

Новиков Павел Игоревич

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЖЕСТКОСТИ
КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ КОНСТРУКЦИЙ
НА ОСНОВЕ МИНИМИЗАЦИИ РАСХОЖДЕНИЙ РАСЧЕТНЫХ
И НАТУРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Белостоцкий Александр Михайлович**
член-корреспондент РААСН,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Дмитриева Татьяна Львовна**
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой механики и сопротивления материалов
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»

Мелешко Владимир Аркадьевич
кандидат технических наук, доцент кафедры
строительной механики ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский государственный архитектурно-
строительный университет»

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»**

Защита диссертации состоится «15» декабря 2020 года в 16:00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.01.09, по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, ауд. 423б.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://www.pstu.ru>).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д ПНИПУ.01.09, кандидат
физико-математических наук, доцент

А.И. Швейкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Технически сложные уникальные здания (сооружения), для обеспечения механической безопасности оснащенные современными системами мониторинга несущих конструкций, требуют контроля напряженно-деформированного состояния. Один из перспективных вариантов системы наблюдения за жесткостными и инерционными свойствами несущих конструкций предусматривает возможность подробного исследования интегральных общесистемных частот и форм собственных колебаний, где прямая задача модального анализа механической системы является известной, а задача интерпретации наблюдаемых динамических свойств объекта представляет обратную некорректную задачу определения коэффициентов конечномерного оператора жесткости механической системы. Подобные обратные динамические задачи параметрической идентификации, предусматривающие подтверждение параметров механической безопасности, выявление возможных дефектов, повреждений, проявлений деградации, износа и прочих особенностей, предъявляют повышенные требования и к способам мониторинга, и к методикам расчетов, возможности которых на данный момент ограничены.

Степень разработанности темы исследования. Решению широкого класса обратных некорректных задач механики в различных постановках посвящены работы отечественных (А.Н. Тихонова, А.О. Ватульяна и др.) и зарубежных (P.C. Hansen, H.D. Bui, C.R. Farrar, M.I. Friswell, T. Marwala, B. Weber и др.) ученых. Методы идентификации, основанные на методах решения обратных некорректных задач и функционального анализа, на данный момент обладают широким инструментарием, но ограничены в части геометрии и структуры сложного объекта. Существует практико-ориентированная группа методов идентификации, основанная на сопоставлении полученных численно и найденных экспериментально частот и векторов форм собственных колебаний значимой (для задач идентификации жесткостных характеристик) части спектра собственных частот с последующим решением задачи минимизации целевой функции по вектору параметров системы. Независимую оценку применимости методов затрудняет существование многочисленных авторских реализаций численных методов минимизации, регуляризации, численных схем метода конечных элементов (МКЭ), недостаточного (по сравнению с проведенными экспериментами) уровня зашумления исследуемых модельных данных. Отсутствуют работы, в полной мере использующие возможности перспективного инструментального метода стоячих волн (МСВ) авторского коллектива Алтае–Саянского филиала геофизической службы сибирского отделения РАН (АСФ ГС СО РАН) для решения математически формализованной задачи идентификации свойств несущих конструкций зданий (сооружений).

Целью диссертационной работы является разработка математически формализованной процедуры идентификации параметров жесткости адаптивных математических (конечноэлементных) моделей на базе минимизации расхождений расчетных и натурных динамических характеристик как основы систем динамического мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений.

Задачи, решенные для достижения поставленной цели:

1. Аналитический обзор современных подходов и методов идентификации жесткостных параметров конструкций зданий, сооружений, стендов по результатам

натурных динамических исследований и экспериментов. Анализ примеров корректного применения методик идентификации для реальных объектов.

2. Разработка, программная реализация и верификация математически формализованной методики идентификации параметров жесткости конструкций по оцифрованным данным экспериментально определенных динамических характеристик на базе адаптируемых конечноэлементных моделей. Методика должна выявлять значимые изменения жесткости конструкций относительно проектных значений.

3. Применение оцифрованных данных инструментального метода определения динамических характеристик, удовлетворяющего требованиям полноты, точности и оперативности измерений, для качественного выявления и количественного описания отклонений жесткостных характеристик несущих конструкций реальных объектов от проектных значений.

4. Верификация методики идентификации (включая локализацию повреждений) жесткостных характеристик конструкций развернутых на базе НИУ МГСУ стендов «Конструктор» и «Этажерка» с использованием значимых частот / векторов форм собственных колебаний структурно развитых, пространственных, адаптивных динамических конечноэлементных моделей и результатов динамических измерений для заданных различных состояний стендов.

Объект исследования. Наблюдаемое на практике несоответствие (невязка) набора частот / форм собственных колебаний различных объектов строительства и частот / форм собственных колебаний значимой части спектра, используемых в расчетной практике пространственных, структурно развитых конечноэлементных моделей. На указанное несоответствие оказывают влияние сложность реальных объектов, проявление отступлений, ошибок строительства, появление и развитие повреждений, дефектов системы несущих конструкций объекта, наличие погрешностей оцифрованных данных измерений.

Предмет исследования. Математически формализованная идентификация жесткостных свойств механических систем на основе формулировки и решения задачи минимизации по вектору состояния расхождений (невязки) динамических характеристик с использованием параметризуемых конечноэлементных моделей различной размерности и структуры.

Научная новизна работы

- Решена серия динамических задач идентификации жесткостных характеристик экспериментальных стендов (как структурно развитых составных механических систем) с использованием конечноэлементных моделей и частот / форм собственных колебаний, выявленных по результатам динамических измерений.

- Предложена и использована оригинальная формулировка задачи нелинейного программирования для минимизации расхождений значимого набора расчетных и измеренных частот / форм собственных колебаний с ограничениями в виде неравенств для расчетных частот собственных колебаний.

- Введено понятие “приоритетных компонент минимизации”, которое показало практическую эффективность при решении динамических задач идентификации. Наблюдается улучшение результатов идентификации в части локализации области параметров, определяющих поврежденность, и кратное уменьшение времени расчета.

- Для целей математически формализованной процедуры идентификации жесткостных характеристик впервые применены натурные динамические данные (частоты / векторы форм колебаний), полученные методом стоячих волн для значимой части спектра собственных частот.

Теоретическая значимость работы. Разработана математически формализованная численно-аналитическая методика идентификации жесткостных характеристик пространственных конструкций на основе инструментально выявленных частот и форм собственных колебаний значимой части спектра с применением современных численных методов моделирования механических систем и нелинейного программирования, реализованных в универсальных программных комплексах (ПК). Методика основана на оригинальной формулировке задачи нелинейного программирования с ограничениями в виде неравенств для расчетных частот собственных колебаний. Подход применим для идентификации свойств сложных составных физических систем, при моделировании которых используется метод конечных элементов.

Практическая значимость работы. Разработанная методика обеспечивает:

- востребованное практикой выявление изменений и уточнение параметров жесткостных характеристик адаптивных конечноэлементных моделей механических систем относительно заданных проектом значений;
- исследование фактического состояния пространственных статически неопределимых несущих конструкций с учетом результатов динамических измерений;
- новый (математически формализованный) подход к решению задач современной практики эксплуатации, мониторинга, обследования и диагностики состояния зданий (сооружений).

Показана возможность выявления дефектов локальной зоны отдельных конструктивных элементов по частотам / формам собственных колебаний значимой части спектра. Один из вариантов идентификации дефектов локальной зоны – рассмотрение априорного набора (или наборов) поврежденных элементов конструкции, выраженных в изменении жесткости выбранных отдельных конечных элементов (КЭ).

