

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГРУППОВЫХ ДЕФЕКТОВ В МОДЕЛИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПРОФИЛЬНОЙ БАЛКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСНОВАННОЙ НА ЧАСТОТНОМ ОТКЛИКЕ КРИВИЗНЫ ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ОБРАТНЫМ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ

© 2023 г. Сону Кумар Гупта^{1,*}, Сураджит Дас^{1,**}

¹Национальный технологический институт, Агартала, Индия
E-mail: *sngupta77@gmail.com; **surajit2006r@gmail.com

Поступила в редакцию 07.12.2022; после доработки 14.02.2023
Принята к публикации 14.02.2023

В гражданской инфраструктуре конструкции, состоящие из профильных элементов, играют важную роль с экономической точки зрения благодаря меньшему собственному весу и устойчивости к функциональным нагрузкам. В настоящее время периодическое обслуживание или мониторинг состояния конструкций является обязательным для достижения максимального использования потенциала конструктивных элементов. В данной работе проведены экспериментальное, численное и аналитическое исследования для изучения структурного повреждения и его серьезности в трубчатой прямоугольной балке из конструкционной стали. Модальные параметры извлекаются с помощью регистратора динамических параметров (В&К) путем воздействия ударного молотка на модельную конструкции и получения данных с помощью набора однонаправленных акселерометров. Сначала из полученных модальных параметров извлекаются две формы колебаний. Ожидается, что во время эксперимента модальные параметры будут содержать шум окружающей среды, поэтому для получения данных без шума необходимо его устранить. Для уменьшения шума в модальных параметрах, полученных на эксперименте, используется обучение искусственной нейронной сети. Используя модифицированные модальные параметры, определяют кривизну формы моды, а так называемая измененная кривизна формы колебаний (ИКФК) используется для расчета индекса дефекта кривизны. Индекс дефекта кривизны применим для исследования расположения групповых дефектов с различными уровнями критичности в конструкциях, состоящих из профильных прямоугольных балок.

Ключевые слова: модель профильной балки, зашумление модальных составляющих, искусственная нейронная сеть, измененная кривизна формы колебаний, индекса дефекта кривизны расположение групповых дефектов.

DOI: 10.31857/S0130308223040024, EDN: ХУНАJW

1. ВВЕДЕНИЕ

В действительности, конструкции в гражданской или промышленной инфраструктуре постепенно деградируют на протяжении всего срока службы под воздействием факторов окружающей среды и других воздействий. Безопасность и надежность конструкции гарантируется благодаря мониторингу состояния конструкции даже после многократных внешних воздействий высокой интенсивности. Мониторинг состояния конструкций и контроль повреждений в гражданской инфраструктуре требует эффективного, надежного и экономичного инструмента для контроля состояния конструкции в период эксплуатации. Повреждения или разрушения могут произойти в результате серьезных аварий, взрывных работ вблизи сооружения, боевых действий, стихийных бедствий, включая землетрясения, сильные наводнения, ураганы и оползни. Значимость мониторинга состояния конструкций (МСК) и контроль дефектов играют важную роль при прогнозировании повреждений в существующих конструкциях. Ранее было проведено множество исследований, в которых использовались модальные параметры на основе вибрационных колебаний. Некоторые из важных исследований представлены в разделе «Введение» следующим образом. Для простых и сплошных балок с различными местами расположения дефектов были получены модельные расчеты, после чего были разработаны методики для применения на реальных мостовых конструкциях [1]. Модельный анализ проводили для простых балок и балок с закрепленными концами для исследования трещин в различных месторасположениях. Для исследования физических изменений в модельных конструкциях получены данные о частотных характеристиках ускорения и собственных частотах [2]. Исследование показало, что дефекты могут быть идентифицированы с использованием собственных частот в дефектных балках. Дополнительные антирезонансные пики на амплитудно-частотной характеристике используются в качестве средства локализации трещин [3]. Групповые трещины исследовали в профильной консольной балке с помощью аналитических и численных методов. Для проверки достоверности модели проводится эксперимент с целью определения вибрационных параметров модели [4]. Обнаружение

утечек в трубопроводе изучали с помощью изменения взаимной спектральной плотности при измерении вибрации в определенных местах. Сложный трубопровод испытывали в лаборатории для определения одиночных и множественных утечек в системе [5]. В исследовании по контролю дефектов консольную балку круглого трубчатого сечения и коробчатого сечения проверяли с помощью теоретической и экспериментальной модели с использованием собственных частот и соответствующих форм колебаний [6]. Для определения места повреждения предложен вибрационный метод, использующий производную формы колебаний [7]. В работе представлен метод обнаружения повреждений моста, основанный на результирующем смещении, вызванным транспортным средством, при этом метод не требует предварительной информации об интенсивности движения и шероховатости поверхности [8]. Авторы продемонстрировали метод обнаружения повреждений с использованием вторых производных формы колебаний для контроля дефектов конструкции [9, 18, 22]. Обнаружение повреждений на основе АЧХ приведено для балочных и ферменных конструкций. Численно полученные данные оптимизируются методом роя частиц для определения конкретных мест повреждений в конструкциях [11]. Представлен обзор на основе МСК, включающий идентификацию нелинейной системы с использованием нелинейных динамических подходов [12]. Сварное соединение исследуется с помощью модального анализа. Механические свойства анализировали для количественной оценки качества сварки в конструкции [13]. Разница между прогнозируемой кривизной формы колебаний и фактическим значением кривизны формы колебаний использовали для определения места повреждения в конструкции балочного типа [14]. Единичные и множественные повреждения идентифицируются с помощью вибрационных характеристик, таких как собственные частоты и формы колебаний для модели балки [15]. В предложенном исследовании повреждение балки характеризуется с помощью результатов испытания по определению частот и форм собственных колебаний конструкции. Место повреждения определяли с помощью собственных частот и формы первой моды неповрежденных и поврежденных конструкций [16]. Предложена стратегия обнаружения повреждений на основе вибрации с применением кривизны формы колебаний. Модальные данные извлекаются в условиях шума, а уровень шума устраняется искусственной нейронной сетью, чтобы определить правильное местоположение повреждения [17]. В [23] представлено исследование, основанное на методе поверхности отклика (МПО), в котором используются собственные частоты и формы мод. Эффективность метода продемонстрирована на примере численного исследования простой балки и стальной рамы, подвергнутой лабораторным испытаниям. Показано, что метод RSM может эффективно выявлять дефекты в конструкциях. Повреждение в шестиэтажном каркасном здании определяется с помощью метода поверхности отклика, который также использует три трансляционные частоты формы колебаний и первые две формы колебаний [19]. Многослойная конструкция анализируется с использованием рассчитанных и экспериментально определенных модальных параметров, таких как собственные частоты [20]. Проводили сравнительное исследование временного отклика между бездефектными и дефектными конструкциями. Это конкретное исследование осуществляли на основе двух подходов, а именно селективного индексного метода и скачкообразного изменения сдвигающих сил [21]. Модальные параметры на основе вибрации используются для выявления одиночных и множественных повреждений в консольной балке [24, 25]. В отдельных исследованиях собственные частоты применяют для выявления дефектов и снижения жесткости конструкций [26, 27]. Для идентификации повреждений в предварительно напряженных шпалах используются квадраты кривизны формы колебаний [28]. Наличие небольших структурных повреждений определяется с помощью многоступенчатой модели искусственной нейронной сети [30]. Повреждения ферменной конструкции исследуют с помощью данных АЧХ в качестве входных данных для модели ИНС [31]. Исследуется возможность обнаружения повреждений в двутавровой балочной конструкции в двойной точке с использованием динамического поведения на основе ИНС [32]. Модель ИНС разработана для уменьшения шума от регистрируемых сигналов с целью улучшения работы модели [36].

Для оценки эксплуатационных характеристик конструкционных сооружений проведение МСК и контроль дефектов является необходимым на всем процессе эксплуатации. На протяжении более 40 лет применяли ряд подходов для оценки состояния конструкций и прогнозирования их поведения в режиме реального времени. Для контроля дефектов конструкций в большинстве предыдущих исследований задействовали смоделированные данные АЧХ. Основной целью данного исследования является использование ИНС для минимизации погрешности измерений в наборах данных АЧХ, которые были получены экспериментально, после чего обучающие наборы данных АЧХ будут привлекать для расчета кривизны формы колебаний, соответствующей бездефектным и дефектным конструкциям. Чтобы точно определить

расположение и критичность дефекта, наконец, определяется индекс дефекта кривизны как для бездефектных, так и для дефектных конструкций.

Условные обозначения. В статье использованы следующие условные обозначения: В&К — Buel & Kjaer; БПФ — быстрое преобразование Фурье; ИКФК — измененная кривизна формы колебаний; МКЭ — метод конечных элементов; H_ω — отклик модели; ω — собственная частота; ИНС — искусственная нейронная сеть; АИДК — абсолютный индекс дефекта кривизны; АЧХ — амплитудно-частотная характеристика; γ^2 — функция когерентности; M — масса модели; САО — среднее абсолютное отклонение; C — демпфирование модели; МСК — мониторинг состояния конструкций; K — жесткость модели.

Задачи исследования

Задачи данного исследования изложены на основе имеющейся литературы:

построение форм поперечных колебаний с использованием модального отклика АЧХ (мнимая часть);

для разграничения состояния конструкции необходимо сравнить данные собственных частот при различных уровнях повреждений;

чтобы уменьшить наличие шума в модели АЧХ, модальные параметры обучаются с помощью искусственной нейронной сети с соответствующей топологией;

построение формы колебаний с использованием обученных модальных АЧХ;

построение кривизны формы колебаний с помощью метода аппроксимации центральной разности с использованием данных модальных АЧХ для необученных и обученных состояний сети;

индекс дефекта кривизны, который показывает точное местоположение дефекта в модели, рассчитывается с использованием кривизны формы колебания.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

2.1. Изгибные колебания балки

Исследовали балочную конструкцию, которая совпадает с осью x в системе координат. Площадь поперечного сечения (A_x) и момент инерции (I_x) представляют геометрические параметры модели конструкции. Модель балки представлена на рис. 1.

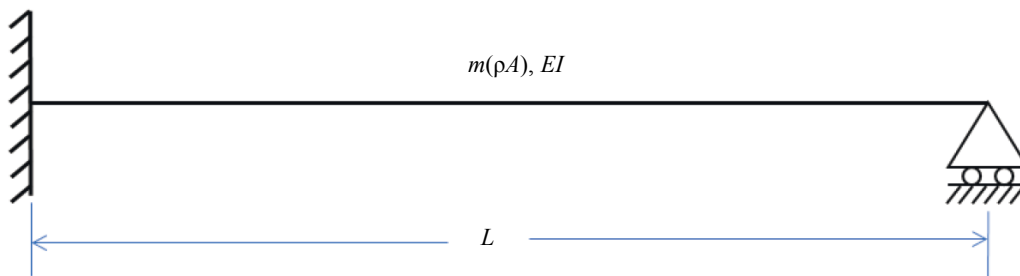


Рис. 1. Модель консольной балки с опорой.

В общем случае свойства материала включают модуль упругости (E_x) и плотность (ρ_x) как функцию от расстояния (x) вдоль балки. При отсутствии поперечной нагрузки (q) свободные колебания модели могут быть представлены в виде дифференциального уравнения. Моды в поперечном направлении задаются как φ [16]:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(E_{(x)} I_{(x)} \frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial x^2} \right) - \rho_{(x)} A_{(x)} \omega_n^2 \varphi_x = 0. \quad (1)$$

Термин ω — собственная частота для модели конструкции.

