

А. В. Черпаков, В. А. Акопян, А. Н. Соловьев

*Научно-исследовательский институт механики и прикладной математики  
им. И. И. Воровича, Южный Федеральный Университет  
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, e-mail: [akop@math.rsu.ru](mailto:akop@math.rsu.ru)*

## Алгоритм многопараметрической идентификации дефектов стержневых конструкций

*Получена 27.12.2012, опубликована 22.03.2013*

В статье предложен, отличающийся от известных, алгоритм многопараметрической идентификации дефектов (ИД) стержневых конструкций. Новизна алгоритма заключается в том, что процедура ИД разделена на два этапа: на 1-м этапе определяется местоположение дефекта, а на втором — степень поврежденности. Дополнительной информацией к решению задачи реконструкции дефектов является набор собственных частот и форм колебаний исследуемой конструкции. При этом анализ форм колебаний позволяет решить задачу первого этапа, после чего строится аналитическая или конечно-элементная модель конструкции с дефектами и с помощью прямых расчетов решается задача второго этапа. Приведен пример расчета параметров дефекта в упругом консольном стержне на основе модельного эксперимента в КЭ комплексе. При использовании современных средств измерения перемещений точность предложенного метода реконструкции параметров дефекта не уступает точности, полученной в известных работах, например, с помощью искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: алгоритм, идентификация дефектов, местоположение дефекта, степень поврежденности стержня.

### ВВЕДЕНИЕ

Решению задач идентификации повреждений (ИД) в стержневых структурах посвящено большое количество работ, что видно из обзоров, опубликованных не только достаточно давно, но и в последние годы [1-7]. Среди ключевых вопросов, возникающих при исследовании поврежденных структур, важное место занимает построение алгоритмов решения задач ИД. При решении задач ИД в последнее время зачастую используется достаточно новый подход, заключающийся в разработке и применении эволюционных алгоритмов, нейронных сетей и методов оптимизации. Краткий обзор исследований в этом направлении приведен в работе S. Moradi et al [8]. Авторы этой работы разработали модифицированный вариант генетического алгоритма (т.н. bees algorithm (БА-алгоритм)) и эволюционной методики оптимизации (swarm-based evolutionary optimization technique). Этот алгоритм был применен для решения задач ИД в консольно-закрепленном упругом стержне с наличием дефекта. ИД

разрабатывалась на основе использования аналитической модели колебаний стержня (задача на основе однородной балки Эйлера, решение которой получено на базе принципа Гамильтона-Остроградского и функций Крылова). В этой модели [1,2], повреждение в стержне моделируется жесткостью эквивалентной пружины. Численный расчет параметров повреждения в стержне был проведен на базе исходных данных — значений характерных резонансных частот колебаний (параметры форм колебаний в расчете не принимались). Сравнение результатов численных расчётов, полученных с помощью ВА-алгоритма и натурального эксперимента, позволило оценить расхождение значений прогнозируемых и экспериментальных данных: по локации (от 3 до 7,5%) и по глубине надреза (от 3 до 15,5%).

Наряду с этим задача ИД в упругих элементах конструкций была решена также с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) [9]. Была построена 3-х мерная конечно-элементная модель стержня прямоугольного сечения с открытой трещиной. В ходе решения задачи ИД (и в частности задачи оптимальной схемы размещения сенсоров на поверхности модели) был использован собственный программный продукт, причем в исходные данные для ИНС были включены не только собственные частоты, но и параметры форм колебаний и их комбинации. Решение задачи ИД в стержне с помощью разработанной ИНС показало, что при выборе оптимальной схемы расположения сенсоров и включении в исходные данные параметров АЧХ первых пяти форм собственных колебаний стержня, достигается точность в 99,16% в определении глубины трещины (надреза) и 99,82% в ее локации. Сравнение этих результатов с данными, приведенными в [8], показали, что подход к решению задачи идентификации повреждений, описанный в [9] дает лучшие по точности результаты. Из этого следует, что включение в алгоритм решения задачи ИД полного набора исходных данных (параметры АЧХ и форм колебаний) позволяет получить более точные результаты. Если же в алгоритме ИД использовать исходные данные по формам собственных колебаний стержня, полученные по результатам натурального эксперимента [4, 10], то степень достоверности результатов ИД в значительной степени повышается. Именно такой подход был использован нами в разработанном алгоритме идентификации повреждений в упругом стержне.

