

ОТЗЫВ

на диссертацию *Новикова Павла Игоревича* на тему “Идентификация параметров жесткости конечноэлементных моделей конструкций на основе минимизации расхождений расчетных и натуральных динамических характеристик”, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заявленная **цель** представленной диссертации *Новикова Павла Игоревича* – разработка математически формализованной процедуры идентификации параметров жесткости адаптивных математических (конечноэлементных) моделей на базе минимизации расхождений расчетных и натуральных динамических характеристик как основы систем динамического мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений.

Актуальность выбранной темы объясняется интересом к методам контроля технического состояния различных зданий и сооружений, в том числе уникальных высотных и большепролётных, для безопасной эксплуатации которых в настоящее время применяют различные системы мониторинга несущих конструкций. В работе использованы возможности весьма перспективного инструментального сейсмологического метода стоячих волн, который применяется для исследования динамических характеристик верхней части геологических разрезов и различных инженерных сооружений. Метод предназначен для выявления частот и форм собственных колебаний значимой части спектра, что позволяет ставить обратную динамическую задачу интерпретации наблюдаемых динамических свойств и определения местных конструкционных параметров элементов инженерного сооружения.

Для достижения поставленной цели обоснованно поставлены и решены следующие основные **задачи**:

1. Аналитический обзор современных подходов и методов идентификации жесткостных параметров различных конструкций по результатам натурных динамических исследований и экспериментов.

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 для выявления значимых изменений 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.

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.

Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений.

Во *введении* диссертации приводится обоснование актуальности работы, определены предметы, цели и задачи исследований, перечислены основные научные и практические результаты, приведено краткое содержание диссертации по главам.

В *первой главе* дается аналитический обзор современного состояния проблемы идентификации свойств механических систем. Кратко рассмотрены методы решения обратных задач идентификации, методы

минимизации функций многих переменных, современные методы моделирования механических систем. На основе открытых источников дана классификация и критическая оценка существующих методов и подходов к проблеме идентификации на основе натуральных динамических характеристик.

Вторая глава посвящена разработанной численно-аналитической методике идентификации параметров жесткости элементов пространственных конструкций, основанной на детальном пространственном КЭ-моделях исследуемой механической системы. Дан обзор инструментального метода исследования значимой части спектра реального объекта. Рассматриваются вопросы математически формализованной процедуры идентификации: целевая функция и её свойства, формирование параметров состояния механической системы, формулировка задачи нелинейного программирования с ограничениями в виде нелинейных неравенств, алгоритм выявления приоритетных компонент минимизации. Приведено описание применяемого алгоритма нелинейного программирования и реализации методики.

В третьей главе изложены результаты верификации методики на стенде «Конструктор». Рассмотрены проектное и повреждённое состояние стенда, в виде разрыва горизонтального стержня нижнего пояса консольной части. Для инструментального исследования состояний стендов использован метод стоячих волн. Дано описание параметрической КЭ-модели стенда, процедуры и результатов идентификации состояний стенда. Показан удовлетворительный результат идентификации двух состояний стенда. Рассмотрен вопрос оценки погрешностей оцифрованных результатов динамического эксперимента.

Представленные результаты показывают работоспособность методики и предложенной процедуры выделения приоритетных компонент в условиях значимого изменения спектра собственных частот и выраженной потери симметрии одной из форм собственных колебаний. Локализация дефекта и его оценка выполнены корректно.

В четвертой главе представлены результаты верификации методики на стенде «Этажерка. ». Рассмотрены проектное и два повреждённых состояния стенда, каждое из которых характеризуется повреждением одной приопорной вертикальной стойки. Дано описание параметрической КЭ-модели стенда, процедуры и результатов идентификации состояний стенда. Показан в целом удовлетворительный, с точки зрения практики, результат идентификации проектного и повреждённого состояния в виде разрыва угловой стойки.

Представленные результаты показывают ограниченную работоспособность методики в условиях малых изменений спектра собственных частот и наличия погрешностей определения компонент форм собственных колебаний, что проявляется в виде ошибки локализации повреждения по высоте стенда. Локализация повреждения в плане стенда выполнена корректно. Вариант разрыва приопорной стойки у центра стенда выявлен частично и, судя по представленным данным, не удовлетворяет критерию выявления дефекта.

Работа обладает несомненными признаками **научной новизны**. Предложена, теоретически обоснована и верифицирована численно-аналитическая методика идентификации параметров жесткости детальных пространственных КЭ-моделей. Весьма ценно предложенное автором понятие “приоритетных компонент минимизации”, которое позволяет эффективно решать уникальные для отечественной практики динамические задачи параметрической идентификации пространственных многоэлементных статически неопределимых конструкций. Впервые применены в оцифрованном варианте натурные динамические данные в виде частот и векторов форм собственных колебаний, полученные методом стоячих волн для значимой части спектра собственных частот.

Практическая значимость диссертации определяется, прежде всего, доказанной автором возможностью выявления изменений и уточнение параметров жесткостных характеристик подробных КЭ-моделей стендов, как весьма близких аналогов реальных зданий и сооружений. Автором

предложена единая непротиворечивая вычислительно эффективная процедура вариантного исследования параметров жесткости конструктивных элементов. Продемонстрирована возможность применения оцифрованных результатов динамических измерений для исследования фактического состояния пространственных статически неопределимых систем несущих конструкций.

Общая методология работы включает применение современных методов теории минимизации, численных методов строительной механики и актуальных сейсмологических методов исследования инженерных сооружений. Реализация методики выполнена с использованием авторских разработок соискателя, основанных на применении программного комплекса Ansys Mechanical (в части расчетных исследований пространственных КЭ-моделей) и среды Matlab (в части эффективных алгоритмов минимизации скалярной целевой функции векторного аргумента).

Также не вызывает сомнения **достоверность** и **обоснованность** основных положений, выносимых на защиту.

В качестве **замечаний** следует отметить следующее.

1. В обзоре численных методов неудачно выбран общий вид функционала изменения полной потенциальной энергии механической системы для метода конечных элементов.

2. Требуется уточнения критерий идентификации дефекта. Непонятно, как выделить “значительные изменения” от других изменений зависимых параметров, под которыми автор понимает целевую функцию, набор параметров МАС и набор частот собственных колебаний значимой части спектра.

3. Недостаточно четко сформулированы требования к инструментальному методу выявления резонансных частот и соответствующих форм колебаний, что может ложно указывать на применимость лишь использованного метода стоячих волн.

4. Поверхностно описаны устройство и принцип работы двух экспериментальных стендов «Конструктор» и «Этажерка».

5. Не совсем понятен критерий выбора положения и количества точек динамических измерений на несущей конструкции.

Заключение

Указанные замечания имеют, в основном, характер пожеланий по развитию исследований и не снижают безусловной ценности представленной диссертации. Выполненное исследование является законченной научно-квалификационной работой, отвечающей предъявляемым к кандидатским диссертациям требованиям ВАК Российской Федерации. Диссертация обладает внутренним единством, четкой структурой, содержит грамотно оформленные новые научные результаты и положения, имеющей значение для решения важного класса задач параметрической идентификации жесткостных характеристик в наиболее универсальной динамической постановке. Тема диссертации соответствует заявленной научной специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Полученные результаты соответствуют поставленной цели и задачам. Автореферат и опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях ВАК РФ статьи в полной мере отражают основное содержание выполненной диссертационной работы.

Следует отметить высокий уровень квалификации соискателя ученой степени в области численных методов минимизации, строительной механике и механике деформируемого твердого тела. