

Методика оценки технического состояния опор воздушных линий электропередачи с учетом типовых эксплуатационных дефектов

© Т.В. Бурнышева, А.Н. Кожевников

ФГБОУ ВО НГТУ, Новосибирск, 630073, Россия

Оценку технического состояния конструкций по результатам модальных испытаний успешно применяют в строительной отрасли. Однако опоры воздушных линий электропередачи представляют собой специализированные сооружения, поэтому при их диагностировании требования имеющихся стандартов не могут быть применены. Для опор не приведены справочные значения частот собственных колебаний, нет методики проведения частотных испытаний, не даны критерии распределения конструкций по степени дефектности. В связи с этим возникла необходимость разработки отдельного подхода к оценке технического состояния конструкций данного типа. Предлагаемая методика позволяет проводить сопоставление рассчитанных и экспериментально полученных значений частот собственных колебаний опор воздушных линий электропередачи. По результатам выполненного сопоставления можно не только определять тип дефекта в конструкции, но и локализовать его вблизи ее основания или в решетке наполнения на одной из граней. Особенность предлагаемой методики заключается в том, что дополнительно учитываются и типовые эксплуатационные дефекты в конструкциях обследуемого класса. На примере участка СВ-5 приведены результаты применения методики оценки состояния промежуточных башенных опор воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ, сформулированы преимущества применения предлагаемой методики при планировании оперативного осмотра конструкций, в том числе и для мониторинга отдельных опор на постоянной основе.

Ключевые слова: *воздушные линии электропередачи, ANSYS, техническое состояние конструкции, частота собственных колебаний, эксплуатационные дефекты, деформация элементов*

Введение. Для передачи электроэнергии на большие расстояния широко применяют воздушные линии (ВЛ) электропередачи.

Конструктивно эти воздушные линии состоят из трех структурных элементов: проводников электрического тока, изоляционных устройств в точках подвеса проводов электросети и непосредственно опор ВЛ. В расчетной схеме отдельного участка линии электропередачи присутствуют модели двух типов: стержневые — для описания поведения проводников тока и гирлянд изоляторов и конечно-элементные — модели самих опор [1–3].

Воздушные линии электропередачи за время эксплуатации (до 50 лет) подвергаются негативному воздействию внешних факторов, таких как ветровые нагрузки разной интенсивности и периодичности, температурные перепады при смене сезонов года и времени суток,

атмосферные осадки (налипание снега, гололедные явления) и т. д. Все указанные воздействия приводят к образованию эксплуатационных дефектов, которые снижают несущую способность опор ВЛ и, как следствие, всей системы транспортировки электрической энергии [4–5].

Для оценки технического состояния промежуточных металлических опор ВЛ была разработана расчетно-экспериментальная методика, основанная на сопоставлении расчетных значений частот собственных колебаний каждой отдельной опоры с измеренными значениями при проведении фактического обследования участка воздушной линии электропередачи.

Цель данной работы — представить результаты апробации методики после обследования участка реальной линии СВ-5 с формулированием выводов о текущем техническом состоянии каждой обследованной конструкции.

Описание типовых эксплуатационных дефектов. На примере промежуточных опор П110-3, установленных в Томской области, рассмотрим типовые эксплуатационные дефекты. Наиболее часто встречаются деформирование или отсутствие отдельных силовых элементов решетки заполнения, а также наличие вертикальных смещений опорных точек конструкции, обусловленных подвижностью грунтов или ослаблением соединения подпятников опоры с бетонным основанием. Учет таких дефектов при разработке методики позволит определять состояние не только типовой конструкции, но и опор конкретного участка.

Опоры ВЛ изготавливают по типовому проекту. Поскольку при установке опор следует принимать во внимание качество грунта, приходится использовать ряд типовых бетонных оснований разной заглубленности. В случае расстановки опор на гористой местности необходимо учитывать существенный перепад высот, а также то, что распределение усилий от тяжения проводов будет иным, чем при прохождении ВЛ по равнинной местности. Следовательно, несмотря на то что металлические промежуточные опоры изготавливают по типовому проекту, существует ряд факторов, обуславливающих необходимость рассматривать каждую опору ВЛ как индивидуальную конструкцию [6].

