

## МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТА КАНАТА НА СПЕКТР ЕГО СВОБОДНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ

© 2023 г. К.Р. Муратов<sup>1,\*</sup>, И.А. Шаропина<sup>1,\*\*</sup>, И.С. Бевзюк<sup>1,\*\*\*</sup>,  
Р.А. Соколов<sup>1,\*\*\*\*</sup>, В.В. Проботюк<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет, Россия 625000 Тюмень, ул. Володарского, 38  
E-mail: \*muratows@mail.ru; \*\*sharopinaia@gmail.com; \*\*\*ira29019@gmail.com;  
\*\*\*\*falcon.rs@mail.ru; \*\*\*\*\*probotjukvv@tyuiu.ru

Поступила в редакцию 11.05.2023; после доработки 29.08.2023  
Принята к публикации 04.09.2023

В ранее выполненной работе была обоснована возможность диагностирования дефекта стального каната по спектральному составу его свободных поперечных колебаний. В настоящей работе предложена аналитическая модель поперечных колебаний стального каната, имеющего локальное повреждение. Наличие дефекта в модели учитывается только в виде убыли изгибной жесткости соответствующего участка без изменения удельной по длине массы. Модель представляет собой три «сшитых» друг с другом однородных участка каната, где средний представляет собой дефектный участок с меньшим значением изгибной жесткости. Согласно модельным расчетам показано, что характер зависимости собственных частот колебаний от их номера практически не изменяется при наличии дефекта. Однако его наличие и расположение влияет на соотношение амплитуд колебаний неповрежденных участков, что можно использовать для мониторинга состояния каната.

*Ключевые слова:* стальной канат, стоячие волны, сила натяжения каната, изгибная жесткость, мониторинг состояния.

## MODEL OF INFLUENCE OF A ROPE DEFECT ON THE SPECTRUM OF ITS FREE TRANSVERSE VIBRATIONS

© 2023 г. K.R. Muratov<sup>1,\*</sup>, I.A. Sharopina<sup>1,\*\*</sup>, I.S. Bevzyuk<sup>1,\*\*\*</sup>,  
R.A. Sokolov<sup>1,\*\*\*\*</sup>, V.V. Probotyuk<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Industrial University of Tyumen, 625000, Volodarsky Street, 38, 625000, Tyumen, Russia  
E-mail: \*muratows@mail.ru; \*\*sharopinaia@gmail.com; \*\*\*ira29019@gmail.com;  
\*\*\*\*falcon.rs@mail.ru; \*\*\*\*\*probotjukvv@tyuiu.ru

In earlier work the possibility of diagnosing a defect of a steel wire rope by spectral composition of its free transverse vibrations was substantiated. In the present work, an analytical model of transverse vibrations of a steel wire rope with local damage is proposed. The presence of the defect in the model is taken into account only in the form of a loss of bending stiffness of the corresponding section without changing the specific mass along the length. The model represents three homogeneous rope sections “stitched” together, where the middle one represents a defective section with a lower value of bending stiffness. According to the model calculations, it is shown that the character of the dependence of the natural frequencies of oscillations on their number practically does not change in the presence of a defect. However, its presence and location affects the ratio of vibration amplitudes of undamaged sections, which can be used to monitor the condition of the rope.

*Keywords:* steel wire rope, standing waves, rope tension force, bending stiffness, condition monitoring.

DOI: 10.31857/S0130308223110076, EDN: XFEZZI

### ВВЕДЕНИЕ

Стальные канаты являясь несущим элементом конструкций требуют повышенного внимания и поэтому проходят периодические обследования разными методами и средствами [1—3], что бывает затруднительно. Поэтому в определенных условиях рационально внедрение мониторинговых систем [4]. В работе [5] нами была показана принципиальная возможность обнаружения дефектов каната по результатам регистрации спектра его собственных поперечных колебаний (стоячих волн). Актуальной является количественная оценка такой возможности, поэтому с целью ее проверки были выполнены модельные расчеты влияния дефекта каната на спектр его колебаний.