В общем случае форма колебания и график кривизны формы колебания представлены для модели консольной балки с опорой. Собственная частота ω , связанная с формами поперечных колебаний, представлена в этом уравнении. Когда конструкция балки однородна, с однородными геометрическими параметрами и свойствами материала, решение дифференциального уравнения (1) может быть выражено в виде:

$$\varphi_{(n)} = \cosh(\beta_n x) - \cos(\beta_n x) - \alpha_n \{ \sinh(\beta_n x) - \sin(\beta_n x) \}. \quad (2)$$

В модели консольной балки с опорой β_n и α_n равны [39]. Тривиальное решение уравнения (2) представляется в виде уравнения:

$$\beta_n L = (4n + 1) \frac{\pi}{4}. \quad (3)$$

Собственные частоты рассчитываются по данной формуле:

$$\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}; \quad (4)$$

$$\omega_n = \frac{\pi^2 (4n + 1)^2}{16} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}. \quad (5)$$

В уравнении (2) представлены следующие условия: L — длина балки, β_n ($i = 1, 2, 3, 4$) — постоянная величина, а в уравнении (6) β_n — безразмерная величина:

$$\beta_n = \left(\frac{\rho A \omega_n^2}{EI} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (6)$$

Форма кривой связана с формой моды, а каждое решение задачи перемещения называется модой. Термин β_n связан с различными параметрами, которые зависят от свойств материала, геометрических свойств и собственной частоты балочных конструкций. На всю балочную конструкцию влияет жесткость на изгиб, поэтому любые изменения в балке в определенной области могут зависеть от изменения значений жесткости на изгиб. В результате, в области дефекта будут меняться значения β_n . Таким образом, о поврежденном состоянии можно узнать, сравнив значения β_n в бездефектном и дефектном состоянии конструкций. Во всех случаях результаты расчета формы колебаний используются для прогнозирования дефектов на основе кривизны, используя индекс дефекта кривизны для определения участков повреждения.

2.2. Амплитудно-частотная характеристика

Физические изменения в конструкциях могут произойти в результате повреждения, что приводит к изменению динамического отклика конструкции. Использование АЧХ является целесообразным методом для рассмотрения динамических особенностей структуры. Для системы с несколькими степенями свободы уравнение динамического равновесия выглядит так:

$$[M]\{\ddot{u}_t\} + [C]\{\dot{u}_t\} + [K]\{u_t\} = \{F_t\}, \quad (7)$$

где $[M]$, $[C]$ и $[K]$ представляют собой $n \times n$ матрицы массы, демпфирования и жесткости соответственно. Применяя быстрое преобразование Фурье (БПФ) к АЧХ, можно получить следующие формулы [10]: \dot{u}_t , \ddot{u}_t и u_t — ускорение, скорость и перемещение соответственно.

Внешняя сила и перемещение также выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned}\{F_t\} &= \{F_\omega\} e^{j\omega t}, \\ \{X_t\} &= \{X_\omega\} e^{j\omega t}.\end{aligned}\quad (8)$$

Уравнение (7) записывается в виде:

$$\{-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]\{X_\omega\}\} e^{j\omega t} = \{F_\omega e^{j\omega t}\}.\quad (9)$$

Обозначим H_ω как

$$[H_\omega] = \frac{1}{-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]}.\quad (10)$$

Преобразуем уравнение (9):

$$H_\omega = \frac{X_\omega}{F_\omega},\quad (11)$$

где ω — это скалярная величина.

2.3. Значение функции когерентности в извлечении АЧХ

Функция когерентности — это спектр, который часто используется в сочетании со случайным или импульсным возбуждением. Она может использоваться для быстрой оценки качества АЧХ и, зачастую, для поиска нелинейности в определенных частотных полосах или резонансных областях. Это, пожалуй, наиболее часто применяемая процедура проверки на нелинейность, поскольку практически все коммерческие анализаторы спектра имеют программное обеспечение, которое позволяет оценить ее величину.

Перед оценкой нелинейности будет рассчитана функция когерентности для линейных систем с шумом при измерениях на выходе. Уравнение движения во временном интервале для такой системы выглядит следующим образом:

$$x(t) = S[f(t)] + m(t),\quad (12)$$

где S — символ оператора, иллюстрирующего структурные характеристики, такие как упругость, инерция и диссипация энергии, $m(t)$ — уровень шума в АЧХ. Простая алгебраическая операция позволяет представить функцию когерентности в диапазоне частот в виде:

$$\gamma^2 = \frac{|H_\omega|^2 S_{ff}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} = 1 - \frac{S_{mm}(\omega)}{S_{xx}(\omega)},\quad (13)$$

где H_ω — амплитудно-частотные характеристики, а $S_{ff}(\omega)$, $S_{xx}(\omega)$ и $S_{mm}(\omega)$ обозначают спектральную функцию на входе, отклик и шум соответственно. Это доля выходной мощности, которая может быть линейно связана с входными данными, γ^2 всегда лежит в интервале от 0 до 1 ($0 \leq \gamma^2 \leq 1$). Если $S_{mm}(\omega) = 0$, то $\gamma^2 = 1$, что указывает на отсутствие шума измерения в измеренных выходных данных, $\gamma^2 < 1$ указывает на наличие шумов измерения в измеряемых выходных данных.

Любые отклонения от единицы будут заметны, если построить график когерентности как функцию от собственной частоты (ω). Все значения во втором члене уравнения (13) можно легко оценить с помощью коммерческих анализаторов спектра, предназначенных для оценки H_ω , именно поэтому измерение когерентности так часто встречается в стандартных приборах.

2.4. Кривизна формы колебаний

Кривизна элемента при определенной площади поперечного сечения (A) определяется с помощью жесткости на изгиб (EI) и изгибающего момента (M):

$$y'' = \frac{M}{EI}. \quad (14)$$

Кривизна наглядно демонстрирует, что если повреждена определенная область балки, то кривизна, соответственно, будет отличаться в месте повреждения. Полученные данные АЧХ используются для расчета кривизны формы колебаний, что позволяет определить одно место повреждения в консольной балке с опорой. Бездефектные и дефектные балки описаны в данной статье с использованием модальных данных, которые были получены экспериментально. При использовании модуля MATLAB ANN сгенерированная форма колебаний обучается для повышения точности прогнозирования. Согласно [10], модальные параметры используются для расчета кривизны формы колебания с помощью метода центральных разностей:

$$(H_{\omega})_i^n = \frac{(H_{\omega})_{i+1} - 2(H_{\omega})_i + (H_{\omega})_{i-1}}{h^2}, \quad (15)$$

$$\left| (\Delta H_{\omega})_i^n \right| = \left| \left[(H_{\omega})_i^n \right]^d - \left[(H_{\omega})_i^n \right]^u \right|. \quad (16)$$

Амплитудно-частотная характеристика применяется для определения абсолютного индекса дефекта кривизны в случае бездефектной и дефектной конструкции:

$$ACDI = \left| \frac{\left[(H_{\omega})_i^n \right]^d - \left[(H_{\omega})_i^n \right]^u}{\left[(H_{\omega})_i^n \right]^u} \right|. \quad (17)$$

2.5. Применение ИНС-моделирования

Для описания нелинейного функционального отображения между набором входных и выходных модальных параметров целесообразно использовать нейронную сеть с прямой связью. Нелинейная функция нескольких переменных характеризуется функцией активации как суперпозиция нелинейных функций отдельных переменных [29].

Нейронная сеть с обратным распространением содержит три слоя: входной, скрытый и выходной. Скрытый слой обрабатывает данные измеренной АЧХ входного слоя перед тем как выходной слой предоставит точные результаты. В данном исследовании использовался алгоритм Левенберга—Марквардта (`trainlm`) и прямое—обратное распространение, как описано в [33]. Для оценки результатов выбран только один из скрытых слоев с дифференцируемой функцией активации `logsig`. В исследовании [34] для определения оптимальной сети для конкретных масивов данных используется диапазон от 2 до 25 скрытых слоев. Наилучшие результаты достигаются при использовании обучающих наборов данных, где значение среднеквадратического отклонения (СКО) должно быть меньше 0,001, среднее абсолютное отклонение (САО) меньше 5 %, а значения коэффициента регрессии больше 0,98. В разделе 2.4 приведены уравнения для определения статистических ошибок. Модель не может быть переобучена, поскольку процесс обучения заканчивается при увеличении ошибки достоверности. Перед обучением сети с помощью выражения (21), используемого в [35], проводится нормализация данных в диапазоне от 0,1 до 0,9. Перед обучением наборы данных распределяются по трем секциям: 70 % для обучения, 15 % для валидации, а оставшиеся 15 % данных выбираются для тестирования:

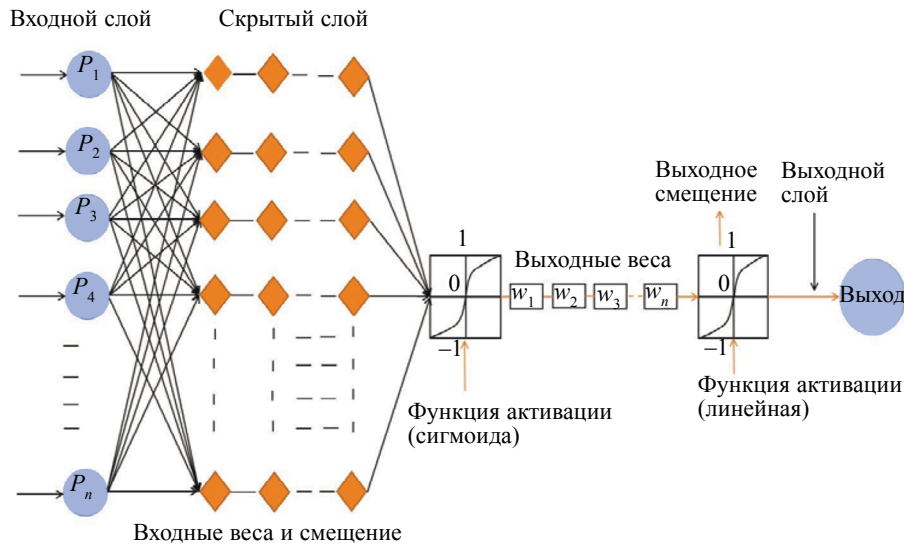


Рис. 2. Модель ИНС с обратным распространением.

$$MSE = \frac{1}{v} \times \left\{ \sum_{k=1}^v (n_k - n_p)^2 \right\}; \quad (18)$$

$$MAPE = \left\{ \frac{1}{v} \times \sum_{k=1}^v \left| \frac{(n_k - n_p)}{n_k} \right| \right\} \times 100 \%; \quad (19)$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{k=1}^v (n_k - n_p)^2}{\sum_{k=1}^v n_p}}, \quad (20)$$

где v — суммарные выходные данные; n_k и n_p — экспериментальное и прогнозируемое значения соответственно.

$$N_k = 0,1 + \left\{ 0,8 \times \left(\frac{Y_k - Y_{k, \min}}{Y_{k, \max} - Y_{k, \min}} \right) \right\}, \quad (21)$$

N_k — нормализованные точки данных; Y_k — массив данных; $Y_{k, \max}$ и $Y_{k, \min}$ — максимальная и минимальная точки данных в массиве соответственно.