Этапы предлагаемой методики. Процесс оценки технического состояния промежуточных металлических опор ВЛ с помощью предлагаемой методики состоит из четырех этапов.

1. *Предварительное моделирование* — заключается в построении расчетной конечно-элементной модели типовой опоры, расчете частот и форм собственных колебаний конструкции с учетом жесткого защемления модели опоры [7, 8]. Дополнительно рекомендуется установить типовые дефекты для исследуемого участка ВЛ и предложить способы внесения таких дефектов в расчетную модель. Оцен-

ка влияния этих дефектов на напряженно-деформированное состояние и динамические характеристики опоры позволит сделать выводы о степени влияния и необходимости учета эксплуатационных дефектов отдельных классов.

2. *Обследование участка линии электропередачи в полевых условиях* — проводится инспекция линии с целью определить частоты собственных колебаний каждой опоры, измерить вертикальные смещения опорных точек каждой конструкции относительно уровня, проведенного через одно из оснований, и провести визуальный осмотр, для того чтобы исключить существенные отклонения в состоянии конструкции (физическое отсутствие силовых элементов, обрывы проводников тока, существенный крен конструкции) [9, 10].

3. *Сопоставление результатов расчета и эксперимента* — для этого выполняются два последовательных шага сравнения расчетных и экспериментальных данных в целях идентификации одного из пяти вариантов состояния конструкции. На первом шаге сравнения все обследованные конструкции подразделяют на две группы: «исправные» (опоры группы А) и «требующие дополнительного анализа» (опоры группы Б). На втором шаге данного этапа проводят детальный анализ спектра частот собственных колебаний опор группы Б для снижения количества исправных конструкций, предварительно классифицированных как «дефектные».

4. *Формулирование заключения о техническом состоянии каждой отдельной конструкции* — на этом этапе каждой опоре ставится в соответствие одно из пяти состояний конструкции (R_1-R_5), определенное по результатам предыдущего этапа. Например, если состояние конструкции описывается параметром R_3 , это означает, что два соседних датчика показали отличие значений экспериментальных частот от ожидаемых значений. В этом случае необходимо не только обратить внимание на состояние крепления соответствующих подпятников к бетонному основанию или рассогласование отмеченных фундаментов, но и более детально обследовать состояние грани конструкции, расположенной между потенциально поврежденными опорными точками. Затем эти пять состояний распределяют по трем укрупненным группам: «исправные», «работоспособные» и «ограниченно работоспособные» конструкции [11]. В зависимости от того, к какой из групп отнесена опора, можно сделать вывод о необходимости и срочности более детального осмотра конструкции, включая подъем на нее и выполнение ремонтных работ.

В рамках данной статьи основное внимание уделено третьему и четвертому этапам предложенной авторами расчетно-экспериментальной методики. Остановимся на них более подробно. Для каждого из указанных шагов третьего этапа методики сопоставления частот

собственных колебаний предложены алгоритмы, представленные на рис. 1 и 2.

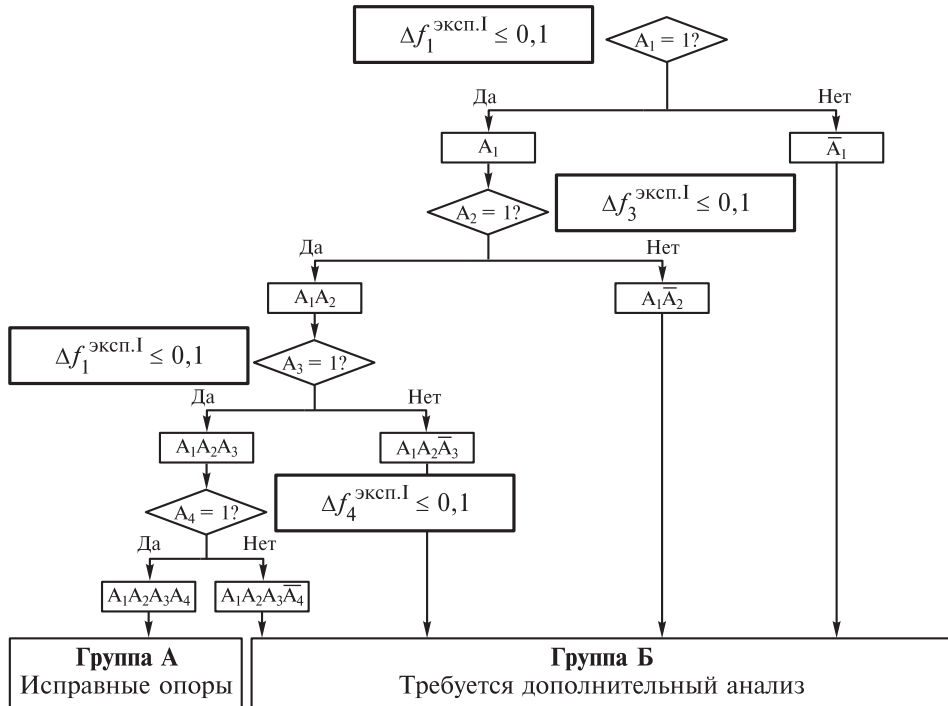


Рис. 1. Логическая схема первого шага третьего этапа методики

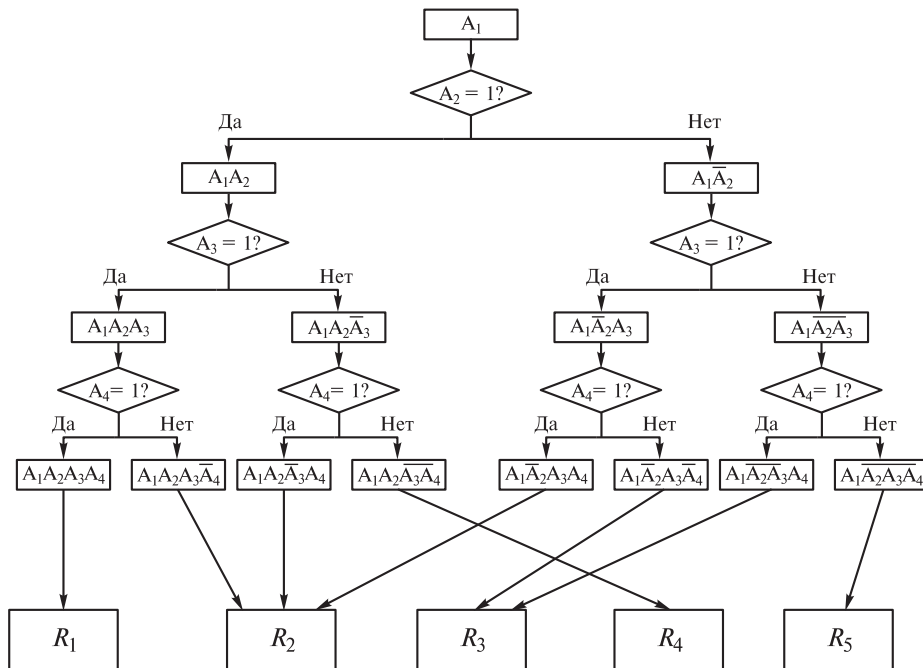


Рис. 2. Логическая схема второго шага третьего этапа методики

Экспериментальные данные. Исходными данными для первого шага третьего этапа методики выступают значения частот собственных колебаний, определенные по результатам измерений четырьмя тензометрическими датчиками, установленными на каждом из поясных уголков таким образом, чтобы каждая пара датчиков фиксировала колебания в одной из двух плоскостей опоры: вдоль или поперек направления проводов электрической сети.

Полученные значения частот от каждого датчика ранжируются по убыванию интенсивности (табл. 1). В качестве эталонных значений при сопоставлении используются медианные значения частот по каждому из датчиков. Критерием сопоставления выступает совпадение значений эксперимента и расчета до 10 %. Пороговое значение принято согласно ГОСТ 31937—2011 [11].

