

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

УДК 621.315.66

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 электропередачи.

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

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

Сафонов О.Н.,
начальник отдела технологического развития и инноваций ПАО «ТРК»

Снежков И.И.,
старший научный сотрудник НИЛ «Мосты» СГУПС

Чаплин И.В.,
младший научный сотрудник кафедры «Мосты» СГУПС

Ключевые слова:

опора ВЛ, оценка технического состояния, диагностика, измерительный комплекс, динамические параметры, частоты собственных колебаний

Keywords:

????????????????????

Оценка технического состояния опор линий электропередачи 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 электропередачи. В основе прин-

ципа работы комплекса — результаты экспериментальных и натуральных 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 трехметровой трубы прямоугольного сечения, приваренной к жесткой металлической платформе (рисунк 1). В данном эксперименте



Рис. 1. Плоская модель опоры ВЛ

была поставлена цель — определить место установки, тип датчика, его чувствительность, а также 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 0,25 м) и на высоте 1,7 м 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 была подобрана необходимая чувствительность вибродатчиков-акселерометров для фиксации частот собственных колебаний вблизи заделки плоской опоры 0,25 м.

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.

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 вы-

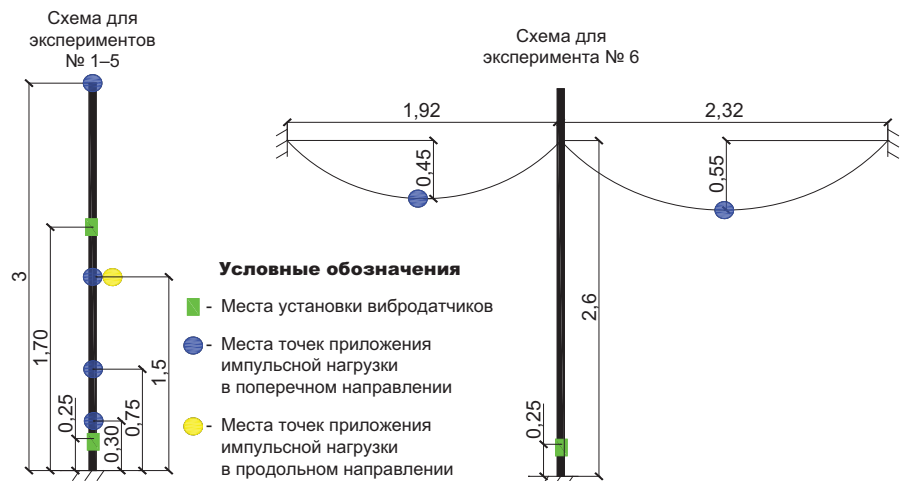


Рис. 2. Схема плоской модели опоры ВЛ при проведении экспериментов

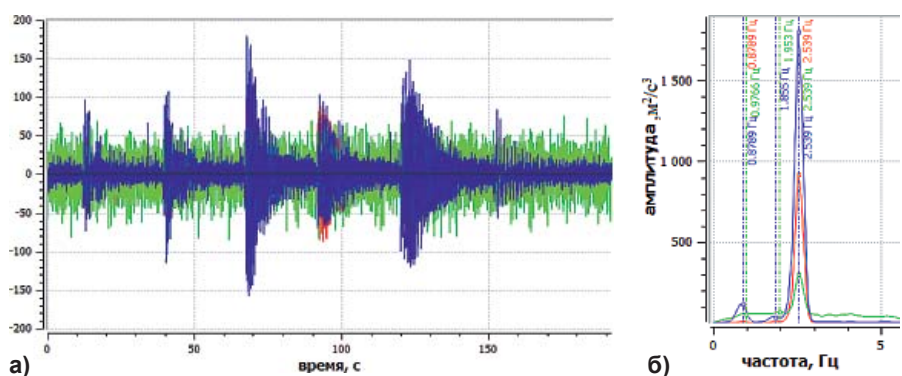


Рис. 3. Пример виброграмм (а) и спектров частот (б) колебаний при проведении экспериментов на плоской модели