3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Консольная балка с опорой, изготовленная из конструкционной стали, подвергается лабораторным исследованиям по изменению динамических свойств. Выбирается профильная балка с прямоугольным поперечным сечением длиной 2000 мм, показанная на рис. 3а. Внешний размер ($b \times d$) поперечного сечения составляет 25×50 мм, а внутренний размер поперечного сечения — 21×46 мм. Толщина стенки балки составляет 2 мм. Все размеры поперечного сечения показаны на рис. 3б.

Эксперимент проводился над консольной профильной балкой с опорой, имеющей плотность 7850 кг/м^3 , модуль упругости 200 ГПа и коэффициент Пуассона 0,29. Один конец балки жестко



Рис. 3. Образец балки: профильная балка длиной 2000 мм (а); размеры поперечного сечения балки (б).

зафиксирован болтами на стержне, который закреплен в бетоне, а другой конец опирается на ролик, как показано на рис. 5.

Экспериментальная установка состоит из консольной балки с опорой и устройства В&К. Устройство имеет пять входных каналов, которые могут соединяться с акселерометром и ударным молотком. Одноосный акселерометр DeltaTorn и ударный молоток подключаются через канал с модальными номерами, заданными как 4507 001 и 8206 003. Для получения всех необходимых данных эксперимент проводится с использованием четырех акселерометров и ударного молотка. В модельной балке создаются двадцать шесть узловых точек с интервалом 80 мм между двумя последовательными узлами. Возбуждение прикладывается на каждый из узлов для регистрации отклика для каждой узловой точки.

Для измерения необходимых модальных параметров балки создана испытательная установка с применением устройства В&К. В данном эксперименте анализатор АЧХ используется для определения собственной частоты, форм колебаний и модального ускорения. На рис. 3а показан образец балки, а на рис. 4а — образец с различным глубиной надреза. Места повреждений показаны на рис. 4б, в на промоделированной балке.

В данной работе используются ударный молоток и акселерометр. Акселерометр и ударный молоток используются для малых и средних размеров конструкции. Акселерометр (4507 001) обладает высокой чувствительностью для обнаружения даже небольших импульсов в конструкции для извлечения модальных параметров. Конструкция акселерометра изготовлена таким образом, что устройство из-за собственного веса никаким образом не влияет на АЧХ. В программной настройке область собственной частоты и частотных линий рассматривается как 210 Гц и 168 линий. Правильное расположение испытуемого образца создается в лаборатории в определенных условиях. В процессе подготовки образец разделяется на 25 элементов и 26 узлов. При первом ударе акселерометр DeltaTorn с помощью клея прикрепляется к нижней поверхности образца в четырех различных узлах. Далее меняются положения акселерометров на другие четыре положения, и снова записывается частотная характеристика. Процесс повторяется несколько раз, чтобы завершить сбор данных для каждого из узлов. В процессе извлечения модальных параметров неповрежденная и поврежденная конструкции закрепляются надлежащим образом с помощью торцевых опор. В первой части эксперимента бездефектная балка используется для получения набора модальных параметров, затем балки с дефектами используются для проведения того же эксперимента. Для получения более точных результатов эксперимент повторяют 4-5 раз и определяют показатель когерентности для получения точных данных частотной характеристики. Когерентность находится в диапазоне от 0 до 1, причем 0 означает наихудшее качество данных с максимальным содержанием шума, а 1 — высокое качество данных с очень низким уровнем шума. Низкое и высокое качество данных зависит от шума, присутствующего в извлеченной функции отклика. Дефектная балка подвергается той же процедуре измерений, что и бездефектная, и так же получают данные АЧХ. Различные дефекты появляются в балке с помощью пропилов различной глубины: 5, 10, 15, 20 и 30 мм, как показано на рис. 4а, в. Измеренная АЧХ затем используется для построения формы колебаний модели консольной балки с опорой.

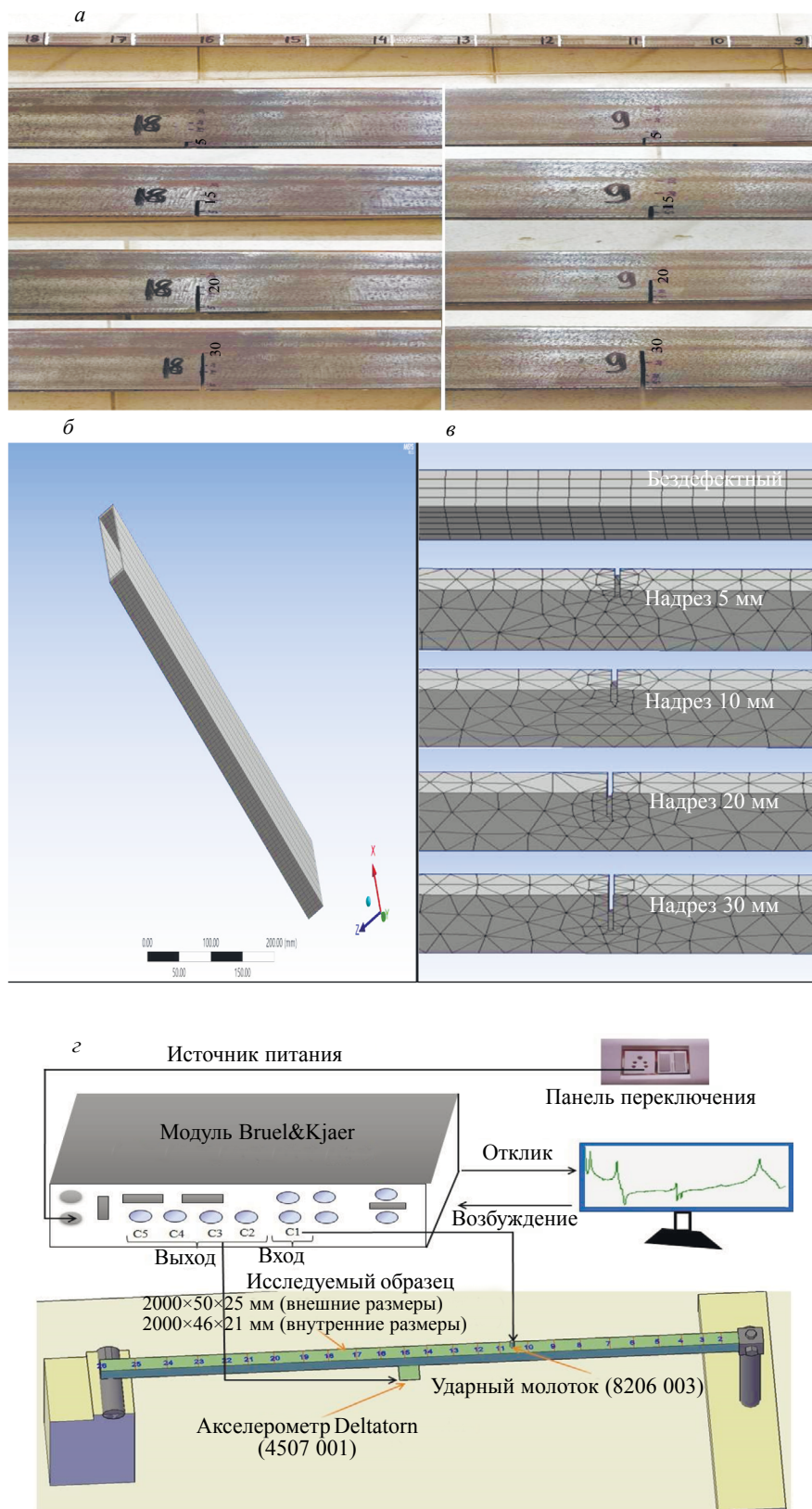


Рис. 4. Экспериментальная установка: реальный образец балки с различными глубинами надрезов (а); смоделированная балка (б); модель балки с надрезами различной глубины (в); линейная схема экспериментальной установки (г).

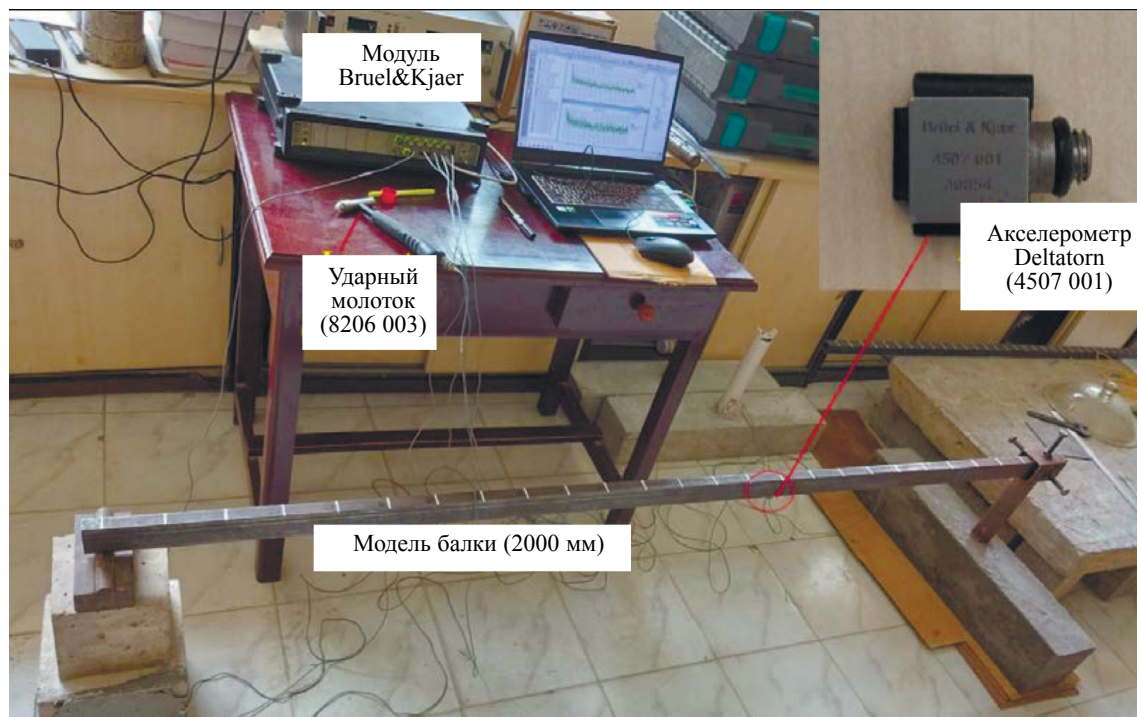


Рис. 5. Экспериментальная установка Briel & Kjaer.

3.1. Моделирование методом конечных элементов

В данном исследовании используют конечно-элементная модель для подтверждения надежности предложенного метода. В этом разделе освещаются некоторые важные параметры, такие как материальное уравнение, тип элементов, обоснования для выбора элементов и их размеров, граничные условия и время вычислений.

Материальное уравнение. Материальное уравнение — это уравнение, которое описывает отклик материала. Каждому механизму соответствует отдельное материальное уравнение.

Материальное уравнение для модели балки в ANSYS Workbench обычно определяется уравнением (14). Соответствующие параметры обозначаются как модуль упругости (E), момент инерции (I) и изгибающий момент (M).

Определение элемента и его размеров. Описание элемента задает тип элемента и связанную с ним математическую модель, которая используется для описания поведения анализируемого материала. Размер элемента задает величину разбиения модели на более мелкие части, которые используются для решения определяющих уравнений при моделировании. Описание элемента влияет на точность моделирования, так как определяет способ моделирования свойств материала и его поведения. Различные типы элементов имеют разные уровни точности, вычислительные затраты и пригодность для различных типов анализа. Размер элементов влияет на точность моделирования, поскольку определяет уровень детализации модели. Если элементы слишком большие, модель может не учесть важные детали, что приведет к неточному расчету.

