

УДК 620.19

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ В УПРУГОМ СТЕРЖНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО АНАЛИЗА МОД ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ

А.В. ЧЕРПАКОВ, В.А. АКОПЯН

(НИИ механики и прикладной математики ЮФУ),

А.Н. СОЛОВЬЕВ

(Донской государственный технический университет),

Е.В. РОЖКОВ

(НИИ механики и прикладной математики ЮФУ),

С.Н. ШЕВЦОВ

(Южный научный центр РАН)

Представлены результаты численного конечно-элементного анализа и натурного эксперимента форм колебаний консольного упругого стержня с надрезом. Предложено использование координаты излома и угла между касательными на графиках собственных форм при переходе через точку повреждения в качестве комплексного диагностического признака местоположения и степени поврежденности стержней.

Ключевые слова: параметры повреждений, упругий стержень с надрезом, конечно-элементный анализ, физический эксперимент, формы колебаний, диагностический признак повреждения.

Введение. Известная классификация задач идентификации параметров повреждений включает в себя четыре уровня достигаемых целей [1, 2]. Решение задач первого уровня заключается в обнаружении повреждений. Ко второму уровню относятся задачи локации повреждений в стержнях и конструкциях. Третий уровень включает в себя как обнаружение повреждений и расчет его местоположения, так и оценку степени опасности этих повреждений. И, наконец, наиболее сложные цели достигаются в процессе решения задач четвертого уровня, связанных с прогнозированием остаточного ресурса конструкции в целом.

Большинство известных работ по идентификации повреждений посвящены решению задач 1-го и 2-го уровня [2-10]. Значительная часть из них включает в себя результаты исследований параметров колебаний стержней и балок и в меньшей степени – более сложных структур, состоящих из связанных элементов конструкций с открытыми трещинами. В недавнем обзоре работ по идентификации повреждений в конструкциях проанализированы результаты решения задач всех четырех уровней [11], а также рассмотрены различные алгоритмы решения задач идентификации. Постановка этих задач использует влияние параметров повреждений на изменение собственных частот и форм колебаний, кривизны этих форм, расчет матриц податливости и демпфирования дефектных структур.

Исследования изменений собственных частот колебаний, обусловленных глубиной закрывающейся трещины, выполнены в работах В.В. Матвеева и А.П. Бовсуновского [4-6]. К сожалению, результаты конечно-элементного анализа, проведенного в этих работах, не были полностью подтверждены натурным экспериментом. В работе [7] приведены результаты конечно-элементных исследований параметров повреждений в стержнях, основанные на анализе суб- и супергармонических резонансов. Однако измерения характеристик колебаний дефектного стержня, проведенные экспериментально, не вполне подтвердили выводы, сделанные из численного эксперимента. Поэтому предложенный в [7] диагностический признак повреждений требует дальнейших исследований.

В работах Mohammad M.F. Dado, Omar A. Shpli, Y.Bamnios и др. [2,3] использовалась конечно-элементная модель стержня с аналогом повреждения в виде дискретного упругого элемента. Его податливость вычислялась A.D. Dimaragonas и др. [8], а позже Dado и Shpli [2] через локальную податливость трещины C_{ij} , выражающуюся в виде интеграла, зависящего от глубины трещины и факторов интенсивности напряжений в окрестности трещины на I, II и III модах колебаний. Однако сложность предварительного анализа напряженно-деформированного состояния материала вблизи трещины значительно снижает преимущества использованного метода идентификации.

В связи с изложенным представляется перспективным исследовать не только изменение собственных частот колебаний дефектной стержневой конструкции, но и соответствующих собственных форм, т.е. распределения амплитуд колебаний по длине стержня с трещиной [12, 13]. Учитывая также расширенные возможности современных конечно-элементных (КЭ) пакетов, исследование целесообразно провести без выполнения отдельного анализа напряженно-деформированного состояния материала вблизи трещины. Такой подход должен дать более полную информацию о закономерностях влияния параметров повреждения на характеристики колебаний дефектной конструкции, тем самым позволив сформулировать и экспериментально проверить некий комплексный признак наличия, локализации и степени поврежденности.

Цель настоящего исследования – поиск и обоснование диагностического признака, характеризующего местоположение повреждения и степень поврежденности консольно закрепленного упругого стержня с помощью конечно-элементного моделирования и натурного эксперимента на основе анализа особенностей на графиках форм нескольких первых мод колебаний.