Таблица 1

Пример экспериментальных данных для опоры № 179

Датчик 1		Датчик 2		Датчик 3		Датчик 4	
Частота, Гц	Интенсивность	Частота, Гц	Интенсивность	Частота, Гц	Интенсивность	Частота, Гц	Интенсивность
37,79	0,0036	37,79	0,0061	37,79	0,0036	2,53	0,0050
22,94	0,0017	20,89	0,0005	2,63	0,0027	20,89	0,0009
2,63	0,0006	22,16	0,0003	14,74	0,0007	14,74	0,0009
4,29	0,0003	35,93	0,0001	22,94	0,0005	37,79	0,0006
37,20	0,0003	2,53	0,0001	15,62	0,0003	28,32	0,0004

Перед проведением второго шага сопоставления частот на третьем этапе методики необходимо уточнить эталонные значения частот собственных колебаний. Для этого среди опор группы А рассчитываются медианные значения для всех четырех датчиков. В эти показатели заложено осредненное состояние конкретного обследуемого участка ВЛ: качество грунта в местности установки опор, средний износ линии, типовые пролеты между опорами и т. д.

Далее необходимо оценить диапазон значений частот собственных колебаний исправных опор, для того чтобы среди опор группы Б выделить значения частот собственных колебаний из описанного диапазона без учета интенсивности этих частот. Затем проводят повторное сопоставление значений частот с критерием совпадения 5 %.

Ужесточение критерия относительно предложенного по ГОСТ 31937—2011 [11] связано с проведенным детальным анализом спектра конструкций группы Б — поиском частот исправных конструкций без учета интенсивности. При обследовании каждой отдельной линии допуск можно задавать индивидуально, что позволит планировать работы по текущему обследованию более гибко и вести мониторинг состояния конструкций на постоянной основе.

Тестирование методики. Апробация разработанной методики была выполнена по результатам обследования участка линии СВ-5 сотрудниками ООО «Институт Электроэнергетики НГТУ». Экспериментальные данные включали результаты 10 частот собственных колебаний по каждому из четырех датчиков, установленных на 49 обследованных конструкциях. В качестве примера приведем экспериментальные данные для трех опор, расположенных на обследованном участке (табл. 2).

Таблица 2

Экспериментально полученные значения частот собственных колебаний датчиков, установленных на опорах участка СВ-5

Номер опоры	Показания датчиков, Гц			
	Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3	Датчик 4
182	14,16	14,16	14,45	14,16
190	2,83	2,63	2,83	2,63
214	34,27	2,73	34,27	2,73

Рассчитанные медианные значения частот собственных колебаний составили 2,83 и 2,73 Гц соответственно. После проведения сопоставления по схеме для первого шага третьего этапа опора № 190 была классифицирована как «исправная», а в отношении опор № 182 и 214 выяснилось, что их следует детально проанализировать (рис. 3).