Граничные условия. Граничное условие для консольной балки с опорой приведено ниже в уравнении.

На неподвижном участке:

$$x = 0, \quad w = 0 \quad \text{и} \quad \frac{d^2w}{dx^2} \neq 0.$$

На шарнирно-закрепленном участке:

$$x = L, \quad w = 0 \quad \text{и} \quad \frac{d^2w}{dx^2} = 0. \quad (22)$$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Применение функции когерентности

Наличие нелинейности в функции частотного отклика может быть установлено путем наблюдения за изменениями функции когерентности для различных состояний конструкций или различных глубин дефектов.

Графики когерентности представлены на рис. 6а—в и показывают изменение пиков по всему диапазону частот. Пики смещаются в направлении более низких частот из-за изменений, произошедших в конструкциях. На рис. 6б, в показаны масштабированные графики когерентности в конкретном диапазоне частот. Сдвиг частоты возникает из-за потери жесткости при изгибе. Экспериментально полученные собственные частоты представлены в табл. 1 для разных дефектов. Хорошо видно, что пики когерентности смещаются в сторону более низкой собственной частоты с увеличением глубины надреза.

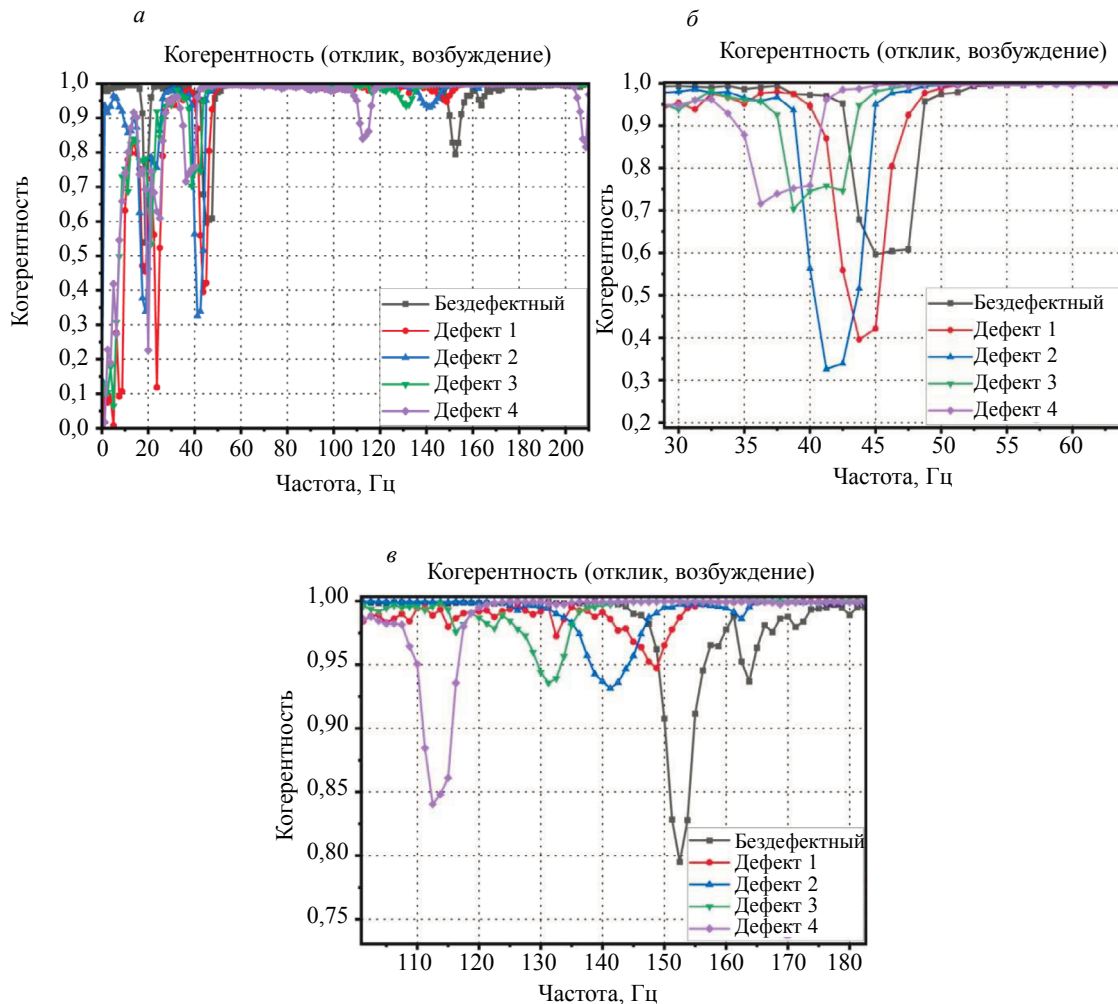


Рис. 6. График когерентности с различными дефектами: 0—210 Гц (а); график когерентности в диапазоне 30—55 Гц (б); график когерентности в диапазоне 105—180 Гц (в).

Значение когерентности становится меньше 1 с увеличением глубины повреждения в диапазоне частот 0 — 60 Гц. Значение когерентности может снижаться только из-за вносимых повреждений или из-за внешних помех во время эксперимента.

Таблица 1

Экспериментально полученные данные собственных частот при различных повреждениях

№ п/п	Номер дефекта	Собственная частота		Изменение (уменьшение) собственных частот, %	
		Мода 1	Мода 2	Мода 1	Мода 2
1	Бездефектный	46,25	151,30	–	–
2	Дефект 1	44,75	147,50	–3,243	–2,512
3	Дефект 2	42,50	141,30	–8,108	–6,609
4	Дефект 3	40,00	133,80	–13,513	–11,566
5	Дефект 4	37,50	113,80	–18,919	–24,785

4.2. Применение функции частотного отклика

Качество частотного отклика зависит от функции когерентности. На наличие структурных дефектов указывает ухудшение качества частотной характеристики или наличие шума в данных частотной характеристики. В программной конфигурации область частот и частотные линии в рамках данного эксперимента были заданы равными 210 Гц и 168 линиям соответственно. В данной области частот и линий для указанной модели балки возможны только две моды. На рис. 7б пик в определенной частотной области отмечен как мода модели балочной структуры. Измеренная АЧХ дает несколько показателей, которые могут быть использованы для прогнозирования возникновения каких-либо структурных изменений. Такие показатели АЧХ, как смещение собственных частот и изменение резонансных пиков, были использованы для исследования двухэтажной каркасной модели. Используя разницу между неповрежденными и поврежденными АЧХ-данными, можно было спрогнозировать наличие и расположение дефектов в балке [37]. При исследовании консольной балки из профильной трубы были получены наборы АЧХ-данных для случаев при наличии и отсутствии дефектов. Логарифмическая АЧХ показана на рис. 7а для случаев при наличии и отсутствии дефектов, глубина надреза 5 мм в узлах 9 и 18, 10 и 15 мм в узлах 9 и 18, срез 20 мм в узлах 9 и 18 и срез 30 мм в узлах 9 и 18. Это также показывает, что из-за жесткого поведения конструкции, изменение частоты между бездефектной балкой и балкой с дефектом 1 довольно мало. Мнимый график АЧХ показан на рис. 7б, который показывает изменение даже при небольшом повреждении.

На рис. 6 показано, что качество данных частотного отклика зависит от качества когерентности. Качество когерентности зависит от различных факторов, таких как величина возбуждения, окружающая среда, человеческий фактор и т.д.

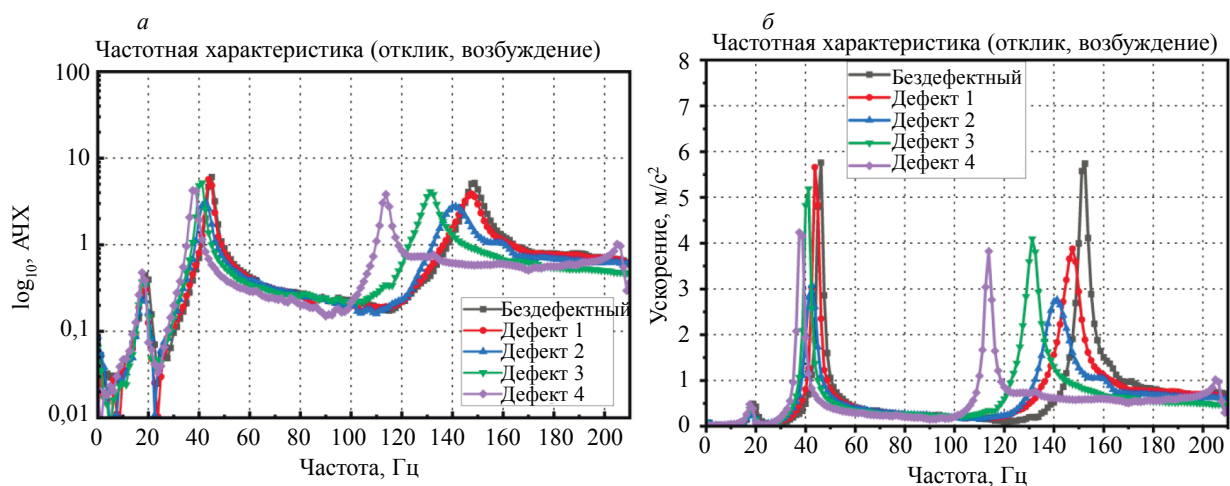


Рис. 7. График логарифмической АЧХ (а); график мнимой АЧХ (б).

Положение пиков АЧХ изменяются у разных дефектов в модели балки. При увеличении глубины надрезов значения частоты смещаются в сторону все более меньших значений, как показано на рис. 6.

Наличие шума в частотной характеристике может привести к получению искаженных данных частотной характеристики, которые могут оказаться неприемлемыми для корректного выявления расположения дефектов в изделии. В случае идеального проведения эксперимента в лаборатории частотная характеристика не содержит большого количества шума. Рис. 6 демонстрирует наличие шума из-за внешних помех, который можно наблюдать в диапазоне частот от 0 до 60 Гц. В диапазоне частот от 0 до 60 Гц значение когерентности уменьшается по мере увеличения глубины надреза. На рис. 7а представлены графики зависимости логарифмической АЧХ от частоты для различных дефектов, которые показывают смещение пиков на всем диапазоне частот. На рис. 7б можно увидеть изменение амплитуды, соответствующее собственной частоте. В диапазоне частот от 20 до 60 Гц значение амплитуды соответствует моде 1, а в диапазоне частот от 100 до 160 Гц — моде 2 в определенной области балки.

4.3. Прогнозирование повреждений с помощью собственных частот

Наличие повреждений можно выявить с помощью данных о собственной частоте, поскольку изменение частоты происходит из-за структурных изменений. Предыдущие исследования показали возможность применения собственной частоты для количественной оценки наличия повреждений и степени повреждений в различных модельных конструкциях. В настоящем исследовании поведение конструкции характеризуется с помощью собственной частоты, что показывает способность исследовать наличие и степень повреждений.

Результаты численного расчета собственных частот представлены в табл. 2, которые демонстрируют наличие повреждений в модели балки профильной трубы. Дефектами являются различные надрезы в известных местах в балке. Дефекты были сделаны в балок в узловых точках 9 и 18. Глубина надрезов в узлах 9 и 18 составляет 5, 10, 15, 20 и 30 мм. Как видно из табл. 2, изменение собственных частот возникает при численном расчете частот. При различных дефектах собственные частоты снижаются по мере увеличения глубины надреза в балке.

