

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 621.31

*ТАРАСОВ АЛЕКСАНДР ГЕОРГИЕВИЧ, канд. техн. наук,
начальник службы диагностики ВЛ,
info@electrocorr.ru
АО «Электросетьсервис ЕНЭС», филиал «Электросетьремонт»,
Институт электроэнергетики
Новосибирского государственного технического университета,
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
СЕМУХИН БОРИС СЕМЕНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
bss@ispms.tsc.ru
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4,
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

КРИТЕРИЙ РЕСУРСА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРИМЕРЕ ОПОР ЛЭП

Ресурс работы или долговечность металлических конструкций опор ЛЭП является одной из жизненно важных характеристик, необходимых для успешного и безаварийного процесса передачи электроэнергии. Возможность определения ресурса работы металлических опор ЛЭП продемонстрирована в настоящей статье. Методом измерения скорости ультразвука на реальных опорах получена зависимость, позволяющая количественно оценить срок службы. Измерения проводили в Татарии (г. Елабуга).

Ключевые слова: ресурс работы; скорость ультразвука; опоры ЛЭП.

*ALEKSANDR G. TARASOV, PhD, A/Professor,
info@electrocorr.ru
АО Elektrosset'servis ENES, Electrical Engineering Institute,
Novosibirsk State Technical University,
20, K. Marks Ave., 630073, Novosibirsk, Russia,
BORIS S. SEMUKHIN, DSc, Professor,
semoukhin@yahoo.com
Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,
8/2, Akademicheskii Ave., 634021, Tomsk, Russia,
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

CRITERION OF SAFE OPERATION OF METAL STRUCTURES OF SUPPORTS

The paper deals with the durability of metal structures of supports which is one of their important properties necessary for the successful and accident-free operation of electric transmission lines. The criterion of safe operation is determined in the paper using a method of measuring the ultrasonic rate of the real supports. As a result the obtained dependence allows the quantitative analysis of the support lifetime. Measurements are carried out in Elabuga (Tataria).

Keywords: lifetime, ultrasonic rate; supports.

Введение

В настоящее время особенно актуальны проблемы технической диагностики работающих конструкций, эксплуатируемых длительное время на предельных режимах. Кроме того, существуют объекты, где необходим регулярный тщательный контроль состояния материалов узлов, деталей и конструкций. Для технической диагностики широко используют известные акустические методы. Анализ литературных данных показывает, что все известные методы, строго говоря, могут использоваться только в том случае, если исследуемый объект находится в упругодеформированном состоянии, т. е. напряжения в нем существенно меньше предела упругости. В этом случае практически любая задача допускает строгое аналитическое решение, сопоставление которого с экспериментальными данными дает корректный ответ на вопрос о распределении напряжений в объекте. Из-за уменьшения исходных сечений от коррозии или износа либо аномально высоких внешних воздействий напряжения в конструкциях и деталях могут выходить за принятые границы, и тогда возможно возникновение значительных пластических деформаций. Согласно действующим нормам **сверхнормативным** сроком службы воздушных линий (ВЛ) считается возраст проводов, первичной арматуры и изоляции более 25 лет, а **аварийным** для всех ВЛ принят срок службы (возраст) опор более 40 лет, после которого требуется замена или продление срока эксплуатации. Амортизируемым принят срок службы ВЛ 50 лет, исходя из предполагаемого ресурса опор.

Возрастная структура действующих ВЛ электрических сетей такова, что на данный момент уже более 37 % ВЛ находятся в аварийном состоянии, а к 2020 г. таких аварийных ВЛ будет уже более 50 %. В связи с этим исследование долговечности ВЛ, выработавших нормативный срок службы, и разработка методологии продления их ресурса по данным диагностики являются актуальной проблемой.

Поэтому основной целью настоящей работы являлось установление связи изменения скорости ультразвука с основными прочностными характеристиками на примере металлических опор ЛЭП, проработавших долгие годы и находящихся в упругопластическом состоянии. По зависимости изменения скорости ультразвука и времени эксплуатации металлических опор разработан критерий ресурса работы. Рассмотрим возможность продления срока службы опор ЛЭП. В статьях, посвященных этому вопросу, предлагаются различные технические решения.

