

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.876.5(045)

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-44-60

Апробация методики идентификации параметров жесткости пространственных конструкций на экспериментальных стендах

А. М. Белостоцкий, доктор технических наук, профессор,
ЗАО «Научно-образовательный центр «СтаДиО», Москва, Россия

П. И. Новиков, ООО «Центр СМИС «БАЗИС», Москва, Россия

А. А. Бах, АСФ ФИЦ ЕГС РАН, Новосибирск, Россия

А. А. Красников, кандидат технических наук, ООО «Геонавигационные технологии», Тюмень, Россия

Разработанная математически формализованная методика идентификации параметров жесткости математических (конечно-элементных) моделей пространственных конструкций апробирована на двух стендовых физических моделях «Конструктор» и «Этажерка». Особенностью стенда «Конструктор» является чувствительность частот и форм собственных колебаний значимой части спектра к вносимому намеренному повреждению, особенностью стенда «Этажерка» – большая индифферентность значимой части спектра к вносимым повреждениям. Выполнена идентификация параметров жесткости и дефектов различных состояний стендов. Показал практическую эффективность предложенный алгоритм выделения приоритетных компонент минимизации, обеспечивающий корректную идентификацию в условиях значимого, «контрастного» изменения значимой части спектра и значительно повышающий вычислительную эффективность эквивалентной задачи минимизации. Для детального исследования резонансных характеристик использован метод стоячих волн в оцифрованном варианте. Получены корректные результаты апробации для стенда «Конструктор». Для стенда «Этажерка» влияние погрешностей приводит к ошибкам локализации дефекта по высоте (уровню) повреждаемой «колонны», преодоление которых в рамках предложенной методики возможно за счет повышения точности компонент векторов форм или исследования более высоких общесистемных частот / форм собственных колебаний. В целом, результаты апробации показывают, что подход применим для исследования пространственных расчетных схем и может быть востребован, в том числе, как составная часть информационно-аналитико-математических моделей цифровых двойников (digital twins) в составе современных систем динамического мониторинга.

Ключевые слова: выявление повреждений, эксперимент, динамические характеристики, конечно-элементная модель, метод стоячих волн.

Введение

Идентификация параметров поврежденных – одна из важных обратных задач исследования свойств различных механических систем [1–3]. Наиболее интересный и универсальный, динамический вариант формулируется как задача интерпретации наблюдаемых натуральных динамических свойств объекта в виде обратной некорректной задачи определения коэффициентов конечномерного оператора жесткости механической системы. Обратную задачу можно свести к сопоставлению получен-

ных численно и найденных экспериментально частот и векторов форм собственных колебаний значимой части спектра. Такой подход представлен и численно апробирован в работах коллективов: В. Chen, S. Nagarajaiah [4], J. S.Kang, H. S. Lee [5], C.R. Farrar [6], D. C. Zimmerman, M. Kaouk [7], T. Marwala [8], F. Shabbir [9], A. Entezami, H. Shariatmadar [10], J. D. Villalba-Morales, J. E. Laier [11], N. F. Alkayem, M. Cao [12], С. М. Николаев, И. А. Киселёв, В. А. Жулёв, П. С. Воронов [13], А. В. Забелин, А. А. Пыхалов [14]. Попыт-

ки апробации на реальных объектах изложены в работах М. I. Friswell [15] и В. Weber [16]. В подобных исследованиях актуальной является задача экспериментальной репрезентативной апробации предлагаемых методик.

Для решения практико-ориентированных обратных задач идентификации необходимо преодолевать нарушение условий единственности и устойчивости решения, учитывать практически важные аспекты сравнения спектра (относительно высокий реальный уровень зашумления, ограниченный объем исходных данных, зависимость процедуры от количества и строгой упорядоченности собственных векторов исследуемой части спектра). Кроме того, при решении практических задач важна вычислительная эффективность методики, что для подробных исследований развитых механических систем является отдельной, весьма сложной задачей.

Статья посвящена апробации востребованной практикой численно-аналитической методики идентификации параметров жесткости пространственных конструкций [17]. В качестве объектов апробации использованы экспериментальные стенды «Конструктор» и «Этажерка». Стенды были развернуты в центре мониторинга НИУ МГСУ [18] и подробно исследованы в научно-образовательном центре компьютерного моделирования НИУ МГСУ в 2012 г. [19, 20]. Предложенные для исследования пространственные конструкции стендов отвечают базовым требованиям к репрезентативности

по ряду критериев, среди которых чувствительность значимой части спектра, количество используемых частот и форм собственных колебаний, количество точек измерений, а также расположение намеренно вносимого дефекта.

Апробация методики выполнена с использованием метода стоячих волн (МСВ) авторского коллектива Алтае-Саянского филиала геофизической службы сибирского отделения РАН [21]. Метод основан на восстановлении когерентных составляющих естественных микросейсмических колебаний строительных и геологических объектов, позволяет для значимого частотного диапазона детально исследовать формы собственных колебаний зданий (сооружений). Следует отдельно отметить, что до настоящего времени отсутствовали работы, в полной мере использующие возможности этого перспективного инструментального метода в оцифрованном варианте, необходимым для адаптации динамических КЭ-моделей.

Основы методики идентификации параметров жесткости

Расчетно-экспериментальная методика включает три блока.

1. Расчетные исследования значимой части спектра собственных частот конечно-элементной модели. Ставится и решается частная проблема собственных колебаний модели линейной механической системы без демпфирования.

2. Натурные инструментальные исследования значимой части спектра реального объекта $(\hat{\omega}_j, \hat{\phi}_j), j = 1, \dots, \hat{m}$ с неизвестными жесткостными $[\hat{K}]$ и инерционными $[\hat{M}]$ характеристиками. Используя оцифрованные данные выявленных частот $\{\hat{\omega}_1, \dots, \hat{\omega}_m\}$ и соответствующие им наборы (векторы)

$$[K][\Phi] = [\Omega^2][M][\Phi],$$

$$[\Omega^2] = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_m^2), \quad [\Phi] = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m], \quad i = 1, \dots, m, \quad (1)$$

$$\omega_i^2 \in [\omega_{\min}^2, \omega_{\max}^2], \quad 0 \leq \omega_{\min}^2 \leq \omega_1^2 \leq \omega_2^2 \leq \dots \leq \omega_m^2 \leq \omega_{\max}^2,$$

где $[K]$, $[M]$ – глобальные матрицы жесткости и масс; ω_i , ϕ_i – i -я угловая частота (рад/с) и вектор формы собственных колебаний, собственная пара; $\lambda_i = \omega_i^2$, λ_i – i -е собственное значение; $\omega_i = 2\pi f_i$, f_i – i -я частота собственных колебаний, Гц; $[\Phi]$ – матрица векторов форм собственных колебаний.

амплитуд ускорений $\hat{A}_j^{(a)} \in [\hat{A}_1^{(a)}, \dots, \hat{A}_{\hat{m}}^{(a)}]$ и начальных фаз $\hat{\psi}_j \in [\hat{\psi}_1, \dots, \hat{\psi}_{\hat{m}}]$, иско-мый набор векторов $\hat{\phi}_j$ составляется с учетом структуры механической систе-мы по гармоническому закону:

$$\hat{\phi}_j = \hat{A}_j^{(u)} \cos(\hat{\omega}_j t_0 + \hat{\psi}_j) = \frac{\hat{A}_j^{(a)}}{-\hat{\omega}_j^2} \cos(\hat{\omega}_j t_0 + \hat{\psi}_j), \quad (2)$$

subject to

$$1 \leq x_k \leq x_{0k}, \quad k = 1, \dots, l, \quad l < p,$$

$$\omega_j(\bar{x}) \geq \hat{\omega}_j, \quad \text{if } \hat{\omega}_j < \omega_j(\bar{x}_0), \quad j = 1, \dots, \hat{m},$$

$$\omega_j(\bar{x}) \geq \alpha \omega_j(\bar{x}_0), \quad \text{if } \hat{\omega}_j \geq \omega_j(\bar{x}_0), \quad j = 1, \dots, \hat{m},$$

$$[F(\bar{x})] = \sum_{i=1}^m \varphi_i(\bar{x}) \phi_i(\bar{x})^T,$$

$$[\hat{F}] = \sum_{j=1}^{\hat{m}} \hat{\phi}_j \hat{\phi}_j^T,$$

$$\|[\hat{F}]\|_{Fr} = \sqrt{\sum_{i,j=1}^{\hat{m}} \hat{F}_{ij}^2},$$

где \bar{x} – вектор параметров состояния сис-темы, $x_k \in \bar{x}$, $\bar{x} \in \mathbb{R}^l$; x_{0k} – априорно задан-ное (стартовое, проектное) значение пара-метра системы, $x_{0k} \in \bar{x}_0$; $\omega_i(\bar{x}), \varphi_i(\bar{x})$ – расчетная i -я круговая частота и собствен-ный вектор КЭ-модели; l – количество вы-деленных (приоритетных) компонент ми-нимизации, $l < p$; $[F(\bar{x})], [\hat{F}]$ – матрицы сочетания векторов форм; \hat{m} – количество пар, выявленных инструментально, $m \geq \hat{m}$; α – понижающий коэффициент, $\alpha = 0,9$; $\|\dots\|_{Fr}$ – матричная норма Фробениуса.

$$\vec{E}_i = \{E_1, E_2, \dots, E_k, \dots, E_p\}^T, \quad E_k = 2,0 \cdot 10^{x_k} \text{ Па}, \quad E_{0k} = 2,0 \cdot 10^{11} \text{ Па},$$

$$\bar{x}_i = \{x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_p\}^T, \quad x_k = \lg \frac{E_k}{E_{0k}} + x_{0k}, \quad x_{0k} = 11,$$

где E_k – значение модуля Юнга выбранно-го в рамках рассматриваемой гипотезы КЭ; x_k – k -й параметр системы.