Конечно-элементное моделирование стержня с разрезом. С помощью конечно-элементного комплекса ANSYS была построена полнотелая модель на основе 3D элемента solid92. Разбивка моделей на узлы по длине производилась кратной 1/40 от общей длины балки. Количество конечных элементов – более 5000. Повреждение моделировалось надрезом шириной 1 мм. Сетка имела двукратное сгущение в месте расположения дефекта.

При различном местоположении повреждения в результате модального анализа были получены собственные частоты и соответствующие формы колебаний.

На 1-й, 2-й и 3-й модах изгибных колебаний консольно закрепленного стержня с надрезом регистрировалось распределение амплитуд поперечных смещений по длине стержня L_0 с интервалом $0.1\bar{L}$, где $\bar{L} = L_i / L_0$, (L_i - расстояние от дефекта до ближайшего конца стержня).

Вычисления производились при относительной глубине надреза $\bar{t} = t_i / a$ (t_i - абсолютное значение глубины надреза, a - высота поперечного сечения стержня), принимающей значения $\bar{t} = 0,3; 0,5; 0,7; 0,86$ и для неповрежденного $\bar{t} = 0$ (рис.1).

Рассматривалась гипотеза о том, что изломы на графиках форм колебаний позволяют локализовать повреждение в стержне. Для проверки ее обоснованности был выполнен анализ графиков этих форм колебаний, который показал следующее. На графиках форм колебаний 1-й и 3-й мод колебаний (рис.1, а, д) обнаружены изломы при расположении надреза $\bar{L}_c = 0,25$ глубиной $\bar{t} = 0,3; 0,5; 0,7$ и $0,86$, отсутствовавшие на графиках форм колебаний неповрежденного стержня.

На форме 2-й моды колебаний (см. рис.1, в) незначительный излом графика наблюдается только при глубине надреза $\bar{t} = 0,86$. Угол этого излома (между касательными к графику кривой с обеих сторон от излома) составляет около $\varphi = 175^\circ$ (см. рис.1, в). Для графиков 1-й и 3-й мод этот угол существенно меньше (см. рис.1, а, д). Эти результаты отличаются от ранее опубликованных [9] авторами в той части, что на графиках 2-й моды колебаний стержня (см. рис.1, в) проявляется особенность, коррелирующая с местоположением и глубиной надреза (повреждения), хотя и в слабой степени. В работе [9] эта особенность не была обнаружена.