Известен также другой подход к решению задач ИД простых балочных структур на основе методов теории возмущений и построения алгоритмов минимизации индикаторов норм сходимости с использованием метода Дэвидона-Флетчера-Пауэлла [11]. В этом исследовании рассмотрены матрицы собственных векторов и собственных значений балочной конструкции. Показано, что разное число разбивки балки на нечётное число элементов позволяет обеспечить быструю сходимость счёта для повреждений (например, трещины) как малой, так и большой глубины. Результаты вычислений были сведены к определению изменений только одного параметра — модуля упругости различных элементов. Остается не исследованным вопрос, на сколько этот метод можно применить для анализа спектра частот и форм различных мод колебаний с учётом того, что алгоритм нелинейной оптимизации многих переменных (квази-ньютоновское приближение) имеет тенденцию «застевать» в

локальных минимумах. Исследования показывают, что для простой балки расчет одного параметра (локации) требует большого объема вычислений, при этом возникают неопределенности в уровне достоверности результатов. Вследствие этого преимущество этого метода ИД по сравнению с конечно-элементным или аналитическими методами не очевидно.

Среди различных методов решения задач ИД в простых стержневых элементах конструкций к наиболее исследованным относятся следующие:

- частотный метод ИД, основанный на анализе собственных частот колебаний элементов конструкций (FBDD — frequency-based damage detection);
- метод ИД, базирующийся на анализе форм различных мод колебаний (MSBDD — mode shape-based damage detection).

Анализ различных подходов к решению задач ИД показывает, что исследование параметров поврежденности вызывает значительные, в т.ч. вычислительные трудности. В связи с этим выбирается наиболее простой и одновременно с этим надежный диагностический признак идентификации, базирующийся на применении метода свободных колебаний [12], основанный на анализе частотных характеристик.

Авторами в [13] был предложен интегральный диагностический признак ИД в стержневых конструкциях. Показано, что на его основе с помощью модального анализа на примере использования КЭ метода можно решить задачу ИД в элементах стержневых конструкций с повышенной степенью достоверности. Для численной реализации такого подхода был разработан алгоритм многопараметрической идентификации дефектов стержневых конструкций, описана схема и пример его реализации с последующей графической визуализацией результатов определения резонансных частот, особенностей параметров собственных форм колебаний, местоположения дефектов и их размеров.

## 1. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ

Данный алгоритм реализован как часть комплекса вибродиагностики многопараметрической идентификации дефектов в рамных стержневых конструкциях.

Базовым блоком алгоритма является создание банка (массива) данных о динамическом состоянии конструкции. Параметры состояния конструкции могут быть получены путем совокупности расчетного моделирования и экспериментального подхода [10].

Процедура алгоритма идентификации дефектов описана как последовательность следующих этапов:

1. Проведение натурального эксперимента с помощью измерительно-информационного комплекса, включающего в себя: конструкцию с испытуемым образцом, датчики, устройство усиления, передающий тракт, устройства сбора и обработки информации с наличием программного обеспечения;
2. Возбуждение колебаний в испытуемом образце и сбор информации о собственных частотах и формах колебаний.
3. Обработка данных о параметрах колебаний, выдача результата измерений и модельного расчета.

Результатом являются: координаты местоположения дефекта и его величины.

На рис. 1 представлена схема алгоритма многопараметрической идентификации дефектов в стержневой конструкции (СК).

На первом этапе производится подготовка численной и натурной моделей, устройств управления колебаниями и сбора данных на базе компьютера. Происходит постановка задачи сбора первичной информации амплитудно-частотных характеристик СК. С помощью блока управления колебаниями происходит ударное или вынужденное возбуждение колебаний СК на частоте  $\omega_i$  в некоторой точке конструкции  $x_k$ . После стабилизации колебательного процесса осуществляется сбор параметров колебаний с помощью датчиков в нескольких точках модели. Итогом работы является массив данных  $U_i(x_k, \omega_i)$  в некоторой точке конструкции  $x_k$ , являющийся амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) конструкции в этой точке. На следующем этапе происходит вывод графического отображения зависимости  $U_i(x_k, \omega_i)$  и сохранение данных в файл, осуществляется обработка измеренных АЧХ  $U_i(x_k, \omega_i)$  и определяются резонансные частоты  $\omega_{ri}$ .

На следующем этапе производится сбор информации о формах собственных колебаний на выделенных резонансных частотах. С помощью блока управления колебаниями происходит возбуждение колебаний на соответствующей резонансной частоте  $\omega_{ri}$ . Измеряются амплитуды колебаний в точках с различным расположением по длине конструкции. Объединив в массив эти данные получаем форму колебаний конструкции в  $K$  точках  $U_i(x, y, z, \omega_i)$ ,  $V_i(x, y, z, \omega_i)$ ,  $W_i(x, y, z, \omega_i)$  на соответствующей резонансной частоте  $\omega_{ri}$ . Затем производится пересчет первичных амплитудных характеристик соответствующей формы колебаний для каждой точки модели путем расчёта углов между касательными в точках сбора амплитуд, и построение массива углов  $\varphi_{ri}(x_k, \omega_{ri})$  и кривизны  $U''_{ri}(x_k, \omega_{ri})$ . Далее осуществляется сохранение данных о соответствующей форме колебаний, углов касательных и ее резонансной частоте в банке данных о конструкции.

По завершению выполнения процедуры измерения параметров форм колебаний, расчета углов изгиба  $\bar{\varphi}_i(x, y, z, \omega_i)$  в точках модели и параметров кривизны  $\bar{U}''_i(x, y, z, \omega_i)$  графиков этих форм осуществляется переход к этапу определения локации дефекта конструкции.

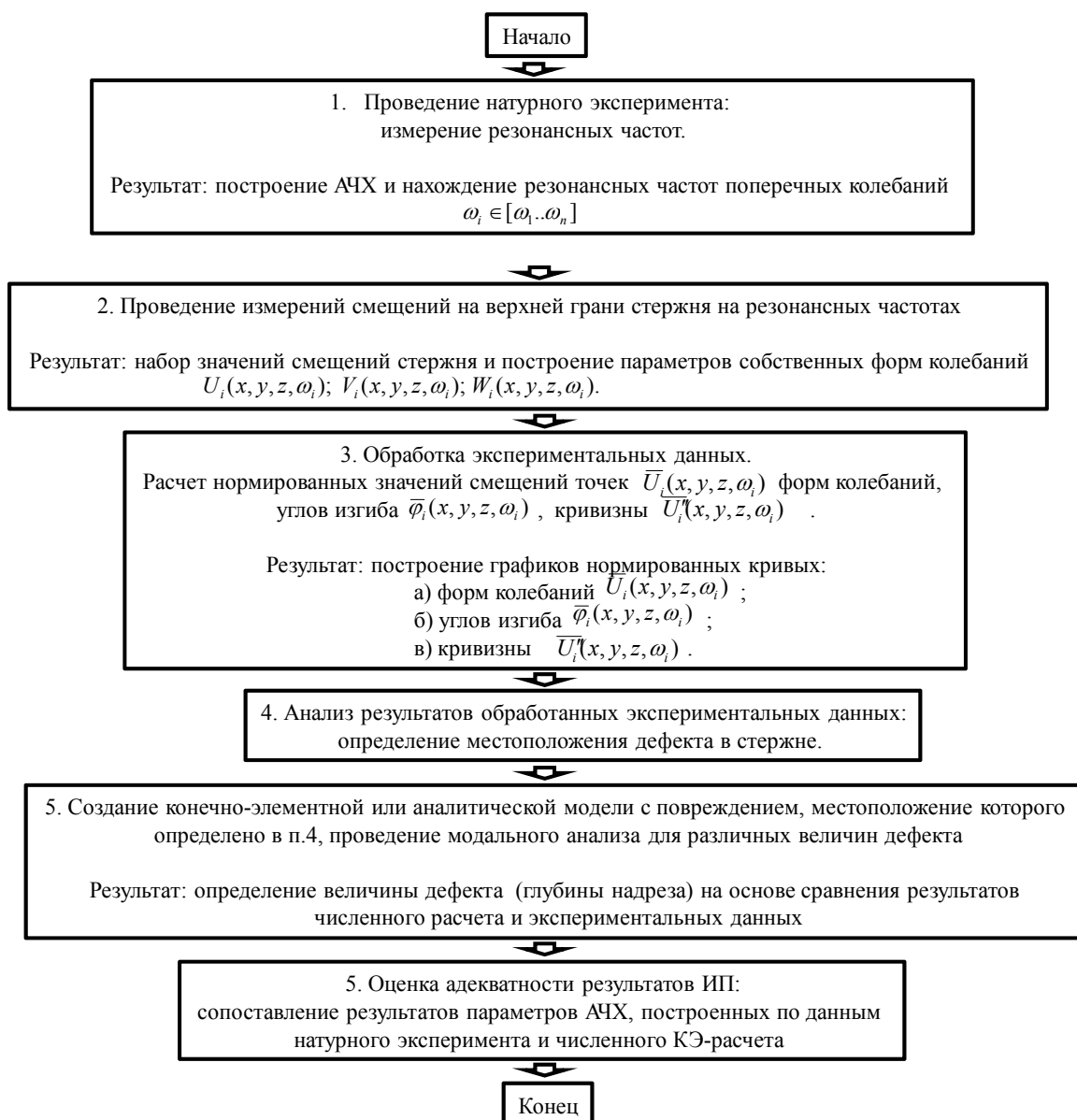


Рис. 1. Алгоритм многопараметрической идентификации дефектов в стержневой конструкции

На последующем этапе создается адекватная конечно-элементная модель конструкции с дефектом, локализованным в определенном ранее месте. На этапе моделирования колебаний конструкции решается задача об определении величины дефекта. При этом для данного расположения дефекта решается задача о собственных колебаниях конструкции при его различных размерах. Определяется чувствительность частот к наличию дефекта, выбираются для исследования наиболее чувствительные моды колебаний, производится анализ особенностей форм колебаний с целью определения местоположения  $L$  дефекта (в частности, надреза) в модели, его величины относительной жесткости  $C_{yup}$  и степени поврежденности (глубины  $\bar{t}$  надреза). В следующем блоке происходит исследование адекватности численной модели с

идентифицированными дефектами и экспериментальной. Результаты исследований выводятся в виде графической интерпретации о формах колебаний  $U_{ri}(x_k, \omega_{ri})$ , углов  $\varphi_{ri}(x_k, \omega_{ri})$ , кривизны  $U''_{ri}(x_k, \omega_{ri})$  в точках, вероятного местоположения  $L$  и глубины  $\bar{t}$  дефекта, производится сохранение в файл отчета о проделанной работе.

## 2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА

В качестве примера реализации алгоритма рассмотрена идентификация дефекта в стержневой конструкции, при этом данные натурального эксперимента заменялись результатами расчета в конечно-элементном комплексе ANSYS. Была построена полнотелая модель консольного стержня (длина  $L=250$  мм, высота поперечного сечения  $h=8$  мм, ширина  $a=4$  мм) с повреждением (дефект в виде поперечного надреза шириной 1 мм и абсолютной глубиной  $h_d=4$  мм), расположенным, в отстоящей от защемления точке стержня на расстоянии  $\bar{L}_d=0.25$ , где  $\bar{L}_d = L_d / L$ ,  $L_d$  — местоположение повреждения. Далее введем безразмерную координату  $\bar{x} = x / L$ . Относительная глубина повреждения  $\bar{t} = h_d / h = 0.5$  [6]. Рассматриваются поперечные колебания стержня.

Последующие действия выполняются, соответственно, по блокам алгоритма. В начале был проведен гармонический анализ колебаний стержня. Результаты этого анализа сохраняются в банке данных о параметрах амплитудно-частотных характеристик в различных точках стержня. На основе анализа АЧХ выявляются собственные резонансные частоты колебаний. На следующем этапе сохраняются значения поперечных смещений в различных точках стержня. Далее, анализируются смещения точек верхней поверхности стержня при собственных колебаниях. На рис. 2а приведена форма первой моды колебаний стержня с наличием повреждения. Вычисляются параметры форм колебаний (углы  $\varphi(\bar{x})$  между касательными (рис.2б) и кривизна  $U''(\bar{x})$  (рис.2в)). Аналогичные действия могут быть произведены при анализе других форм колебаний. Осуществляется их анализ с целью выявления характерных точек, в которых имеет место резкое («пикообразное») изменение на их графиках [14]. Координаты точек, имеющие выраженные изломы по длине стержня, совпадают с местоположением повреждения.