Инерционные характеристики предпола-гаются известными $[\hat{M}] \approx [M_0]$.

При рассмотрении сложной механиче-ской системы набор гипотез \bar{x} может быть достаточно большим. С целью повышения вычислительной эффективности методики

где t_0 – заданный момент времени, с; u – перемещение, м; a – ускорение, м/с².

3. Формулировка и решение задачи ми-нимизации скалярной непрерывной целевой функции $f(\bar{x})$ векторного аргумента \bar{x}

$$\min_{\bar{x} \in \mathbb{R}^l} f(\bar{x}) = \frac{1}{2 \left\| [\hat{F}] \right\|_{Fr}^2} \left\| [F(\bar{x})] - [\hat{F}] \right\|_{Fr}^2, \quad (3)$$

Для отображения меры соответствия век-торов форм собственных колебаний $\phi_i(\bar{x})$ и $\hat{\phi}_j$ удобно использовать критерий $MAC_{ij} \in [0, 1]$:

$$MAC_{ij} = \cos^2(\varphi_i(\bar{x}), \hat{\phi}_j) = \frac{(\varphi_i \cdot \hat{\phi}_j)^2}{\varphi_i^T \cdot \varphi_i \cdot \hat{\phi}_j^T \cdot \hat{\phi}_j}.$$

Вектор параметров состояния механиче-ской системы \bar{x} реализует изменения пара-метров жесткости локальной области сталь-ного стержня в рамках выбранного набора гипотез

на старте процедуры предлагается выделить приоритетные для задачи идентификации компоненты из набора $x_k \in \bar{x}$. Алгоритм выделения основан на сопоставлении ком-понент $\nabla f(\bar{x}_0)$ и $\nabla \Pi(\bar{x}_0)$. В качестве при-оритетных рассматриваются компоненты $x_i \in \bar{x}_0$, значения которых в $\nabla \Pi(\bar{x}_0)$ макси-мальны, в $\nabla f(\bar{x}_0)$ – неотрицательны.

$$\Pi(\bar{x}) = \frac{1}{\beta} \sum_{j=1}^{\dot{m}} \hat{\phi}_j^T [K(\bar{x})] \hat{\phi}_j, \quad \nabla \Pi(\bar{x}) = \left\{ \frac{\partial \Pi(\bar{x})}{\partial x_1}, \frac{\partial \Pi(\bar{x})}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial \Pi(\bar{x})}{\partial x_k}, \dots, \frac{\partial \Pi(\bar{x})}{\partial x_p} \right\},$$

$$\Pi'_{x_k} = \frac{\partial \Pi(\bar{x})}{\partial x_k} = \frac{1}{\beta} \sum_{j=1}^{\dot{m}} \hat{\phi}_j^T \frac{\partial [K(\bar{x})]}{\partial x_k} \hat{\phi}_j, \quad [K(\bar{x})]_{x_k} = \frac{\partial [K(\bar{x})]}{\partial x_k} = \frac{\partial [K(\bar{x})]}{\partial E_k} \cdot \frac{\partial E_k}{\partial x_k},$$

где β – коэффициент масштаба.

Апробация методики на стенде «Конструктор»

Стенд – пространственная, симметричная в плане, трехуровневая стальная рама Г-образной формы по высоте. Рама составлена

из стальных стержней ($l = 400$ мм) кругового сечения ($d = 24$ мм). Стержни запрессованы в призматические фланцы $20 \times 60 \times 60$ мм. Для соединения использованы стальные «кубики» $60 \times 60 \times 60$ мм. Расстояние между центрами «кубиков» составляет 500 мм.

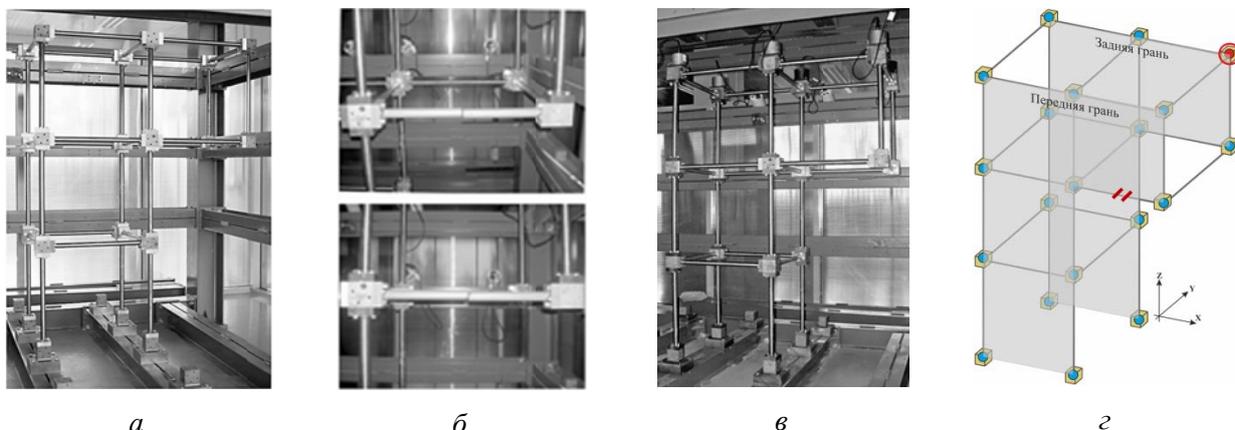


Рис. 1. Общий вид стенда «Конструктор»: а – общий вид; б – вносимый дефект; в – измерения; г – схема измерений

с использованием инструментального метода стоячих волн зафиксировано два состояния стенда: исходное «проектное» и намеренно поврежденное (разрыв стального стержня в нижнем поясе консоли). Особенностью стенда и организованных экспериментов является чувствительность

значимой части спектра к вносимому намеренному повреждению. Выбранная схема измерений – регулярная сетка из 20 точек (рис. 1, г). Измерения сериями по 10 минут проводились 6 парами «сейсмоприемник А1638» – «регистратор Байкал-АС».

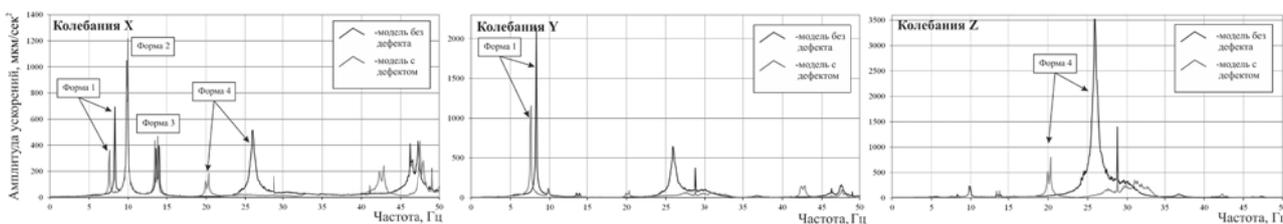


Рис. 2. Амплитудный спектр опорной точки (выделена на рис. 1, г)

Описание конечно-элементной модели стенда и результаты расчетов

Для идентификации использована адаптивная пространственная КЭ-модель, разработанная в «тяжелом» программном комплексе *ANSYS Mechanical*. Стальные стерж-

ни кругового сечения моделируются стержневыми КЭ BEAM44 с дискретизацией элементами длиной 50 мм (8 КЭ/стержень). Элемент реализует формулировку трехмерной упругой балки (растяжение/сжатие, кручение, изгиб, сдвиг). Стальные двутавры

основания заданы четырехугольными КЭ SHELL43. Элемент реализует формулировку оболочки Кирхгофа – Лява. Инерционные характеристики узлов стенда отражены в КЭ-модели элементами MASS21. Узлы приняты жесткими, отражены в КЭ-модели набором абсолютно жестких вставок. Кине-

матические ограничения в виде жесткого заземления приняты для узлов нижней полки и торцов опорных двутавров.

