

## Анализ влияния дефектов в основании опоры ЛЭП на параметры собственных поперечных колебаний на основе аналитической модели

*И.О. Егорочкина<sup>1</sup>, Е.А. Шляхова<sup>1</sup>, А.В. Черпаков<sup>2</sup>, А.Н.Соловьев<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Ростовский государственный строительный университет*

*<sup>2</sup>Южный федеральный университет*

*<sup>3</sup>Донской государственный технический университет*

**Аннотация:** Рассмотрен подход к оценке текущего состояния стержневых конструкций на примере опор ЛЭП, с применением метода вибродиагностики. В работе представлен пример аналитического моделирования собственных колебаний конструкции железобетонной опоры ЛЭП с дефектами в основании. Получены зависимости относительных частот колебаний от жесткости дефекта.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, стержневая конструкция, опора ЛЭП, дефект, аналитическое моделирование, поперечные колебания, собственные колебания, собственные частоты.

Одной из важнейших задач в области строительства является повышение надежности, долговечности и безопасности бетонных и железобетонных конструкций. Для принятия решения о безопасной эксплуатации конструкций необходима своевременная диагностика. Одним из методов оценки технического состояния конструкций является метод колебаний [1,2]. Данный метод может быть реализован на основе применения специализированных алгоритмов математической обработки входной информации о колебаниях конструкции и решения прямых и обратных задач теории колебаний для восстановления недостающей информации о дефектах стержневых конструкций [3,4]. В работах [5,6] показан процесс моделирования колебаний полнотелой стержневой балочной конструкции с дефектами с использованием конечно-элементного расчетного подхода. Для определения критического состояния конструкции требуется разработка обобщенных критериев [7 - 10]. Анализ рассмотренных подходов показывает,

---

что применение вибрационного метода на основе построения алгоритмов и критериев изменения собственных частот является достаточно информативным и позволяет быстро и эффективно оценить состояние конструкции. При оценке фактического состояния конструкции необходимо учитывать характерные места локализации дефектов. Одним из мест опасной локализации дефектов стержневых конструкций консольного типа является зона основания опоры.

**Цель работы:** обоснование подхода к оценке текущего состояния стержневых конструкций, в частности, железобетонных опор ЛЭП с повреждением в основании, путём исследования параметров собственных поперечных колебаний.

**Объект исследований.** В качестве объекта исследований выбрана стойка опоры ЛЭП, выполненная из железобетона класса В35 (рис. 1.). Конструкция имеет в наземном основании дефекты: наклонные трещины граней длиной 25-30 см с раскрытием 0,4-0,7 мм. Модель опоры ЛЭП без повреждения представлена в виде стержня, имеющего жесткое закрепление одного из концов (рис. 2а). Упрощенным вариантом дефекта может быть пружинный упругий элемент, имеющий определенную изгибную жесткость ( $C$ , Н·м/рад) (рис. 2б). При моделировании принимались следующие параметры: длина модели  $L=7650$  мм, сечение – прямоугольное, полнотелое. Расчетные усредненные размеры сечения:  $a=260$  мм,  $b=190$  мм. Для расчетов принят: модуль упругости железобетона  $E = 3,45 \cdot 10^9$  Па, плотность  $\rho = 2380$  кг/м<sup>3</sup>. Предполагается, что распределение параметров сечения и свойств по длине стержневой конструкции постоянные.

**Моделирование.** Для достижения цели работы рассматривается задача о поперечных свободных колебаниях стержневой конструкции.

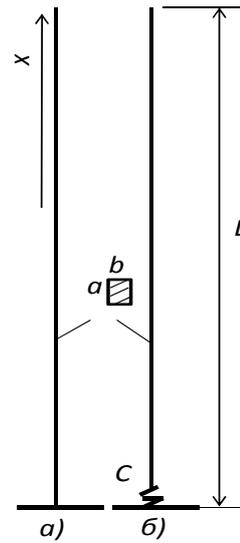


Рис. 1 – Опора ЛЭП с дефектами

Рис. 2 - Модель опоры ЛЭП: а) без повреждения; б) с повреждением в основании

Аналитическое описание колебаний может быть представлено в рамках гипотезы Эйлера-Бернулли:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EJ(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] - \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где  $u$  - смещение точек оси балки, м;  $E$  - модуль упругости, Па;  $J(x)$  - момент инерции сечения, м<sup>4</sup>;  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $A$  - площадь сечения, м<sup>2</sup>.

Граничные условия для составной конструкции, имеющей упругий элемент, определенной жесткости  $C$  в области консольного защемления стржня имеют вид:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0: \quad & u(0) = 0; \quad EJ \cdot u''(0) = Cu'(0) \\ \text{при } x = L: \quad & u''(L) = 0; \quad u'''(L) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Решение задачи может быть представлено в виде спектра собственных частот ( $\omega \in \omega_1.. \omega_i, i = 1, 2..n$ ) при идентификации величины жесткости поврежденного сечения и построения частотных зависимостей от его жесткости  $C$ .

На первом этапе был получен спектр собственных частот поперечных пяти мод колебаний для неповрежденной конструкции:

$$\omega_1 = 0.825 \text{ Гц}; \omega_2 = 5.390 \text{ Гц}; \omega_3 = 15.125 \text{ Гц}; \omega_4 = 29.70 \text{ Гц}; \omega_5 = 49.115 \text{ Гц}.$$

На следующем этапе была решена задача о собственных колебаниях стержневой конструкции при различных величинах жесткости дефекта  $C$  в основании конструкции. Разброс жесткости дефекта варьировался в пределах:  $C \in 100 \dots 10000000 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$ . Получены зависимости собственных частот от величины жесткости дефекта для пяти мод поперечных колебаний, а также вычислены относительные зависимости собственных частот  $\Delta\omega_i$  конструкции с дефектом по формуле (3):

$$\Delta\omega_i = 100\% * \frac{\omega_i^t - \omega_i^{t=0}}{\omega_i^{t=0}}, \quad (3)$$

где  $i$  - номер собственной моды колебаний,  $\omega_i^t$  и  $\omega_i^{t=0}$  - соответственно, собственные частоты различных мод колебаний поврежденной и неповрежденной конструкции.

Относительная величина повреждения  $\bar{C}_i$  рассчитывалась по формуле (4):

$$\bar{C}_i = \frac{C^{t=0} - C_j}{C^{t=0}} * 100\%, \quad (4)$$

где  $C^{t=0} = 10000000$  - условно большая величина жесткости при отсутствии повреждений. При данной жесткости изменение частот минимально.

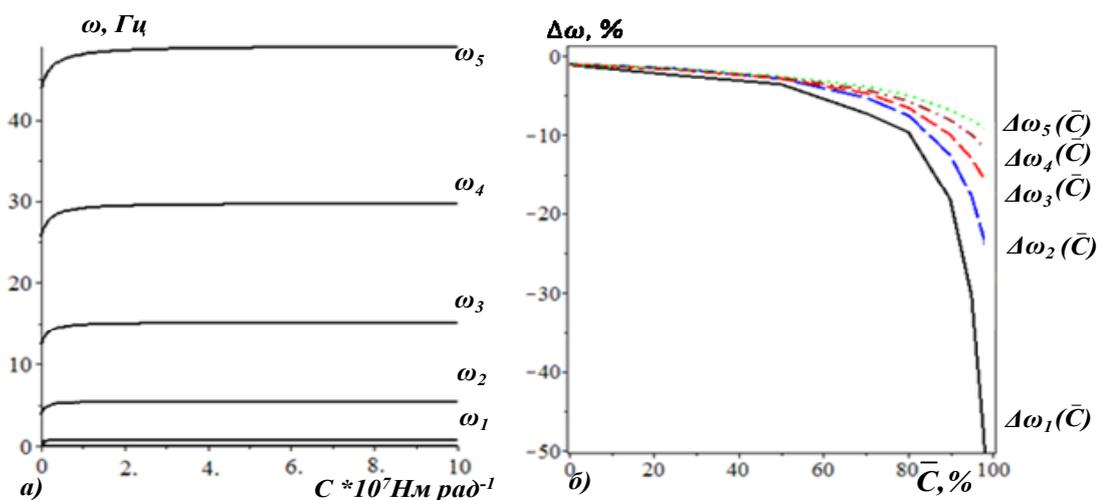


Рис. 3 - Зависимости собственных частот колебаний от:

а) жесткости дефекта; б) относительной величины повреждения

**Выводы.** Рассмотренный поход может быть использован при разработке методик вибрационной диагностики и мониторинга технического состояния различных по сложности конструкций стержневого типа. Достаточно информативным критерием для прогнозирования аварийного состояния конструкций стоек опор ЛЭП является достижение определенного значения собственных частот колебаний в диапазоне 0,01 – 49,1 Гц. Оценка критического состояния стержневой конструкции требует дальнейших исследований на примере полнотелого моделирования при конечно-элементном подходе.