Анализ графиков параметров форм колебаний (рис.2 б, в) позволил сделать выводы о том, что с их помощью можно установить местоположение дефекта. В данном примере для случая 1-й моды колебаний определяем расположение дефекта в точке по длине стержня с максимальным перегибом в координате  $\bar{L}_d^* = 0.245$  (в данном случае звездочкой указывается найденная величина). Погрешность определения местоположения дефекта рассчитывается по формуле:

$$\Delta = \frac{|\bar{L}_d^* - \bar{L}_d|}{\bar{L}_d} 100\% = \frac{|0.245 - 0.25|}{0.25} 100\% = 2\%.$$

После идентификации местоположения дефекта производится идентификация величины дефекта. Для этого исследуем влияние величины дефекта на параметры формы колебаний. Для сопоставления параметров формы 1-й моды колебаний для различных величин дефекта (надреза) при выявленном местоположении строятся графики зависимости параметров формы колебаний (рис. 3а), зависимостей величины дефекта от угла  $\varphi(\bar{x})$  (рис. 3б) между касательными и кривизны  $U''(\bar{x})$  (рис. 3в).

Для оценки влияния глубины повреждения (надреза) на характер кривых параметров форм колебаний (рис. 3б, в) в зоне «излома» (вероятного местоположения дефекта) были построены графики зависимостей угла между касательными  $\varphi(\bar{L}_d)$  и кривизны  $U''(\bar{L}_d)$  (рис. 4).

Анализ значений угла между касательными, например, для 1-й формы колебаний, позволяет определить величину дефекта (надреза)  $\bar{t}$ . Из графика на рис. 2б видно, что в точке наибольшего перегиба («излома») формы колебаний ( $\bar{L}_d^* = 0.245$ ) угол между касательными в этой точке составляет  $\varphi(\bar{L}_d) = 167.8$  град, а кривизна в точке перегиба (рис. 2в)  $U''(\bar{L}_d) = 7.1$  усл. ед. Анализируя графики зависимостей угла между касательными и кривизны в зоне «излома» от относительной глубины надреза (рис. 4) определяем относительную величину дефекта (глубину надреза):  $\bar{t}^* = 0.48$ .

Погрешность определения величины дефекта (глубины надреза) для данного случая при сопоставлении с исходными данными ( $\bar{t} = 0.5$ ) вычисляется следующим образом:

$$\Delta = \frac{|\bar{t}^* - \bar{t}|}{\bar{t}} 100\% = \frac{|0.48 - 0.5|}{0.5} 100\% = 4\%.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

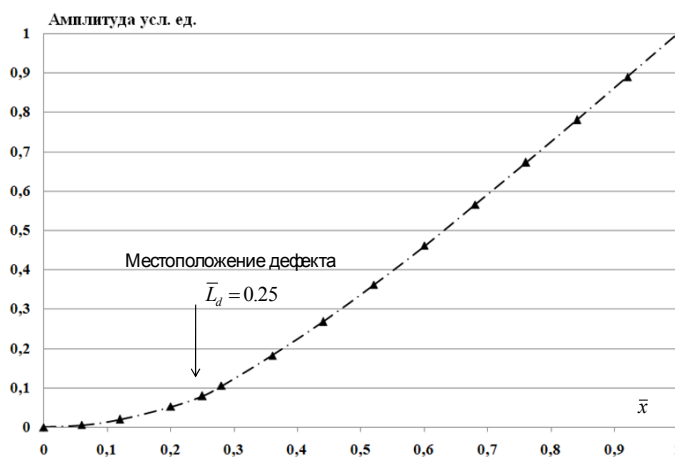
1. Разработанный алгоритм многопараметрической идентификации дефектов в стержневой конструкции позволяет рассчитать параметры трещины (открытого надреза) в консольно-закрепленном упругом стержне, в т.ч. глубину и местоположение трещины с меньшими погрешностями, чем при использовании других алгоритмов.

2. Снижение погрешности в определяемых параметрах идентификации стержня достигается благодаря использованию в алгоритме более широкого набора исходных (также и экспериментальных) данных (не только значений частот резонансов, но и параметров собственных форм колебаний стержня), а так же в силу применения в алгоритме интегрального диагностического признака идентификации.