Методология и методы исследования. При подготовке диссертации использованы современные методы прикладной математики, теории минимизации, строительной механики и сейсмологии. Рассматривались статически неопределимые пространственные расчетные конечноэлементные модели стенов «жесткое основание – стальные конструкции». Для решения частной (частичной) проблемы собственных значений применен блочный метод Ланцоша. В качестве численного метода нелинейного программирования использован один из эффективных методов – последовательное квадратичное программирование (*Sequential Quadratic Programming, SQP*). Для исследования значимой части спектра стенов использованы оцифрованные результаты микросейсмических исследований по МСВ. Реализация методики выполнена на базе универсальных программных средств *ANSYS Mechanical* и *MATLAB* с использованием разработанного авторского программного модуля.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты аналитического обзора современных математически формализованных подходов к идентификации жесткостных характеристик пространственных математических моделей зданий (сооружений), стенов; к основным недостаткам

существующих подходов относятся авторские реализации численных методов минимизации и МКЭ, недостаточный по сравнению с выполненными экспериментами уровень зашумления исследуемых данных, игнорирование значимых для практики критических повреждений конструкций;

- математически формализованная методика идентификации, отвечающая сформированным требованиям: пространственная постановка, использование полученных численно и выявленных экспериментально частот и форм собственных колебаний, учет практически значимых критериев сравнения векторов форм собственных колебаний, применение универсальных междисциплинарных программных средств (*ANSYS Mechanical, MATLAB*) и авторских программных разработок, всесторонний анализ результатов идентификации;

- формулировка задачи идентификации как эквивалентной задачи минимизации расхождений частот / форм собственных колебаний значимой части спектра по вектору параметров системы с ограничениями в виде неравенств для расчетных частот собственных колебаний;

- верификация методики с использованием результатов натуральных динамических измерений для двух контролируемых состояний стенда «Конструктор»;

- верификация методики с использованием результатов натуральных динамических измерений для трех контролируемых состояний стенда «Этажерка».

Личный вклад автора диссертации заключается в обоснованной конкретизации задач исследования, обобщении, систематизации и решении исследуемых проблем, а также разработке и верификации методики идентификации. Соискателем самостоятельно разработаны расчетные конечноэлементные модели, средства интеграции универсальных ПК и необходимые вычислительные модули.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается удовлетворительным соответствием полученных оптимальных решений задачи определения параметров жесткости с исследованными по МСВ заданными состояниями стендов.

Апробация работы выполнена в виде докладов на ряде научно-технических конференций, симпозиумов и семинаров, в том числе: XXII Русско-Словацко-Польский семинар «Теоретические основы строительства», г. Жилина, 2013 г; XXV Международная конференция «Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов. ВЕМ&FEM», СПб, 2013 г; II Международная научно-практическая конференция «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы», НИУ МГСУ, г. Москва, 2013 г; II Международная научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», г. Москва, НИУ МГСУ, 2013 г; V Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», г. Иркутск, 2014 г; IV Международная научная конференция «Applied Mechanics, Materials and Manufacturing (ICAM 2014)», г. Шэньчжэнь, Китай; IX Международная научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», г. Москва, РААСН, 2020 г. Работа полностью заслушана и обсуждена на семинарах в институте механики сплошных сред УО РАН (рук. акад. РАН В.П. Матвеев), на кафедре МКМК (рук. проф. А.Н. Аношкин) и на кафедре ММСП ПНИПУ (рук. проф. П.В. Трусков).

Внедрение результатов исследования. Разработанная методика внедрена и используется в Научно-исследовательском центре СтаДиО (ЗАО НИЦ СтаДиО, г. Москва) для выполнения научно-исследовательских работ в области численного моделирования фактического состояния объектов строительства и энергетики.

Публикации. Основные положения диссертационной работы представлены в 10 публикациях, из них 5 – в рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ по специальности 05.13.18, в т. ч. 3 – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования (Scopus). Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020617551.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержит 268 страниц машинописного текста, из которых основной текст составляет 175 страниц, 60 рисунков, 62 таблицы, список литературы (218 наименований), 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности темы диссертационного исследования, охарактеризована степень ее разработки, приведены цели и задачи работы, указаны объект и предмет исследования, описаны методология и методы исследования, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад соискателя, достоверность и обоснованность результатов, представлены сведения об апробации работы, внедрении результатов и публикациях автора, структуре и объеме диссертации.

В первой главе представлен краткий обзор современного состояния проблемы идентификации дефектов конструктивных элементов структурно развитых пространственных расчетных схем. Рассмотрены методы решения обратных некорректных задач и задач минимизации. Приведена классификация наиболее востребованных формулировок задачи идентификации жесткостных параметров для развитых пространственных многократно статически неопределимых конструктивных систем. Акцент сделан на особенностях разработки и апробации методики. Главу завершают результаты аналитического обзора: сформулированы задачи исследования, выделены значимые для практической реализации допущения конкурирующих методик, сформулированы требования к разрабатываемой методике.

Вторая глава посвящена разработанной методике идентификации жесткостных характеристик пространственных конструкций с использованием конечноэлементных моделей (КЭМ). Общая структурная схема методики приведена на рис. 1.

Методика представляется совокупностью трех блоков. К первому блоку относятся постановка и решение частной (частичной) проблемы собственных колебаний линейной механической системы без демпфирования.

$$[K][\Phi] = [\Omega^2][M][\Phi], \quad (1)$$

$$\begin{aligned} [\Omega^2] &= \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_m^2), \quad [\Phi] = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m], \\ \omega_i &\in [\omega_{min}, \omega_{max}], \quad 0 \leq \omega_{min}^2 \leq \omega_1^2 \leq \omega_2^2 \leq \dots \leq \omega_m^2 \leq \omega_{max}^2, \\ [\Phi]^T [K] [\Phi] &= [\Omega^2], \quad [\Phi]^T [M] [\Phi] = [E], \end{aligned} \quad (2)$$

где $[K]$, $[M]$ – глобальные матрицы жесткости и масс (симметричные, невырожденные, положительно определенные, блочно-редкозаполненные); ω_i , ϕ_i , $i = 1, \dots, m$ – i -ая круговая частота (рад/с) и вектор формы собственных колебаний, собственная пара;

$\lambda_i = \omega_i^2$, λ_i – i -ое собственное значение; $\omega_i = 2\pi f_i$, f_i – i -ая частота собственных колебаний, Гц; $[\Phi]$ – матрица векторов форм, удовлетворяющая условиям ортогональности.

Блок / Стадия	Формулировка	Результат
1. Расчетные исследования значимой части спектра с. ч. модели механической системы	$[K][\Phi] = [\Omega^2][M][\Phi] \quad (1)$ $[\Omega^2] = \text{diag}(\omega_1^2, \dots, \omega_m^2), [\Phi] = [\phi_1, \dots, \phi_m]$	Параметризуемая конечноэлементная модель механической системы
2. Инструментальные исследования значимой части спектра частот реального объекта	$(\hat{\omega}_j, \hat{\phi}_j), j = 1, \dots, \hat{m}$ $\hat{\phi}_j = \hat{A}_j^{(a)} / (-\hat{\omega}_j^2) \cos(\hat{\omega}_j t_0 + \hat{\psi}_j) \quad (3)$	Набор частот / форм собственных колебаний значимой части спектра реального объекта
3. Исследование набора(ов) гипотез изменения жесткости. Математически формализованная процедура минимизации невязки частот / форм собственных колебаний	$\min_{\vec{x} \in \mathbb{R}^l} f(\vec{x}) = \frac{1}{2} \frac{\ [F(\vec{x})] - [\hat{F}] \ _{Fr}^2}{\ [\hat{F}] \ _{Fr}^2}$ $\text{subject to } 1 \leq x_k \leq x_{0k}, k = 1, \dots, l \quad (4)$ $\omega_j(\vec{x}) \geq \hat{\omega}_j, \quad \text{if } \hat{\omega}_j < \omega_j(\vec{x}_0), j = 1, \dots, \hat{m}$ $\omega_j(\vec{x}) \geq \alpha \omega_j(\vec{x}_0), \quad \text{if } \hat{\omega}_j \geq \omega_j(\vec{x}_0)$	Вектор оптимального состояния модели $\vec{x}^* \in \mathbb{R}^l$ Оценка достоверности полученного решения $\Delta f = f(\vec{x}_0) - f(\vec{x}^*)$ и $\Delta MAC = MAC(\vec{x}_0) - MAC(\vec{x}^*)$

Рис. 1. Общая структурная схема разработанной методики идентификации.