Таблица 2

Результаты численного расчета собственных частот при различных уровнях повреждений

№ п/п	Номер дефекта	Собственная частота		Изменение (уменьшение) собственных частот, %	
		Мода 1	Мода 2	Мода 1	Мода 2
1	Бездефектный	48,889	157,25	–	–
2	Дефект 1	48,419	155,20	–0,961	–1,304
3	Дефект 2	47,138	151,72	–3,582	–3,517
4	Дефект 3	46,234	145,68	–5,431	–7,358
5	Дефект 4	42,065	128,24	–13,958	–18,448

Повреждения балки представляют собой такие случаи, как бездефектная балка, балка с повреждением 10 %, балка с повреждением 25 %, балка с повреждением 40 % и балка с повреждением 60 % от общей толщины модели балки.

Собственные частоты аналитической модели балки представлены для различных случаев повреждения. Собственные частоты рассчитываются с помощью уравнения (16) для модели бездефектной балки. Дальнейшее исследование осуществляется для расчета собственных частот для поврежденной балки путем введения изменений момента инерции (I) в определенном месте. В связи с изменением момента инерции собственные частоты рассчитываются с помощью уравнения (16). В табл. 3 показано изменение собственных частот для различных случаев дефектов.

Таблица 3

Данные собственных частот, полученные аналитическим путем, при различных уровнях повреждений

№ п/п	Номер дефекта	Собственная частота		Изменение (уменьшение) собственных частот, %	
		Мода 1	Мода 2	Мода 1	Мода 2
1	Бездефектный	49,965	153,293	–	–
2	Дефект 1	49,236	150,695	–1,4590	–1,6948
3	Дефект 2	47,963	143,439	–4,0068	–6,4282
4	Дефект 3	46,873	134,153	–6,1883	–12,4859
5	Дефект 4	43,469	115,968	–13,0011	–24,3488

4.4. Определение формы мод при контроле дефектов

Была исследована балка из профильной трубы с целью выявления формы поперечной моды для различных дефектов. Исследование выполнено на четырех различных дефектах, выполненных путем нанесения глубоких надрезов с помощью режущего инструмента. Результаты определения экспериментальных и численных данных формы мод позволяют определить место повреждения в балке. Формы мод с различными дефектами представлены на рис. 8 и 9.

4.4.1. Формы мод, полученные экспериментальным путем для образца консольной балки с опорой

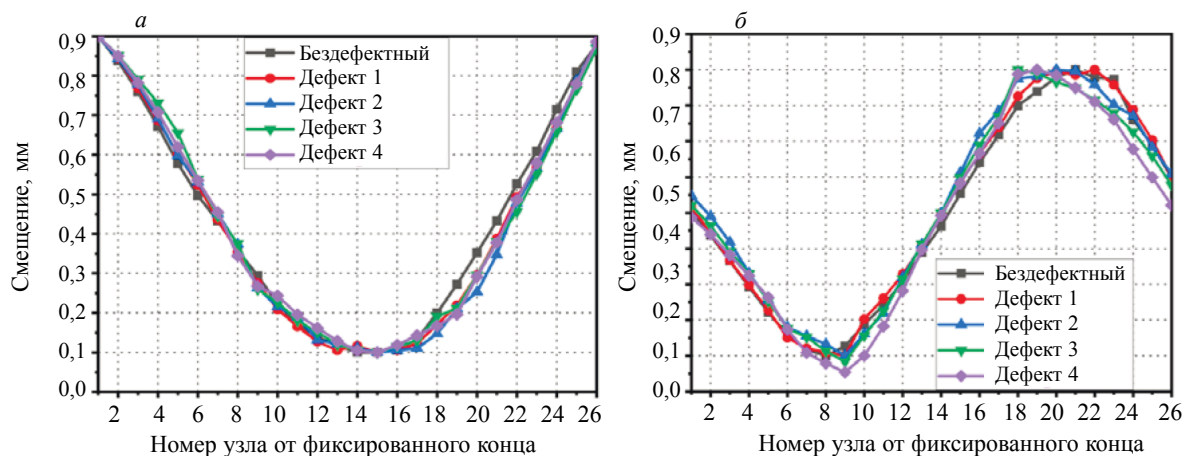


Рис. 8. Формы мод, полученные экспериментально, для моделей бездефектной и дефектной балок: форма первой моды (а); форма второй моды (б).

4.4.2. Формы мод, полученные численным методом для образца консольной балки с опорой

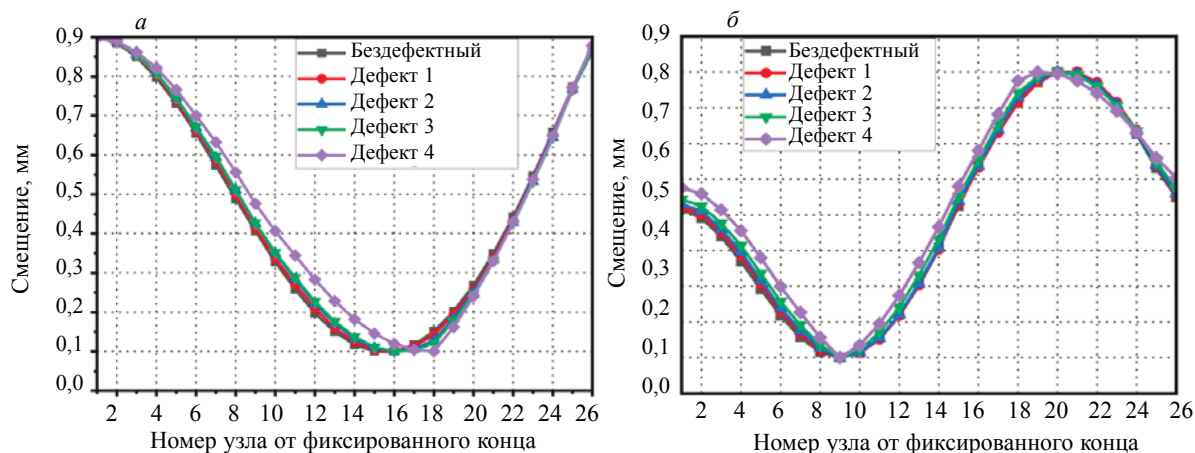


Рис. 9. Формы мод, полученные экспериментально, для моделей бездефектной и дефектной балок: форма первой моды (а); форма второй моды (б).

4.4.3. Форма моды образца балки, полученная с помощью МКЭ (форма первой моды на различных дефектах)

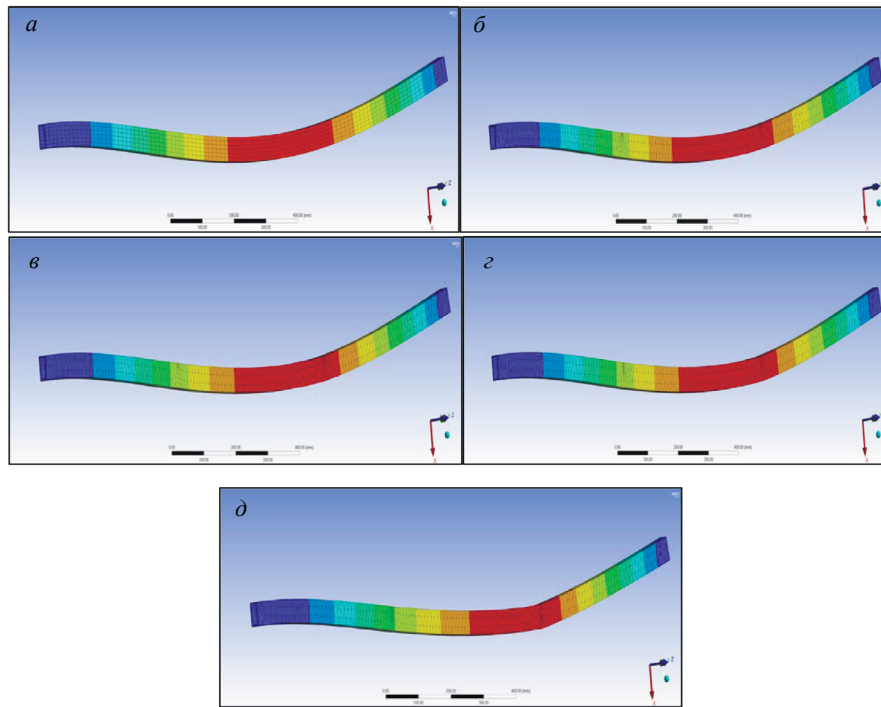


Рис. 10. Форма первой поперечной моды модели балки с различной глубиной повреждения.

4.4.4. Форма моды образца балки, полученная с помощью МКЭ (форма второй моды на различных дефектах)

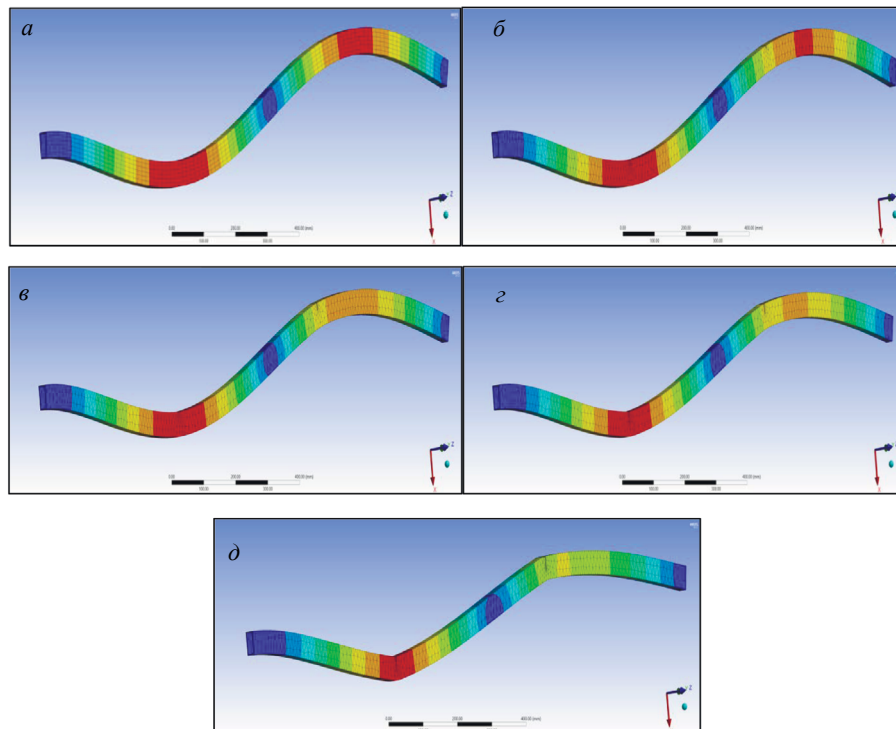


Рис. 11. Форма второй моды модели балки с различной глубиной повреждения.

В разделе 3.1 были рассмотрены такие понятия, как материальное уравнение, причины для определения элементов и их размеров, граничные условия. Конечно-элементная модель с тетраэдрическим элементом с десятью узлами создана с помощью программного пакета ANSYS 17.2. Модель создана для получения собственных частот и формы мод модельной конструкции. Для конкретной модельной конструкции требуемое время вычислений составляет 6 с.