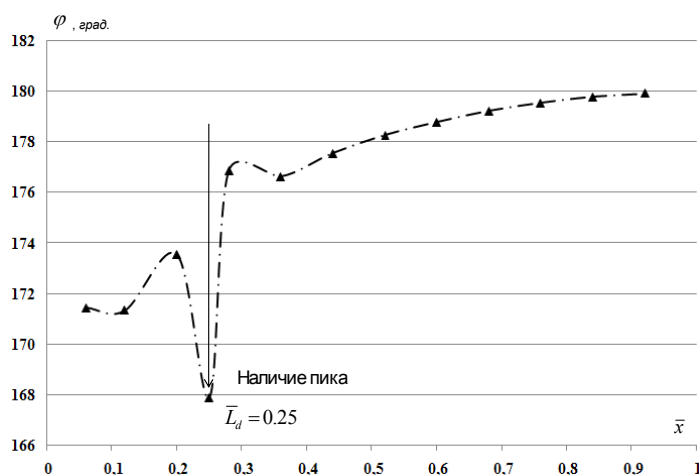
3. Предложенный алгоритм может быть положен в основу для разработки методики технической диагностики технического состояния строительных конструкций консольного типа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 10-08-00093-а, 10-08-01296-а, 12-08-90815 мол\_рф\_нр).

а)



б)



в)

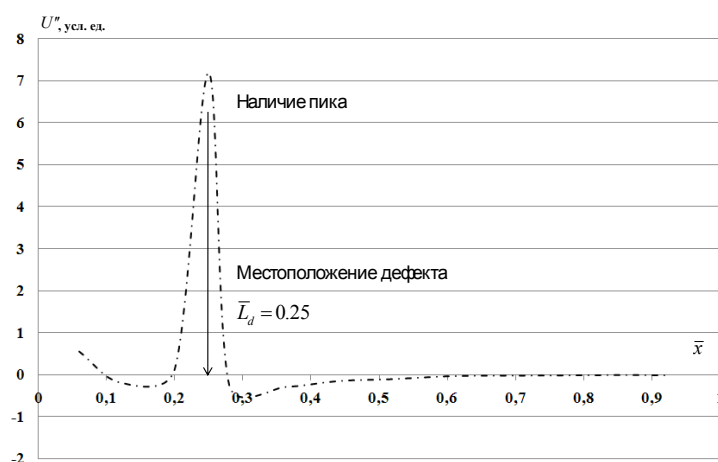
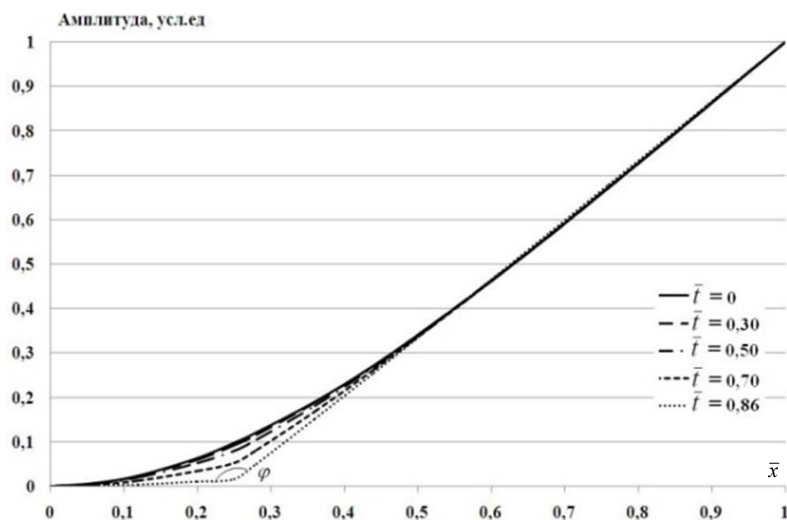


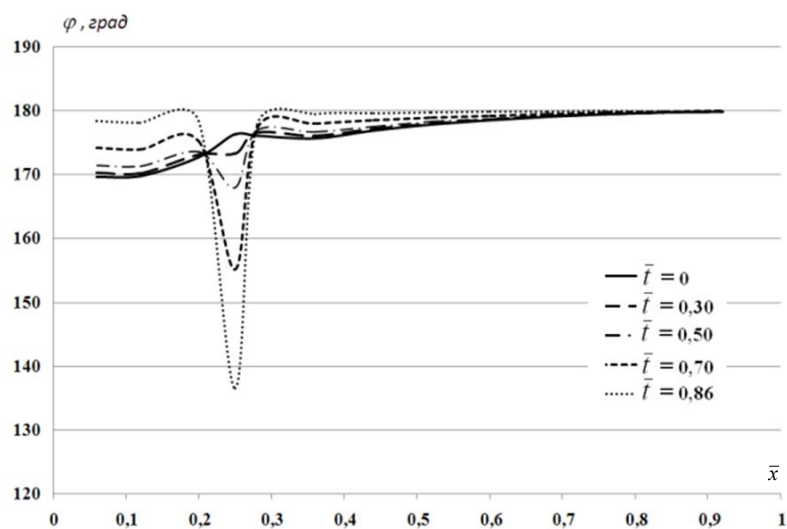
Рис. 2. а) форма 1-й моды колебаний стержня с наличием дефекта относительной глубиной  $\bar{l} = 0.5$  и его местоположении  $\bar{L}_d = 0.25$ ; б) углы различных в точках формы колебаний, образованные между касательными  $\varphi(\bar{x})$ ; в) кривизна в различных точках формы колебаний  $U''(\bar{x})$