Например, одним из эффективных способов увеличения прочности опор является присоединение дополнительных элементов болтовыми соединениями крестообразных ног. Эффективность метода модернизированных ног была проверена экспериментально. В статье предложен численный метод моделирования, сравниваемый с экспериментом. Параметрические исследования показали, что крестообразные соединения имеют высокую производительность передачи нагрузки стали в модернизированных опорах и эффективны в повышении прочности всей конструкции [1]. В настоящее время существуют два основных метода, усиливающих опоры, которые используются на практике. Первый метод включает в себя добавление количества горизонтальных скобок (диафрагм) к середине длины тонких опор, в то время как второй метод ориентирован на укрепление потенциала существующих ног путем модернизации их дополнительных частей. В статье [2] опора была исследована с помощью экспериментальной программы тестирования нелинейных конечных элементов в МКЭ модели. Результаты сравниваются с данными, полученными из экспериментов, с хорошим согласием. В статье анализируется влияние ветровой нагрузки на ресурс работы опор в горной местности. Показано, что вязкоупругие демпферы могут эффективно подавлять ветровую деформацию опоры. Численные результаты показывают, что реакция опоры на ветер и его влияние в основном связаны с жесткостью опоры и не зависят от высоты пролета линий электропередачи.

Большое количество статей посвящено мониторингу металлических конструкций (стальных опор). Так, в статье [3] для того, чтобы изучить динамические характеристики линий электропередачи при механических нагрузках, структурные показатели динамического мониторинга на основе требований измерения поля были определены в соответствии со структурными характеристиками стальных опор. Программа мониторинга была сделана на основе показаний датчиков. Вибрационные характеристики, динамическое поведение и механические напряжения выбраны в качестве параметров мониторинга. С помощью системы GPS можно одновременно контролировать состояние опоры, используя датчики вибрации, GPS и деформации. Мониторинг может обеспечить информацией, необходимой для создания системы раннего предупреждения разрушения опоры ЛЭП.

В статье [4] приведены данные по исследованию, проведенному для теоретической оценки жизненного цикла стальных опор одного типа (400 кВ), установленных на линии электропередачи. Исследование было сфокусировано на определении структурных и вибрационных характеристик промежуточных опор в условиях атмосферной коррозии с учетом потери металла от коррозии. Строится модель для анализа с учетом собственных частот колебаний опор. Предлагается прогнозирование срока службы опоры ЛЭП с учетом эффекта коррозии. Предлагается метод диагностики опор на основе мультигибридных датчиков для измерения вращения, перемещения и наклона опоры ЛЭП. Это сделано на основе рекомендации МЭК 61850 [UsN based Soundness Monitoring Diagnosis System of Power Transmission Steel Tower]. Описано техническое устройство, содержащее три вида оптико-волоконных датчиков, которые измеряют соответственно перемещения и давление воды для различных мест опоры.

В работе [5] предлагается бесконтактный метод измерения деформации для определения статической деформации при нагрузках, которые не могут быть достигнуты с помощью тензометрических датчиков. Этот метод основан на технологии фотограмметрии. Отслеживая и сравнивая 3D координаты, можно получить схему деформации для всей крупномасштабной структуры. В режиме реального времени предложенный метод может эффективно выполнить требования к точности решения масштабной задачи мониторинга полей деформации опор ЛЭП [6]. Обнаружение структурных повреждений в крупномасштабных трехмерных пространственных структурах является сложной задачей. В 2009 г. был предложен метод обнаружения повреждений для мониторинга опор ЛЭП, разработанный на основе методологии конечных элементов (КЭ) с использованием выявленных модельных параметров. В статье [7] обсуждаются некоторые практические вопросы, связанные с предлагаемым способом, например размещение датчиков. Расположение датчиков должно быть таким, чтобы измеренные данные содержали информацию для идентификации всех сценариев заданных повреждений. Предложенный метод затем проверяется на уменьшенной модели опоры (2,4 м в высоту), построенной в лаборатории структурной вибрации (SVL) Городского университета Гонконга. Результаты проверки показывают, что предложенный метод обнаружения определяет поврежденные структуры во всех рассмотренных случаях.