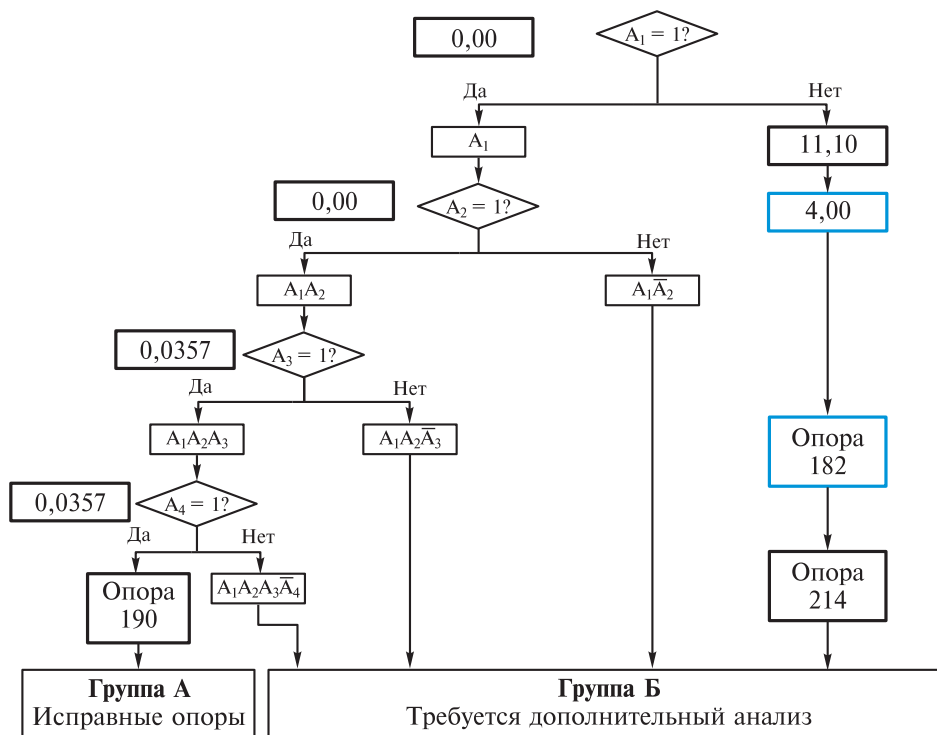


Рис. 3. Результаты проведения первого шага третьего этапа методики

При сопоставлении значений частот на первом шаге третьего этапа методики из 49 опор 30 были классифицированы как «исправные» и 19 опор были отнесены к группе Б и подлежали детальному анализу. Диапазон значений частот собственных колебаний среди «исправных» конструкций составлял 2,54...2,93 Гц, а медианные значения (эталон для сопоставления) остались без изменений — 2,73 и 2,83 Гц.

После детального анализа спектров частот собственных колебаний опор группы Б и поиска частот из диапазона исправных конструкций без учета их интенсивности были получены значения для выполнения второго шага третьего этапа сопоставления (табл. 3).

Таблица 3

Экспериментально полученные значения частот собственных колебаний датчиков, установленных на опорах участка СВ-5 после детального анализа спектров колебаний

Номер опоры	Показания датчиков, Гц			
	Датчик 1, $f_1^{\text{экс. I}}$	Датчик 2, $f_2^{\text{экс. I}}$	Датчик 3, $f_3^{\text{экс. I}}$	Датчик 4, $f_4^{\text{экс. I}}$
182	2,63	2,63	2,63	2,63
190	2,83	2,63	2,83	2,63
214	2,73	2,73	2,73	2,73