Результаты модального анализа двух состояний КЭ-модели показывают удовлетворительное соответствие с результатами эксперимента (до 10 %) (рис. 3, табл. 1, 2).

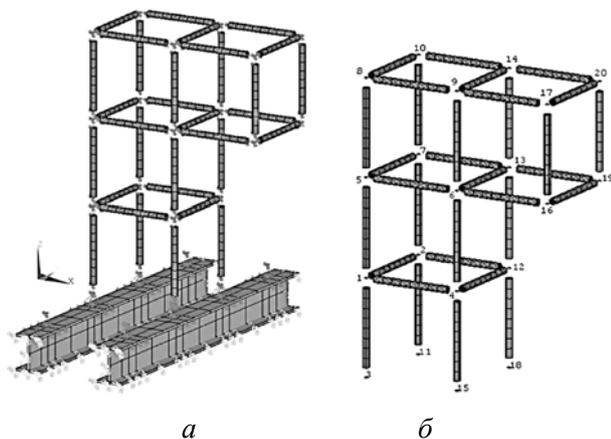


Рис. 3. КЭ-модель стенда «Конструктор». Общий вид и основные параметры:
а – общий вид; б – номера узлов

| | |
|---|---------------------|
| Количество КЭ | 480 |
| Количество узлов | |
| – всего | 558 |
| – с кинематическими ограничениями | 118 |
| – задействованы для формулировки ограничений степеней свободы | 168 |
| ▪ из них master-узлы | 24 |
| ▪ из них slave-узлы | 144 |
| Количество степеней свободы КЭ-модели (degrees of freedom, DOF) | 1776 |
| Параметры изотропного материала: | |
| – модуль упругости (Юнга), Па | $2,0 \cdot 10^{11}$ |
| – коэффициент Пуассона | 0,28 |
| – плотность, кг/м ³ | 7826 |

Таблица 1. Результаты модального анализа КЭ-модели и инструментальных динамических исследований (Гц). Исходное проектное состояние

| | | | | | | |
|-----------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Общий вид вектора формы КЭМ | | | | | | |
| 1776 DOF | 8,650 | 10,784 | 14,424 | 28,168 | 37,379 | 49,401 |
| MCB | 8,240 | 9,888 | 13,672 | 26,245 | 35,461 | 47,424 |
| $\delta, \%$ | 4,74 | 8,31 | 5,21 | 6,83 | 5,13 | 4,00 |

Таблица 2. Результаты модального анализа КЭ-модели и инструментальных динамических исследований (Гц). Намеренно поврежденное состояние

| | | | | | | |
|-----------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Общий вид вектора формы КЭМ | | | | | | |
| 1776 DOF | 7,938 | 10,743 | 14,276 | 21,495 | 30,207 | 34,472 |
| MCB | 7,568 | 9,766 | 13,489 | 19,958 | 27,588 | 32,776 |
| $\delta, \%$ | 4,66 | 9,09 | 5,51 | 7,15 | 8,67 | 4,92 |

Единого уровня зашумления векторов форм не выявлено. Оценка уровня погрешностей выполнена эквивалентным зашумле-

нием компонент векторов форм белым, равномерно распределенным шумом (4) с последующим сопоставлением значений целе-

вой функции $f(\vec{x})$ (3). Результаты численных исследований указывают, что для исходного состояния эквивалентный уровень составляет более 50 %, для намеренно поврежденного – около 40 %.

$$\tilde{\phi}_i^{(j)} = \phi_i^{(j)} (1 + \alpha_i \xi), \quad i = 1, \dots, \hat{m}, \quad j = 1, \dots, DOF, \quad (4)$$

где i – номер вектора; ϕ_i – вычисленный собственный вектор; $\tilde{\phi}_i$ – зашумленный вектор; j – j -я компонента; α_i – уровень погрешности; ξ – псевдослучайное равномерно распределенное число из диапазона $(-1; 1)$.

При формировании вектора \vec{x} используется следующая гипотеза: жесткость EJ

каждого стального стержня стэнда определяется модулем Юнга k -го конечного элемента (КЭ) E_k , который связан с x_k соотношением $E_k = 2,0 \cdot 10^{x_k}$ Па. Вектор \vec{x} сформирован из характерных КЭ, локализованных по центру стержней, по принципу 1 КЭ для одного стального стержня.

Идентификация намеренно поврежденного состояния стэнда

На основании анализа градиентов $\nabla f(\vec{x}_0)$ и $\nabla \Pi(\vec{x}_0)$ на этапе старта процедуры минимизации выделены приоритетные компоненты (рис. 4, а).

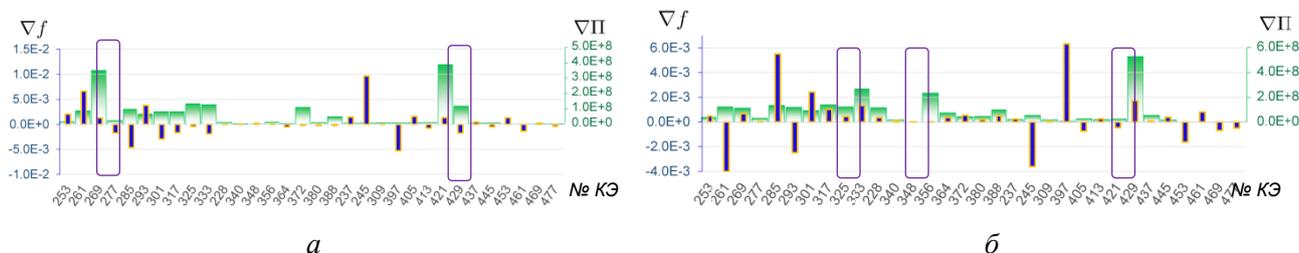


Рис. 4. Выделение приоритетных компонент вектора состояния \vec{x} : а – внесено повреждение; б – проектное состояние

Для выделенных компонент решена задача нелинейного программирования с ограничениями (3). Использована реализация метода последовательного квадратичного программирования SQP в пакете MATLAB.

Основные параметры и результаты процедуры минимизации (3) проиллюстрированы на рис. 5 и собраны в табл. 3

Для предварительной селекции векторов форм собственных колебаний использован критерий MAC.

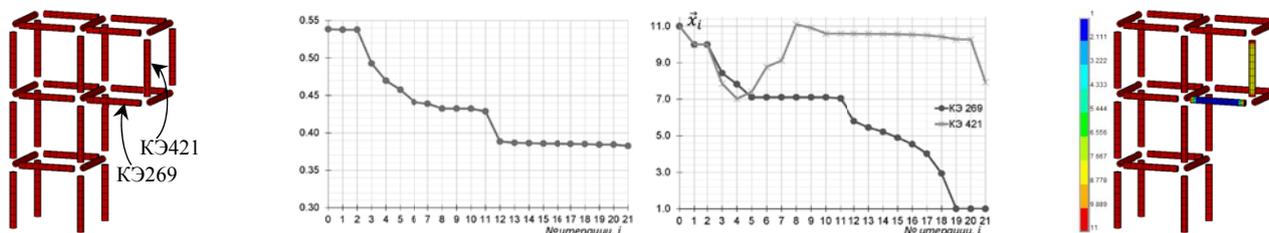
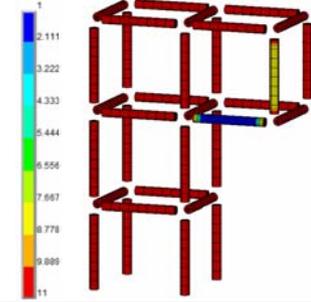
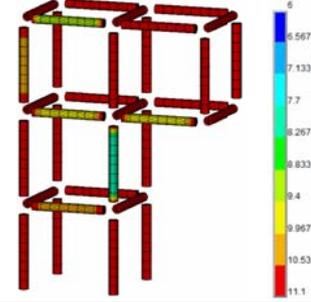


Рис. 5. Результаты идентификации намеренно поврежденного состояния. Оценка модуля упругости поврежденного стержня $E_{КЭ269} \approx 0$ ГПа

Таблица 3. Описание результатов минимизации для поврежденного состояния

| Параметр | Приоритетные компоненты, $\bar{x} \in \mathbb{R}^2$ | Полный вектор, $\bar{x} \in \mathbb{R}^{32}$ |
|---|--|---|
| Результаты идентификации состояния стенда |  |  |
| Количество итераций (время расчёта) | 21 (7 мин.) | 15 (37 мин.) |
| Значения параметров МАС | $MAC(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,701 (+1,3 \%)$ $MAC(\phi_4, \hat{\phi}_4) = 0,560 (+147 \%)$ $MAC_{SUM} = 1,261 (+37 \%)$ | $MAC(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,693 (+0,1 \%)$ $MAC(\phi_4, \hat{\phi}_4) = 0,229 (+1,3 \%)$ $MAC_{SUM} = 0,922 (+0,4 \%)$ |
| Спектр собственных частот | | |
| МСВ | КЭ-модель (проект) | |
| 7,568 Гц | 8,650 Гц (14,3 %) | 7,897 Гц (4,4 %) |
| 9,766 Гц | 10,784 Гц (10,4 %) | 10,692 Гц (9,5 %) |
| 13,489 Гц | 14,424 Гц (6,9 %) | 14,226 Гц (5,5 %) |
| 19,958 Гц | 28,168 Гц (41,1 %) | 20,350 Гц (2,0 %) |
| 27,588 Гц | 37,379 Гц (35,5 %) | 22,794 Гц (17,4 %) |
| | | 8,580 Гц (13,4 %) |
| | | 10,762 Гц (10,2 %) |
| | | 14,389 Гц (6,7 %) |
| | | 27,982 Гц (40,2 %) |
| | | 37,243 Гц (35,0 %) |

Попытка идентификации с использованием полного вектора $\bar{x} \in \mathbb{R}^{32}$ приводит к ошибкам локализации дефекта и неверной оценке жесткости конструкции. Наблюдаемое распределение параметров жесткости согласуется со значениями стартового градиента $\nabla f(\bar{x}_0)$, показанного на рис. 4, а.