Достаточно много статей, описывающих моделирование дефектов, нагрузок и иных факторов на срок службы конструкций опор. В работе [8] приведены новые алгоритмы развития методики определения внешних дефектов сооружений, основанных на использовании в комплексной системе мониторинга видеодетекторов. Методика может применяться как постоянно в режиме реального времени, так и время от времени при проведении профилактических обследований и паспортизации объектов. Предлагаемые алгоритмы могут оценивать появление тех или иных внешних дефектов по всей поверхности сооружения. В статье [9] разработан критерий прочности для трубных опор ЛЭП на основе экспериментальных исследований и теоретических расчетов. Расчеты четырех различных спецификаций стальной трубы показали, что прочность зависит от четырех параметров, определяющих размеры и диаметр трубы. Рекомендуется формула расчета предела прочности в упругой и пластичной области работы опоры. В статье [10] описан способ анализа ветровой вибрации и контроль опор в горной местности. Метод применяется к реальной линии передачи, имеющей две самонесущие стальные угловые опоры. Статья [11] посвящена оценке надежности стальных опор линий электропередач в России. В настоящее время временной ресурс существующих опор в большинстве своем исчерпан, однако замена их связана с большими материальными затратами. По наблюдениям авторов статьи, в подавляющем большинстве стальные опоры находятся в работоспособном состоянии, и срок их службы может быть продлен. В то же время выявлено наличие относительных смещений подножников четырехногих опор, приводящих (в силу статической неопределимости схемы) к появлению дополнительных внутренних усилий. Выполненные с использованием программных комплексов расчеты показали, что в отдельных случаях при неблагоприятных погодных усло-

виях возможна потеря устойчивости опор, несмотря на полное соответствие опор проектным требованиям. Предлагается внести коррективы в существующие нормативные документы

Таким образом, пристальное внимание и большой интерес к проблеме определения ресурса работы опор ЛЭП прослеживается во многих изданиях. Однако нет прямого и достаточно точного метода определения этой характеристики в реальных условиях. В настоящей работе предлагается метод определения ресурса по изменению величины скорости ультразвука, измеряемой непосредственно на опорах ЛЭП.

Методика измерений

В представленной работе в качестве метода определения напряжений в опорах ЛЭП был выбран метод измерения малых изменений скорости распространения ультразвука. В работах [12–15] обоснована физическая природа этих связей и установлена принципиальная возможность определения напряжений акустическим методом по соответствующим корреляционным зависимостям.

Преимущества метода:

– устойчивое обнаружение начальной стадии накопления повреждаемости в металлах, не определяемой с помощью серийно выпускаемых ультразвуковых, электромагнитных, вихревых дефектоскопов;

– оперативное получение квалифицированного заключения о состоянии и ресурсе работы металлоконструкций на действующем оборудовании в процессе эксплуатации;

– возможность предсказания места зарождения разрушений в узлах деталей и конструкций.

Метод автоциркуляции импульсов основан на измерении скорости акустических волн, распространяющихся в исследуемом образце. При этом прошедший по образцу (объекту) ультразвуковой импульс преобразуется в приёмном пьезопреобразователе ультразвукового датчика в электрический сигнал, формирующий следующий вводимый в объект импульс.

Скорость распространения акустических волн в твердых телах определяется модулями упругости и плотностью последних. Любое изменение напряженно-деформированного или структурного состояния материала вызывает изменение сил взаимодействия между атомами и расположения атомов, а следовательно, модулей упругости и функционально связанной с ними скорости распространения ультразвука. Прецизионные измерения скорости ультразвука в различных металлах и сплавах позволяют судить о вариациях химического состава, структурных изменениях, однородности строения объекта на микроскопическом уровне, характере распределений внутренних напряжений и пр. В настоящее время строгие математические зависимости значения скорости акустической волны в материале от конкретных параметров структуры, содержания примесей или уровня напряжений в объекте неизвестны. Поэтому экспериментально устанавливаются функциональные связи между скоростью акустических волн v или частотой автоциркуляции ν ультразвуковых импульсов, пропорционально связанной со скоростью (далее – информативный параметр) и исследуемым показателем. Эти связи имеют строгое физическое обоснование.

Для определения напряжений была разработана Методика выполнения измерений ультразвуковым методом (МВИ) «Напряжения механические в стальных элементах опор ЛЭП», аттестованная в Томском ЦСМ № 003 2008 г.