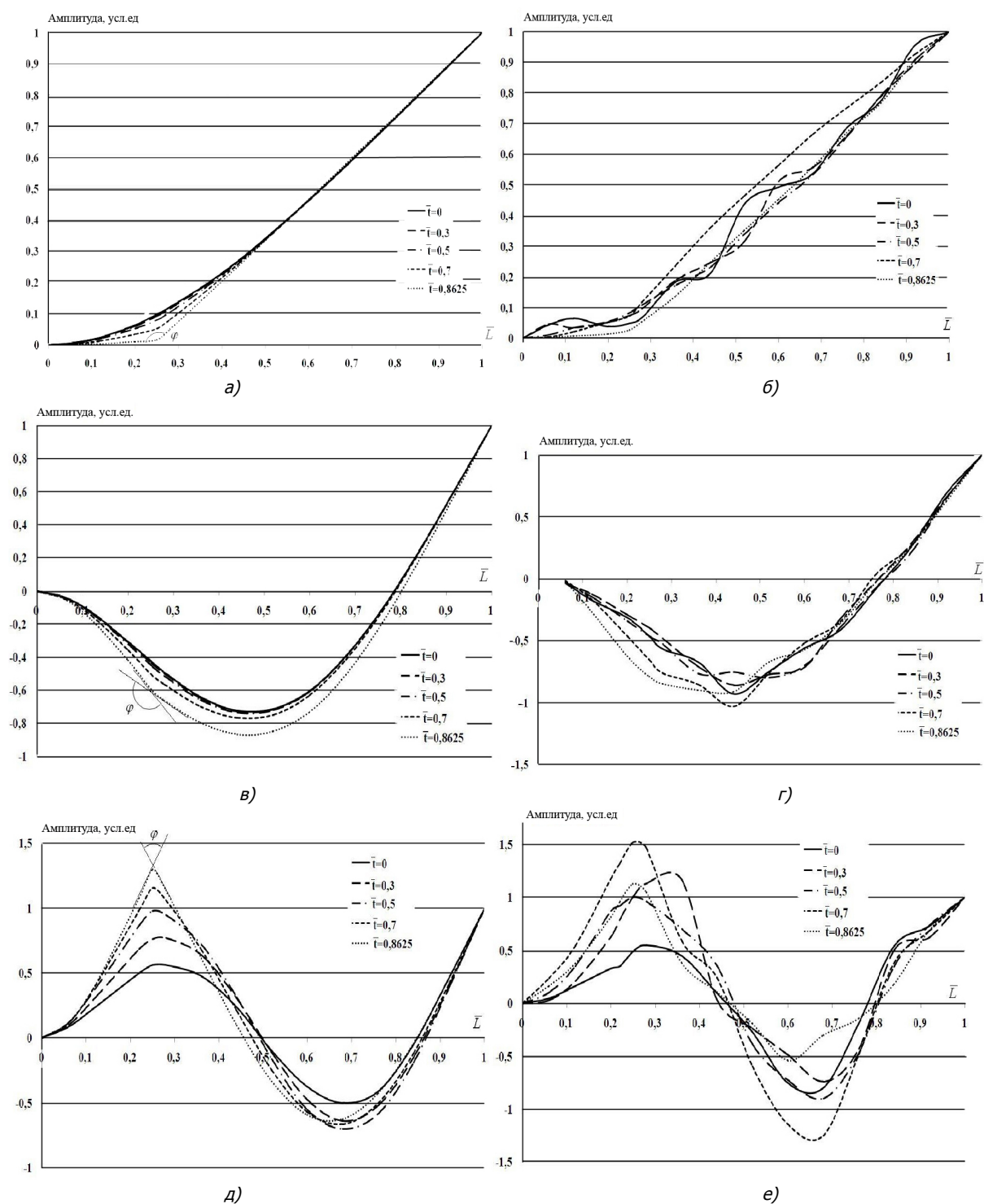


Рис.1. Формы 1-й (а, б), 2-й (в, г) и 3-й (д, е) мод поперечных колебаний стержня с повреждением в виде надреза на расстоянии $\bar{L}_c = 0,25$ от заземления при различной степени поврежденности $\bar{t}$, рассчитанные в КЭ-комплексе ANSYS (а, в, д) и полученные экспериментально (б, г, е)

Для выявления причин расхождения результатов КЭ анализа на втором этапе работы были проведены экспериментальные исследования форм колебаний кантилевера с надрезом.

При этом геометрические и массовые характеристики испытуемых образцов не отличались от использованных в конечно-элементной модели.

Натурный эксперимент. Экспериментальные исследования были проведены на специально разработанном информационно-измерительном комплексе ИИК-210; его структурная схема и общий вид показаны на рис.2. Образец 1 - металлический стержень из стали 3 размером 4x8x250 мм консольно закреплен в опоре-держателе 2, установленной на основании 3. Вынужденные изгибные колебания образца создаются с помощью электромагнитного возбудителя 4 модели ЭМВ210, который питается переменным током от усилителя мощности 5 модели LV102. Частота колебаний регулируется генератором 6 Г6-27, а амплитуда – изменением коэффициента усиления усилителя 5. Формирование возбуждающего сигнала возможно также с использованием виртуального генератора на базе модуля цифроаналогового преобразования (ЦАП) 7 модели E-14-440 фирмы L-Card.

Регистрация частоты изгибных колебаний образца производится частотомером ЧЗ-33 (8), а форма колебаний возбуждающего напряжения - цифровым осциллографом LeCroy WS-422 (9). Вертикальные и боковые смещения точек поверхности образца при изгибных колебаниях регистрировались с помощью пары оптических датчиков РФ 603 10 и 11, которые могли перемещаться вдоль образца без изменения базового расстояния между его плоскостью и рабочей поверхностью датчиков. Виброускорения регистрировались вибродатчиком 12 модели ADXL-203. Управление модулем АЦП/ЦАП (7, 13) и обработка регистрируемого сигнала осуществлялись с помощью оригинальной программы ИИК-210.

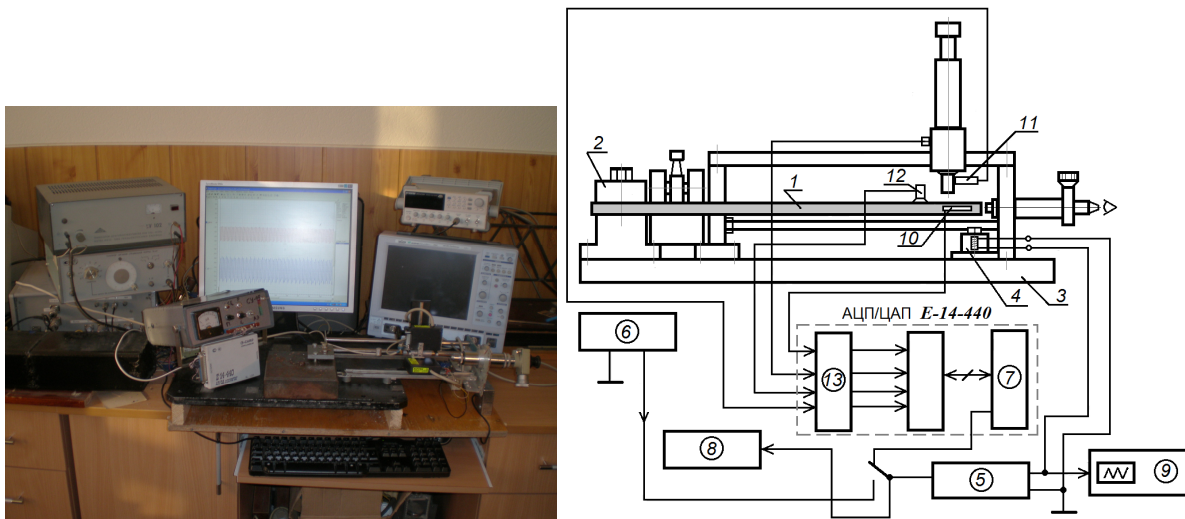


Рис.2. Общий вид и структурная схема комплекса ИИК-210

Снятие амплитудно-частотных характеристик производилось в диапазоне частот 0...2000 Гц. Последовательно на 1-й, 2-й и 3-й модах колебаний регистрировались распределения амплитуд вертикальных смещений по длине образца с помощью перемещаемых оптических датчиков. По полученным данным восстанавливались формы колебаний всех трех исследуемых мод колебаний. Описанный алгоритм эксперимента был применен к неповрежденному образцу ($\bar{t} = 0$) и к образцам с увеличивающейся глубиной надреза $\bar{t} = 0,3; 0,5; 0,7; 0,86$, расположенного на расстоянии $\bar{L}_c = 0,25$ от заделки (см. рис.1, б, г, е).

Сравнительный анализ форм колебаний, полученных методом конечных элементов (см. рис.1, а, в, д) и в эксперименте (рис.1, б, г, е) показал изломы и перегибы на формах 1-й и 3-й мод колебаний на расстояния $\bar{L}_c = 0,25-0,27$ от заделки для всех надрезов глубиной $\bar{t} = 0,3; 0,5; 0,7; 0,86$. На графиках, полученных методом конечных элементов (см. рис.1, а, д), в зоне распо-

ложения дефекта наблюдаются изломы; на экспериментальных кривых (см. рис.1, б, е) эти изломы значительно сглажены. Их координаты определены нами по точкам пересечения касательных к прилегающим с обеих сторон участкам кривой до и после перегиба. При этом угол φ между этими касательными уменьшается с ростом глубины надреза, что вполне объяснимо уменьшением жесткости стержня с увеличением глубины надреза. На формах 1-й и 3-й мод колебаний для образцов без надреза изломы отсутствуют.

Характер изменения формы колебаний на 2-й моде (см. рис.1, в, г) при появлении надреза отличается от закономерностей, выявленных на 1-й и 3-й модах. Численным экспериментом выявлена очень слабая особенность в поведении 2-й моды колебаний (см. рис.1, в) и только при максимальной глубине надреза $\bar{t} = 0,86$. На экспериментальных кривых для координаты надреза $\bar{L}_c = 0,25$ (см. рис.1, г) надежно регистрируются резкие изменения поведения форм колебаний уже начиная с $\bar{t} = 0,7$. Этот результат выявляет некоторую ограниченность метода конечных элементов (во всяком случае, в использованной постановке задачи) для построения модели диагностирования параметров повреждения. Совместное использование обладающего высокой чувствительностью физического эксперимента с анализом форм колебаний на собственных частотах и метода конечных элементов, позволяющего выявить ясную картину полуколичественных закономерностей модификации собственных форм, по-видимому, является перспективным методом диагностирования дефектов типа трещин при возбуждении изгибных колебаний в балочных конструкциях.

