

УДК 69.036.7

doi: 10.53816/23061456_2025_7–8_59

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД К МОНИТОРИНГУ
НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ
ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL APPROACH TO MONITORING
THE LOAD-BEARING STRUCTURES OF OVERHEAD POWER
TRANSMISSION TOWERS, TAKING INTO ACCOUNT POSSIBLE DAMAGE
TO INDIVIDUAL ELEMENTS**

Канд. техн. наук Д.П. Мандрица, д-р техн. наук А.Н. Миронов

Ph.D. D.P. Mandritsa, D.Sc. A.N. Mironov

Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского

В рамках данной работы предложен расчетно-экспериментальный подход к определению фактического технического состояния опор воздушных линий электропередачи (ВЛЭП). Разработанная с учетом данного подхода методика представляет собой простую последовательность численных расчетов, технических мероприятий по обследованию поврежденных элементов и при необходимости ремонта отдельных элементов конструкции ВЛЭП. Особенность предлагаемой методики заключается в том, что дополнительно учитываются особенности деформирования конструкций опор ВЛЭП при разрушении отдельных элементов, а также эксплуатационные дефекты в конструкциях.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, техническое состояние конструкции, параметры напряженно-деформированного состояния, частота собственных колебаний, деформация элементов, эксплуатационные дефекты.

Within the framework of this work, a computational and experimental approach to determining the actual technical condition of overhead power transmission poles is proposed. The methodology developed with this approach in mind is a simple sequence of numerical calculations, technical measures to inspect damaged elements and, if necessary, repair individual overhead line structural elements. The peculiarity of the proposed technique is that it additionally takes into account the features of deformation of overhead line support structures during the destruction of individual elements, as well as operational defects in the structures.

Keywords: overhead power transmission lines, technical condition of the structure, stress-strain state parameters, natural oscillation frequency, deformation of elements, operational defects.

Введение

В настоящее время для обеспечения надежного электроснабжения различных объектов широко применяются воздушные линии электропередачи (ВЛЭП). Важная роль при этом отводится непосредственно опорам ВЛЭП, представляющим пространственную металлическую стержневую конструкцию (рис. 1).

В процессе эксплуатации опор ВЛЭП они подвергаются воздействию различных внешних факторов: ветровых нагрузок разной интенсивности и периодичности, температурных и гололедных нагрузок, а также особых нагрузок и воздействий. К таким особым нагрузкам относятся: ударные, сейсмические, взрывные нагрузки, а также воздействия беспилотных летательных аппаратов [1–4].

Все указанные воздействия приводят к образованию повреждений (разрушений), которые резко снижают несущую способность опор ВЛЭП и, как следствие, всей системы электроснабжения.

В настоящее время системы мониторинга применительно к опорам ВЛЭП — это система визуальных и инструментальных наблюдений за техническим состоянием конструкций (СМИС), нацеленная на оперативное установление возможных негативных воздействий и их устранение. СМИС проектируются на базе программно-технических средств, включающих следующие компоненты: комплекс измерительных средств, средств автоматизации и исполнительных механизмов; проводные или беспроводные сети передачи информации; соответствующие программы расчета напряженно-деформированного состояния сооружений [1–6].

Для мониторинга поврежденных опор ВЛЭП используют различные подходы [4–6], которые включают осмотр с воздуха с помощью беспилотных летательных аппаратов. С их помощью проводят верховой осмотр опор ВЛЭП для выявления дефектов, диагностический облет по всей протяженности линии для обнаружения дефектов опор, пролетов и нарушений в охранной зоне, а также топографо-геодезические работы. Важное значение имеет использование систем мониторинга с измерительными блоками. Они распределены вдоль трассы ВЛЭП и связаны через канал связи с оборудованием на диспетчерском пункте. Измерительные блоки монтируют на опорах либо непосредственно на высоковольтных проводах.

Однако данные подходы не учитывают особенности работы отдельных элементов конструкций в условиях возникновения деформаций, превышающих допустимые, но не приводящих их к потере устойчивости (формы). В настоящее время разработаны отдельные методики мониторинга закритического деформирования конструкций, которые учитывают следующие положения.