В настоящем методе предусматривается предварительное построение градуировочной зависимости (ГЗ) на рабочем эталоне (далее – образце) между частотой автоциркуляции импульсов (или её изменением по отношению к контрольному состоянию) и механическим напряжением, возникающим вследствие механического нагружения образцов при проведении испытаний на растяжение или изгиб на силоизмерительной универсальной машине. Допускается пользоваться номинальной ГЗ. В качестве нормативов оперативно-го контроля точности результатов измерений принимают:

– допускаемое расхождение результатов измерений напряжений на обследуемом объекте (образце), выполненных при одних и тех же условиях по МВИ, d – норматив контроля сходимости результатов МВИ;

– допускаемое расхождение результатов измерений напряжений при испытаниях одного и того же объекта (образца), выполненных в различных условиях, допускаемых методикой, D – норматив контроля воспроизводимости результатов МВИ;

– допускаемое расхождение результатов измерений напряжений с использованием градуировочной зависимости на контрольном образце и приложенным к нему нормированным воздействием, K – норматив контроля точности результата измерений по данной методике.

Приписанные характеристики погрешности результатов измерений напряжений и нормативы контроля точности устанавливаются для всей области действия методики. Оценка характеристик погрешности проводится по алгоритмам, изложенным в нормативных документах МИ 1967 «ГСИ. Выбор методов и средств измерений при разработке методик выполнения измерений. Общие положения», МИ 1317 «ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров», ГОСТ 8.207 «ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений», МИ 2083 «ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей», МИ 2336 «Характеристики погрешности результатов количественного химического анализа. Алгоритмы оценивания и адаптированных к разработанной методике выполнения измерений».

Для измерения скорости распространения ультразвука при эксплуатации конструкций и сооружений использовали ультразвуковой прибор ASTR. С его помощью можно проводить анализ состояния металлов или сплавов и оценивать эксплуатационные возможности узлов деталей и конструкций в процессе длительной эксплуатации в экстремальных режимах. Он обеспечивает получение информации о структуре сталей и сплавов (в том числе непосредственно на работающем оборудовании), контроль качества и прочностных показателей металла, достоверный прогноз оценки фактического эксплуатационного ресурса металлоконструкций.

В приборе ASTR используются рэлеевские поверхностные волны с частотой 2,5–10 МГц. Ультразвуковые колебания вводятся и принимаются стан-

дартным способом, с помощью призмобразных пьезопреобразователей, расположенных на расстоянии $33 \pm 0,5$ мм в корпусе, залитом компаундом. На дисплее прибора отражается значение частоты автоциркуляции, измеряемой с точностью 10^{-5} .

Результаты эксперимента

В статье проанализированы результаты натуральных измерений механических напряжений в поясных уголках опор ВЛ 110 кВ «Тойма 2 – Прикамская» и «Отпайка на ГПП-1».

Обследование элементов металлических опор ВЛ 110 кВ «Тойма 2 – Прикамская» и «Отпайка на ГПП-1» производилось в двух опасных зонах, выявленных расчётным путём при максимальных нагрузках (рис. 1) Согласно расчётам, зоны с опасными механическими напряжениями могут возникать на нижней секции опоры в районе нижней диафрагмы (зоне максимального изгибающего момента от ветровой нагрузки) и в районе нижней траверсы (в зоне максимального изгибающего момента при несимметричной нагрузке от веса проводов и гололёда, зависящих от длины пролета). Датчик прибора предварительно калибровался на эталоне (рис. 2), установленном на опоре, с целью выравнивания температурного режима, а затем уже устанавливался на поясной уголок для измерений. Как показывают результаты измерений, механические напряжения в поясных уголках не обладают стабильностью (одинаковостью), которая свойственна идеализированным конструкциям, принимаемым для расчёта. Разброс измеренных механических напряжений по стойкам каждой отдельной опоры и между разными опорами одного типа вызван, прежде всего, отклонением фактической геометрии опор от теоретической. Это и изогнутые уголки, и смещённые фундаменты, и разные марки сталей уголков, и их размеры, используемые в опорах. Это и наличие эксцентриситета конструкции опоры относительно её вертикальной оси и оси трассы ВЛ, прокатная неоднородность самих поясных уголков и остаточная деформация этих уголков с момента монтажа опор. Для контроля материала опоры (марки стали) и его свойств дополнительно к эталонному образцу на реальных опорах в качестве рабочего эталона использовались «косынки» подпятников стоек опор ЛЭП, т. к. в них наименьшее механическое напряжение и они сделаны из того же металла, что и стойки опор.