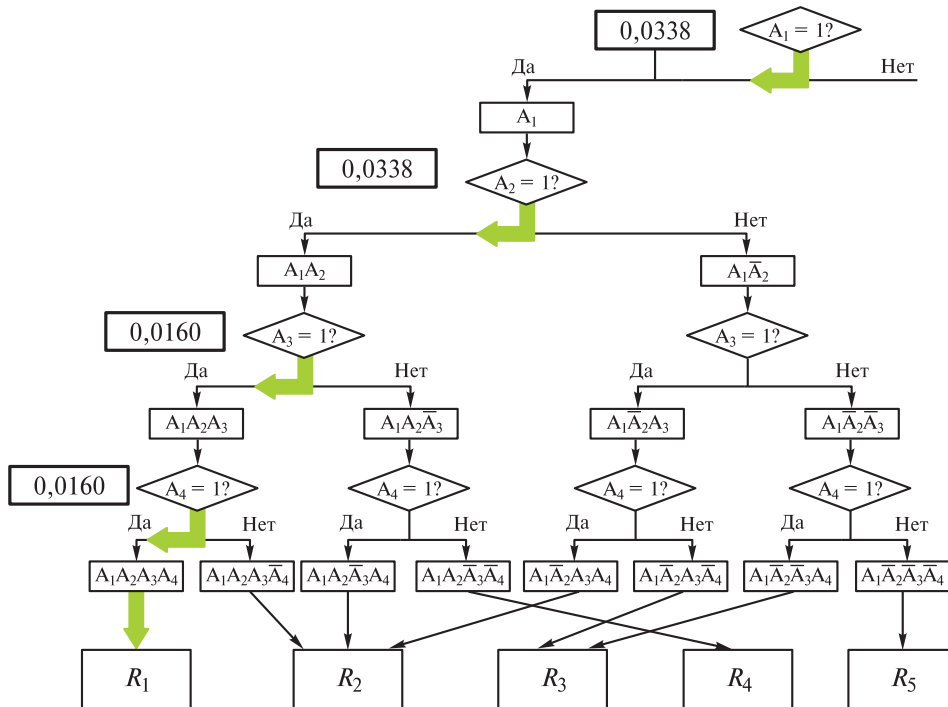


Рис. 4. Определение состояния опоры № 214

Результаты повторного сопоставления значений частот собственных колебаний для опоры № 214 представлены на рис. 4, для опоры № 182 — на рис. 5.

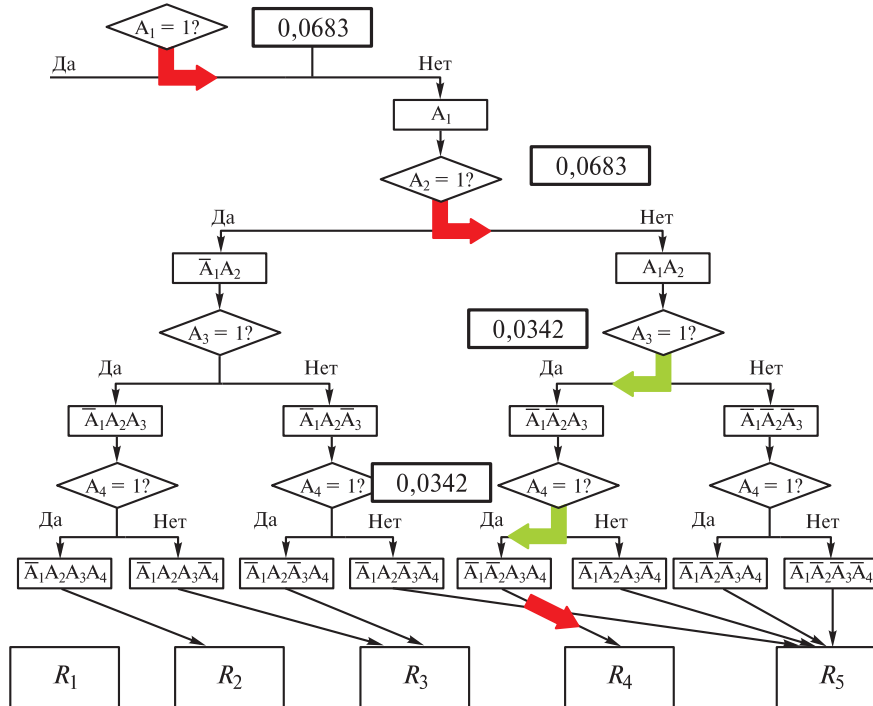


Рис. 5. Определение состояния опоры № 182

По результатам сопоставления значений частот собственных колебаний опоры № 214 характеризуется состоянием R_1 . Такое состояние возникает при удовлетворительных результатах сопоставления значений на всех четырех датчиках. Этой конструкции не требуется оперативный осмотр или ремонт. Согласно ГОСТ 34081—2017 [10], в течение двух лет не требуется проводить ее следующего обследования с контрольным измерением частот собственных колебаний.

Опора № 182 по результатам сопоставления значений частот собственных колебаний характеризуется состоянием R_4 . Такое состояние возникает при удовлетворительных результатах сопоставления значений только по двум датчикам, установленным диагонально; два других датчика фиксируют отклонения в значениях. Для опоры с таким качественным состоянием необходимо выполнить осмотр двух соответствующих оснований (креплений подпятников к бетонным фундаментам) и детальный осмотр двух граней, воспринимающих ту форму колебаний, значение частоты которой снижено.

Результаты применения методики. Выполнение второго шага третьего этапа методики для всех 19 опор, подлежащих дополнительному анализу, привело к результатам, сведенным в табл. 4.