4.4.5. Формы мод, полученные аналитическим путем, для образца консольной балки с опорой

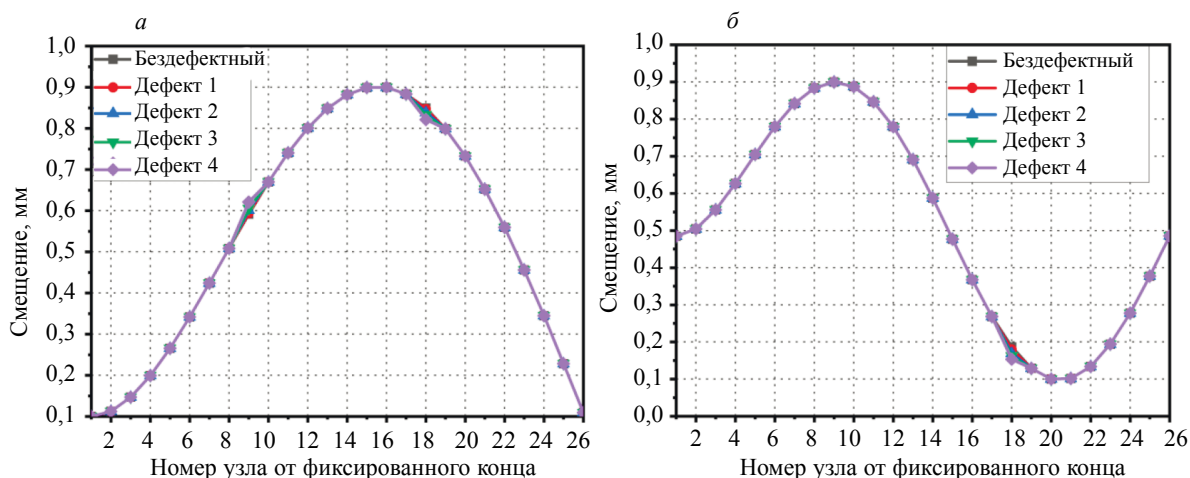


Рис. 12. Формы мод, полученные аналитическим путем, для моделей бездефектной и дефектной балок: форма первой моды (а), форма второй моды (б).

В данном исследовании представлены первые две формы поперечных мод для определения места дефекта и степени дефекта в балке из профильной трубы с консольной опорой. На рис. 8 показана экспериментально полученная форма моды, как и на рис. 9; численно полученная форма моды представлена с помощью линейной диаграммы. На рис. 10 и 11 показана МКЭ-модель первой и второй форм мод в изделии. Рис. 10 и 11 включают пять моделей МКЭ, которые представляют данные от пяти различных дефектов. На рис. 12 представлена форма мод консольной балки с опорой, полученная аналитическим путем.

4.5. Прогнозирование места дефекта без использования искусственных нейронных сетей

Для определения индекса дефекта кривизны консольной балочной конструкции с опорой непосредственно используются формы мод, полученные с помощью данных частотной характеристики, и численно полученные данные форм мод. Результаты показывают, что экспериментально полученные данные имеют меньшую эффективность в обнаружении дефектов, в то время как численно полученные результаты эффективны для локализации места дефекта в консольной балке с опорой. Причину неточности результатов можно объяснить тем, что экспериментальные результаты содержат производственные и внешние шумы во время эксперимента. Численно полученные результаты обладают хорошей точностью при обнаружении мест дефектов благодаря идеально полученным формам мод.

4.5.1. Индекс дефекта кривизны, определенный экспериментально с использованием исходных данных

Для того чтобы определить место дефекта в модели балки сначала необходимо выполнить ряд определенных действий. Измеренные данные частотной характеристики используются для получения формы колебаний модельной конструкции. Форма моды смещения применяется для определения кривизны формы моды. Затем кривизна формы моды используется для расчета индекса дефекта кривизны, который позволяет определить расположение дефекта в модельной конструк-

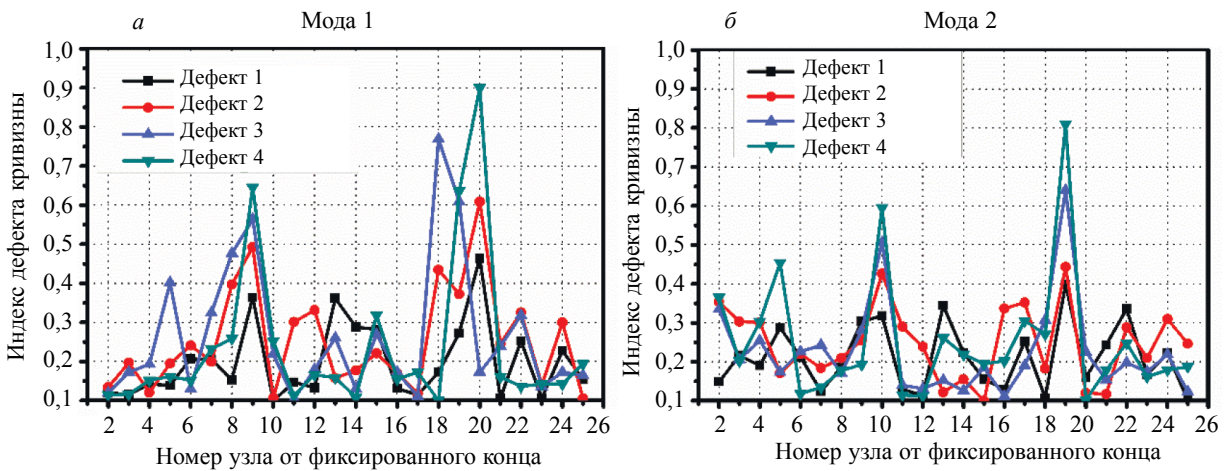


Рис. 13. Индекс дефекта кривизны на основе экспериментальных исходных данных: индекс дефекта кривизны для моды 1 (а); индекс дефекта кривизны для моды 2 (б).

ции. На рис. 13а, б показан индекс дефекта кривизны, полученный экспериментально с помощью кривизны формы моды, который показывает расположение дефекта в конструкции балки. График содержит ряд нежелательных пиков, которые снижают точность определения точного расположения дефекта в балочной конструкции. Расположение дефекта может быть выявлено на графике, но нежелательные пики не должны преобладать, чтобы не снижать точность определения положения дефекта. Нежелательные пики могут возникать из-за недостаточной точности сбора данных или помех окружающей среды. Раздел 4.5.2 содержит аналитически рассчитанный индекс дефекта кривизны с целью определения расположения дефекта в модели балки. Аналитически полученные результаты представлены на рис. 14 для сравнения с экспериментально полученными, представленными на рис. 13. Далее будет показано, как данные частотной характеристики обрабатываются с помощью искусственной нейронной сети для уменьшения погрешности данных и устранения нежелательных пиков из полученных результатов.

4.5.2. Индекс дефекта кривизны, полученный аналитическим путем

На рис. 14 представлен аналитически рассчитанный индекс дефекта кривизны с целью определения расположения дефекта в консольной балке с опорой. Точное расположение дефектов в нескольких местах самой балки определяется на основе аналитически полученных модальных данных.

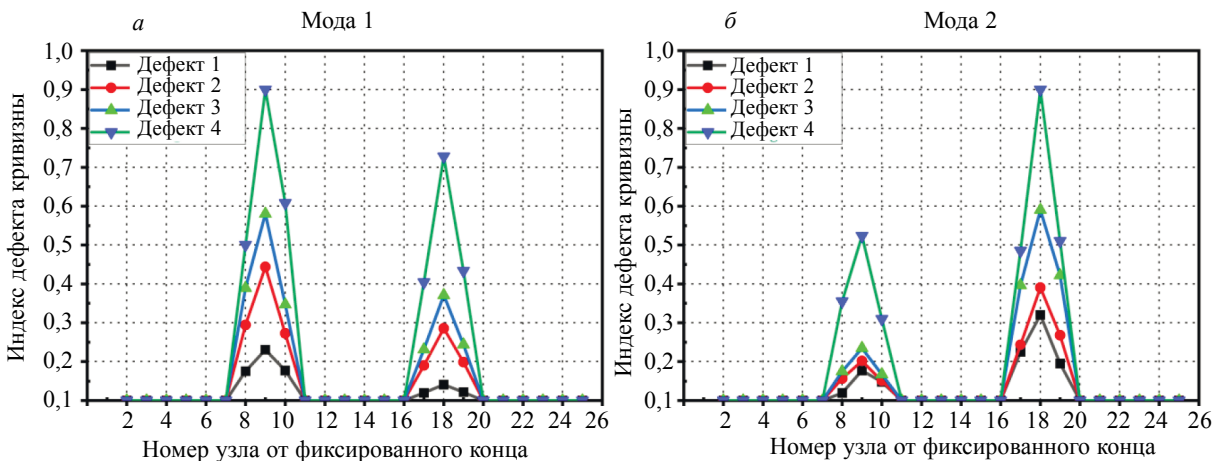


Рис. 14. Индекс дефекта кривизны с использованием аналитических данных: индекс дефекта кривизны для моды 1 (а); индекс дефекта кривизны для моды 2 (б).

4.5.3. Индекс дефекта кривизны, полученный численным методом на основании исходных данных

На рис. 15 график индекса дефекта кривизны построен с использованием модальных данных на основе МКЭ, который не содержит каких-либо ошибок, и месторасположение дефекта идеально определяется без дополнительной обработки. В результатах, полученных на основе МКЭ, нет необходимости в дальнейшем анализе, а исходных данных вполне достаточно для определения точного места дефекта в модельных конструкциях. В качестве исходных данных при анализе рассматриваются модальные данные от бездефектной балки и определяется индекс дефекта кривизны.

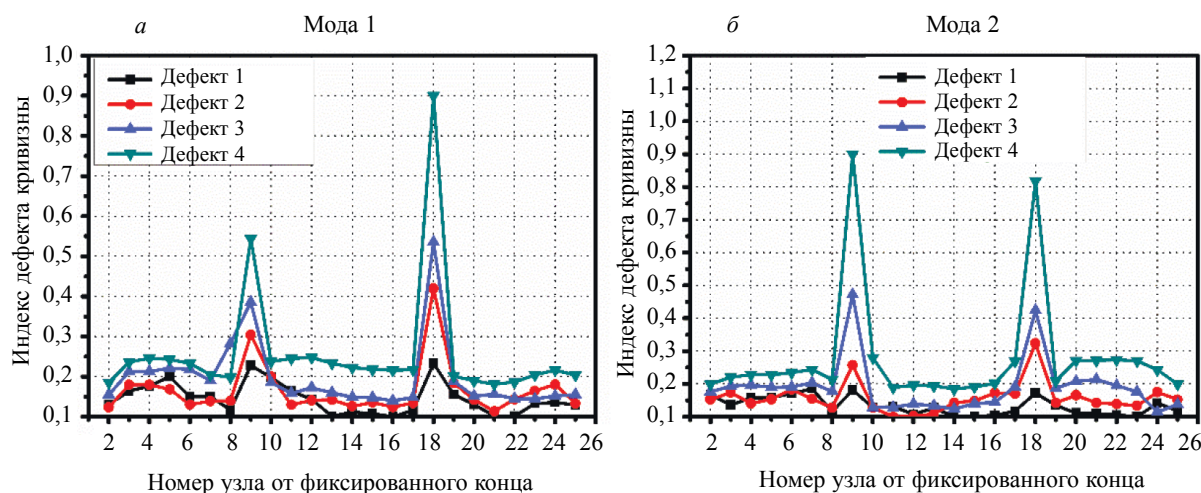


Рис. 15. Индекс дефекта кривизны на основе данных численных расчетов: индекс дефекта кривизны для моды 1 (а); индекс дефекта кривизны для моды 2 (б).