Идентификация исходного проектного состояния стенда

На основании анализа градиентов $\nabla f(\bar{x}_0)$ и $\nabla \Pi(\bar{x}_0)$ на этапе старта процедуры мини-

мизации выделены приоритетные компоненты (рис. 4, б).

Для выделенных компонент решена задача нелинейного программирования с ограничениями (3) с использованием метода последовательного квадратичного программирования SQP и его реализации в пакете MATLAB.

Основные параметры и результаты процедуры минимизации (3) для исходного состояния стенда проиллюстрированы на рис. 6 и собраны в табл. 4.

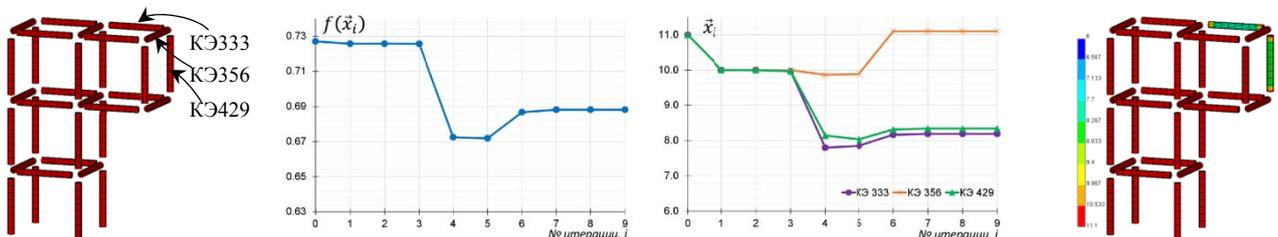
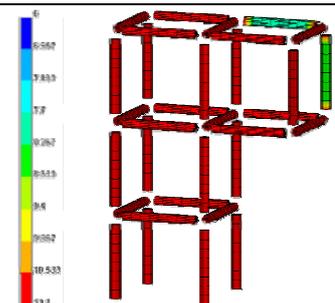
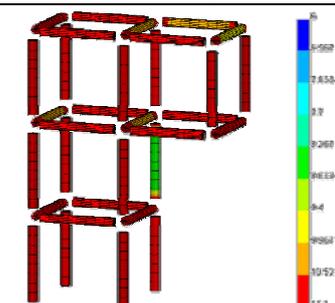


Рис. 6. Результаты идентификации исходного проектного состояния

Результаты минимизации указывают на отсутствие дефекта. Значимое снижение жесткости для КЭ 333 и КЭ 429 сопровождается незначительным изменением целевой функции (-5 %) и умеренное повышение суммарного параметра МАС на 12 %. Ин-

терпретация наблюдаемых изменений жесткости объясняется влиянием таких факторов, как несовершенства стенда, несовершенства поставленного эксперимента, проявление погрешностей оцифрованных данных.

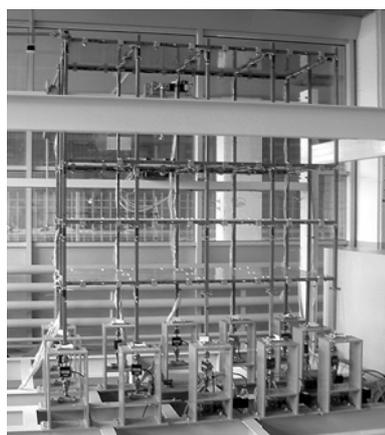
Таблица 4. Описание результатов минимизации для исходного состояния

| Параметр | Приоритетные компоненты, $\bar{x} \in \mathbb{R}^2$ | Полный вектор, $\bar{x} \in \mathbb{R}^{32}$ |
|--|---|--|
| Результаты идентификации состояния стенда |  |  |
| Количество итераций (время расчета) | 9 (9 мин.) | 70 (1 ч. 57 мин.) |
| Значения параметров МАС | $\text{MAC}(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,159 (+0,5 \%)$ $\text{MAC}(\phi_3, \hat{\phi}_3) = 0,328 (+0,2 \%)$ $\text{MAC}(\phi_4, \hat{\phi}_4) = 0,456 (+28 \%)$ $\text{MAC}_{\text{SUM}} = 0,943 (+12 \%)$ | $\text{MAC}(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,156 (-0,9 \%)$ $\text{MAC}(\phi_3, \hat{\phi}_3) = 0,318 (-3,0 \%)$ $\text{MAC}(\phi_4, \hat{\phi}_4) = 0,414 (+16,3 \%)$ $\text{MAC}_{\text{SUM}} = 0,888 (+5,6 \%)$ |
| Спектр собственных частот МСВ КЭ-модель (проект) | | |
| 8,240 Гц 8,650 Гц (5,0 %) | 8,607 Гц (4,5 %) | 8,257 Гц (0,2 %) |
| 9,888 Гц 10,784 Гц (9,1 %) | 10,764 Гц (8,9 %) | 10,538 Гц (6,6 %) |
| 13,672 Гц 14,424 Гц (5,5 %) | 14,417 Гц (5,4 %) | 14,201 Гц (3,9 %) |
| 26,245 Гц 28,168 Гц (7,3 %) | 26,245 Гц (0,0 %) | 26,245 Гц (0,0 %) |
| 35,461 Гц 37,379 Гц (5,4 %) | 34,541 Гц (2,6 %) | 35,384 Гц (0,2 %) |

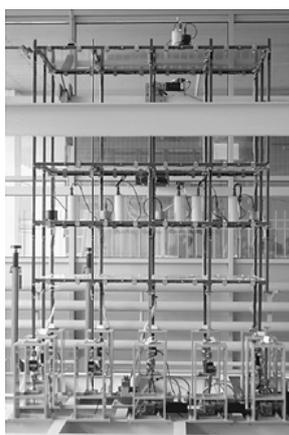
Апробация методики на стенде «Этажерка»

Стенд – пространственная регулярно-ортогональная рама шагом 0,4 м. Стержни рамы выполнены стальными, в виде квадратных труб 20×20×1,2 мм, для соединения используется сварка. Перекрытия, обра-

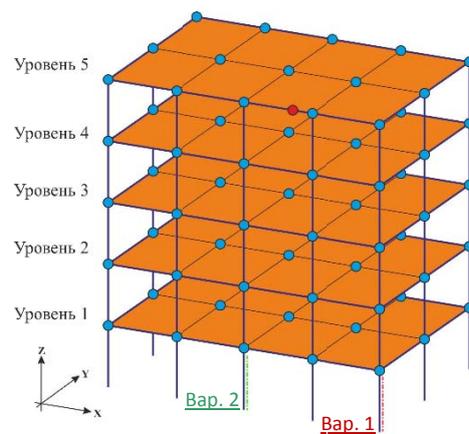
зующие 5 уровней стенда, выполнены в виде стальных листов 400×800×2 мм, крепятся к раме с использованием болтов и стальных накладок. Рама шарнирно оперта на массивные, развитые по высоте, стальные, прямоугольные стойки, которые закреплены на двутавровом основании сложной конфигурации.



а) общий вид



б) измерения



в) схема измерений

Рис. 7. Общий вид стенда «Этажерка»

С использованием инструментального метода стоячих волн зафиксировано три состояния стэнда: исходное «проектное», удаление угловой приопорной стойки (вариант 1), удаление средней приопорной стойки (вариант 2). Особенностью стэнда и организованных экспериментов является индиффе-

рентность значимой части спектра к вносимым намеренным повреждениям. Выбранная схема измерений – регулярная сетка из 75 точек (рис. 7, в). Измерения сериями по 10 минут проводились 6 парами «сейсмоприемник А1638» – «регистратор Байкал-АС».