Второй блок методики предусматривает формирование частот / форм собственных колебаний реального объекта $(\hat{\omega}_j, \hat{\phi}_j), j = 1, \dots, \hat{m}$. В работе применяются результаты метода стоячих волн (МСВ), который основан на восстановлении когерентных составляющих естественных микросейсмических колебаний строительных (здания, сооружения) и геологических (верхняя часть разреза) объектов. Используются следующие оцифрованные данные: выявленные частоты $\{\hat{\omega}_1, \dots, \hat{\omega}_{\hat{m}}\}$, наборы (векторы) амплитуд ускорений $\hat{A}_j^{(a)} \in [\hat{A}_1^{(a)}, \dots, \hat{A}_{\hat{m}}^{(a)}]$ и начальных фаз $\hat{\psi}_j \in [\hat{\psi}_1, \dots, \hat{\psi}_{\hat{m}}]$. Векторы $\hat{\phi}_j$ составляются с учетом структуры механической системы по гармоническому закону

$$\hat{\phi}_j = \hat{A}_j^{(u)} \cos(\hat{\omega}_j t_0 + \hat{\psi}_j) = \hat{A}_j^{(a)} / (-\hat{\omega}_j^2) \cdot \cos(\hat{\omega}_j t_0 + \hat{\psi}_j), \quad (3)$$

где t_0 – заданный момент времени, с; $\hat{\omega}_j$ – собственная угловая частота, рад/с; u – индекс перемещения; a – индекс ускорения. Особенности набора пар $(\hat{\omega}_j, \hat{\phi}_j), j = 1, \dots, \hat{m}$, полученных по МСВ: 1) в редких случаях возможен пропуск отдельных собственных пар $(\hat{\omega}_j, \hat{\phi}_j)$; 2) результаты отыскиваются для ограниченного набора точек измерений; 3) каждая точка характеризуется лишь поступательными степенями свободы по трем осям; 4) отсутствуют работы и публикации, описывающие практические результаты идентификации с использованием оцифрованных результатов МСВ.

Третий блок методики включает формулировку и решение задачи минимизации скалярной непрерывной целевой функции $f(\vec{x})$ векторного аргумента \vec{x} .

$$\min_{\vec{x} \in \mathbb{R}^l} f(\vec{x}) = \frac{1}{2} \frac{\| [F(\vec{x})] - [\hat{F}] \|_{Fr}^2}{\| [\hat{F}] \|_{Fr}^2}, \quad (4)$$

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

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

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

$$[F(\vec{x})] = \sum_{i=1}^m \phi_i(\vec{x}) \phi_i(\vec{x})^T, \quad [\hat{F}] = \sum_{j=1}^{\hat{m}} \hat{\phi}_j \hat{\phi}_j^T, \quad \| [\hat{F}] \|_{Fr} = \sqrt{\sum_{i,j}^N \hat{F}_{ij}}$$

где \vec{x} – вектор параметров состояния системы, $x_k \in \vec{x}$, $\vec{x} \in \mathbb{R}^l$; x_{0k} – априорно задан-

ное (стартовое, проектное) значение параметра системы, $x_{0k} \in \vec{x}_0$; $\omega_i(\vec{x})$, $\phi_i(\vec{x})$ – расчетная i -ая круговая частота и собственный вектор КЭМ; l – количество выделенных приоритетных компонент минимизации, $l < p$; $[F(\vec{x})]$, $[\hat{F}]$ – 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.

Цель минимизации – найти конфигурацию глобальной матрицы $[K(\vec{x}^*)] \approx [\hat{K}]$, удовлетворяющую условиям (4) с учетом выявленной по результатам динамических измерений порции $(\hat{\omega}_j, \hat{\phi}_j)$, $j = 1, \dots, \hat{m}$, порции соответствующих собственных пар значимой части спектра КЭМ (ω_i, ϕ_i) , $i = 1, \dots, m$ и априорных матриц $[K_0]$, $[M_0]$.

Вектор параметров состояния механической системы \vec{x}

$$\begin{aligned} \vec{E}_i &= \{E_1, E_2, \dots, E_k, \dots, E_p\}^T, \quad E_k = 2,0 \cdot 10^{x_k} \text{ Па}, \quad E_{0k} = 2,0 \cdot 10^{11} \text{ Па}, \\ \vec{x}_i &= \{x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_p\}^T, \quad x_k = \lg \frac{E_k}{E_{0k}} + x_{0k}, \quad x_{0k} = 11, \end{aligned} \quad (5)$$

где E_k – k -й параметр системы, значение модуля Юнга выбранного в рамках рассматриваемой гипотезы КЭ; x_k – k -й параметр системы, показатель по основанию 10 (“порядок”) значения модуля Юнга выбранного КЭ. При анализе стальных конструкций использованы проектные значения $E_{0k} = 2,0 \cdot 10^{11}$ Па, $x_{0k} = 11$. Вектор \vec{x} реализует изменения параметров жесткости в рамках выбранного набора гипотез.

Допущения. Д1) Идентифицируются жесткостные характеристики линейной системы (1) без демпфирования. Д2) Ансамбль $[M]$ считается постоянным и известным. Несоответствие двух наборов частот / форм собственных колебаний преодолевается изменением ансамбля $[K(\vec{x})]$ относительно проектной (стартовой) конфигурации $[K_0] = [K(\vec{x}_0)]$. Д3) Набор изменяемых конечных элементов (КЭ) определяется набором априорно заданных гипотез. Изменение жесткости k -ого конструктивно-го элемента увязывается с изменением значения модуля Юнга отдельного характерного КЭ, составляющего конструкцию. Выбор конкретного КЭ зависит от специфики исследования, выполняется на этапе формирования набора гипотез.

Критерий идентификации дефекта: достоверные значительные изменения параметров жесткости системы порождают значительные изменения зависимых параметров – целевой функции, набора МАС, набора частот значимой части спектра. Для отображения меры соответствия векторов форм собственных колебаний $\phi_i(\vec{x})$ и $\hat{\phi}_j$, а также для предварительной селекции векторов использован критерий $MAC_{ij} \in [0,1]$,

$$MAC_{ij} = \cos^2(\phi_i(\vec{x}), \hat{\phi}_j) = (\phi_i^T \cdot \hat{\phi}_j)^2 / (\phi_i^T \cdot \phi_i \cdot \hat{\phi}_j^T \cdot \hat{\phi}_j). \quad (6)$$

Аналитическая производная целевой функции по параметру системы x_k

При решении задачи нелинейного программирования методом SQP предусмотрено аналитическое вычисление градиента $\nabla f(\vec{x})$. Производные ϕ'_{i,x_k} , $i = 1, \dots, m$, вычисляются аналитически, по итерационному алгоритму Zhang–Zerva (1996).

$$\nabla f(\vec{x}) = \left\{ \frac{\partial f(\vec{x})}{\partial x_1}, \frac{\partial f(\vec{x})}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f(\vec{x})}{\partial x_k}, \dots, \frac{\partial f(\vec{x})}{\partial x_p} \right\}, \quad (7)$$

$$f'_{x_k} = \frac{\partial f(\vec{x})}{\partial x_k} = \frac{1}{\|[\hat{F}]\|_{Fr}^2} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (F(\vec{x}) - \hat{F})_{ij} \left(\frac{\partial F(\vec{x})}{\partial x_k} \right)_{ij} \right], \quad (8)$$

$$\frac{\partial [F(\vec{x})]}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \sum_{i=1}^m \phi_i(\vec{x}) \phi_i^T(\vec{x}) = \sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial \phi_i}{\partial x_k} \phi_i^T + \phi_i \frac{\partial \phi_i^T}{\partial x_k} \right]. \quad (9)$$

Предложен и показал свою эффективность алгоритм выделения приоритетных компонент минимизации. Для выделения используется дополнительная функция $\Pi(\vec{x})$ и градиент $\nabla \Pi(\vec{x}_0)$, который рассматривается совместно с $\nabla f(\vec{x}_0)$.

