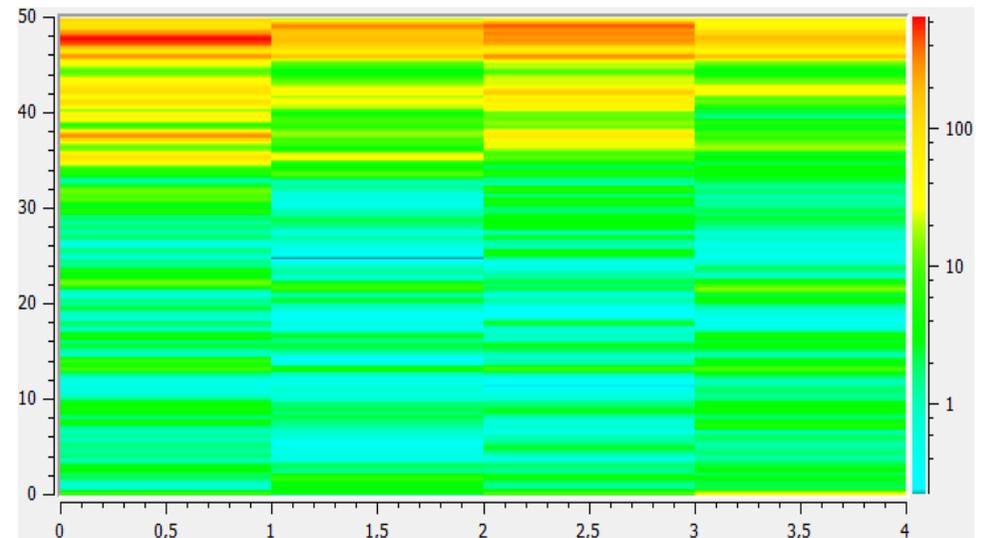


Рис. 10. Примеры «цифровых портретов» частот собственных колебаний целых и дефектных опор ВЛ



Рис.11 Работа с измерительным комплексом «ЛЭПтон» и смартфоном



Рис. 12. Общий вид комплекса для оценки технического состояния опор