Результаты применения методики к опорам участка СВ-5

По результатам первого шага третьего этапа		По результатам второго шага третьего этапа		
Опоры группы А	Опоры группы Б	Исправные опоры	Работоспособные опоры	Ограниченно работоспособные
30 шт.	19 шт.	38 шт.	8 шт.	3 шт.
61 %	39 %	77 %	17 %	6 %

Заключение. Предложенный в рамках данной работы расчетно-экспериментальный подход к определению фактического технического состояния опор воздушных линий электропередачи основан на обобщении требований ГОСТ 31937–2011 для отдельного типа сооружений. Разработанная методика представляет собой достаточно простую последовательность действий, результатом которых становится распределение всех обследованных конструкций на три укрупненные группы в зависимости от необходимости проведения оперативного осмотра или ремонта отдельных элементов конструкции.

На основании экспериментальных данных для опор участка линии СВ-5 показан алгоритм распределения конструкций на «исправные», «работоспособные» и «ограниченно работоспособные», что позволяет более эффективно распределять ресурсы обслуживающих организаций при планировании и выполнении обязательных инспекций воздушных линий электропередачи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] Левин В.Е., Кожевников А.Н., Сафонов О.Н. К вопросу о расчете опор и участков воздушных линий электропередачи = Calculation of overhead transmission line supports and segments. *Электроэнергия. Передача и распределение*, 2017, № 6 (45), с. 68–72.
- [3] Kozhevnikov A.N., Krasnorutskiy D.A., Levin V.E., Pustovoy N.V. The method of analyzing vibrations of air power transmission lines using reduced finite-element models of pylons and differential model of thin elastic rod system. *11th International forum on strategic technology (IFOST 2016): Proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016*. Novosibirsk, NSTU, 2016, Pt. 2, pp. 200–203. DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884227
- [4] Chen B., Guo W.H., Li P.Y., Xie W.P. Dynamic responses and vibration control of the transmission tower-line system: a state-of-the-art review. *The Scientific World Journal*, 2014, vol. 2014. Article ID 538457, 20 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/538457>

- [5] Jiang Dong, Fei Qingguo, Zhou Honggang, & Han Xiaolin. Study on dynamic properties of long-span power transmission tower-cable system. *14th International Workshop on Atmospheric icing of structures*, 2011, vol. 14. URL: https://www.compusult.com/html/IWAIS_Proceedings/IWAIS_2011/Papers/P2_33_214.pdf (дата обращения 07.02.2021).
- [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] Kozhevnikov A.N., Krasnorutskiy D.A., Levin V.E. Development of subroutine for automatic building of finite-element models of typical metal pylons of air power transmission lines. *2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. Tomsk, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414897
- [8] Shen-En Chen and Kaoshan Dai. Modal Characteristics of Two Operating Power Transmission Poles. *Shock and Vibration*, 2010, vol. 17, no. 4-5, pp. 551–561. DOI: 10.3233/SAV-2010-0547
- [9] Кравченко А.Я., Роденко С.В., Сафонов О.Н., Снежков И.И., Чаплин И.В. Экспериментальные исследования динамической работы опор линий электропередачи при разработке измерительного комплекса «ЛЭПтон» для оценки их технического состояния *Электроэнергия. Передача и распределение*, 2018, № 6 (51), с. 126–131.
- [10] ГОСТ 34081–2017. Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний. Москва, Изд-во стандартов, 2017, 26 с.
- [11] ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Москва, Изд-во стандартов, 2011, 95 с.

Статья поступила в редакцию 16.11.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бурнышева Т.В., Кожевников А.Н. Методика оценки технического состояния опор воздушных линий электропередачи с учетом типовых эксплуатационных эффектов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 2.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-2-2053>

Бурнышева Татьяна Витальевна — д-р техн. наук, профессор кафедры «Прочность летательных аппаратов» НГТУ. e-mail: burnysheva@corp.nstu.ru

Кожевников Алексей Николаевич — старший преподаватель кафедры «Прочность летательных аппаратов» НГТУ. e-mail: Kozhevnikov.2010@corp.nstu.ru