а)



б)



в)

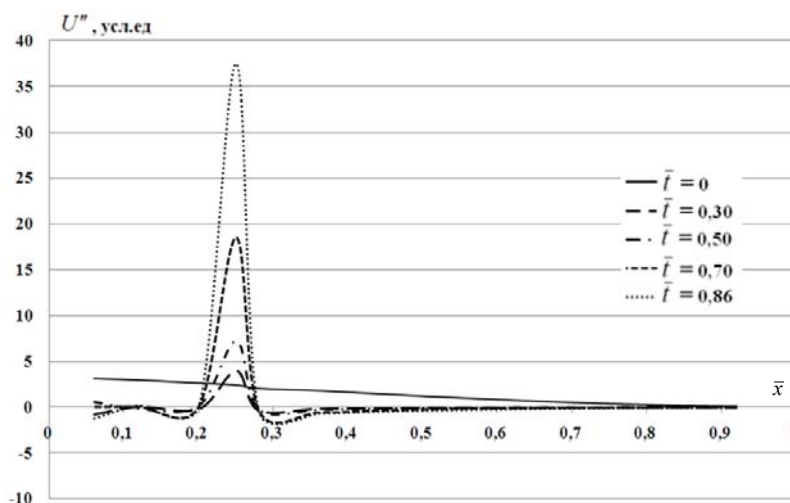
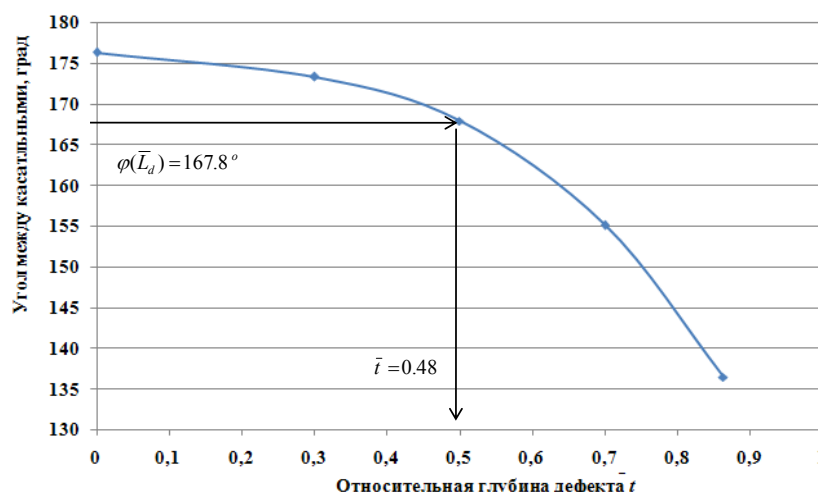


Рис. 3. Графики форм 1-й моды колебаний (а) и ее параметров: углов между касательными  $\varphi(\bar{x})$  (б) и кривизны  $U''(\bar{x})$  в различных точках (в) при разных значениях глубины надреза  $\bar{t}$  и его местоположении  $\bar{L}_d^* = 0.245$

а)



б)