$$\Pi(\vec{x}) = \frac{1}{\beta} \sum_{j=1}^{\hat{m}} \hat{\phi}_j^T [K(\vec{x})] \hat{\phi}_j, \quad \nabla \Pi(\vec{x}) = \left\{ \frac{\partial \Pi(\vec{x})}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial \Pi(\vec{x})}{\partial x_p} \right\}, \quad (10)$$

$$\Pi'_{x_k} = \frac{\partial \Pi(\vec{x})}{\partial x_k} = \frac{1}{\beta} \sum_{j=1}^{\hat{m}} \hat{\phi}_j^T \frac{\partial [K(\vec{x})]}{\partial x_k} \hat{\phi}_j, \quad [K]'_{x_k} = \frac{\partial [K(\vec{x})]}{\partial x_k} = \frac{\partial [K]}{\partial E_k} \cdot \frac{\partial E_k}{\partial x_k}. \quad (11)$$

Приоритетные компоненты минимизации – набор компонент вектора состояния механической системы \vec{x} , выявляемый путем сопоставления градиентов $\nabla f(\vec{x}_0)$ и $\nabla \Pi(\vec{x}_0)$, для вариантного исследования наиболее существенных изменений свойств системы и преодоления общей параметрической избыточности проблемы идентификации свойств современных многоэлементных конструкций. Выделение компонент выполняется на старте минимизации.

Для решения задачи (4) выбран метод SQP – один из эффективных методов нелинейного программирования с ограничениями различного вида. Использована реализация алгоритма в ПО *MATLAB*. В качестве основного ПК выбран промышленный, верифицированный в РААСН ПК *ANSYS Mechanical*, в полной мере удовлетворяющий требованиям методики. Автором разработан программный модуль, позволяющий использовать связку указанных программ, формировать пары $(\hat{\omega}_j, \hat{\phi}_j)$, вычислять необходимые параметры, векторы и матрицы для итерационной процедуры минимизации (в т. ч. $[K]'_{x_k}$, λ'_{i,x_k} , ϕ'_{i,x_k} , $\nabla f(\vec{x}_n)$, $\nabla \Pi(\vec{x}_0)$), накапливать численную информацию о решении, обрабатывать результаты. Разработка и верификация методики проводилась на базе НИУ МГСУ (2011–2015 гг.) и НИЦ СтаДиО (2015–2019 гг.).

В третьей главе приведены результаты верификации методики на стенде «Конструктор» (НИУ МГСУ). 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 болтового соединения фланцев друг с другом и с опорными двутаврами использованы стальные “кубики” $60 \times 60 \times 60$ мм. Расстояние м/д геометрическими центрами “кубиков” составляет 500 мм.

В рамках серии из двух экспериментов по МСВ предусматривалась фиксация исходного “проектного” варианта и намеренно поврежденного варианта (разрыв стального стержня в нижнем поясе консоли). Выбранная схема измерений – регулярная сетка из 20-ти точек в узлах стенда. Особенностью стенда и организованных экспериментов является чувствительность значимой части спектра к вносимому намеренному повреждению (рис. 2).

Идентификация заданных состояний проведена с использованием адаптивной пространственной КЭМ (рис. 3). На один стержень стенда приходится 8 КЭ.

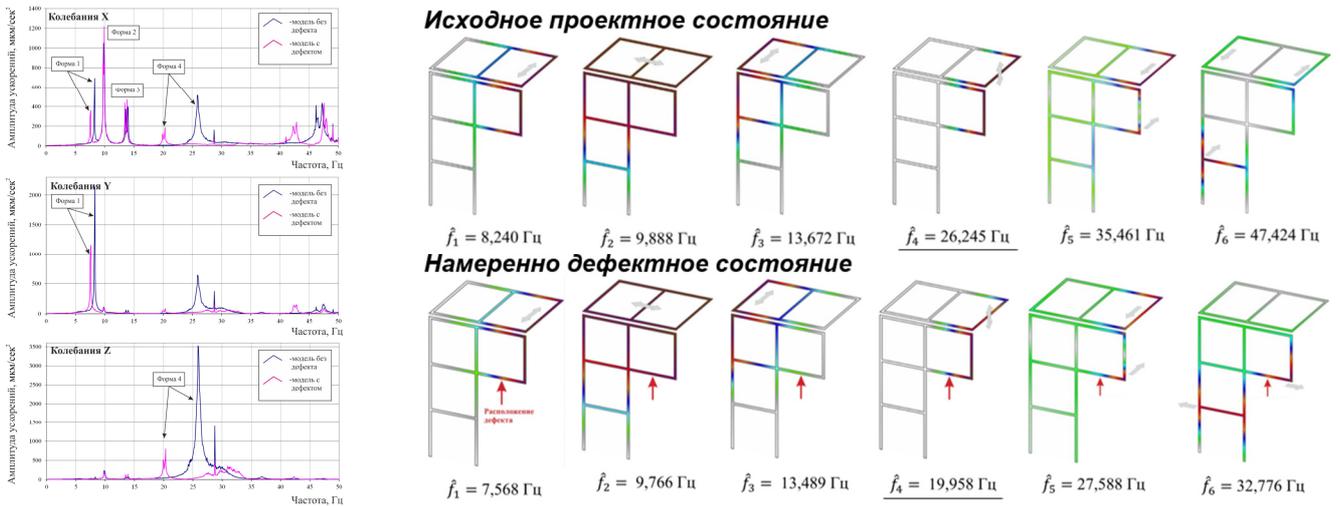
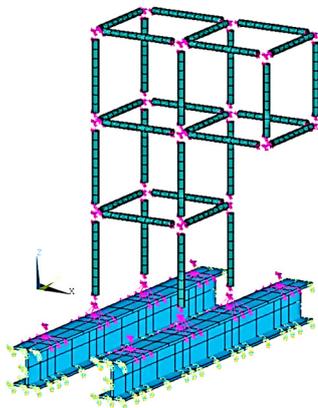


Рис. 2. Частоты / формы собственных колебаний стенда «Конструктор» по MSC. Наблюдается ожидаемое смещение спектра влево при повреждении стержня.

Стальные стержни кругового сечения моделируются стержневыми КЭ *BEAM44* с дискретизацией элементами длиной 50 мм. Элемент реализует формулировку трехмерной упругой балки (растяжение/сжатие, кручение, изгиб, сдвиг), состоит из трех узлов (включая узел ориентации). Стальные двутавры основания заданы четырехугольными КЭ *SHELL43*. Элемент реализует формулировку оболочки Кирхгофа–Лява. Инерционные характеристики узлов стенда (фланцы стержней, “кубики”, акселерометры) отражены в КЭМ элементами *MASS21*. Узлы приняты жесткими, отражены в КЭМ набором абсолютно жестких вставок. Кинематические ограничения в виде жесткого защемления приняты для узлов нижней полки и торцов опорных двутавров.



Характеристика	КЭМ
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 КЭМ (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

Рис. 3. КЭМ стенда «Конструктор». Общий вид и основные характеристики.

Результаты модального анализа исходного состояния двух вариантов КЭМ (рис. 4, 5) показывают практическую идентичность значимой части спектра моделей и удовлетворительное соответствие с результатами эксперимента (до 10%). Для компонент векторов форм единого уровня зашумления не выявлено.

Для формирования вектора \vec{x} используется следующая гипотеза: жесткость EJ каждого стержня определяется модулем Юнга k -го конечного элемента E_k , который связан с параметром системы x_k соотношением $E_k = 2,0 \cdot 10^{x_k}$ Па. Для исследования стандартной КЭМ 1776 степеней свободы (degrees of freedom, DOF) вектор \vec{x} сформирован из КЭ, локализованных по центру стержней стенда, по принципу 1 КЭ для одного стержня. Данный набор КЭ формирует набор f -гипотез. Для анализа функции $\Pi(\vec{x})$ и рационального преодоления противоречий в структуре $[\hat{\Phi}]$ и $[K]_{x_k}'$ рассматривался

другой набор КЭ, элементы которого локализованы у точек измерений эксперимента, по принципу 2 КЭ для одного стержня (набор П-гипотез).