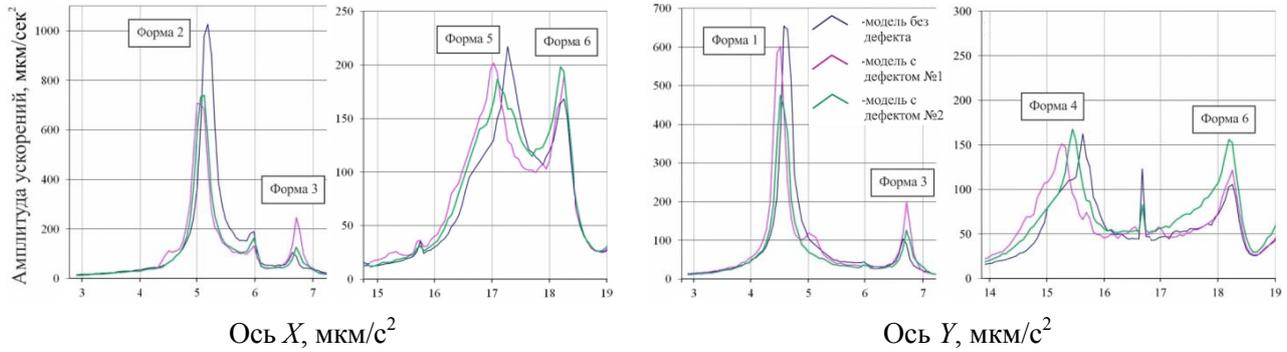


Рис. 8. Значимые диапазоны спектра собственных частот (Гц) опорной точки

Описание конечно-элементной модели стэнда и результаты расчетов

Для идентификации использована адаптивная пространственная КЭ-модель, разработанная в «тяжелом» программном комплексе ANSYS Mechanical. Стальные стержни моделируются КЭ BEAM44 с дискретизацией элементами длиной 100 мм

(4 КЭ/стержень). Стальные листы «перекрытий» заданы четырехугольными КЭ SHELL43. Инерционные характеристики оборудования отражены в КЭ-модели элементами MASS21. Кинематические ограничения в виде шарнирного закрепления приняты для нижних узлов приопорных стоек.

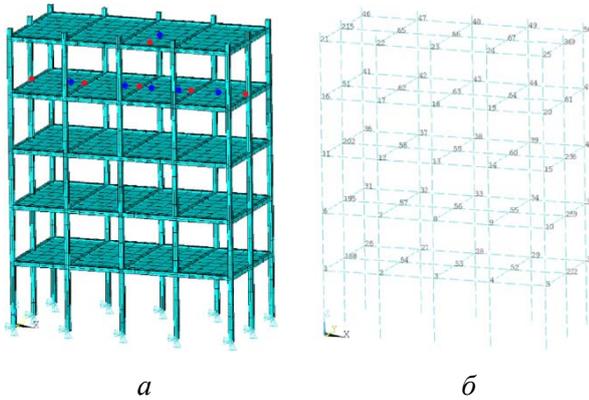


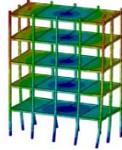
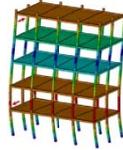
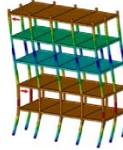
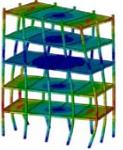
Рис. 9. КЭ-модель стэнда «Этажерка». Общий вид и основные параметры: а – общий вид; б – номера узлов

Результаты модального анализа трех состояний КЭ-модели стэнда показывают удовлетворительное соответствие с результатами эксперимента (до 10 %) в диапазоне до 20 Гц.

Общесистемные собственные пары, идентифицирующие дефект, располагаются значительно выше, у отметки в 70 Гц, что затрудняет их инструментальное изучение.

| | |
|---|---------------------|
| Количество КЭ | 480 |
| Количество узлов | 981 |
| – всего | |
| – с кинематическими ограничениями | 12 |
| Количество степеней свободы (degrees of freedom, DOF) | 5850 |
| Параметры изотропного материала: | |
| – модуль упругости (Юнга), Па | $2,0 \cdot 10^{11}$ |
| – коэффициент Пуассона | 0,30 |
| – плотность, кг/м ³ | 7790 |

Таблицы 5. Результаты модального анализа КЭ-модели и инструментальных динамических исследований. Исследованные варианты состояния стэнда «Этажерка»

| Общий вид вектора формы |  |  |  |  |  |  |
|--|---|---|---|--|---|---|
| | 1-я пара | 2-я пара | 3-я пара | 4-я пара | 5-я пара | 6-я пара |
| <i>Исходное проектное состояние</i> | | | | | | |
| КЭ-модель | 4,584 | 4,924 | 6,514 | 17,326 | 18,684 | 24,642 |
| МСВ | 4,639 | 5,188 | 6,897 | 15,625 | 17,273 | 20,142 |
| $\delta, \%$ | -1,20 % | -5,36 % | -5,88 % | 9,82 % | 7,55 % | 18,26 % |
| <i>Удалена угловая приопорная стойка (1-й вариант дефекта)</i> | | | | | | |
| КЭ-модель | 4,375 | 4,761 | 6,262 | 16,782 | 18,301 | 24,200 |
| МСВ | 4,517 | 5,066 | 6,714 | 15,259 | 17,029 | 20,020 |
| $\delta, \%$ | -3,25 % | -6,41 % | -7,22 % | 9,08 % | 6,95 % | 17,27 % |
| <i>Удалена средняя приопорная стойка (2-й вариант дефекта)</i> | | | | | | |
| КЭ-модель | 4,496 | 4,765 | 6,457 | 17,142 | 18,480 | 24,570 |
| МСВ | 4,578 | 5,066 | 6,714 | 15,442 | 17,090 | 19,836 |
| $\delta, \%$ | -1,82 % | -6,32 % | -3,98 % | 9,92 % | 7,52 % | 19,27 % |

Единого уровня зашумления векторов форм не выявлено. Оценка уровня погрешностей выполнена эквивалентным зашумлением белым, равномерно распределенным шумом (4) с последующим сопоставлением значений целевой функции $f(\vec{x})$ (3). Результаты численных исследований указывают, что для исходного состояния и при повреждении средней стойки эквивалентный уровень составляет более 50 %, при повреждении угловой стойки – около 40 %.

Формирование вектора \vec{x} выполнено на основе следующей гипотезы: жесткость EJ каждого вертикального стержня определяется модулем Юнга k -го конечного элемента E_k , который связан с параметром x_k соотношением $E_k = 2,0 \cdot 10^{x_k}$ Па. Вектор \vec{x} сформирован из КЭ, локализованных по центру стержней стэнда, по принципу 1 КЭ для одного стержня.

Приоритетные компоненты выделены по результатам анализа градиентов $\nabla f(\vec{x}_0)$ и $\nabla \Pi(\vec{x}_0)$. Использовалось «структурное» сопоставления двух наборов КЭ, соответст-

вующих 10 максимальным значениям $\nabla f(\vec{x}_0)$ и 10 максимальным значениям $\nabla \Pi(\vec{x}_0)$. Если КЭ стержня попадают в обе выборки, компонента $x_k \in \vec{x}$ считается приоритетной.

Идентификация намеренно поврежденного состояния стэнда (удаление угловой стойки, 1-й вариант поврежденного состояния)

На основании анализа градиентов $\nabla f(\vec{x}_0)$ и $\nabla \Pi(\vec{x}_0)$ на этапе старта процедуры минимизации выделены приоритетные компоненты.

Для выделенных компонент решена задача нелинейного программирования с ограничениями (3). Использована реализация метода последовательного квадратичного программирования SQP в пакете MATLAB.

Основные параметры и результаты процедуры минимизации (3) проиллюстрированы на рис. 10 и собраны в табл. 6.

Для предварительной селекции векторов форм собственных колебаний использован критерий MAC.