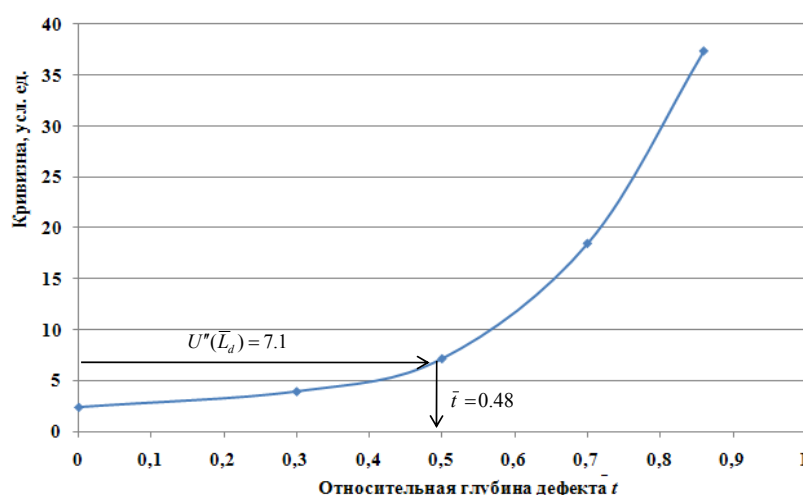


Рис. 4. Графики зависимости величины относительной глубины надреза от параметров форм колебаний в зоне «излома»: угла  $\varphi(\bar{L}_d)$  между касательными (а) и кривизны  $U''(\bar{L}_d)$  (б)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Dimarogonas A.D. 1996. Vibration of cracked structures: a state of the art review. Eng. Fract.Mech. 55, 831–857. (doi:10.1016/0013-7944(94)00175-8).
2. Friswell M.I. Damage identification using inverse methods // Phil. Trans. R. Soc. A (2007) 365, 393–410. (doi:10.1098/rsta.2006.1930.).
3. Бовсуновский О.А. Конечно-элементная модель для исследования колебаний стержня с закрывающейся трещиной // Пробл. прочности. - 2008. - № 5. - С. 114 - 120.
4. Постнов В.А. Определение повреждений упругих систем путем математической обработки частотных спектров полученных из эксперимента // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2000. №6. С. 155-160.

5. Постнов В.А. Использование методов регуляризации Тихонова для решения задач идентификации упругих систем // Механика твердого тела. 2010. №1. с. 64-71.
6. Акопян В.А., Черпаков А.В., Соловьев А.Н., Кабельков А.Н., Шевцов С.Н. Аналитический и конечно-элементный анализ параметров колебаний в стержне с повреждением // Изв. Вузов “Северо-Кавказский регион техн. науки”. 2010, №5, с. 21-28.
7. Akopyan V., Soloviev A. and Cherpakov A. Parameter Estimation of Pre-Destruction State of the Steel Frame Construction Using Vibrodiagnostic Methods. // Mechanical Vibrations: Types, Testing and Analysis. Nova Science Publishers, Inc. Edit. A.L. Galloway. Chapter 4. pp.147-161. 2010. N-Y. ISBN: 978-1-61668-217-0.
8. Moradi S., Razi P., Fatahi L. On the application of bees algorithm to the problem of crack detection of beam-type structures // Computers and Structures t. 89. 2011, pp. 2169–2175.
9. Krasnoshchekov A.A., Sobol B.V., Solov'ev A.N., Cherpakov A.V. Identification of Crack Like Defects in Elastic Structural Elements on the Basis of Evolution Algorithms // ISSN 1061\_8309, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2011, v. 47, No. 6, pp. 412–419.
10. Черпаков А.В., Акопян В.А., Рожков Е.В., Соловьев А.Н. Идентификация параметров поврежденности в упругом стержне с использованием конечно-элементного и экспериментального анализа мод изгибных колебаний // Вестник ДГТУ. 2011. №3. С.312-318.
11. Wong C.N., Huang H-Z., Xiang J. at al. Perturbed eigenvalue problem with Davidon-Fletcher-Powell quasi-Newton approach for damage detection of fixed-fixed beam // Mathematic and mechanic of solid. 2011, v. 16 (2), pp. 228-247.
12. Ваньков Ю.В., Казаков Р.Б., Яковлева Э.Р. Собственные частоты изделия как информативный признак наличия дефектов [Электронный ресурс] // Техническая акустика. – Электрон. журн. – 2003. – 5. Режим доступа: <http://www.ejta.org>, свободный.
13. Акопян В.А., Черпаков А.В., Рожков Е.В., Соловьев А.Н. Интегральный диагностический признак идентификации повреждений в элементах стержневых конструкций // Контроль. Диагностика. 2012. № 7, С. 50-56.
14. Акопян В.А., Соловьев А.Н., Черпаков А.В., Шевцов С.Н. О деформационном признаке идентификации повреждений, основанном на анализе форм собственных колебаний кантилевера с надрезом // Дефектоскопия. 2013 (принято в печать).