Энергетический подход механики разрушения. Данный подход используется для оценки устойчивости закритического деформирования, сопровождающегося равновесным ростом и развитием дефектов. Основан на сравнении приращений работы внешних сил и работы деформаций (суммы приращений упругой энергии и работы разрушения) при самопроизвольном приращении закритической деформации.

Экспериментальное изучение закритической стадии деформирования. Для этого применяют испытательные машины, предназначенные

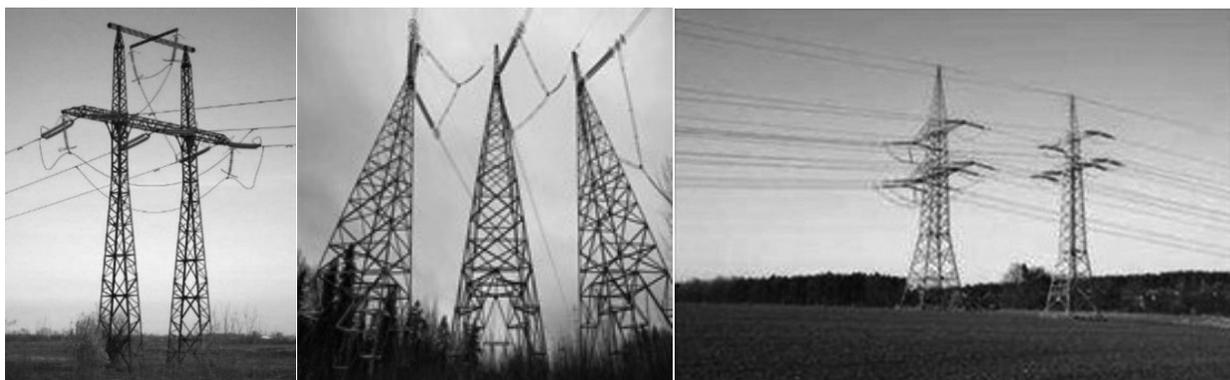


Рис. 1. Виды опор воздушных линий электропередач

для работы в режиме кинематического нагружения и характеризующиеся высокой жесткостью. Это требуется для реализации контролируемой скорости деформирования материала на стадии разупрочнения и обеспечения высокой жесткости, нагружающей системы по отношению к испытываемому образцу.

Математическое моделирование. Позволяет прогнозировать условия разрушения деформируемых тел и анализировать возможности управления этими процессами.

Использование современных технологий. Для диагностики и мониторинга деформированного состояния элементов конструкции применяют, например, видеосистемы регистрации полей перемещений и деформаций, аппаратуру регистрации сигналов акустической эмиссии, тензометрирования, термосканирования и скоростной видеосъемки.

Анализ существующих подходов показывает, что предлагаемые методы мониторинга по отношению опорам ВЛЭП не позволяют в полном объеме оценить параметры поврежденности отдельных элементов и прогнозировать работоспособность несущих конструкций опор в течение различных периодов эксплуатации, в том числе при закритических деформациях.

Для оценки технического состояния отдельных элементов опор ВЛЭП, имеющих повреждение (разрушения), разработан расчетно-экспериментальный подход к проведению мониторинга опор ВЛЭП, заключающийся в сопоставлении анализа инструментальных измерений деформаций и уклонов поврежденных элементов с результатами аналитических или численных расчетов и сравнении их с критическими значениями.

Цель данной работы — повышение эффективности мониторинга эксплуатационного состояния и оценка напряженно-деформированного состояния несущих конструкций ВЛЭП с учетом критических деформаций.

Оценка влияния этих повреждений на напряженно-деформированное состояние и общую устойчивость опор ВЛЭП и динамические характеристики опоры позволит сделать выводы о степени влияния и необходимости учета эксплуатационных дефектов несущих конструкций.

Этапы предлагаемого подхода к проведению мониторинга

Процесс оценки технического состояния металлических опор ВЛЭП с помощью предлагаемого подхода включает пять этапов.