Результаты натуральных измерений скорости ультразвука в элементах опор, полученные для опор, проработавших многие годы, позволили построить зависимость ресурса работы от изменения скорости ультразвука (рис. 3). Анализ данной зависимости дает возможность количественной оценки уровня снижения срока службы элементов опор, типа поясных уголков, что критично в районах с высокими значениями ветрового давления. В работе предлагается критерий ресурса работы опор ЛЭП, основанный на прецизионных измерениях скорости распространения ультразвука в элементах опор. Он заключается в построении графика зависимости изменения прироста скорости ультразвука по отношению к эталонной. Затем проводится дифференцирование полученной кривой, и по резкому изменению данного параметра можно определять ресурс работы (рис. 4).



Рис. 1. Опора ВЛ 110 кВ «Тойма 2 – Прикамская»



Рис. 2. Процесс измерения скорости ультразвука с поправкой на реальную температуру металла опоры

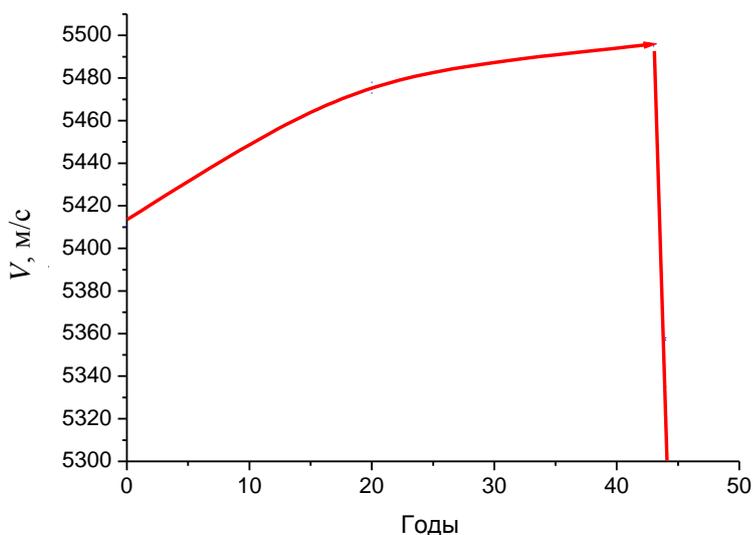


Рис. 3. Зависимость скорости ультразвука от срока эксплуатации опор

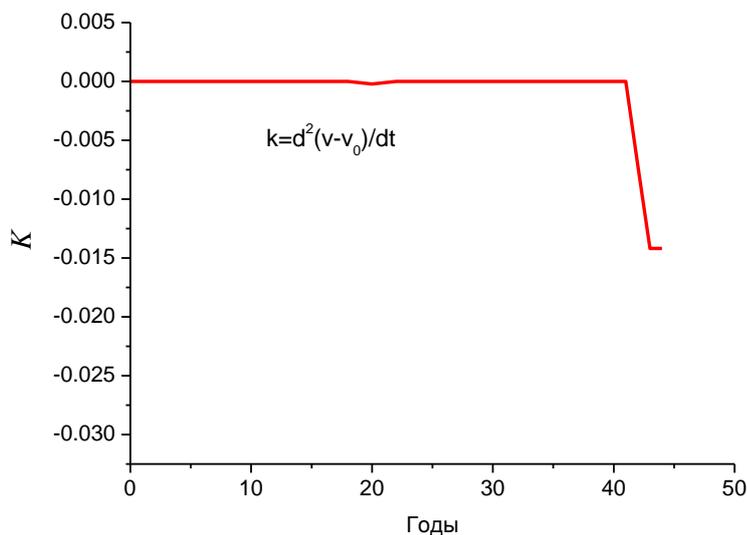


Рис. 4. Коэффициент ресурса работы

В результате можно утверждать, что скорость ультразвука является структурно чувствительной характеристикой и позволяет пересчитывать ее в основные механические напряжения для любого эксплуатационного состояния металла конструкций опор ВЛ. Используя полученную аналитическую зависимость изменения скорости от срока эксплуатации опор, удастся с достаточно хорошей точностью определять ресурс работы.