делены 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

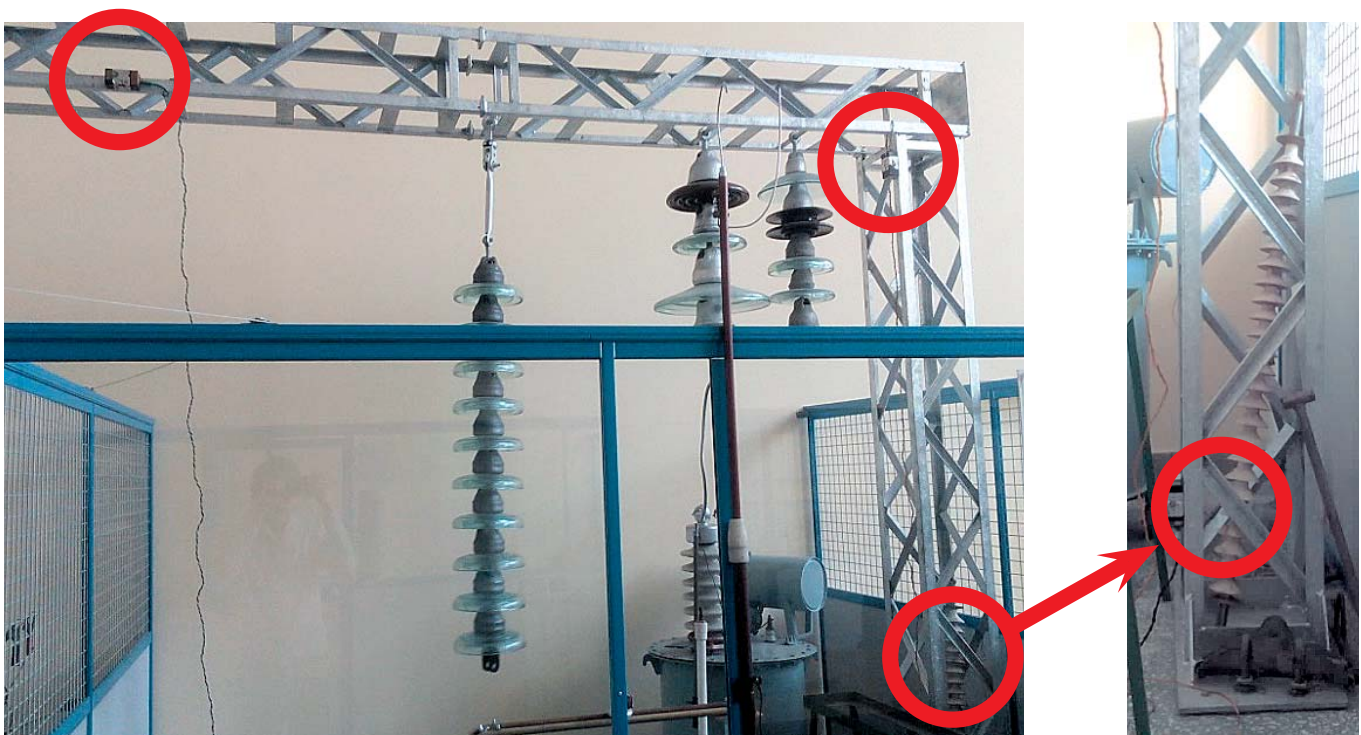


Рис. 4. Общий вид пространственной модели, оборудованной вибродатчиками-акселерометрами

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, так как в ней находится нулевая точка деформаций. При вынужденных колебаниях (колебания 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.

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 электропередачи пассивным методом вибродиагностики. По результатам сравнения и ана-

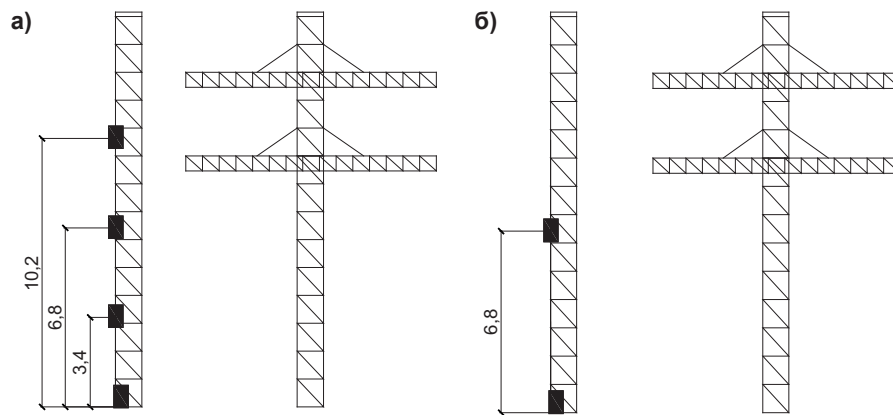


Рис. 5. Схема установки датчиков при проведении экспериментов № 1 (а) и № 2 (б) на отдельно стоящей опоре решетчатого типа (без проводов)

лиза 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.