На основании анализа градиентов $\nabla f(\vec{x}_0)$ и $\nabla \Pi(\vec{x}_0)$ на этапе старта процедуры минимизации выделены приоритетные компоненты (рис. 6).

Общий вид вектора формы КЭМ						
1776 DOF	8,650	10,784	14,424	28,168	37,379	49,401
МСВ	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

Рис. 4. Частоты собственных колебаний (Гц) значимой части спектра двух вариантов КЭМ стенда «Конструктор». Исходное (проектное) состояние.

Общий вид вектора формы КЭМ						
1776 DOF	7,938	10,743	14,276	21,495	30,207	34,472
МСВ	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

Рис. 5. Частоты собственных колебаний (Гц) значимой части спектра двух вариантов КЭМ стенда «Конструктор». Намеренно дефектное состояние.

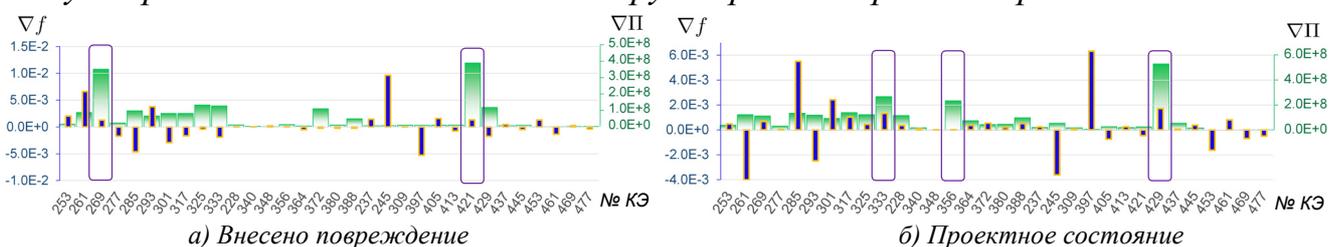


Рис. 6. Выделение приоритетных компонент для вариантов КЭМ «Конструктор».

Для двух состояний стенда решены задачи нелинейного программирования с ограничениями (4) с использованием адаптивной пространственной КЭМ стенда «Конструктор». Основные параметры и результаты процедуры минимизации (4) собраны в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 7. Для предварительной селекции векторов форм собственных колебаний использован критерий МАС.

При рассмотрении стенда с внесенным в конструкцию дефектом идентифицировано полное повреждение (разрыв) стержня стенда с использованием предложенного алгоритма выделения приоритетных компонент. Значимое снижение жесткости ($E_{KЭ269} = 0$ ГПа) для КЭ 269 влечет изменение $f(\vec{x})$ на 29% и повышение суммарного параметра МАС на 37%. Для исходного проектного состояния стенда выявлено меньшее изменение $f(\vec{x})$ (5%) и умеренное повышение суммарного параметра МАС на 12%. Наблюдаемые для исходного состояния изменения параметров жесткости с большой вероятностью увязаны с погрешностями данных эксперимента.

Попытка идентификации намеренно дефектного состояния стенда для полного вектора $\vec{x} \in \mathbb{R}^{32}$ приводит к грубым ошибкам локализации дефекта и, как следствие, неверной оценке жесткости конструкции.

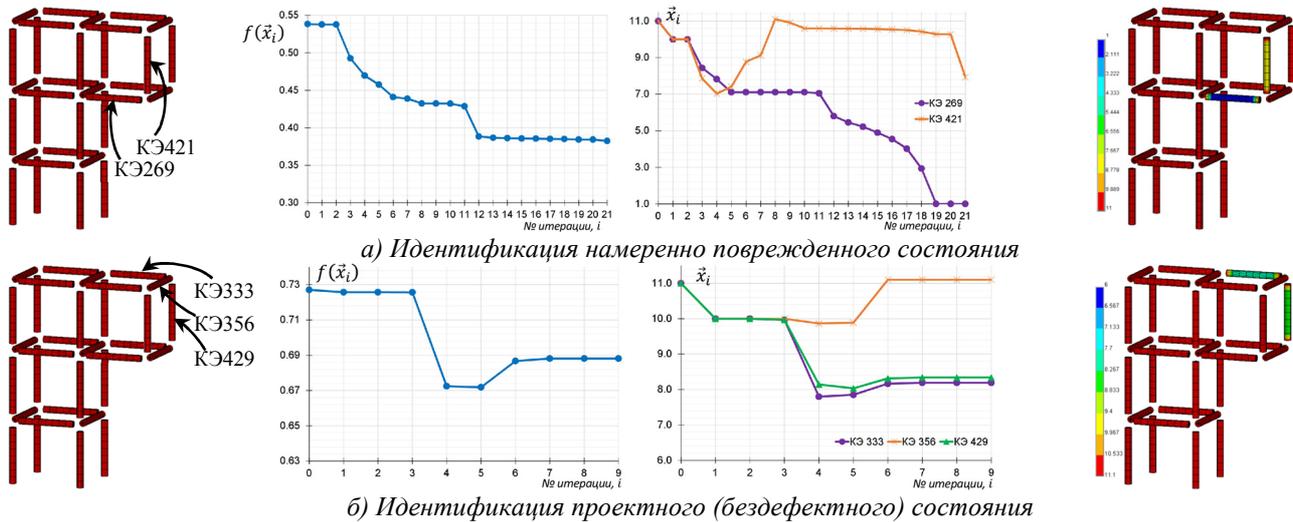


Рис. 7. Иллюстрации результатов идентификации. КЭМ 1776 DOF.

Табл. 1. Идентификация заданных состояний стэнда «Конструктор». КЭМ 1776 DOF

Параметр	Внесен дефект, алг-м приор. напр.	Внесен дефект, полный вектор	Проектное состояние, алг-м приор. напр.	Проектное состояние, полный вектор
Количество собственных пар	2 пары: (ω_2, ϕ_2), (ω_4, ϕ_4), ($\hat{\omega}_2, \hat{\phi}_2$), ($\hat{\omega}_4, \hat{\phi}_4$)	2 пары: (ω_2, ϕ_2), (ω_4, ϕ_4), ($\hat{\omega}_2, \hat{\phi}_2$), ($\hat{\omega}_4, \hat{\phi}_4$)	3 пары: (ω_2, ϕ_2), (ω_3, ϕ_3), (ω_4, ϕ_4), ($\hat{\omega}_2, \hat{\phi}_2$), ($\hat{\omega}_3, \hat{\phi}_3$), ($\hat{\omega}_4, \hat{\phi}_4$)	3 пары: (ω_2, ϕ_2), (ω_3, ϕ_3), (ω_4, ϕ_4), ($\hat{\omega}_2, \hat{\phi}_2$), ($\hat{\omega}_3, \hat{\phi}_3$), ($\hat{\omega}_4, \hat{\phi}_4$)
Старт. значение $f(\vec{x}_0)$	0,5383	0,5383	0,7271	0,7271
Кол-во компонент	2, $\vec{x} \in \mathbb{R}^2$	32, $\vec{x} \in \mathbb{R}^{32}$	3, $\vec{x} \in \mathbb{R}^3$	32, $\vec{x} \in \mathbb{R}^{32}$
Допустимое отклонение $\Delta f, \varepsilon_f$	1E-07	1E-07	1E-07	1E-07
Кол-во итераций (время расчета)	21 (7 мин.)	15 (37 мин.)	9 (9 мин.)	70 (1 ч. 57 мин.)
«Флаг» завершения процесса минимизации	5, получено решение с заданной точностью	5, получено решение с заданной точностью	5, получено решение с заданной точностью	5, получено решение с заданной точностью
Результат минимизации	$f(\vec{x}^*) = 0,3825$ (-29%) ХКЭ269 = 1,0 ХКЭ421 = 7,9	$f(\vec{x}^*) = 0,4878$ (-9%) ХКЭ245 = 7,7 ХКЭ261 = 8,8 ХКЭ269 = 9,8 ХКЭ293 = 9,8 ХКЭ253 = 10,4 ...	$f(\vec{x}^*) = 0,6881$ (-5%) ХКЭ333 = 8,2 ХКЭ356 = 11,1 ХКЭ429 = 8,3	$f(\vec{x}^*) = 0,7019$ (-3%) ХКЭ397 = 8,5 ХКЭ388 = 9,6 ХКЭ364 = 10,0 ХКЭ333 = 10,3 ХКЭ228 = 10,3 ...
Параметры MAC	$MAC(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,701$ (+1,3%) ... $MAC_{SUM} = 1,261$ (+37%)	$MAC(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,693$ (+0,1%) ... $MAC_{SUM} = 0,922$ (+0,4%)	$MAC(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,159$ (+0,5%) ... $MAC_{SUM} = 0,943$ (+12%)	$MAC(\phi_2, \hat{\phi}_2) = 0,156$ (-0,9%) ... $MAC_{SUM} = 0,888$ (+5,6%)
Значения частот собственных колебаний КЭМ, Гц	7,897 Гц (4,4%) 10,692 Гц (9,5%) 14,226 Гц (5,5%) 20,350 Гц (2,0%) 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%)	8,607 Гц (4,5%) 10,764 Гц (8,9%) 14,417 Гц (5,4%) 26,245 Гц (0,0%) 34,541 Гц (2,6%)	8,257 Гц (0,2%) 10,538 Гц (6,6%) 14,201 Гц (3,9%) 26,245 Гц (0,0%) 35,384 Гц (0,2%)
Результат идентификации	Идентифицирован дефект ($E_{КЭ269} = 0$ ГПа)	Заданный дефект не идентифицирован	Дефекты не идентифицированы	Дефекты не идентифицированы