В качестве критерия ресурса выбран показатель – коэффициент ресурса, который представляет собой вторую производную от зависимости изменения скорости ультразвука от срока службы самих конструкций.

Таким образом, в работе введен новый технический критерий ресурса работы любой металлической конструкции с различным типом нагружения. Практическое использование предложенного критерия, основанного на изменении скорости распространения ультразвука, возможно при ремонте или техническом обслуживании. Простота измерений при любых условиях позволяет использовать его в районах с экстремальными метеоусловиями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Lu Chenghao*. Modeling of retrofitted steel transmission towers / Lu Chenghao, Ma Xing, J.E. Mills // *Journal of constructional steel research*. – 2015. – V. 112. – P. 138–154.
2. *Yan Zhuge*. Modeling of steel lattice tower angle legs reinforced for increased load capacity / Yan Zhuge, J.E. Mills, Ma Xing // *Engineering structures*. – 2014. – V. 43. – P. 160.
3. *Xia Kaiquan*. Structural Dynamic Response Monitoring of Power Transmission Tower / Xia Kaiquan, Liu Xuewu, Liu Yun // *International Conference on Vibration, Structural Engineering and Measurement (ICVSEM 2011)*: Shanghai, Applied Mechanics and Materials. – 2012. – V. 105–107. – P. 986.
4. *Salazar, J.E.* Life prediction of electrical power transmission tower/ J.E. Salazar, J.A. Mendoza // *ASME 9th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis Haifa, ISRAEL*. – 2008. – V. 2. – P. 313–323.
5. *Cao Yongxing*. Design and application of online landslide monitoring system for transmission lines corridor based on the optical fiber sensing technology / Cao Yongxing, Xue Zhihang, Zhang Changhua // *International Conference on Mechatronics Engineering and Computing Technology (ICMECT) Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – V. 556–562. – P. 3160–3163.
6. *Liu Jian-wei*. Development of a 3D full-field monitoring system for large-scale static deformation based on Close Range Photogrammetry / Liu Jian-wei, Jiang ZHI-qiang, Liu Yuan-peng // *3rd International Conference on Manufacturing Science and Engineering (ICMSE 2012) Advanced Materials Research*. – 2012. – V. 468–471. – P. 1074–1077.
7. *Lam Heung-Fai*. Dynamic reduction-based structural damage detection of transmission towers: Practical issues and experimental verification / Lam Heung-Fai, Yin Tao // *Engineering structures*. – 2011. – V. 33. – P. 1459–1478.
8. *Loktev, A.A.* Method of determining external defects of a structure by analyzing a series of its images in the monitoring system / A.A. Loktev, V.F. Bakhtin, I.Yu. Chernikov // *Vestnik MGSU*. – 2015. – V. 3. – P. 7–16.
9. *Jiao An-Liang*. Experiment study and theoretical analysis of ultimate strength for steel tubular joint of uhv transmission tower / Jiao An-Liang, Li Zheng-Liang, Liu // *3rd International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering (ICCAHE) Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – V. 638–640. – P. 84–100.
10. *Sheng Zhengyi*. Analytical Study on Wind-induced Vibration and its Control of Transmission towers in Mountainous Area / Sheng Zhengyi, Xia, Chun, Xu Weiping et al.; ed. Lin PP, Zhang // *International Conference on Vibration, Structural Engineering and Measurement (ICVSEM 2011) Shanghai, Applied Mechanics and Materials*. – 2011. – V. 105–107. – P. 635–639.
11. *Кудлай, А.А.* Рассогласование опорных узлов как параметр оценки напряженно-деформированного состояния опор ЛЭП / А.А. Кудлай // *Вестник Оренбургского государственного университета*. – 2006. – № 9. – Ч. 2. – С. 308–311.
12. *Semukhin, B.S.* Ultrasound-velocity measurement of strain in metallic polycrystals / B.S. Semukhin, K.I. Bushmelyova, L.B Zuev // *Material Research Innovatios*. – 2002. – V. 5. – № 3–4. – P. 140–143.
13. *Zuev, L.B.* Some acoustic proper-ties of a deforming medium / L.B. Zuev, B.S. Semukhin // *Philos. Mag. A*. – 2002. – V. 82. – № 6. – P. 1183–1193.
14. *Зуев, Л.Б.* Акустические свойства металлов и сплавов при деформации / Л.Б. Зуев, Б.С. Семухин // *Физика и химия обработки материалов*. – 2002. – № 5. – С. 62–68.
15. *Зуев, Л.Б.* Использование измерений скорости ультразвука для определения напряженно-деформированного состояния металлических изделий / Л.Б. Зуев, А.Г. Лунев, Б.С. Семухин // *Измерительная техника*. – 2010. – № 4. – С. 58–61.