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 ее состояния. Здесь же следует пояснить, что эксперименты проводились с использованием датчиков и других блоков измерительного ком-

плекса, используемого для диагностики мостов (рисунок 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 [1]. Также возбуждение частот собственных колебаний под дей-



Рис. 6. Мачта анемометра, оборудованная вибродатчиками: а) общий вид опоры анемометра; б) установка измерительного комплекса на опору анемометра

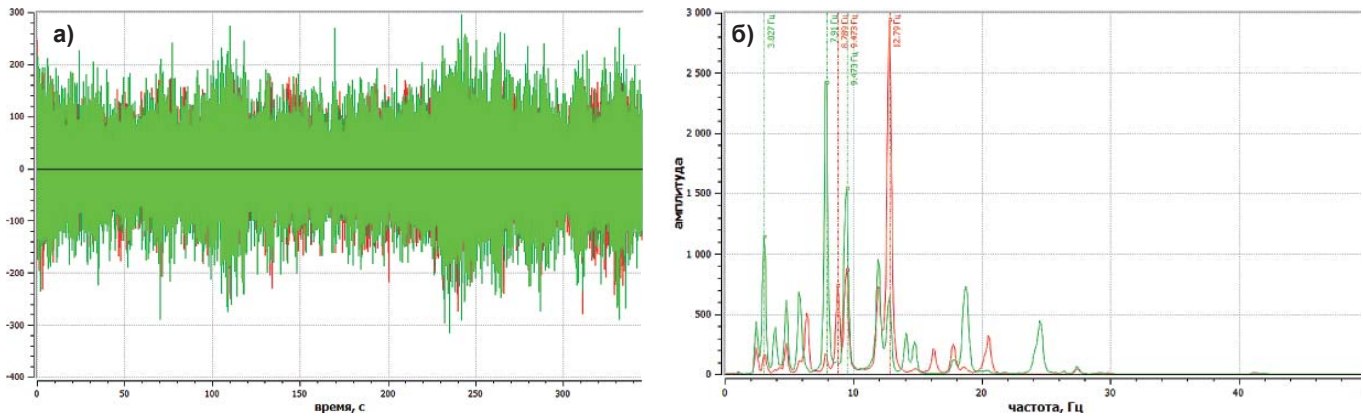


Рис. 7. Измерение виброускорений на мачте анемометра решетчатого типа (красным — поперечные колебания, зеленым — продольные колебания): а) виброграмма ускорений мачты; б) спектр частот колебаний мачты

ствием ветра является удобным на линиях электропередачи, 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.

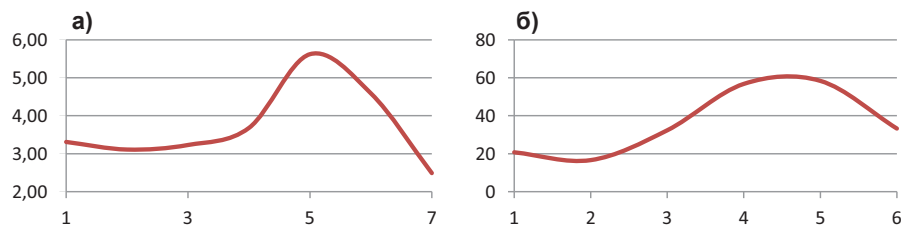


Рис. 8. Графики мгновенной скорости ветра по данным анемометра (а) и измерения виброускорений мачты, выполненной из круглой трубы (б)

На рисунках 6а и 6б 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 электропередачи.

С наработанной методикой, полученной по результатам вышеперечисленных и других (не вошедших в статью) экспериментов, были выполнены измерения на действующих опорах линии электропередачи 110 кВ СВ-5 в г. Стрежевом Томской области. Эта линия была выбрана, поскольку именно на этой линии произошло единовременное повреждение нескольких опор в 2010 году. 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.