### МОДЕЛЬ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ КАНАТА С ДЕФЕКТОМ

Дифференциальное уравнение, описывающее поперечные колебания каната с учетом его реакции на изгиб и без учета затухания, имеет вид:

$$f \frac{d^2 u}{dx^2} - g \frac{d^4 u}{dx^4} = \frac{d^2 u}{dt^2}, \quad (1)$$

где  $u$  — поперечное смещение;  $x$  — координата вдоль оси каната;  $t$  — время;  $f = F/\tau$  — отношение силы натяжения  $F$  и массы  $\tau$  одного метра каната;  $g = EI/\tau$  — отношение изгибной жесткости каната  $EI$  и  $\tau$ . Стоячие волны, являющиеся одним из решений уравнения (1), зададим выражением:

$$u = A \cos(2\pi\nu t) \sin(kx + \varphi), \quad (2)$$

где  $A$  — амплитуда колебаний;  $\nu$  — частота колебаний;  $k$  — волновое число;  $\varphi$  — фаза колебаний при  $x = 0$ .

Ограничение пространства существования стоячей волны, как известно, приводит к дискретному набору возможных частот колебаний. В случае однородного каната по всей его длине  $L$  совместное решение уравнений (1) и (2) даст набор возможных частот:

$$\nu^2 = \frac{f}{4L^2} n^2 + \frac{\pi^2 g}{4L^4} n^4. \quad (3)$$

Здесь  $n$  — номер тона (гармоники).

Чтобы не прибегать к сложному численному моделированию колебаний каната с локализованным дефектом, нами предложена модель, изображенная на рис. 1. Канат слева и справа закреплён в точках с координатами  $-L/2$  и  $+L/2$ , центр дефектного участка протяженностью  $\Delta$  имеет координату  $l$ .

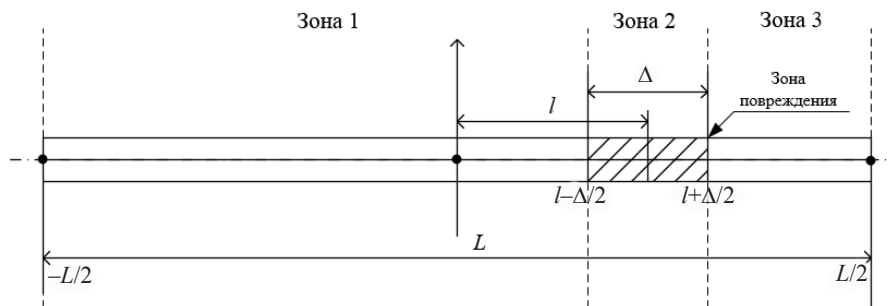


Рис. 1. Модельная схема расположения дефекта на канате.

Колебания в каждой из характерных зон каната описываются уравнением (2) со своими значениями амплитуды  $A_i$ , волнового числа  $k_i$  и фазой  $\varphi_i$ . Так как зоны 1 и 3 не имеют повреждения, то их волновые числа одинаковы  $k_1 = k_3 = k_0$ , в зоне 2 —  $k_2 = k$ . Частоты колебаний одинаковы. Краевыми условиями являются условия неподвижности на концах каната ( $u_1 = u_2 = 0$ ), неразрывность в точках «сшивки» ( $u_1 = u_2, u_2 = u_3$ ) и отсутствие изломов в них ( $du_1/dx = du_2/dx, du_2/dx = du_3/dx$ ).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Чтобы оценить возможность определения повреждения каната были использованы данные реальных измерений канатов вантового перехода ( $L, F, EI, \tau$ ) из работы [5]. Уменьшение изгибной жесткости взято не более 10 %. Ожидались искажения характера зависимости  $\nu(n)$  от закономерности для однородного каната (уравнение (3)). Самый неблагоприятный вариант локации дефекта дал отклонения, которые практически невозможно зарегистрировать инструментально (рис. 2). На рис. 3 представлен результат моделирования с менее реальным сочетанием параметров  $L, F, EI, \tau$  и дефектом протяженностью 5 % длины всего каната. Здесь мы видим, что наличие дефекта и его локация все-таки оказывает влияние на частоту колебаний двадцать пятой гармоники (черные маркеры), однако характер  $\nu(n)$  качественно не меняется.

Отношение амплитуд неповрежденных участков  $A_3/A_1$  при наличии дефекта отличается от единицы (красные маркеры на рис. 3). На рис. 4 представлен модельный характер распределения поперечных смещений каната в трех характерных зонах. На рис. 5 показаны вычисленные отношения