REFERENCES

1. Lu Chenghao, Ma Xing, Mills Julie E. Modeling of retrofitted steel transmission towers. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. V. 112. Pp. 138–154.
2. Yan Zhuge, Mills Julie E., Ma Xing. Modeling of steel lattice tower angle legs reinforced for increased load capacity. *Engineering Structures*. 2014. V. 43. P. 160.
3. Xia Kaiquan, Liu Xuewu, Liu Yun. Structural dynamic response monitoring of power transmission tower. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. V. 105–107. P. 986.
4. Salazar J.E.; Mendoza J.A. Life prediction of electrical power transmission tower. *ASME 9th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*. Haifa, Israel, 2008. V. 2. Pp. 313–323.
5. Cao Yongxing, Xue Zhihang, Zhang Changhua. Design and application of online landslide monitoring system for transmission lines corridor based on the optical fiber sensing technology. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. V. 556–562. Pp. 3160–3163.
6. Liu Jian-wei, Jiang Zhi-qiang, Liu Yuan-peng. Development of a 3D full-field monitoring system for large-scale static deformation based on close range photogrammetry. *Advanced Materials Research*. 2012. V. 468–471. Pp. 1074–1077.
7. Lam Heung-Fai, Yin Tao. Dynamic reduction-based structural damage detection of transmission towers: Practical issues and experimental verification. *Engineering Structures*. 2011. V. 33. Pp. 1459–1478.
8. Loktev A.A., Bakhtin V.F. Chernikov I.Yu. Method of determining external defects of a structure by analyzing a series of its images in the monitoring system. *Vestnik MGSU*. 2015. V. 3. Pp. 7–16.
9. Jiao An-Liang, Li Zheng-Liang Liu. Experiment study and theoretical analysis of ultimate strength for steel tubular joint of uhv transmission tower. *Proc. 3rd Int. Conf. 'Civil, Architectural and Hydraulic Engineering'*. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. V. 638–640. Pp. 84–100.
10. Sheng Zhengyi, Xia Chun, Xu Weiping, et al. Analytical study on wind-induced vibration and its control of transmission towers in mountainous area. *Proc. Int. Conf. 'Vibration, Structural Engineering and Measurement'*, *Applied Mechanics and Materials*. 2011. V. 105–107. Pp. 635–639.
11. Kudlai A.A. Rassoglasovanie opornykh uzlov kak parametr otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya opor LEP [Imbalance of support assemblies as estimation parameter of their stress-strain state]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2006. V. 2. No. 9. Pp. 308–311. (rus)
12. Semukhin B.S. Bushmelyova K.I., Zuev L.B. Ultrasound-velocity measurement of strain in metallic polycrystals. *Material Research Innovations*. 2002. V. 5. No. 3–4. Pp. 140–143.
13. Zuev L.B., Semukhin B.S. Some acoustic properties of a deforming medium. *Philos. Mag. A*. 2002. V. 82. No. 6. Pp. 1183–1193.
14. Zuev L.B., Semukhin B.S. Akusticheskie svoystva metallov i splavov pri deformatsii [Acoustic properties of metals and alloys at deformation]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2002. No. 5. Pp. 62–68. (rus)
15. Zuev L.B., Lunev A.G., Semukhin B.S. The use of measurements of the velocity of ultrasound to determine the stress-strain state of metal articles. *Measurement Techniques*. 2010. No. 4. Pp. 439–443.