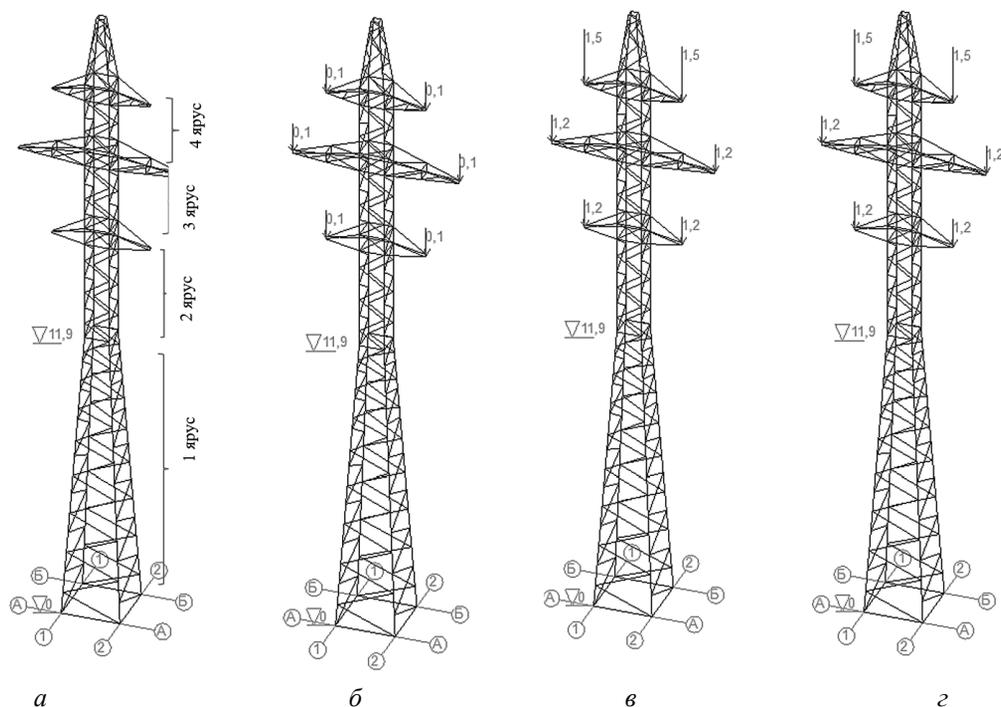


Рис. 2. Схемы: а — вертикальный план ВЛЭП; б — расчетная схема; в-г — схемы загрузки опоры ВЛЭП

Предварительное моделирование опор ВЛЭП: построение расчетной конечно-элементной модели типовой опоры ВЛ, определение вертикальных и горизонтальных перемещений, расчет частот и форм собственных колебаний конструкций [7, 8]. Дополнительно рекомендуется установить возможные места повреждения (разрушения) отдельных элементов, возможность применения.

Для повышения эффективности мониторинга технического состояния предлагается разделить опоры ВЛ на отдельные ярусы в конструктивном исполнении. Такое разделение позволит сформировать в дальнейшем область допустимых, опасных и критических повреждений и оценить фактическое техническое состояние опоры ВЛЭП.

Пример опоры ВЛ, разделение на ярусы, а также моделирование опоры ВЛ с учетом воздействия эксплуатационных нагрузок представлены на рис. 2. В качестве расчетной принята промежуточная двухцепная опора 35–10 кВ по

серии 3.407–2 для промежуточных и анкерно-угловых опор ВЛ 35–110 кВ.

В результате расчетов на действие эксплуатационных нагрузок и воздействий определяются вертикальные, горизонтальные перемещения, продольные усилия в наиболее нагруженных элементах при разрушении (изъятии) в каждом отдельном ярусе (рис. 3).

Выполним расчеты для всех ярусов ВЛЭП с учетом удаления элементов в уровне 2, 3, 4 и 5 ярусов. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы.

С увеличением высоты удаляемых элементов значительно снижаются максимальные вертикальные перемещения. Спектр этих элементов с максимальными перемещениями находится на том же уровне, что и удаляемый элемент.