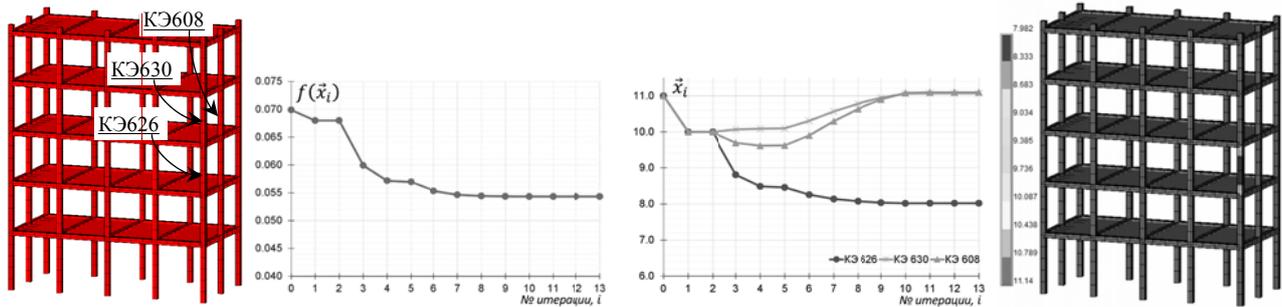
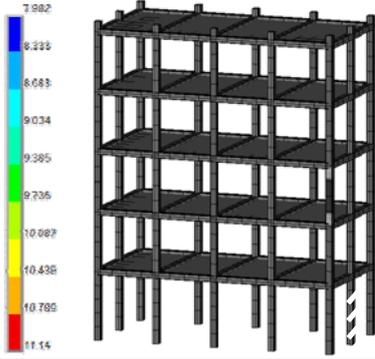
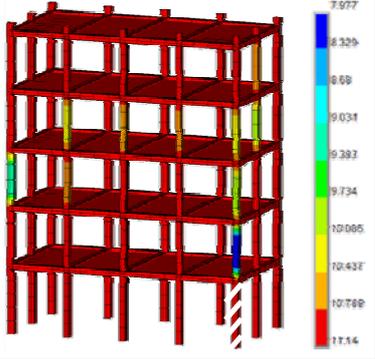


Рис. 10. Результаты идентификации 1-го намеренно поврежденного состояния.
 Оценка модуля упругости поврежденного стержня $E_{КЭ626} \approx 0,2$ ГПа

Результаты идентификации указывают на полное повреждение одного из стальных стержней, образующих поврежденную угловую «колонну». Значимое снижение жесткости до $x_{КЭ626} = 8,0$ ($E_{КЭ626} \approx 0,2$ ГПа) сопровождается значимым изменением целевой функции (-22 %) и повышением суммарного параметра МАС на 1,6 %. Наблю-

дается ошибка локализации дефекта по высоте стенда. Повреждение приопорной стойки проявляется по высоте между вторым и третьим уровнем стенда. Попытка идентификации состояния стенда с использованием полного вектора $\bar{x} \in \mathbb{R}^{60}$ приводит к качественно схожему результату.

Таблица 6. Результаты минимизации 1-го намеренно поврежденного состояния

| Параметр | Приоритетные компоненты, $\bar{x} \in \mathbb{R}^3$ | Полный вектор, $\bar{x} \in \mathbb{R}^{60}$ |
|---|--|--|
| Результаты идентификации состояния стенда |  |  |
| Количество итераций (время расчета) | 13 (10 мин.) | 101 (13 ч. 35 мин.) |
| Значения параметров МАС | $MAS(\phi_1, \hat{\phi}_1) = 0,966 (+0,9 \%)$ $MAS(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,976 (+0,7 \%)$ $MAS(\phi_4, \hat{\phi}_4) = 0,899 (+3,4 \%)$ $MAS_{SUM} = 2,841 (+1,6 \%)$ | $MAS(\phi_1, \hat{\phi}_1) = 0,976 (+2,0 \%)$ $MAS(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,983 (+1,4 \%)$ $MAS(\phi_4, \hat{\phi}_4) = 0,901 (+3,6 \%)$ $MAS_{SUM} = 2,861 (+2,3 \%)$ |
| Спектр собственных частот | | |
| МСВ | | |
| КЭ-модель (проект) | | |
| 4,517 Гц | 4,584 Гц (1,5 %) | 4,559 Гц (0,9 %) |
| 5,066 Гц | 4,924 Гц (2,8 %) | 4,907 Гц (3,1 %) |
| 6,714 Гц | 6,514 Гц (3,0 %) | 6,489 Гц (3,4 %) |
| 15,259 Гц | 17,326 Гц (13,5 %) | 16,879 Гц (10,6 %) |
| 17,029 Гц | 18,684 Гц (9,7 %) | 18,381 Гц (7,9 %) |
| | | 4,542 Гц (0,6 %) |
| | | 4,909 Гц (3,1 %) |
| | | 6,497 Гц (3,2 %) |
| | | 16,715 Гц (9,5 %) |
| | | 18,200 Гц (6,9 %) |

Идентификация намеренно поврежденного состояния стенда (удаление средней стойки, 2-й вариант поврежденного состояния)

Основные параметры и результаты процедуры минимизации (3) проиллюстрированы на рис. 11 и собраны в табл. 7.

Результаты идентификации указывают на полное повреждение одного из стальных стержней, образующих поврежденную центральную «колонну». Значимое снижение жесткости параметров $x_{KЭ666} = 5,4$ ($E_{KЭ666} \approx 0$ ГПа) и $x_{KЭ674} = 9,2$ ($E_{KЭ674} \approx 3,2$ ГПа) сопровождается незначительным изменением целевой функции ($-1,5\%$) и суммарного параметра МАС ($+0,1\%$). Слабое влияние выявленных жесткостных изменений на целе-

вую функцию и параметры МАС не позволяют однозначно увязывать наблюдаемые измерения именно с внесенным дефектом, а не с погрешностями оцифрованных инструментальных данных. Для уверенной идентификации дефекта нужны дополнительные исследования. Попытка идентификации состояния стэнда с использованием полного вектора $\vec{x} \in \mathbb{R}^{60}$ приводит к качественно схожему результату.

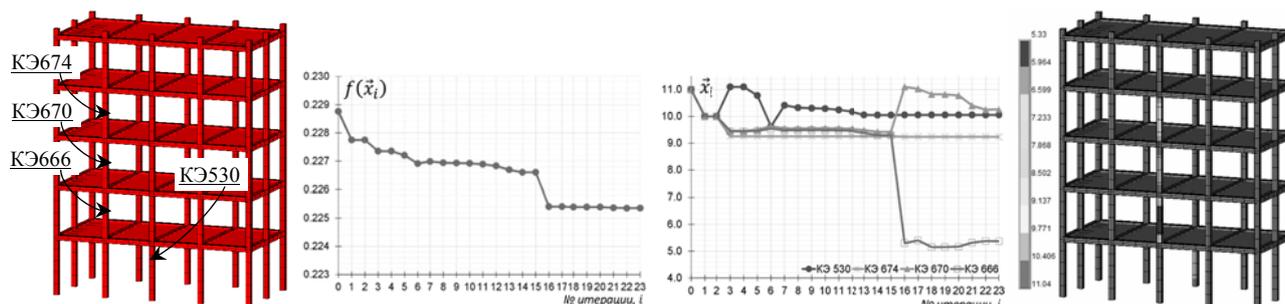


Рис. 11. Результаты идентификации 2-го намеренно поврежденного состояния.
Оценка модуля упругости поврежденного стержня $E_{KЭ666} \approx 0$ ГПа

Таблица 7. Результаты минимизации 2-го намеренно поврежденного состояния

| Параметр | Приоритетные компоненты, $\vec{x} \in \mathbb{R}^3$ | Полный вектор, $\vec{x} \in \mathbb{R}^{32}$ |
|--|---|--|
| Результаты идентификации состояния стэнда | | |
| Количество итераций (время расчета) | 23 (23 мин.) | 118 (18 ч. 3 мин.) |
| Значения параметров МАС | $MAC(\phi_1, \hat{\phi}_1) = 0,960 (-0,1\%)$ $MAC(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,985 (0,0\%)$ $MAC(\phi_4, \hat{\phi}_4) = 0,863 (+0,6\%)$ $MAC(\phi_5, \hat{\phi}_5) = 0,499 (-0,1\%)$ $MAC_{SUM} = 3,307 (+0,1\%)$ | $MAC(\phi_1, \hat{\phi}_1) = 0,963 (+0,2\%)$ $MAC(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,986 (+0,1\%)$ $MAC(\phi_4, \hat{\phi}_4) = 0,866 (+1,0\%)$ $MAC(\phi_5, \hat{\phi}_5) = 0,498 (-0,4\%)$ $MAC_{SUM} = 3,312 (+0,3\%)$ |
| Спектр собственных частот МСВ КЭ-модель (проект) | | |
| 4,578 Гц | 4,584 Гц (0,1 %) | 4,578 Гц (0,0 %) |
| 5,066 Гц | 4,924 Гц (2,8 %) | 4,909 Гц (3,1 %) |
| 6,714 Гц | 6,514 Гц (3,0 %) | 6,505 Гц (3,1 %) |
| 15,442 Гц | 17,326 Гц (12,2 %) | 16,864 Гц (9,2 %) |
| 17,090 Гц | 18,684 Гц (9,3 %) | 18,059 Гц (5,7 %) |

Идентификация исходного «проектного» состояния стенда (повреждения отсутствуют)

Основные параметры и результаты процедуры минимизации (3) проиллюстрированы на рис. 12 и собраны в табл. 8.

Результаты идентификации указывают на отсутствие повреждений в рамках исследованных гипотез изменения жесткости. Умеренное снижение жесткости для КЭ 608 и КЭ 612 сопровождается незначительным изме-

нение целевой функции ($-0,7\%$) и суммарного параметра МАС ($+0,1\%$). Выявленные жесткостные изменения объясняются влиянием таких факторов, как несовершенство стенда, несовершенство поставленного эксперимента, проявление погрешностей оцифрованных данных. Попытка идентификации состояния стенда для полного вектора $\vec{x} \in \mathbb{R}^{60}$ приводит к качественно схожему результату.