Выводы. Анализ форм 1-й и 2-й мод изгибных колебаний стержней с дефектом типа трещин колебаний выявил особенность этих форм в виде изломов, координаты которых совпадают с местоположением повреждения (надреза). Угол между касательными к графику формы колебаний, проведенными при переходе через координату повреждения, непрерывно уменьшается с ростом глубины надреза, тем самым характеризуя степень поврежденности. Оба этих параметра в совокупности могут служить диагностическим признаком, характеризующим место и степень поврежденности консольно закрепленного упругого стержня с высокой степенью достоверности. Количественные расчеты углов между касательными к кривым форм колебаний будут получены позже в рамках дальнейших исследований.

Заключение. Предложен комбинированный конечно-элементный и экспериментальный метод идентификации параметров повреждений в стержневых конструкциях, позволяющий с высокой достоверностью оценить местоположение и степень поврежденности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №10-08-00093а, 10-08-05011-6, 10-08-13300-РТ_ОМИ).

Библиографический список

1. Rytter A. Vibration Based Inspection of civil Engineering Structures / A. Rytter // PhD Thesis, University of Aalborg (Denmark), 1999.
2. Dado H.F. Mohammad. Crack parameter estimation in structures using finite element modeling / Mohammad H.F. Dado, Omar A. Shpli // Jnt. J. Solid and Structures. – 2003. – V.40.
3. Bamnios Y. Crack identification in beam structures using mechanical impedance / Y. Bamnios, E. Douka, and B. Trochidis // J. of Sound and Vibration. – 2002. – V.256(2).
4. Матвеев В.В. К анализу эффективности метода спектральной вибродиагностики усталостного повреждения элементов конструкций. Сообщение 1. Продольные колебания, аналитическое решение / В.В. Матвеев // Проблемы прочности. – 1997. – №6.
5. Матвеев В.В. К анализу эффективности метода спектральной вибродиагностики усталостного повреждения элементов конструкций. Сообщение 3. Аналитическое и численное определение собственных частот продольных и изгибных колебаний стержней с поперечными трещинами. / В.В.Матвеев, А.П Бовсуновский // Проблемы прочности. – 1999. – №4.

6. Matveev V. V. Vibration-based diagnostics of fatigue damage of beam-like structures / V.V. Matveev, A. P. Bovsunovsky. // J. Sound and Vibration. – 2002. – V.249.
7. Бовсуновский А.П. Использование нелинейных резонансов для диагностики закрывающихся трещин в стержневых элементах / А.П. Бовсуновский, О.А. Бовсуновский // Проблемы прочности. – 2010. – №3.
8. Gounaris G. A finite element of a cracked prismatic beam for structural analysis. / G. Gounaris, A. D. Dimarogonac // Computer and Structures. – 1988. – V.28.
9. Акопьян В.А. Аналитический и конечно-элементный анализ параметров колебаний в стержне с повреждением / В.А. Акопьян, А.Н. Кабельков, А.Н. Соловьев // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. – 2010. – №5.
10. Акопьян В.А. Деформационный критерий состояния предразрушения элементов ферменных конструкций и акустоэмиссионно-резонансная методика на его основе / В.А. Акопьян // Дефектоскопия. – 2009. – №3.
11. Del. Grosso A. A critical review of recent advances in monitoring data analysis and interpretation for civil structures / A. Del. Grosso, F. Lanato // Proc. of Four European Conf. of Structural Control. Saint-Petersburg. – 2008. – V.1.
12. Акопьян В.А. Оценка влияния поврежденности строительной конструкции на параметры собственных частот методом конечных элементов / В.А. Акопьян, А.Н. Соловьев, А.Н. Кабельков, А.В. Черпаков // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. – 2009. – №1.
13. Акопьян В.А. Некоторые подходы к оценке остаточного ресурса строительных ферменных конструкций / В.А. Акопьян, А.Н. Кабельков, А.В. Черпаков // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. – 2009. – №5.

Материал поступил в редакцию 23.12.10.