Максимальные горизонтальные перемещения по оси X сначала увеличиваются и имеют максимум на 2 ярусе, затем уменьшаются до ми-

Таблица 1

Результаты расчетов

№ п/п	Ярус	Удаляем. элемент	Вертик. перемещ. макс. Z , мм	Горизонт. перемещ. макс. по X , мм	Горизонт. перемещ. макс. по Y , мм	Продольные усилия макс. кН	Коэфф. использ. макс.	Неустойч. элементы конст.
1	исх сост.	–	6,2	137	20,6	10,8	0,8	нет
2	1	1	12,5	206,2	47,9	19,2	1,05	есть
3	2	177	13,5	213	51,4	16,8	1,3	есть
4	3	248	10,2	158,9	10	2,4	1,25	есть
5	4	340	9,3	143,6	15,5	3,6	1,3	есть
6	5	380	6,2	137,6	19,9	$3,3 \cdot 10^{-2}$	0,5	нет

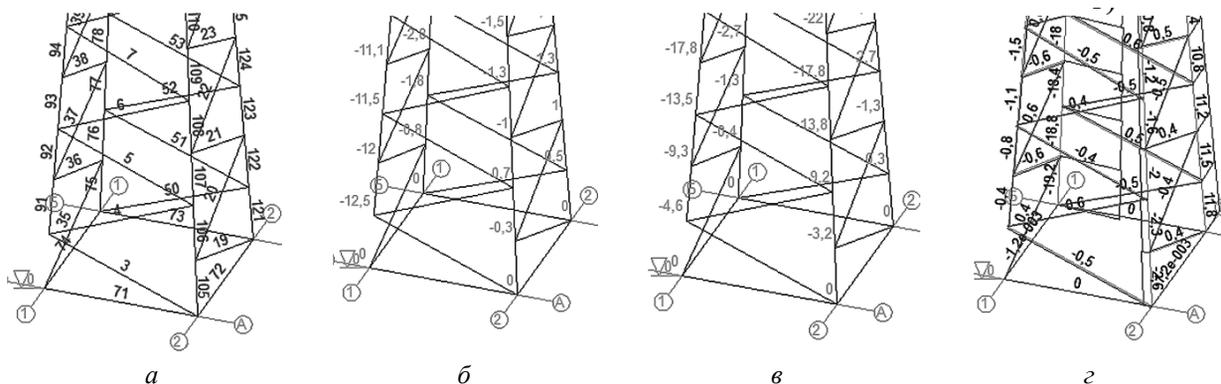


Рис. 3. Нижняя часть 1 яруса ВЛЭП: а — номера элементов, удаленная часть; б, в — вертикальные и горизонтальные перемещения; г — продольные усилия

нимальных значений; они возникают в направлении удаляемых элементов и находятся на последнем 5 ярусе.

Максимальные горизонтальные перемещения по оси Y возникают в направлении удаляемых элементов, и находятся на последнем 5 ярусе и имеют тенденцию резко возрастать и так же резко снижаться, что обусловлено различными типами решеток, а также различными сечениями направляющих на каждом уровне.

На 1–4 ярусах возможна потеря устойчивости отдельных элементов опор, что обусловлено перераспределением усилий в решетках опор за счет удаляемого элемента.

Обследование опор ВЛЭП после удаления отдельных элементов в полевых условиях. Данный этап является важнейшим. Проводится с целью определения уровня поврежденности; параметров вертикальных и горизонтальных перемещений, оценки параметров относительных деформаций, углов наклона отдельных элементов; определения плано-высотного положения отдельных элементов опор ВЛЭП. Обследование опор ВЛЭП включает следующие этапы.

Визуальный контроль проводится для оценки целостности и потери устойчивости отдельных элементов опор ВЛЭП, при этом фиксируется повреждение и его расположение.

Инструментальный контроль проводится для более детального обследования поврежденных конструкций и включает:

1. Осмотр с воздуха с помощью беспилотных летательных аппаратов. С их помощью проводят верховой осмотр опор ВЛ для выявления дефектов, диагностический облет по всем яру-

сам с целью обнаружения дефектов опор, пролетов и нарушений в зоне подвеса проводов, а также для возможного проведения топографо-геодезических работ.

В случае обнаружения элементов с потерей устойчивости такие элементы фиксируются, определяются возможные повреждения в виде скручивания сечений, выгиба их в различных направлениях.

2. Для оценки поврежденных элементов конструкций предлагается новый способ визуально-инструментального обследования поврежденных элементов опор ВЛ с использованием систем мониторинга с измерительными блоками. Они распределены по высоте ВЛЭП и связаны через канал связи с оборудованием на диспетчерском пункте. Предлагается их установка на каждом ярусе возле критичных элементов. Для определения вертикальности ядра ВЛЭП предлагается установка 2 инклинометров в уровне 1 яруса.