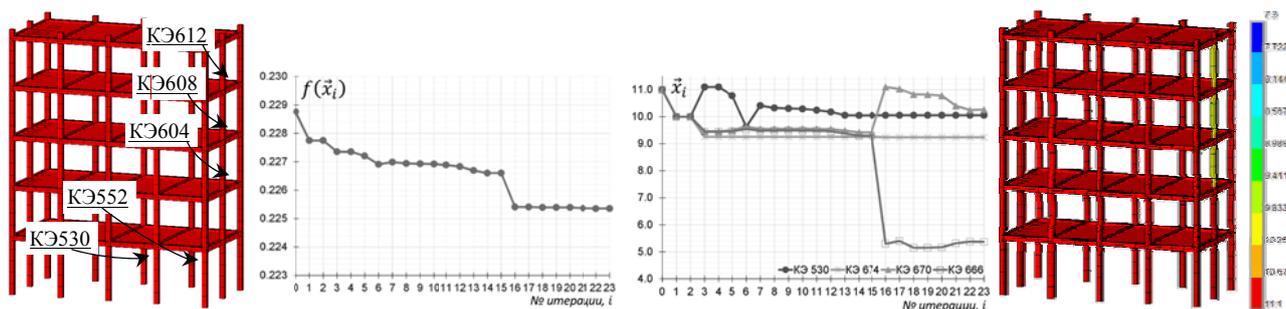


Рис. 12. Результаты идентификации исходного «проектного» состояния

Таблица 8. Результаты минимизации исходного «проектного» состояния

| Параметр | Приоритетные компоненты, $\vec{x} \in \mathbb{R}^5$ | Полный вектор, $\vec{x} \in \mathbb{R}^{60}$ |
|---|--|---|
| Результаты идентификации состояния стенда | | |
| Количество итераций (время расчёта) | 4 (5 мин.) | 48 (8 ч. 32 мин.) |
| Значения параметров МАС | $\text{MAC}(\phi_1, \hat{\phi}_1) = 0,977 (0,0\%)$ $\text{MAC}(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,984 (0,0\%)$ $\text{MAC}(\phi_4, \hat{\phi}_4) = 0,848 (+0,6\%)$ $\text{MAC}(\phi_5, \hat{\phi}_5) = 0,602 (0,0\%)$ $\text{MAC}_{SUM} = 3,412 (+0,1\%)$ | $\text{MAC}(\phi_1, \hat{\phi}_1) = 0,978 (+0,1\%)$ $\text{MAC}(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,985 (+0,1\%)$ $\text{MAC}(\phi_4, \hat{\phi}_4) = 0,854 (+1,2\%)$ $\text{MAC}(\phi_5, \hat{\phi}_5) = 0,600 (-0,4\%)$ $\text{MAC}_{SUM} = 3,417 (+0,3\%)$ |
| Спектр собственных частот | | |
| МСВ | | |
| КЭ-модель (проект) | | |
| 4,639 Гц | 4,584 Гц (1,2 %) | 4,569 Гц (1,5 %) |
| 5,188 Гц | 4,924 Гц (5,1 %) | 4,910 Гц (5,4 %) |
| 6,897 Гц | 6,514 Гц (5,6 %) | 6,497 Гц (5,8 %) |
| 15,625 Гц | 17,326 Гц (10,9 %) | 17,110 Гц (9,5 %) |
| 17,273 Гц | 18,684 Гц (8,2 %) | 18,646 Гц (7,9 %) |
| | | 4,523 Гц (2,5 %) |
| | | 4,876 Гц (6,0 %) |
| | | 6,404 Гц (7,2 %) |
| | | 16,638 Гц (6,5 %) |
| | | 18,186 Гц (5,3 %) |

Заключение

Апробация методики выполнена на двух показательных стендах «Конструктор» и «Этажерка», динамические исследования различных состояний которых выполнены по методу стоячих волн. Оцифрованные результаты инструментальных динамических исследований, проведенных по методу стоячих волн, впервые использованы для идентификации параметров жесткости пространственных конструкций.

Для стенда «Конструктор» идентифицировано намеренно поврежденное (наличие, расположение и «глубина» дефекта) и исходное проектное состояние. Намеренно поврежденное состояние характеризуется разрывом стального стержня стенда, наблюдается чувствительность значимой части спектра к вносимому намеренному повреждению. Показана работоспособность методики в условиях значимого, «контрастного» изменения спектра собственных колебаний, интерпретация которого без специальных подходов приводит к ошибкам локализации повреждения и неверной оценке жесткости конструкции. В качестве специального подхода применена процедура выделения приоритетных компонент на старте процесса минимизации.

Для стенда «Этажерка» методика позволяет идентифицировать повреждение угловой «колонны» (наличие, «глубина» дефекта) и исходный «проектный» вариант. Влияние погрешностей проявляется в виде ошибки локализации дефекта по высоте (уровню) повреждаемой «колонны». Значимое повышение вычислительной эффективности методики обеспечивает алгоритм выделения приоритетных компонент.

Апробация методики на стенде «Этажерка» показывает работоспособность методики в условиях слабых изменений спектра собственных колебаний механической системы, когда влияние вносимых повреждений на значимую часть спектра соизмеримо с погрешностями динамических характеристик модели. Использование полного вектора параметров системы \vec{x} подтверждает объективность результатов идентификации, их согласованность с оцифрованными инструментальными данными.

Второй вариант повреждения (разрыв средней приопорной стойки стенда «Этажерка») не различим по изменению целевой функции и параметрам МАС, что затрудняет идентификацию повреждения. Подобная ситуация характерна при выявлении повреждений на ранней стадии, когда изменение системы еще не оказывает значимого влияния на интегральные, общесистемные собственные пары исследованного частотного диапазона. Тем не менее для данного случая методика дает хорошую привязку к поврежденной «колонне», что на практике может использоваться для проверки, детального исследования и успешной диагностики повреждения. Уверенная идентификация второго варианта повреждения требует дополнительных исследований, включающих повышение точности компонент векторов форм и расширение частотной области, предусматривающей исследование более высоких общесистемных частот / форм собственных колебаний.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам МГСУ д-ру техн. наук, проф. А. В. Коргину, ст. науч. сотр. А. В. Кухте и канд. техн. наук Д. К. Каличаве за организацию экспериментов на стендовых моделях «Этажерка» и «Конструктор».

Библиографические ссылки

1. Ватульян А. О. Коэффициентные обратные задачи механики. М. : Физматлит, 2019. 272 с.
2. Hansen P. C. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve // SIAM Review. 1992. No. 34. Pp. 561-580.
3. Bui H.D. Fracture Mechanics. Inverse Problems and Solutions. Springer, 2006. 375 p.
4. Chen B., Nagarajaiah S. Flexibility-based structural damage identification using Gauss-Newton method // Sadhana. 2013. Vol. 38, no. 4. Pp. 557-569.
5. Kang J. S., Yeo I. H., Lee H. S., Shin S. B. Structural damage detection using modal data with regularization technique // 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology Post-Conference (Post-smirt15). Cheju, South Korea: 1999.
6. Farrar C. R., Cone K. M. Vibration testing of the I-40 bridge before and after the introduction of

damage // Proc. 13th Int. Modal Anal. Conf. 1995. Pp. 203-209.

7. Zimmerman D. C., Kaouk M. Eigenstructure assignment approach for structural damage detection // AIAA. 1992. No. 30 (7). Pp. 1848-1855.

8. Marwala T. Finite element model updating using computational intelligence techniques. London: Springer, 2010. 250 p.

9. Shabbir F., Khan M. I., Naveed A., Tahir M. F., Ejaz N., Hussain J. Structural Damage Detection with Different Objective Functions in Noisy Conditions Using an Evolutionary Algorithm // Applied Sciences. 2017. Vol. 7, Iss. 12. Pp. 2076-3417.

10. Entezami A., Shariatmadar H. Damage detection in structural systems by improved sensitivity of modal strain energy and Tikhonov regularization method // International Journal of Dynamics and Control. 2014. No. 2. Pp. 509-520.

11. Villalba-Morales J.D., Laier J. E. Assessing the performance of a differential evolution algorithm in structural damage detection by varying the objective function // DYNA. 2014. Vol. 81, Iss. 188. Pp. 106-115.

12. Alkayem N.F., Cao M., Zhang Y., Bayat M., Su Zh. Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms a survey // Neural Computing and Applications. 2018. No. 30. Pp. 389-411.

13. Методика уточнения конечно-элементной модели механической системы с помощью анализа чувствительности [Электронный ресурс] / С. М. Николаев, И. А. Киселёв, В. А. Жулёв, П. С. Воронов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана : электрон. журн. 2014. № 1. С. 128–136. URL: <http://engineering-science.ru/file/out/755815> (accessed 10.06.2020). DOI: 10.7463/1214.0751548.