Methodology of overhead power transmission line pylons technical state assessment with typical exploitation faults accounted

© T.V. Burnysheva, A.N. Kozhevnikov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russia

Structure safety estimation via the results of modal testing is widely used in building field. However, overhead power line pylons are so specialised that it is not possible to expand existing standards so that those could be employed to assess pylon conditions. These standards do not contain any information about the pylon eigenvalues, methodology of full-scaled experiment execution or criteria to differentiate pylons with respect to the extent of the structure defects occurred. This means that it is necessary to develop a dedicated approach to estimating the safety of this type of structures. The method proposed boasts an additional advantage, that is, it takes into account the operating defects that are typical for the type of structures under consideration. The point of this method is comparing the computed and experimentally determined natural frequencies of overhead power line pylons. This comparison enables us not only to detect the defect type present in the structure, but also to find whether it is located closer to the base of the structure or in the latticework on one of the sides. The paper presents the results of using our method for estimating the safety of intermediate towers for a 110 kV overhead power line as represented by the SV-5 segment and states the advantages of using our method when planning real-time inspection of structures, as well as for monitoring select towers constantly.

Keywords: overhead power line, ANSYS, structure safety, natural frequency, operating defects, component deformation

REFERENCES

- [1] Kozhevnikov A.N., Burnysheva T.V. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya — Scientific and Technical Volga region Bulletin*, 2020, no. 10, pp. 66–68.
- [2] Levin V.E., Kozhevnikov A.N., Safonov O.N. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie — Electric power. Transmission and distribution*, 2017, no. 6 (45), pp. 68–72.
- [3] Kozhevnikov A.N., Krasnorutskiy D.A., Levin V.E., Pustovoy N.V. The method of analyzing vibrations of air power transmission lines using reduced finite-element models of pylons and differential model of thin elastic rod system. *11th International forum on strategic technology (IFOST 2016): proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016*. Novosibirsk, NSTU, 2016, vol. 2, pp. 200–203. DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884227
- [4] Chen B., Guo W.H., Li P.Y., Xie W.P. *The Scientific World Journal*, 2014, vol. 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/538457>
- [5] Jiang D., Fei Q., Zhou H., Han X. Study on dynamic properties of long-span power transmission tower-cable system. *14th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, 2011, vol. 14. Available at: https://www.compusult.com/html/IWAIS_Proceedings/IWAIS_2011/Papers/P2_33_214.pdf
- [6] Smaznov D.N., Rodchikhin S.V., Moskalev A.V., Zimin K.N. *Energiya edinoy seti — Energy of Unified Grid*, 2017, no. 1 (30), pp. 38–45.
- [7] Kozhevnikov A.N., Krasnorutskiy D.A., Levin V.E. Development of subroutine for automatic building of finite-element models of typical metal pylons of air power transmission lines. *2015 International Conference on Mechanical Engi-*

- neering, Automation and Control Systems (MEACS)*. Tomsk, 2015, pp. 1–4.
DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414897
- [8] Shen-En C., Kaoshan D. *Shock and Vibration*, 2010, vol. 17, no. 4–5, pp. 551–561.
DOI: 10.3233/SAV-2010-0547
- [9] Kravchenko A.Ya., Rodenko S.V., Safonov O.N., Snezhkov I.I., Chaplin I.V. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie — Electric power. Transmission and distribution*, 2018, no. 6 (51), pp. 126–131.
- [10] *GOST 34081—2017. Zdaniya i sooruzheniya. Opredelenie parametrov osnovnogo tona sobstvennykh kolebaniy* [Buildings and constructions. Determination of parameters of the basic tone of natural oscillations]. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 26 p.
- [11] *GOST 31937—2011. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya* [Buildings and constructions. Rules of inspection and monitoring of the technical condition]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 95 p.

Burnysheva T.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aircraft Strength, Novosibirsk State Technical University. e-mail: burnysheva@corp.nstu.ru

Kozhevnikov A.N., Assistant Lecturer, Department of Aircraft Strength, Novosibirsk State Technical University. e-mail: Kozhevnikov.2010@corp.nstu.ru