Для оценки деформированного состояния всей конструкции предлагается установка датчиков перемещений на элементах пятого яруса, которые имеют максимальные горизонтальные и вертикальные колебания. С целью получения достоверных эксплуатационных данных о деформациях в запрельных состояниях предлагается установка таких датчиков на один ярус ниже. Характеристики основного комплекта системы мониторинга представлены в табл. 2.

Проведение численных расчетов опор ВЛЭП с учетом наличия поврежденных элементов и определением параметров напряженно-деформированного состояния таких конструк-

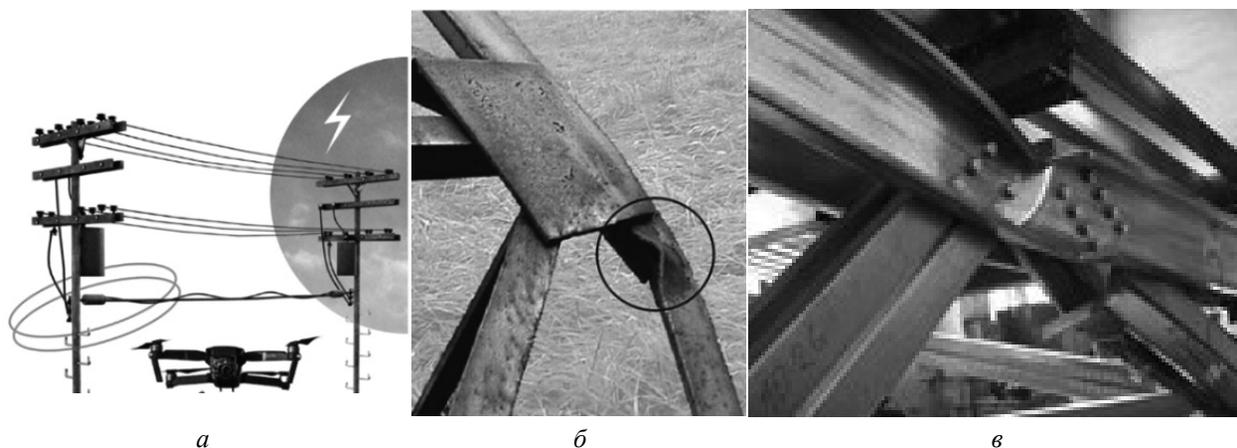


Рис. 4. Схемы обследования с помощью БПЛА отдельных поврежденных конструкций ВЛЭП

Характеристики основного комплекта системы мониторинга

№ п/п	Ярус	Инклинометры	Датчики перемещения трансформаторного типа (LVDT)	Датчик линейных перемещений на элементе Холла	Датчик деформации с базой 100 мм и 8 канальное устройство сбора данных (Zet Lab)
1	1	2	2	–	2
2	2–4	–	2	–	2
3	5	1	–	2	2

ций: вертикальных и горизонтальных перемещений (в узлах), при необходимости с помощью тензометров — деформаций поврежденных элементов.

Численные расчеты выполняются в расчетно-проектировочных комплексах SCAD, Лира и др., в которых возможно проведение расчетов специальных сооружений с учетом разрушения отдельных элементов опор ВЛЭП. Методика расчетов включает расчет на прогрессирующее разрушение с определением критических элементов, удаление которых приводит к опрокидыванию опоры ВЛЭП либо потере устойчивости всей конструкции ВЛЭП.

Сопоставление результатов расчета и результатов обследований: для этого выполняются два последовательных шага сравнения расчетных и экспериментальных данных в целях идентификации одного из пяти вариантов состояния конструкций: нормального, работоспособного, ограниченно-работоспособного и аварийного. Случае необходимости определяются динамические характеристики колебаний конструкций: частоты собственных колебаний, амплитуды и др.

Формулирование заключения о техническом состоянии отдельных конструкций всех ярусов, определяются критические элементы для каждого яруса, удаление которых приводит к прогрессирующему разрушению всей конструкции опор ВЛЭП.