Предварительно была построена конечно-элементная модель опоры П110-3. Модель создана по чертежу № 3078ТМ-113а согласно типовому проекту «Унифицированные стальные нормальные опоры ВЛ 35, 110 и 150 кВ № 3.407-68/73. Том 9». Рассчитаны частоты трех опор:

- 1) опора без дефектов;
- 2) опора с дефектом в виде оторванного раскоса в нижнем поясе;
- 3) опора с дефектом в виде «зависшей» пяты опоры.

На каждой опоре проведена вибродиагностика и диагностическое обследование посредством визуального осмотра. По результатам диагностического обследования зафиксировано два характерных места возможной потери локальной устойчивости главных несущих уголков в месте стыковки уголков через накладку из уголка под нижней траверсой и стыковой первой и второго поясов (рисунки 9).



Рис. 9. Место стыковки первого и второго поясов

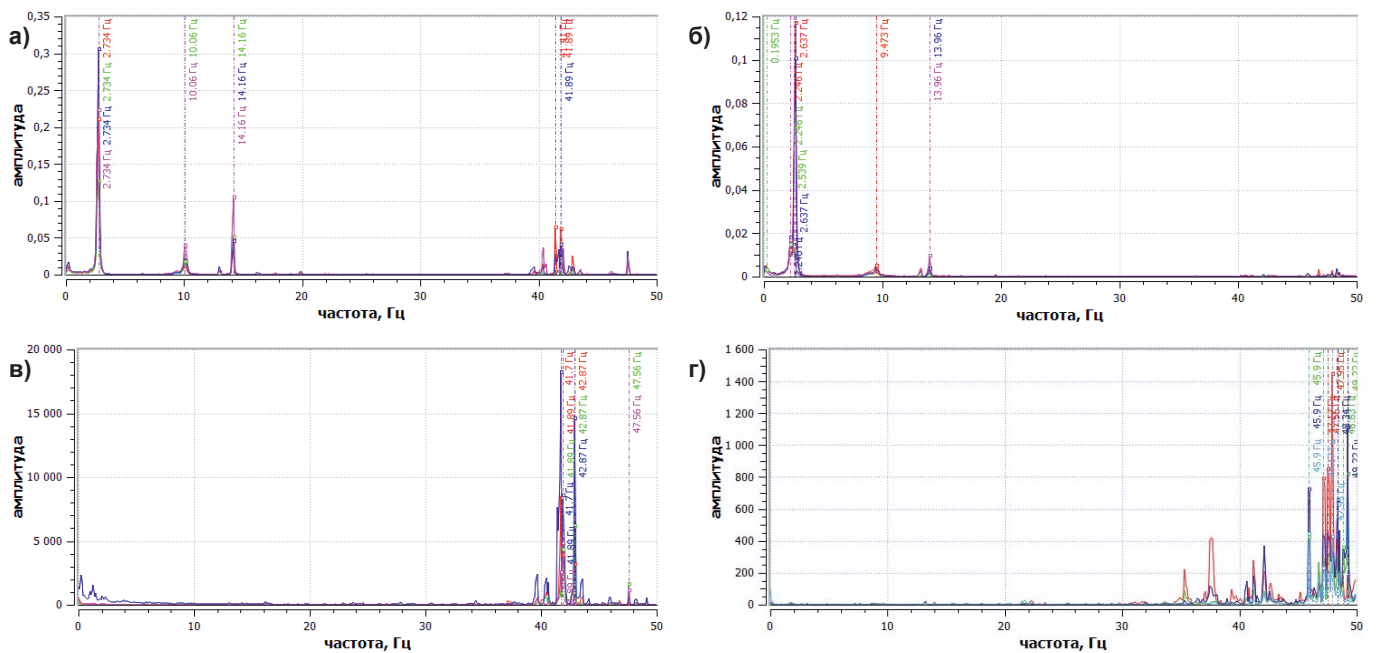


Рис. 10. Примеры спектров частот собственных колебаний целых и дефектных опор: а) спектр низких частот целой опоры; б) спектр низких частот дефектной опоры; в) спектр высоких частот целой опоры; г) спектр высоких частот дефектной опоры

По результатам расчета напряжений по программе моделирования совместных нелинейных колебаний проводов и опор ВЛ (участка электросети) при действии ветровой нагрузки (1, 2) получены максимальные концентрации динамической нагрузки именно в этих точках.