References

1. Rytter A. Vibration Based Inspection of civil Engineering Structures / A. Rytter // PhD Thesis, University of Aalborg (Denmark), 1999.
2. Dado H.F. Mohammad. Crack parameter estimation in structures using finite element modeling / Mohammad H.F. Dado, Omar A. Shpli // Int. J. Solid and Structures. – 2003. – V.40.
3. Bamnios Y. Crack identification in beam structures using mechanical impedance / Y. Bamnios, E. Douka, and B. Trochidis // J. of Sound and Vibration. – 2002. – V.256(2).
4. Matveev V.V. K analizu effektivnosti metoda spektral'noi vibrodiagnostiki ustalostnogo povrejdeniya elementov konstrukcii. Soobschenie 1. Prodol'nye kolebaniya, analiticheskoe reshenie / V.V. Matveev // Problemy prochnosti. – 1997. – №6. – In Russian.
5. Matveev V.V. K analizu effektivnosti metoda spektral'noi vibrodiagnostiki ustalostnogo povrejdeniya elementov konstrukcii. Soobschenie 3. Analiticheskoe i chislennoe opredelenie sobstvennykh chastot prodol'nykh i izgibnykh kolebaniy sterznej s poperechnymi treschinami. / V.V. Matveev, A.P. Bovsunovskii // Problemy prochnosti. – 1999. – №4. – In Russian.
6. Matveev V. V. Vibration-based diagnostics of fatigue damage of beam-like structures / V.V. Matveev, A. P. Bovsunovsky. // J. Sound and Vibration. – 2002. – V.249.
7. Bovsunovskii A.P. Ispol'zovanie nelineinykh rezonansov dlya diagnostiki zakryvayushchihya treschin v sterznevyykh elementah / A.P. Bovsunovskii, O.A. Bovsunovskii // Problemy prochnosti. – 2010. – №3. – In Russian.
8. Gounaris G. A finite element of a cracked prismatic beam for structural analysis. / G. Gounaris, A. D. Dimarogonac // Computer and Structures. – 1988. – V.28.
9. Akop'yan V.A. Analiticheskii i konechno-elementnyi analiz parametrov kolebaniy v sterznej s povrejdeniem / V.A. Akop'yan, A.N. Kabel'kov, A.N. Solov'ev // Izv. vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tehn. nauki. – 2010. – №5. – In Russian.

10. Akop'yan V.A. Deformacionnyi kriterii sostoyaniya predrazrusheniya elementov fermennykh konstruktsii i akustoemissionno-rezonansnaya metodika na ego osnove / V.A. Akop'yan // Defektoskopiya. – 2009. – №3. – In Russian.

11. Del. Grosso A. A critical review of recent advances in monitoring data analysis and interpretation for civil structures / A. Del. Grosso, F. Lanato // Proc. of Four European Conf. of Structural Control. Saint-Petersburg. – 2008. – V.1.

12. Akop'yan V.A. Ocenka vliyaniya povrejdennosti stroitel'noi konstruktsii na parametry sobstvennykh chastot metodom konechnykh elementov / V.A. Akop'yan, A.N. Solov'ev, A.N. Kabel'kov, A.V. Cherpakov // Izv. vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tehn. nauki. – 2009. – №1. – In Russian.

13. Akop'yan V.A. Nekotorye podhody k ocenke ostatochnogo resursa stroitel'nykh fermennykh konstruktsii / V.A. Akop'yan, A.N. Kabel'kov, A.V. Cherpakov // Izv. vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tehn. nauki. – 2009. – №5. – In Russian.

DAMAGE PARAMETERS IDENTIFICATION IN ELASTIC ROD USING BOTH FINITE ELEMENT AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FLEXURAL VIBRATION MODES

A.V. CHERPAKOV, V.A. AKOPYAN

(Research Institute of Mechanics and Applied Mathematics, SFU)

A.N. SOLOVYEV

(Don State Technical University)

E.V. ROZHKOVA

(Research Institute of Mechanics and Applied Mathematics, SFU)

S.N. SHEVTSOV

(Southern Scientific Centre of RAS)

The results of finite-element analysis and experimental investigations of the cantilever elastic notched bar flexural modes are presented. The application of the kinking coordinate and tangent angle on the eigenform graphs under the transition through the damage point as a complex diagnostic property of the location and bar damage degree is offered.

Keywords: parameters of damage, notched elastic bar, finite-element analysis, physical experiment, oscillation mode, damage diagnostic criterion.