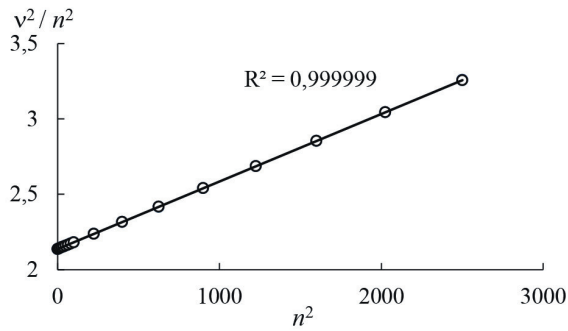
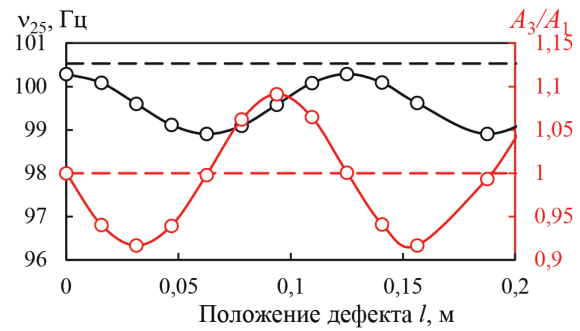
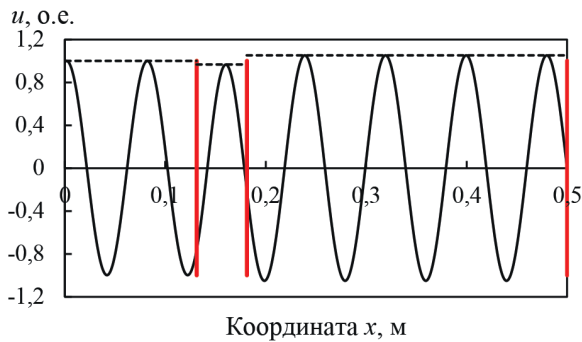
Рис. 2. Модельная зависимость отношения  $v^2/n^2$  от  $n^2$ .Рис. 3. Влияние положения дефекта на частоту колебаний 25-й гармоники и соотношение  $A_3/A_1$ .

Рис. 4. Характер влияния дефекта каната на распределение амплитуды его колебаний.

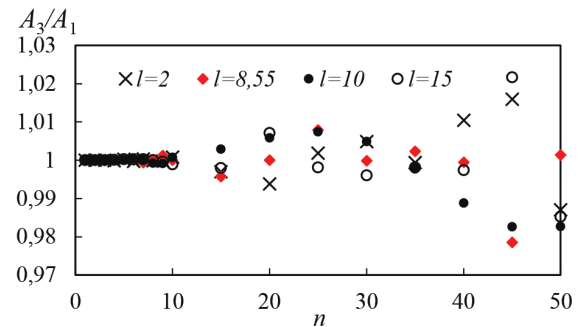


Рис. 5. Зависимость отношения амплитуд 1 и 3 зон от номера частоты и положения дефекта.

амплитуд  $A_3/A_1$  для большого набора частот и четырех локаций дефекта. Для низких частот ( $n < 10$ ) отношение  $A_3/A_1 \cong 1$ . С ростом номера гармоники отношение  $A_3/A_1$  отклоняется от единицы и в окрестности  $n = 35$  приближается к единице, а затем снова отклоняется и в большей степени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный результат в перспективе можно использовать для создания мониторинговой системы состояния стальных канатов. Диагностирование повреждения каната возможно с помощью определения соотношения амплитуд колебаний на разных частотах и вблизи зажимов. Авторы благодарят за поддержку данного исследования национальный проект «Наука и университеты» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FEWN-2021-0012).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов С.П., Батрагин А.В., Воронова В.С., Шиндина А.В. Идентификация дефектов стальных канатов по цифровым радиографическим изображениям // Технологии техносферной безопасности. 2013. № 5(51). С. 6.
2. Lei H. M., Mao Yi.M. Fatigue Testing and evaluation for coated steel belts based on electrical method // Дефектоскопия. 2013. № 10. С. 53—60.
3. Соболев А.С., Пудов В.И. Физическое моделирование условий и параметров надежности магнитного контроля стальных канатов // Дефектоскопия. 2014. № 11. С. 22—30.
4. Сухоруков В.В. Техническая диагностика стальных канатов добывающей промышленности: от дефектоскопии к автоматизированному мониторингу // В мире неразрушающего контроля. 2019. Т. 22. № 3. С. 4—8.
5. Муратов К.Р., Новиков В.Ф., Кулак С.М., Соколов Р.А., Сафаргалиев Р.Ф., Мусихин С.А., Пробыток В.В. Учет жесткости стальных канатов при оценке силы их натяжения по результатам измерения частоты собственных колебаний // Дефектоскопия. 2023. № 2. С. 16—23.