Например, если состояние конструкции описывается работоспособное, но два соседних датчика показали отличие значений экспериментальных значений от численных результатов, необходимо не только обратить внимание на состояние крепления этих элементов друг к другу, но и детально обследовать состояние грани конструкции, расположенной между потенциально поврежденными опорными точками.

Заключение

Предложенный в рамках данной работы расчетно-экспериментальный подход к определению фактического технического состояния опор воздушных линий электропередачи основан на обобщении требований ГОСТ 31937–2024 для отдельного типа сооружений. Разработанная методика представляет собой простую последовательность экспериментальных исследований и численных расчетов, результатом которых становится определение технического состояния отдельных элементов обследованных конструкций и выясняется необходимость проведения оперативного осмотра или ремонта отдельных элементов этих конструкций.

Также для мониторинга ВЛЭП могут применяться алгоритмы обработки цифровой информации на основе искусственного интеллекта, которые позволяют выявлять на изображениях отклонения от нормальных параметров: вертикальных и горизонтальных перемещений, деформаций, кренов и в отдельных случаях параметров колебаний.

Список источников

1. ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Изд-во стандартов, 2024. 104 с.
2. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. 594 с.
3. Русаков С.В., Бузмакова М.М. Численные методы: курс лекций: учеб. пособие. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет. 2020. Ч. 2. 112 с.

4. Кожевников А.Н., Бурнышева Т.В. Применение методов моделирования в расчетах на прочность опор воздушных линий электропередачи при динамическом деформировании // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 10. С. 66–68.

5. Левин В.Е., Кожевников А.Н., Сафонов О.Н. К вопросу о расчете опор и участков воздушных линий электропередачи // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 6 (45). С. 68–72.

6. Смазнов Д.Н., Родчихин С.В., Москалев А.В., Зимин К.Н. Высотные опоры в индивидуальном проектировании воздушных линий // Энергия единой сети. 2017. № 1 (30). С. 38–45.

7. ГОСТ 34081–2017. Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний. М.: Изд-во стандартов, 2017. 26 с.

8. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. Новосибирск: Наука, 2009. 135 с.

9. Байков И., Голубев П., Сизых Ю. Применение дистанционных методов при обследовании воздушных линий электропередачи // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № 1.

10. Валиев А.В. Опыт применения БЛА «Птеро-Е» для поиска мест аварии на ЛЭП // Кабель-news. 2009. № 11. С. 20–22.

References

1. GOST 31937–2024. Buildings and structures. Rules for inspection and monitoring of technical condition. Moscow: Publishing House of Standards, 2024. 104 p.

2. Birbraer A.N., Roleder A.Y. Extreme impacts on structures, textbook. St. Petersburg: Publishing house of SPbGPU, 2009. 594 p.

3. Rusakov S.V., Buzmakova M.M. Numerical methods: a course of lectures: a textbook. Perm: Perm State National Research University, 2020. Part 2. 112 p.

4. Kozhevnikov A.N., Burnysheva T.V. Application of modeling methods in calculations for the strength of overhead power transmission poles under dynamic deformation // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2020. No 10. Pp. 66–68.

5. Levin V.E., Kozhevnikov A.N., Safonov O.N. On the calculation of overhead transmission line supports and segments // Electricity. Transmission and Distribution, 2017. No 6 (45). Pp. 68–72.

6. Smaznov D.N., Rodchikhin S.V., Moskalev A.V., Zimin K.N. High-altitude supports in the individual design of overhead lines // United Grid Energy. 2017. No 1 (30). Pp. 38–45.

7. GOST 34081–2017. Buildings and structures. Determination of the parameters of the fundamental tone of natural vibrations. Moscow: Publishing House of Standards. 2017. 26 p.

8. Arbuzov R.S., Ovsyannikov A.G. Modern methods of diagnostics of overhead power transmission lines. Novosibirsk: Nauka Publ., 2009. 135 p.

9. Baykov I., Golubev P., Sizykh Y. Application of remote methods in the examination of overhead power transmission lines // Electric power. Transmission and distribution. 2016. No 1.

10. Valiev A.V. The experience of using the Ptero-E UAV to search for power line accident sites // Cable-news. 2009. No 11. Pp. 20–22.