В четвертой главе приведены результаты верификация методики на стэнде «Этажерка» (НИУ МГСУ). Стенд – пространственная регулярно-ортогональная рама с шагом 400 мм. Стержни рамы выполнены в виде стальных квадратных труб $20 \times 20 \times 1,2$ мм, соединения сварные. “Перекрытия”, образующие 5 уровней, выполнены в виде стальных листов $400 \times 800 \times 2$ мм, крепятся на болтах. Рама шарнирно оперта на стальные, массивные, развитые по высоте стойки сложной конфигурации.

Серия динамических экспериментов включала исследование трех вариантов состояния стэнда: исходный проектный, с удаленной угловой приопорной стойкой (1-й вариант дефекта) и с удаленной средней приопорной стойкой (2-ой вариант дефекта). Выбранная схема измерений – регулярная сетка точек 5×3 для каждого

уровня. Особенностью стенда является нечувствительность значимой части спектра к вносимому намеренному повреждению, что демонстрируется сопоставлением полученных экспериментально частот / форм собственных колебаний (рис. 8).

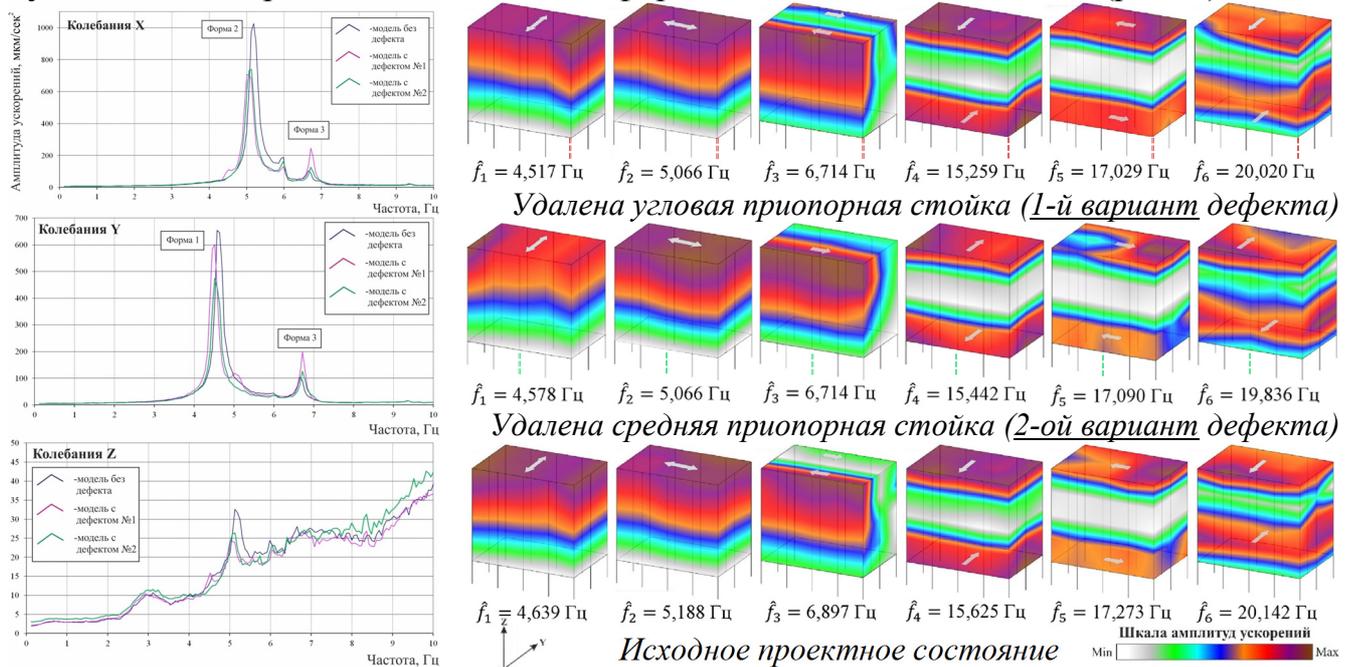


Рис. 8. Частоты / формы собственных колебаний стенда «Этажерка».

Идентификация заданных состояний проводится с использованием адаптивной пространственной КЭМ (рис. 9). 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 КЭМ элементами *MASS21*. Кинематические ограничения в виде шарнирного закрепления приняты для нижних узлов приопорных стоек.

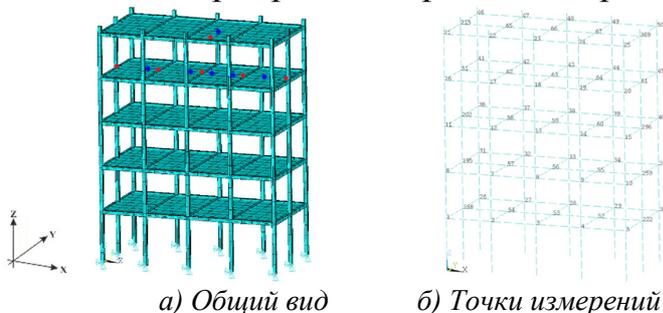


Рис. 9. КЭМ стенда «Этажерка». Общий вид и основные характеристики.

Характеристика	Значение
Количество КЭ	1420
Количество узлов	
– всего	981
– с кинематическими ограничениями	12
Количество степеней свободы КЭМ (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

Результаты модального анализа заданных состояний КЭМ (табл. 2) показывают практическую идентичность и удовлетворительное соответствие с результатами эксперимента (до 10%) для значимой части спектра до 19 Гц.

Для формирования вектора \vec{x} используется следующая гипотеза: жесткость EJ каждого вертикального стержня определяется модулем Юнга k -го конечного элемента E_k , который связан с параметром системы x_k соотношением $E_k = 2,0 \cdot 10^{x_k}$ Па. Для исследования КЭМ вектор \vec{x} сформирован из КЭ, локализованных по центру стержней стенда, по принципу 1 КЭ для одного стержня. Данный набор КЭ формирует набор f -гипотез. Для анализа дополнительной функции $\Pi(\vec{x})$ сформирован другой набор КЭ, элементы которого локализованы у точек измерений эксперимента, по принципу 2 КЭ для одного вертикального стержня (набор Π -гипотез).