4.6. Анализ дефектов в балке с применением результатов, полученных искусственной нейронной сетью

Измеренные данные частотной характеристики (АЧХ) обрабатываются в программе MATLAB с помощью метода `trainlm`, который по своей эффективности превосходит другие методы, включая `trainbfg`, `trainlm`, `trainscg`, `trainrp`, `traingda` и `traingdx`, как показано в [35]. В функции обучения сети `Trainlm` [36] используется подход оптимизации Левенберга—Марквардта. `Trainlm` использует оптимизацию Левенберга—Марквардта для обновления весовых переменных и переменных смещения. Данные должны быть масштабированы в едином диапазоне (0,1—0,9) [38], чтобы предотвратить преобладание больших целых чисел над меньшими. Данные должны быть стандартизированы в пределах слегка смещенных значений, например, 0,1—0,9, а не 0—1, чтобы избежать насыщения сигмоидной функции, что приводит к медленному обучению или его отсутствию.

В данной сети используется три набора входных данных и один набор выходных данных. Для каждого набора данных получено в общей сложности 130 единиц, из которых 90 используются для обучения, а 20—20 образцов из всей выборки данных берутся для валидации и тестирования. В качестве входных данных берутся место удара, глубина дефекта и процент от общей глубины повреждений, а в качестве выходных данных — измеренные наборы данных АЧХ. Для обучения сети используются 2—25 нейронов, как показано в [35]. Оптимальные результаты показаны в табл. 4 и 5. Сеть, которая обучалась на наборах данных, полученных при измерениях на профильной балке, может быть представлена в виде такой топологии (3 – 12 – 1) и (3 – 10 – 1) для моды 1 и моды 2. Топология сети (3 – 12 – 1) и (3 – 10 – 1) показывает количество входов, нейронов и выходов соответственно. Поскольку истинные цели не могут быть достигнуты без устранения экспериментальных недостатков из наборов данных, экспериментальная ошибка уменьшается путем обработки наборов данных АЧХ с помощью ИНС. Полученные нейросетью наборы данных, которые были признаны способными для нахождения местоположения дефектов, были успешно использованы для построения измененных форм мод, представленных на рис. 16.

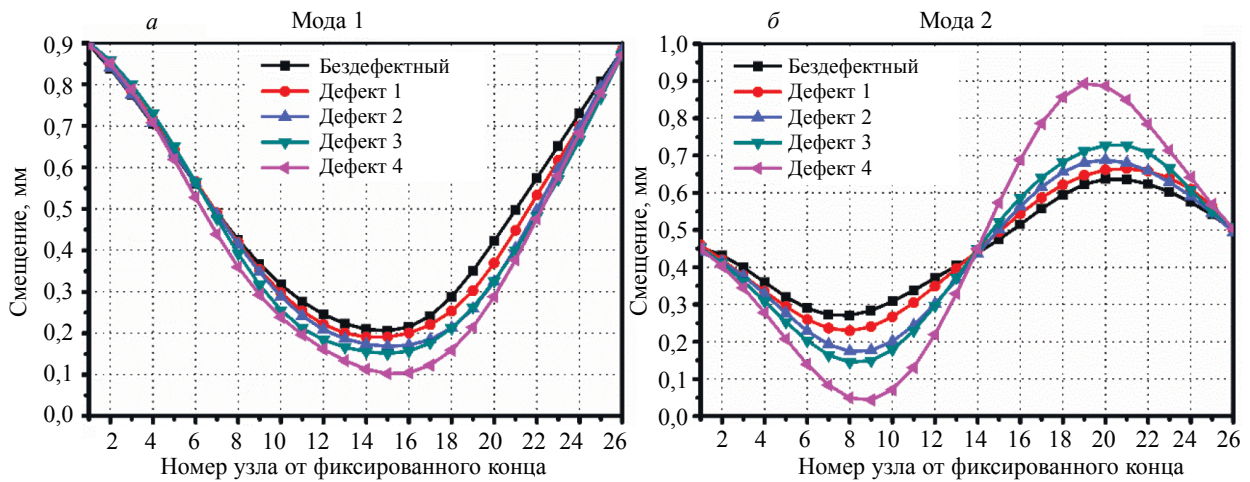


Рис. 16. Формы поперечных мод, построенные с помощью ИНС на основе экспериментально полученных данных: 1-я мода (а); 2-я мода (б).

Для исследования состояния конструкции были выбраны две первичные экспериментальные тренированные формы мод, как показано на рис. 16. На основании спрогнозированных нейросетью выходных наборов данных рассчитывается кривизна формы моды, а затем определяется индекс дефекта кривизны для оценки расположения дефекта. В процессе обучения нейронной сети используется различное количество нейронов, от двух до двадцати. В табл. 4 и 5 представлены результаты обучения. Полученные результаты демонстрируют, что коэффициент регрессии, СКО и САО были корректно рассчитаны на нейронах в количестве 12 и 10 для моды 1 и моды 2

Таблица 4

Результаты, полученные для моды 1 с использованием алгоритма Trainlm для экспериментальных данных

Количество нейронов	Структура сети	Коэффициент регрессии ®				СКО	% САО
		Обучение	Валидация	Тестирование	Общий		
$n = 2$	3 – 2 – 1	0,997058	0,996910	0,997182	0,997123	0,0003585	0,24552
$n = 4$	3 – 4 – 1	0,998891	0,998346	0,997748	0,998746	0,0001563	0,491229
$n = 6$	3 – 6 – 1	0,999191	0,998677	0,999514	0,999155	0,00001055	0,22519
$n = 8$	3 – 8 – 1	0,999321	0,999259	0,999286	0,999311	0,00008644	0,187576
$n = 10$	3 – 10 – 1	0,999578	0,999444	0,998586	0,999374	0,00006324	0,159408
$n = 12$	3 – 12 – 1	0,999560	0,999040	0,999469	0,999438	0,00007062	0,159122
$n = 14$	3 – 14 – 1	0,999194	0,999171	0,999499	0,999225	0,00010048	0,88094
$n = 16$	3 – 16 – 1	0,999477	0,999581	0,998828	0,999330	0,00008640	0,396848
$n = 18$	3 – 18 – 1	0,999605	0,999124	0,999049	0,999421	0,00007331	0,51149
$n = 20$	3 – 20 – 1	0,999558	0,999218	0,999110	0,999385	0,00007810	0,59836

соответственно. Для выявления локализации дефекта в модели балки также был проведен анализ МКЭ. Измеряемые в конечно-элементной модели модальные параметры не требуют обучения ИНС. Модальные параметры используются для расчета индекса дефекта кривизны. Как следствие, индекс дефекта кривизны используется для расчета положения дефекта в модели балки. Для обоих мод данные для обучения указывают на местоположение дефекта путем обучения на разных нейронах.

Таблица 5

Результаты, полученные для моды 2 с использованием алгоритма Trainlm для численных данных

Количество нейронов	Структура сети	Коэффициент регрессии \mathbb{R}				СКО	% САО
		Обучение	Валидация	Тестирование	Общий		
$n = 2$	3 – 2 – 1	0,951895	0,945248	0,971328	0,953763	0,003397	0,707141
$n = 4$	3 – 4 – 1	0,994467	0,994286	0,995418	0,993966	0,0004667	2,00922
$n = 6$	3 – 6 – 1	0,998217	0,992337	0,997576	0,997094	0,0006003	0,5587
$n = 8$	3 – 8 – 1	0,997852	0,995516	0,997633	0,997236	0,0002080	0,77982
$n = 10$	3 – 10 – 1	0,999510	0,998706	0,998194	0,998800	0,0001965	0,35441
$n = 12$	3 – 12 – 1	0,997112	0,992386	0,993363	0,995999	0,0003006	0,39918
$n = 14$	3 – 14 – 1	0,998920	0,999147	0,998400	0,998658	0,0002024	1,66571
$n = 16$	3 – 16 – 1	0,998504	0,998890	0,993144	0,998024	0,0002499	1,12825
$n = 18$	3 – 18 – 1	0,997283	0,998465	0,994314	0,996900	0,0002579	2,39681
$n = 20$	3 – 20 – 1	0,997170	0,995316	0,996060	0,996796	0,0002446	1,17172

4.7. Применение измененного индекса дефекта кривизны для обнаружения дефектов

Перспективный метод контроля дефектов в численной модели балки был предложен на основе использования производной второго порядка от формы моды [9]. Квадрат кривизны формы моды и больший индекс кривизны были признаны эффективными для выявления расположения дефекта в [28, 22]. Цель использования абсолютного индекса дефекта кривизны с обучением и без обучения ИНС представлена в данном исследовании для идентификации расположения дефекта путем использования форм мод смещения конструкции. В данной работе была использована новая методика для уменьшения погрешности экспериментальных данных АЧХ с помощью обучения ИНС, что является важным для последующей оценки повреждений конструкции. Было установлено, что индекс дефекта кривизны, рассчитанный непосредственно по данным АЧХ, не способен выявить расположение дефекта.

С другой стороны, формы криволинейных мод, вычисленные на основе обученных данных АЧХ, могут успешно отслеживать существование и местоположение дефекта конструкции. Для проверки устойчивости методики и подтверждения экспериментальных результатов проводится численное исследование. Внешние помехи в полученных результатах не являются исключением в

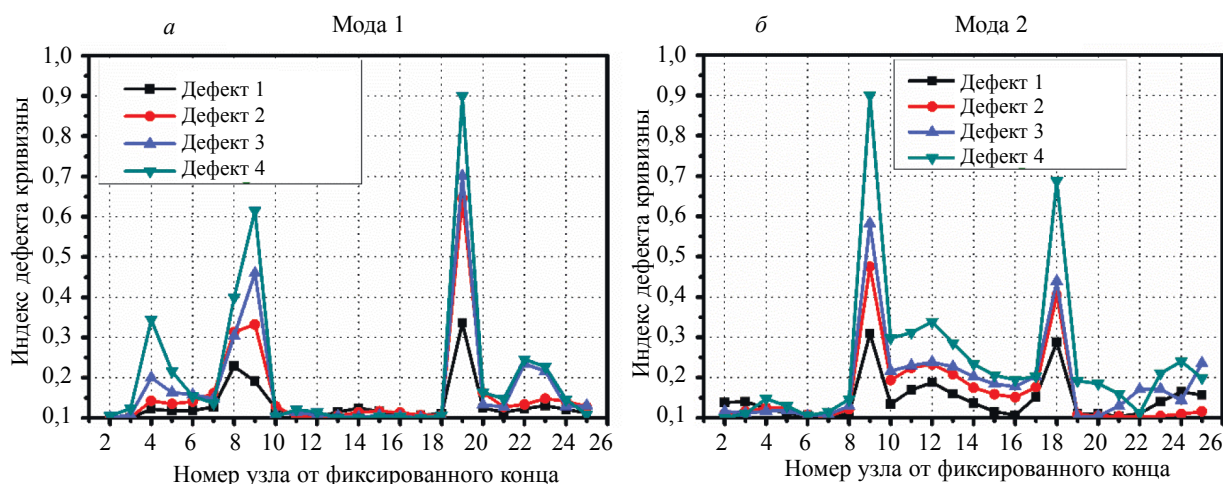


Рис. 17. Измененный индекс дефекта кривизны при использовании экспериментальных данных, полученных с помощью ИНС: индекс дефекта кривизны для моды 1 (а); индекс дефекта кривизны для моды 2 (б).