14. Забелин А. В., Пыхалов А. А. Валидация конечно-элементных моделей и алгоритм ее реализации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 3. С. 216–233. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.3.13.

15. Friswell M. I., Mottershead J. E. Finite element model updating in structural dynamics. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995. 304 p.

16. Weber B., Paultre P., Proulx J. Damage Detection of an Aluminum Truss Using Tikhonov Regularization // Conference & Exposition on Structural Dynamics (IMAC-XXIV). St. Louis, Missouri, United States: 2006.

17. Новиков П. И. Численно-аналитическая методика идентификации параметров жесткости пространственных конструкций на основе ми-

нимизации различия расчетных (конечноэлементных) и натурных динамических характеристик // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 3. С. 64–71. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-64-71.

18. Кухта А. В. Экспериментальные стенды «Конструктор», «Плита» и «Створ» научно-образовательного центра мониторинга МГСУ // Предотвращение аварий зданий и сооружений : электрон. журн. 2013. №1. С. 46-59. URL: http://www.pamag.ru/src/designer-plate_target/designer-plate_target.pdf (accessed 10.06.2020).

19. Адаптируемые конечноэлементные модели в основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Часть 2. Верификация методики на стендовых моделях / А. М. Белостоцкий, Д. К. Каличева, А. И. Нагибович, Н. О. Петряшев, С. О. Петряшев // Int. Jour. for Computational Civil and Structural Engineering. 2012. Vol. 8, Iss. 4. С. 28–42.

20. Каличева Д. К. Адаптивные динамические конечноэлементные модели в основе мониторинга несущих конструкций высотных зданий : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. М., 2012. 149 с.

21. Еманов А. Ф. Восстановление когерентных составляющих волновых полей в сейсмике: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.10. Новосибирск, 2004. 279 с.

References

1. Vatulyan A.O. *Koeffitsientnye obratnye zadachi mekhaniki* [Coefficient in-verse problems of mechanics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2019, 272 p. (in Russ.).

2. Hansen P. C. [Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve]. SIAM Review, 1992, vol. 34, pp. 561-580.

3. Bui H.D. [Fracture Mechanics. Inverse Problems and Solutions]. Springer, 2006, 375 p.

4. Chen B., Nagarajaiah S. [Flexibility-based structural damage identification using Gauss-Newton method]. Sadhana, 2013, volume 38, pp. 557-569. <https://doi.org/10.1007/s12046-013-0151-3>.

5. Kang J. S., Yeo I. H., Lee H. S., Shin S. B. Structural damage detection using modal data with regularization technique // 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology Post-Conference (Post-smirt15). Cheju, South Korea: 1999.

6. Farrar C. R., Cone K. M. [Vibration testing of the I-40 bridge before and after the introduction of damage]. Nashville, Proc. 13th Int. Modal Anal. Conf., 1995, pp. 203-209.

7. Zimmerman D. C., Kaouk M. [Eigenstructure assignment approach for structural damage detection]. AIAA, 1992, vol. 30, no. 7, pp. 1848-1855. <https://doi.org/10.2514/3.11146>
8. Marwala T. [Finite element model updating using computational intelligence techniques]. London, Springer, 2010, 250 p.
9. Shabbir F., Khan M. I., Naveed A., Tahir M. F., Ejaz N., Hussain J. [Structural Damage Detection with Different Objective Functions in Noisy Conditions Using an Evolutionary Algorithm]. Applied Sciences, 2017, vol. 7, issue 12, pp. 2076-3417. DOI <https://doi.org/10.3390/app7121245>.
10. Entezami A., Shariatmadar H. [Damage detection in structural systems by improved sensitivity of modal strain energy and Tikhonov regularization method]. International Journal of Dynamics and Control, 2014, volume 2, pp. 509-520. DOI <https://doi.org/10.1007/s40435-014-0071-z>.
11. Villalba-Morales J.D., Laier J. E. [Assessing the performance of a differential evolution algorithm in structural damage detection by varying the objective function]. DYNA, 2014, volume 81, issue 188, pp. 106-115. DOI: 10.15446/dyna.v81n188.41105.
12. Alkayem N.F., Cao M., Zhang Y., Bayat M., Su Zh. [Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms a survey]. Neural Computing and Applications, 2018, volume 30, issue 2, pp. 389-411. DOI: 10.1007/s00521-017-3284-1.
13. Nikolaev S. M., Kiselev I. A., Zhulev V. A., Voronov P. S. [Sensitivity based finite element model updating technique]. Moscow, Science and Education of the Bauman MSTU, 2014, volume 1, pp. 128-136 (in Russ.). Available at: <http://engineering-science.ru/file/out/755815> (accessed 10.06.2020). DOI: 10.7463/1214.0751548.
14. Zabelin A. V., Pyhalov A. A. [Finite-element model validation and its execution algorithm]. Perm, PNRPU Mechanics Bulletin, 2017, no. 3, pp. 216-233 (in Russ.). DOI: 10.15593/perm.mech/2017.3.13.
15. Friswell M. I., Mottershead J. E. [Finite element model updating in structural dynamics]. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1995, 304 p.
16. Weber B., Paultre P., Proulx J. [Damage Detection of an Aluminum Truss Using Tikhonov Regularization]. Conference & Exposition on Structural Dynamics (IMAC-XXIV). St. Louis, Missouri, United States, 2006.
17. Novikov P. I. [Numerical analysis technique for stiffness parameters identification of spatial structures by minimizing the difference between the calculated (finite element) and natural dynamic characteristics]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 64-71 (in Russ.). DOI 10.22213/2410-9304-2020-3-64-71.
18. Kukhta A. V. [Experimental stands "Constructor", "Plate" and "Stvor" of the scientific and educational monitoring center of MSUCE]. Moscow, *Predotvrashchenie avarii zdaniy i sooruzheniy* [Prevention of accidents in buildings and structures], 2013, vol. 1, pp. 46-59 (in Russ.). Available at: http://www.pamag.ru/src/designer-plate_target/designer-plate_target.pdf (accessed 10.06.2020).
19. Belostotsky A. M., Kalichava D. K., Nagibovich A. I., Petryashev N. O., Petryashev S. O. [Adaptive finite element models as the base of dynamic monitoring of tall buildings. Part 2. Verification procedures for experimental models]. Int. Jour. for Computational Civil and Structural Engineering, 2012, volume 8, issue 4, pp. 28-42 (in Russ.).
20. Kalichava D. K. *Adaptivnye dinamicheskie konechnoelementnye modeli v os-nove monitoringa nesushchikh konstruktivnykh vysootnykh zdaniy* [Adaptive finite element models as the base of dynamic monitoring of tall buildings]: PhD thesis. Moscow, 2012, 149 p. (in Russ.).
21. Emanov A. F. *Vosstanovlenie kogerentnykh sostavlyayushchikh volnovykh polei v seismike* [Reconstruction of coherent components of wave fields in seismics]: PhD thesis. Novosibirsk, 2004, 279 p. (in Russ.).

Approbation of the Method for Stiffness Parameters Identification of Spatial Structures on Experimental Stands

A. M. Belostotsky, DSc in Engineering, Professor, CJSC "Research Center "StaDiO", Moscow, Russia

P. I. Novikov, "Center SMIS "BASIS Ltd", Moscow, Russia

A. A. Bakh, Senior Engineer, Altay-Sayan Branch of Federal Research Center "United Geophysical Survey RAS", Novosibirsk, Russia

A. A. Krasnikov, PhD in Engineering, "Geonavigation technologies Ltd", Tyumen, Russia

Mathematically formalized technique for stiffness parameters identification of spatial structures has been tested on two physical experimental models, "Constructor" and "Etazherka". The specific feature of the stand "Constructor" is the sensitivity of natural frequencies and mode shapes of a significant spectrum part to the inflicted damage. The specific feature of the stand "Etazherka" is the indifference of a significant spectrum part to the inflicted damage. Identification of stiffness parameters and defects of various stand states is performed.

An algorithm for selecting priority minimization components is proposed. The algorithm provides correct identification of stiffness parameters under conditions of significant "contrast" change of a significant spectrum part. The algorithm also significantly increases the computational efficiency of the equivalent minimization problem. For a detailed study of resonance characteristics, the method of standing waves in the digitized version was used. The correct results of approbation of the technique for the stand "Constructor" were received. For the stand "Etazherka" the influence of errors and noise leads to localization errors by the height of the damaged "column". Damage localization errors can be overcome by improving the accuracy of mode shapes components or by investigating higher system frequencies and mode shapes. As a whole, results of approbation show that the technique is applicable for research of spatial structural schemes and can be demanded as a component of information, analytical and mathematical models of digital twins as a part of modern dynamic monitoring systems.

Keywords: damage detection, experiment, dynamic characteristics, finite element model, standing wave method.

Получено: 16.06.2020