Табл. 2. Сопоставление вычисленных и выявленных экспериментально частот собственных колебаний значимой части спектра стелла «Этажерка», Гц

Общий вид вектора формы КЭМ						
	1-ая пара	2-ая пара	3-ая пара	4-ая пара	5-ая пара	6-ая пара
а) Исходное проектное состояние						
КЭМ	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
$\delta_1, \%$	-1,20%	-5,36%	-5,88%	9,82%	7,55%	18,26%
б) Удалена угловая приопорная стойка (1-й вариант дефекта)						
КЭМ	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
$\delta_2, \%$	-3,25%	-6,41%	-7,22%	9,08%	6,95%	17,27%
в) Удалена средняя приопорная стойка (2-ой вариант дефекта)						
КЭМ	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
$\delta_3, \%$	-1,82%	-6,32%	-3,98%	9,92%	7,52%	19,27%

На основании анализа градиентов $\nabla f(\vec{x}_0)$ и $\nabla \Pi(\vec{x}_0)$ на этапе старта процедуры минимизации выделены приоритетные компоненты на основе структурного сопоставления набора КЭ, соответствующих 10 максимальным значениям $\nabla f(\vec{x}_0)$, и набора КЭ, соответствующих 10 максимальным значениям $\nabla \Pi(\vec{x}_0)$. Если соответствующие КЭ стержня попадают в обе выборки, компоненты принимаются приоритетным.

Для трех зафиксированных состояний решены задачи нелинейного программирования с ограничениями (4) с использованием адаптивной пространственной КЭМ стелла «Этажерка». Основные параметры и результаты процедуры минимизации (4) собраны в табл. 3 и проиллюстрированы на рис. 10. Для отображения соответствия векторов форм собственных колебаний, а также для предварительной селекции форм использован критерий МАС.

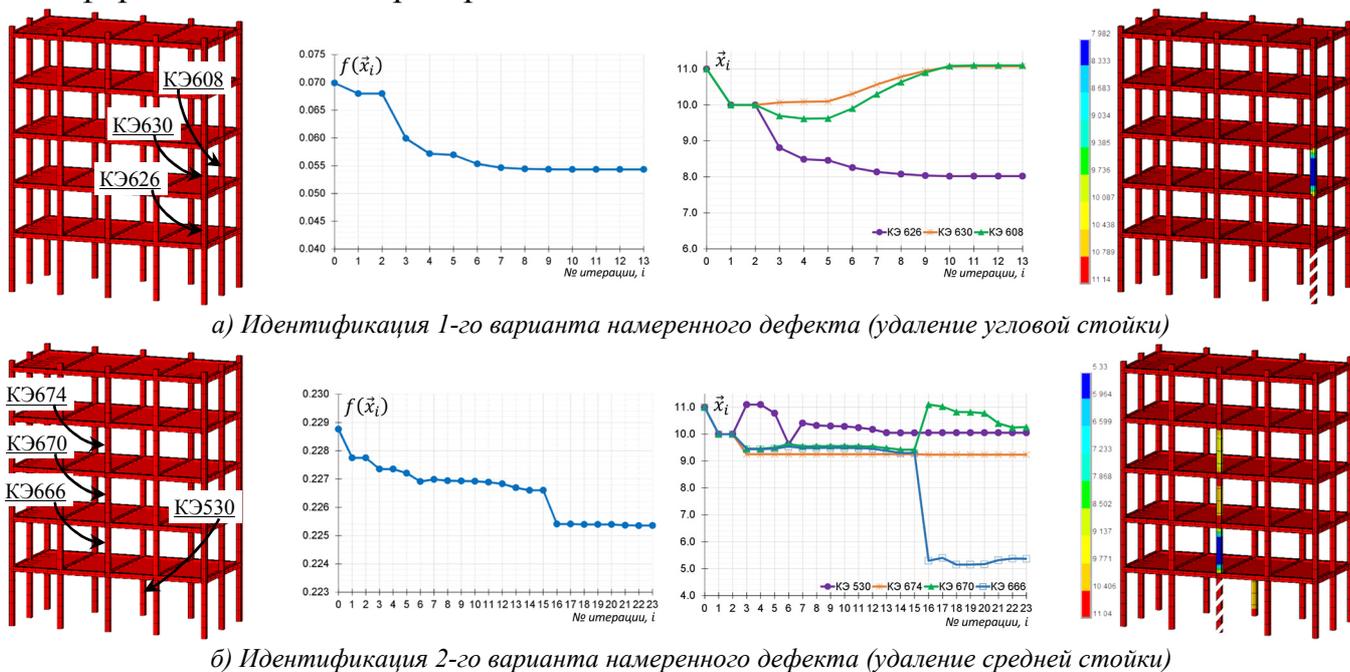


Рис. 10. Иллюстрация идентификации заданных состояний стелла «Этажерка».

При рассмотрении стелла с внесенным в конструкцию дефектом по 1-му варианту модель показывает полное повреждение (разрыв) вертикального стержня стелла.

да для поврежденной “колонны”. Дефект расположен выше второго уровня стенда, что является ошибкой локализации по высоте. Наблюдается значимое снижение жесткости до 8,0 для КЭ 626, которое сопровождается значимым изменением целевой функции (-22%) и повышением параметра МАС на 1,6%.

При рассмотрении стенда с внесенным в конструкцию дефектом по 2-му варианту разрыв вертикального стержня стенда не идентифицирован. Наблюдается значимое снижение жесткости для КЭ 666 и КЭ 674, которое сопровождается незначительным изменением целевой функции (-1,5%) и ничтожным повышением суммарного параметра МАС на 0,1%. Также наблюдается ошибка идентификации по высоте стенда. Для идентификации дефекта нужны дополнительные исследования.

Для проектного состояния модель показывает умеренное снижения жесткости для КЭ 608 и КЭ 612, которые сопровождаются незначительным изменением целевой функции (-0,7%) и ничтожным повышением суммарного параметра МАС на 0,1%.

Табл. 3. Идентификация заданных состояний стенда «Этажерка»

Параметр	Дефект №1, алг-м приор. н.	Дефект №1, полный вектор	Дефект №2, алг-м приор. н.	Дефект №2, полный вектор	Проект, алг-м приор. н.	Проект, полный вектор
Количество собственных пар	3 пары: 1, 2, 4	3 пары: 1, 2, 4	4 пары: 1, 2, 4, 5	4 пары: 1, 2, 4, 5	4 пары: 1, 2, 4, 5	4 пары: 1, 2, 4, 5
Начальное значение $f(\vec{x}_0)$	0,0699	0,0699	0,2288	0,2288	0,2026	0,2026
Кол-во компонент	3	60	4	60	5	60
Допустимое отклонение $\Delta f, \varepsilon_f$	1E-06	1E-06	1E-07	1E-07	1E-07	1E-07
Кол-во итераций (время расчета)	13 (10 мин.)	101 (13 ч. 35 мин.)	23 (23 мин.)	118 (18 ч. 3 мин.)	4 (5 мин.)	50 (8 ч. 32 мин.)
"Флаг" завершения	5	5	5	5	5	0
Результат минимизации	$f(\vec{x}^*) =$ 0,054(-22%) $x_{КЭ626} = 8,0$ $x_{КЭ630} = 11,07$ $x_{КЭ608} = 11,1$	$f(\vec{x}^*) =$ 0,0530 (-24%) $x_{КЭ622} = 8,0$ $x_{КЭ473} = 9,2$ $x_{КЭ626} = 9,9$ $x_{КЭ608} = 10,0...$	$f(\vec{x}^*) =$ 0,2254 (-1,5%) $x_{КЭ666} = 5,4$ $x_{КЭ674} = 9,2$ $x_{КЭ530} = 10,1$ $x_{КЭ670} = 10,3$	$f(\vec{x}^*) =$ 0,22473 (-1,8%) $x_{КЭ674} = 7,1$ $x_{КЭ644} = 9,5$ $x_{КЭ612} = 9,6$ $x_{КЭ502} = 10,0...$	$f(\vec{x}^*) =$ 0,2012 (-0,7%) $x_{КЭ608} = 9,8$ $x_{КЭ612} = 9,9$ $x_{КЭ604} = 10,0$ $x_{КЭ530} = 10,8$	$f(\vec{x}^*) =$ 0,1994 (-1,6%) $x_{КЭ608} = 9,1$ $x_{КЭ604} = 9,7$ $x_{КЭ652} = 9,8$ $x_{КЭ674} = 9,9$
Параметры МАС	$MAS(\phi_1, \hat{\phi}_1) =$ 0,966 (+0,9%) ... $MAS_{SUM} =$ 2,841 (+1,6%)	$MAS(\phi_1, \hat{\phi}_1) =$ 0,976 (+2,0%) ... $MAS_{SUM} =$ 2,861 (+2,3%)	$MAS(\phi_1, \hat{\phi}_1) =$ 0,960 (-0,1%) ... $MAS_{SUM} =$ 3,307(+0,1%)	$MAS(\phi_1, \hat{\phi}_1) =$ 0,963 (+0,2%) ... $MAS_{SUM} =$ 3,312 (+0,3%)	$MAS(\phi_1, \hat{\phi}_1) =$ 0,977 (0,0%) ... $MAS_{SUM} =$ 3,412 (+0,1%)	$MAS(\phi_1, \hat{\phi}_1) =$ 0,978 (+0,1%) ... $MAS_{SUM} =$ 3,417 (+0,3%)
Значения частот собственных колебаний, Гц	4,559 (0,9%) 4,907 (3,1%) 6,489 (3,4%) 16,879 (10,6%) 18,381 (7,9%)	4,542 (0,6%) 4,909 (3,1%) 6,497 (3,2%) 16,715 (9,5%) 18,200 (6,9%)	4,537 (0,9%) 4,815 (5,0%) 6,465 (3,7%) 17,048 (10,4%) 18,164 (6,3%)	4,578 (0,0%) 4,909 (3,1%) 6,505 (3,1%) 16,864 (9,2%) 18,059 (5,7%)	4,569 (1,5%) 4,910 (5,4%) 6,497 (5,8%) 17,110 (9,5%) 18,646 (7,9%)	4,523 (2,5%) 4,876 (6,0%) 6,404 (7,2%) 16,638 (6,5%) 18,186 (5,3%)
Результат идентификации	Выявлен дефект ($E_{КЭ626} = 0,2$ ГПа)	Выявлен дефект ($E_{КЭ622} = 0,2$ ГПа)	Внесенный дефект не выявлен	Внесенный дефект не выявлен	Дефекты не выявлены	Дефекты не выявлены