численном анализе. В результате полученные данные должны быть точными, а конкретная область дефекта должна быть успешно идентифицирована.

Результаты, показанные на рис. 17, отражают более точные значения, чем те, которые показаны на рис. 13. Индекс дефекта кривизны изменяется путем обучения модальных параметров, чтобы уменьшить наличие ошибок. На рис. 17 результаты были существенно улучшены, а повреждения локализованы вблизи места надреза.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная проблематика текущего исследования сосредоточена на обеспечении целостности конструкций и обнаружении повреждений существующих сооружений. Когда требуется обеспечить целостность конструкций в сфере сохранности гражданской инфраструктуры, обнаружение многочисленных повреждений остается более сложной задачей, чем выявление единичного дефекта. Благодаря многочисленным инженерным приложениям такого рода конструкции являются весьма значимыми. Одним из важных видов конструкций, рассматриваемых при исследовании повреждений, является модель консольной балки с опорой. Исследование включает в себя множество этапов анализа для получения окончательных результатов.

Модальные параметры извлекаются для экспериментальной и численной модели балки с целью выявления форм смещенных мод от различных глубинных надрезов в различных областях балки.

В экспериментальных модальных данных неизбежно наличие ошибок из-за внешних помех. Наличие непредотвратимых ошибок может снизить достоверность выводов и результатов.

При численном моделировании выходных модальных параметров ошибки и внешние помехи не влияют на результаты, а точное расположение и критичность дефектов определяются для различных дефектов в различных областях.

Результаты с использованием экспериментально полученных исходных данных демонстрируют многочисленные пики, которые неверно указывают на локализацию дефекта в модели балки.

ИНС применяется для уменьшения наличия ошибок в модальных параметрах, что значительно улучшает их качество.

Полученные после обучения ИНС модальные параметры используются для расчета кривизны формы моды и одновременно с этим для расчета индекса дефекта кривизны, чтобы точно идентифицировать расположение дефекта в нескольких местах.

Применяемая стратегия имеет большее значение из-за простоты применения при идентификации дефектов для экспериментально и численно полученных результатов.

Для проверки надежности метода проводится сравнение между экспериментально и аналитически полученным показателем дефекта кривизны.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wahab M.A., De Roeck G.* Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario // *J. Sound. Vib.* 1999. V. 226 (2). P. 217—235. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2295>
2. *Owolabi G. M., Swamidass A.S.J., Seshadri R.* Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response functions // *J. Sound. Vib.* 2003. V. 265. No. 1. P. 1—22. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)01264-6](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)01264-6)
3. *Sinou Jean-Jacques.* Damage assessment based on the frequencies' ratio surfaces intersection method for the identification of the crack depth, location and orientation // *Structural Durability and Health Monitoring.* 2007. V. 3. No. 3. P. 134—162.
4. *Altunışık Ahmet Can, Okur Fatih Yesevi, Kahya Volkan.* Structural identification of a cantilever beam with multiple cracks: Modeling and validation // *International Journal of Mechanical Sciences.* 2017. V. 130. P. 74—89. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.05.039>
5. *Yazdekhastı Sepideh, Piratla Kalyan R., Atamturktur Sez, Khan Abdul.* Experimental evaluation of a vibration-based leak detection technique for water pipelines // *Structure and Infrastructure Engineering.* 2018. V. 14. No. 1. P. 46—55. <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1327544>
6. *Altunışık Ahmet Can, Okur Fatih Yesevi, Karaca Sebahat, Kahya Volkan.* Vibration-based damage detection in beam structures with multiple cracks: modal curvature vs. modal flexibility methods // *Nondestructive Testing and Evaluation.* 2019. V. 34. No. 1. P. 33—53. <https://doi.org/10.1080/10589759.2018.1518445>
7. *Roy Koushik.* Structural damage identification using mode shape slope and curvature // *Journal of Engineering Mechanics.* 2017. V. 143. No. 9. P. 04017110. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001305](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001305)
8. *Feng Dongming, Feng Maria Q.* Output-only damage detection using vehicle-induced displacement

- response and mode shape curvature index // *Structural Control and Health Monitoring*. 2016. V. 23. No. 8. P. 1088—1107. <https://doi.org/10.1002/stc.1829>
9. *Pandey A.K., Biswas M., Samman M.M.* Damage detection from changes in curvature mode shapes // *J. of sound and vibration*. 1991. V. 145. No. 2. P. 321—332. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90595-B](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90595-B)
10. *Brigham E.O.* The Fast Fourier Transform and Applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1988.
11. *Zenzen R., Khatir Samir, Belaidi I., Wahab Magd Abdel.* Structural health monitoring of beam-like and truss structures using frequency response and particle swarm optimization // *Numerical Modelling in Engineering*. Springer, Singapore, 2018. P. 390—399. DOI: 10.1007_978-981-13-2273-0_30
12. *Worden Keith, Charles R. Farrar, Jonathan Haywood, Michael Todd.* A review of nonlinear dynamics applications to structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring // The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and the European Association for the Control of Structures*. 2008. V. 15. No. 4. P. 540—567. <https://doi.org/10.1002/stc.215>
13. *de la Cruz Rafael, Salehi Paniagua V.K., Salgado Sánchez P., García-Fogeda P.* A Vibration-Based Method for assessing the integrity of welded structures // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2020. V. 35. No. 4. P. 452—472. <https://doi.org/10.1080/10589759.2019.1692011>
14. *Pooya Seyed Majid Hosseini, Massumi Ali.* A novel and efficient method for damage detection in beam-like structures solely based on damaged structure data and using mode shape curvature estimation // *Applied Mathematical Modelling*. 2021. V. 91. P. 670—694. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.09.012>
15. *Sha Ganggang, Radzieński Maciej, Cao Maosen, Ostachowicz Wiesław.* A novel method for single and multiple damage detection in beams using relative natural frequency changes // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. V. 132. P. 335—352. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.06.027>
16. *Gorgin Rahim.* Damage identification technique based on mode shape analysis of beam structures // *Structures*. Elsevier, 2020. V. 27. P. 2300—2308. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.034>
17. *Hooman Nick, Armin Aziminejad.* Vibration-Based Damage Identification in Steel Girder Bridges Using Artificial Neural Network Under Noisy Conditions // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2021. V. 40. No. 1. P. 1—22. <https://doi.org/10.1007/s10921-020-00744-8>
18. *Hamey Cole S., Wahyu Lestari, Pizhong Qiao, Gangbing Song.* Experimental damage identification of carbon/epoxy composite beams using curvature mode shapes // *Structural Health Monitoring*. 2004. V. 3. No. 4. P. 333—353. <https://doi.org/10.1177/1475921704047502>
19. *Kumar Anjneya, Koushik Roy.* Response surface-based structural damage identification using dynamic responses // *Structures*. Elsevier. 2021. V. 29. P. 1047—1058. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.033>
20. *Gupta Krishanu, Bhattacharjee Biplab, Gupta Sonu Kumar, Chakraborti Prasun.* Study of natural frequencies of natural rubber cored novel sandwich structure without tip mass // *Structures*. Elsevier, 2020. V. 28. P. 651—658. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.010>
21. *Stoykov S., Manoach E.* Damage localization of beams based on measured forced responses // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. V. 151. P. 107379. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107379>
22. *Qiao Pizhong, Lu Kan, Lestari Wahyu, Wang Jialai.* Curvature mode shape-based damage detection in composite laminated plates // *Composite Structures*. 2007. V. 80. No. 3. P. 409—428. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.05.026>
23. *Sarehati Umar, Norhisham Bakhary, Abidin A.R.Z.* Response surface methodology for damage detection using frequency and mode shape // *Measurement*. 2018. V. 115. P. 258—268. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.047>
24. *Gupta S.K., Das S.* Damage detection in a cantilever beam using noisy mode shapes with an application of artificial neural network-based improved mode shape curvature technique // *Asian. J. Civ. Eng.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s42107-021-00404-w>
25. *Gupta S.K., Das S.* Multiple Damage Identification in a Beam Using Artificial Neural Network-Based Modified Mode Shape Curvature // *Arab. J. Sci. Eng.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06267-2>
26. *Cawley Peter, Adams Robert Darius.* The location of defects in structures from measurements of natural frequencies // *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 1979. V. 14. No. 2. P. 49—57. <https://doi.org/10.1243/03093247V142049>
27. *Hassiotis Sophia, Jeong Garrett D.* Identification of stiffness reductions using natural frequencies // *J. Eng. Mech.* 1995. V. 121. No. 10. P. 1106—1113. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1995\)121:10\(1106\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1995)121:10(1106))
28. *Rucevskis S., Wesolowski Miroslaw.* Identification of damage in a beam structure by using mode shape curvature squares // *Shock and Vibration*. 2010. V. 17. No. 4—5. P. 601—610. <https://doi.org/10.3233/SAV-2010-0551>
29. *Bishop Christopher M.* Neural networks for pattern recognition. Oxford university press, 1995.
30. *Bakhary Norhisham, Hong Hao, Deeks Andrew J.* Structure damage detection using a neural network with multi-stage substructuring // *Advances in Structural Engineering*. 2010. V. 13. No. 1. P. 95—110. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.13.1.95>
31. *Padil Khairul H., Bakhary Norhisham, Abdulkareem Muyideen, Li Jun, Hao Hong.* Non-probabilistic method to consider uncertainties in frequency response function for vibration-based damage detection using Artificial Neural Network // *Journal of Sound and Vibration*. 2020. V. 467. P. 115069. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115069>

32. *Hakim S.J.S., Razak H. Abdul, Ravanfar S.A.* Fault diagnosis on beam-like structures from modal parameters using artificial neural networks // *Measurement*. 2015. V. 76. P. 45—61. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.08.021>
33. *Ismail Harun Mohamed, Ng Hoon Kiat, Queck Cheen Wei, Gan Suyin.* Artificial neural networks modelling of engine-out responses for a light-duty diesel engine fuelled with biodiesel blends // *Applied energy*. 2012. V. 92. P. 769—777. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.027>
34. *Yusaf Talal F., Buttsworth D. R., Saleh Khalid H., Yousif B.F.* CNG-diesel engine performance and exhaust emission analysis with the aid of artificial neural network // *Applied Energy*. 2010. V. 87. No. 5. P. 1661—1669. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.009>
35. *Bhowmik Subrata, Rajsekhar Panua, Durbadal Debroy, Abhishek Paul.* Artificial neural network prediction of diesel engine performance and emission fueled with Diesel—Kerosene—Ethanol Blends: A fuzzy-based optimization // *Journal of Energy Resources Technology*. 2017. V. 139. No. 4. <https://doi.org/10.1115/1.4035886>
36. *Lubna Badri.* Development of neural networks for noise reduction // *Int. Arab J. Inf. Technol.* 2010. V. 7. No. 3. P. 289—294.
37. *Limongelli M.P.* Frequency response function interpolation for damage detection under changing environment // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2010. V. 24. No. 8. P. 2898—2913.
38. *Hassoun Mohamad H.* Fundamentals of artificial neural networks. MIT press, 1995.
39. *Young Dana, Felgar Robert P.* Tables of characteristic functions representing normal modes of vibration of a beam. 1949.
-