*Работа выполнена при частичной поддержке Южного федерального университета (проект № 213.01.-2014/03ВГ), а также РФФИ (гранты № 14-38-50933 мол\_нр. № 14-38-50915 мол\_нр. 14-08-00546-А).*

### Литература

1. Идентификация повреждений в упругих структурах: подходы, методы, анализ: Монография /Акопьян В.А., Рожков Е.В., Соловьев А.Н., Шевцов С.Н., Черпаков А.В. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2015. – 74 с. ISBN 978-5-9275-1517-2.
2. Кадомцев М.И., Ляпин А.А., Шатилов Ю.Ю. Вибродиагностика строительных конструкций //Инженерный вестник Дона, 2012, № 3 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012).
3. Черпаков А.В., Акопьян В.А., Соловьев А.Н. Алгоритм многопараметрической идентификации дефектов стержневых конструкций // Техническая акустика, 2013, №1 URL: [ejta.org](http://ejta.org).
4. Денина О.В., Ватульян А.О. Обратные коэффициентные задачи для стержней // Методы определения неоднородных свойств упругих стержней на основе акустического зондирования / Saarbrücke, 2011, pp.23-28.

5. Косенко Е.Е., Косенко В.В., Черпаков А.В. Исследование колебаний полнотелой стержневой модели кантилевера с дефектом // Инженерный вестник Дона, 2013, № 4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013.
6. Черпаков А.В., Каюмов Р.А., Косенко Е.Е., Мухамедова И.З. Моделирование балки с дефектами конечно-элементным методом // Вестник Казанского технологического университета, 2014, Т. 17, № 10, С. 182-184.
7. Коробко В.И., Калашников М.О., Бояркина О.В. Интегральная оценка дефектности строительных конструкций балочного типа динамическими методами // Строительная механика и расчет сооружений, 2009, №1, URL: stroy-mex.narod.ru/index/2009/0-74.
8. Акопьян В.А., Черпаков А.В., Соловьев А.Н. Интегральный диагностический признак идентификации повреждений в элементах стержневых конструкций //Контроль. Диагностика. 2012, № 7 URL: td-j.ru/index.php/archive/208-07.
9. Kanstad T. Nonlinear Analysis Considering Timedependent Deformations and Capacity of reinforced Concrete. -Norway. -Trondheim. -NTH. -1990, -349 p.
10. Akopyan, V.; Soloviev, A.; Cherpakov, A. Chapter 4. Parameter Estimation of Pre-Destruction State of the Steel Frame Construction Using Vibrodiagnostic Methods. In: Mechanical Vibrations: Types, Testing and Analysis. A. L. Galloway (Ed.). Nova Science Publishers, New York, 2010, pp.147-161.

### Reference

1. Akopyan V.A., Rozhkov E.V., Solovyov A.N., Shevtsov S.N., Cherpakov A.V. Identifikatsiya povrezhdeniya elastichnykh struktur: podkhody, metody, analiz. [Identification of damage in elastic structures: approaches, methods, analysis]. Rostov-on-Don: Southern Federal University, 2015, p. 74.
  2. Kadomtsev M.I., Liapin A.A., Shatilov J.J. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, № 3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012.
-



3. Cherpakov A.V., Akopyan V.A., Soloviev A.N. Technical Acoustics, 2013, №1 URL: ejta.org.
4. Denina O.V., Vatulyan A.O. Obratnyye zadachi dlya sterzhney. Metody opredeleniya svoystv neodnorodnykh uprugikh sterzhney, osnovannykh na akusticheskom zondirovaniya [Methods for determination of properties of inhomogeneous elastic rods based on acoustic sensing]. Saarbrücke, 2011.
5. Kosenko E.E., Kosenko V.V., Cherpakov A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013.
6. Cherpakov A.V., Kayumov R.A., Kosenko E.E., Mukhamedova I.Z. Kazan.: Technological University, 2014, T. 17, № 10, pp. 182-184.
7. Korobko V.I., Kalashnikov M.O., Boyarkina O.V. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy, 2009, № 1 URL: stroy-mex.narod.ru/index/2009/0-74.
8. Akopyan V.A., Cherpakov A.V., Rozhkov E.V., Soloviev A.N. Kontrol' . Diagnostika, 2012, № 7 URL: td-j.ru/index.php/archive/208-07.
9. Kanstad T. Nonlinear Analysis Considering Timedependent Deformations and Capacity of reinforced and Prestressed Concrete. Norway. Trondheim. NTH. 1990. 349p.
10. Akopyan, V.; Soloviev, A.; Cherpakov, A.; Chapter 4. Parameter Estimation of Pre-Destruction State of the Steel Frame Construction Using Vibrodiagnostic Methods. In: Mechanical Vibrations: Types, Testing and Analysis. A. L. Galloway (Ed.). Nova Science Publishers, New York. 2010, pp.147-161.