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. По результатам аналитического обзора существующих методик идентификации параметров жесткости конструктивных элементов конечноэлементных моделей уточнены цель и задачи исследования, формализованы требования к методике.

2. Разработана методика идентификации жесткостных свойств произвольных пространственных конструкций. Методика программно реализована для стержневых элементов, как важного частного случая. Методику выделяет использование полученных численно и найденных экспериментально частот и форм собственных коле-

баний (с учетом значимых критериев сравнения), оригинальная формулировка эквивалентной задачи минимизации, применение универсальных многодисциплинарных программных средств (*ANSYS Mechanical, MATLAB*) и всесторонний анализ результатов идентификации. Подход естественным образом распространяется на идентификацию характеристик других типов конструкций (оболочечных, объемных).

3. Предложена и показала свою эффективность схема выделения приоритетных компонент минимизации, позволяющая сокращать размерность вектора параметров состояния механической системы без потери значимых результатов идентификации.

4. В качестве инструментального метода выявления частот / форм собственных колебаний экспериментальных стендов выбран и впервые апробирован для целей идентификации в оцифрованном варианте метод стоячих волн.

5. Верификация методики выполнена для двух конструктивно различных экспериментальных стендов «Конструктор» (преимущественно стержневая КЭ-модель) и «Этажерка» (плитно-стержневая КЭ-модель). Качество идентификации механической системы зависит от количества используемых точек динамических измерений, точности определения компонент векторов форм собственных колебаний (в первую очередь, выявленных инструментально) и доступной для исследования части спектра собственных частот.

6. Выполнена идентификация четырех из пяти контролируемых состояний стендов. Для стенда «Конструктор» идентифицировано намеренно дефектное (наличие, расположение и “глубина” дефекта) и бездефектное проектное состояние. Для стенда «Этажерка» идентифицировано намеренно дефектное (наличие и “глубина” дефекта) и бездефектное проектное состояние. В части локализации повреждения для стенда «Этажерка» корректно определена поврежденная “колонна”, однако присутствует ошибка локализации по высоте (уровню) выделенной “колонны”.

7. Предложенные для идентификации три намеренно дефектных состояния стендов характеризуются разрывом отдельных стержней стенда, однако обладают различным влиянием на исследуемую часть спектра собственных частот. Расчетные исследования показывают, что наиболее сложный случай повреждения может быть идентифицирован при исследовании расширенной частотной области, включающей более высокие частоты / формы собственных колебаний.

8. Предложенная методика реализует практическую потребность в разработке математически формализованных методов идентификации конструктивных повреждений и дефектов, множество вариантов которых рассматривается в виде изменений параметров жесткости конечных элементов локальной зоны.

9. Верификация методики на двух реальных, конструктивно различных стендах обеспечивает переход к исследованию большиеразмерных зданий и сооружений.

10. Среди направлений совершенствования методики следует выделить подход рационального сокращения точек (объема) измерений, использование дополнительных типов конечных элементов (оболочечных, объемных и пр.), разработку схемы регуляризации, повышающей качество и “контрастность” результатов идентификации, отказ от допущения равенства параметров инерционных характеристик расчетной модели и инерционных свойств объекта, а также адаптацию методики для суперэлементного подхода.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Белостоцкий А.М., Новиков П.И. Идентификация действительных инерционно-жесткостных свойств конструктивных элементов адаптируемых конечно-элементных моделей зданий и сооружений. Состояние проблемы и пути решения // International Journal for Computation Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций). – 2013. – Т. 9. – № 4. – С. 107-118. **(ВАК)** (*непереводная версия: Identifying Real Stiffness Properties of Structural Elements of Adapted Finite-Element Models of Buildings and Structures. Part 1: Problem Setting / Pavel I. Novikov // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 670-671. – Pp. 732-735 (Scopus)*)
2. Белостоцкий А.М., Новиков П.И. Идентификация действительных жесткостных свойств конструктивных элементов адаптируемых конечно-элементных моделей зданий и сооружений. Часть 1: Основы расчетно-экспериментальной методики // International Journal for Computation Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций). – 2014. – Т. 10. – № 3. – С. 49-55. **(ВАК)** (*непереводная версия: Identifying real stiffness properties of structural elements of adapted finite-element models of buildings and structures: Part 2: Computational-experimental methodology / A.M. Belostotskiy, P.I. Novikov // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 670-671. – Pp. 736-741 (Scopus)*)
3. Белостоцкий А.М., Новиков П.И. Идентификация действительных жесткостных свойств конструктивных элементов адаптируемых конечно-элементных моделей зданий и сооружений. Часть 2: Апробация расчетно-экспериментальной методики // International Journal for Computation Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций). – 2014. – Т. 10. – № 3. – С. 56-63. **(ВАК)** (*непереводная версия: Identifying real stiffness properties of structural elements of adapted finite-element models of buildings and structures: Part 3: Approbation of experimental methodology / P.I. Novikov, A.M. Belostotskiy // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 670-671. – Pp. 742-746 (Scopus)*)
4. Новиков П.И. Численно-аналитическая методика идентификации параметров жесткости пространственных конструкций на основе минимизации различия расчетных (конечноэлементных) и натуральных динамических характеристик // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18. – № 3. – С. 64-71. **(ВАК)**
5. Белостоцкий А.М., Новиков П.И., Бах А.А., Красников А.А. Апробация методики идентификации параметров жесткости пространственных конструкций на экспериментальных стендах // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 44-60. **(ВАК)**
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617551 Российская Федерация. Программный модуль идентификации параметров жесткости пространственных конструкций на основе минимизации различий расчетных и натуральных динамических характеристик (Mechanical system identification module) / П. И. Новиков; заявитель и правообладатель П. И. Новиков. – № 2020616502; заявл. 19.06.2020; опублик. 08.07.2020 г.