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

Первая собственная частота характеризует общее состояние опоры. Снижение первой частоты на 0,1–0,3 Гц свидетельствует о неравномерной затяжке болтовых соединений, что приводит к снижению жесткости конструкции. У 60-ти обследованных опор, включающих 19 новых опор, установленных после аварии и 41-й старой, первая частота была ниже расчетной на 0,1–0,3 Гц. Снижение первой собственной частоты колебаний опоры на значения от 0,3 до 0,8 Гц может говорить о неплотном прилегании одной пяты опоры. Здесь следует указать, что расчетное снижение частоты опоры с дефектом в виде оторванного раскоса в нижнем поясе — 0,3 Гц, а расчетное снижение частоты опоры с дефектом в виде «зависшей» пяты опоры — 0,8 Гц.

Высокие частоты характеризуют состояние связей опоры (ослабление натяжения болтов или дефекты в сварных соединениях) и находятся в определенном диапазоне частот, определяемом по результатам расчетов. На рисунке 10 приведены примеры спектров частот 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 сравнением частот, полученных при измерениях с расчетными частотами данного типа опоры, хранящимися в базе данных ноутбука. Оценка технического состояния опор ЛЭП с помощью разработанного измерительного комплекса проводится в следующем порядке:

1. Измерительный комплекс «ЛЭПтон» устанавливается на один из поясных уголков диагностируемой опоры ВЛ и осуществляется замер собственных частот опоры. Данные передаются на смартфон по каналу связи Bluetooth (рисунок 11).
2. Дальнейшая оценка состояния опоры производится на ноут-

буке с помощью специальной программы после передачи на него данных со смартфона по каналу связи Bluetooth.

Измерительный комплекс «ЛЭПтон» способен фиксировать виброперемещения в трех плоскостях, температуру. В нем предусмотрена возможность подключения дополнительно до четырех датчиков для проведения исследовательских задач. Диапазон фиксируемых частот 0,1–50 Гц. Ориентировочная длительность работы измеритель-

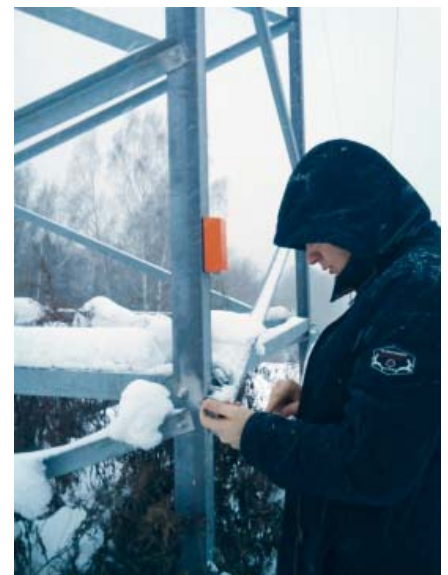


Рис. 11. Работа с измерительным комплексом «ЛЭПтон» и смартфоном

ного 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.

По заявке № 2017143250/28 (074528) от 11.12.2017 получено решение о выдаче патента на полезную модель «Устройство для оценки технического состояния металлических решетчатых конструкций» [2].

На рисунке 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 наличие дефектов опоры, не проводя стандартные инструментальные измерения 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:

- 1) для проведения измерения используется один датчик и одно место присоединения к опоре, что позволяет сократить время измерения на одну опору;
- 2) высокая чувствительность прибора позволяет регистрировать естественные колеба-




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

ния опоры от небольшой силы ветра и проводить измерения без использования дополнительного внешнего источника колебаний, что упрощает проведение измерений.

Проведение измерений прибором является менее трудозатратным по сравнению с оценкой технического состояния ВЛ в соответствии с СТО 56947007-29.240.55.111-2011 «Методические указания по оценке технического состояния ВЛ и остаточного ресурса компонентов ВЛ», так как не требуется подъем на опору, применение гидроподъемника

или телескопической вышки, отключение ВЛ для безопасного выполнения работ. При этом с помощью измерительного комплекса можно получить сопоставимые по информативности и достоверности результаты обследования ВЛ.

В настоящее время 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. 

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко А.Я., Красноруцкий Д.А., Левин В.Е., Роденко С.В. Расчет совместных колебаний проводов и опор участка воздушной линии электропередачи при действии периодической ветровой нагрузки // ЭЛЕКТРО-ЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2018, № 2(47). С. 58–63.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616567 KLPVL-v.1. Правообладатель: ПАО «Томская Распределительная Компания», дата регистрации 04 июня 2018 г.

REFERENCES

- 1.
- 2.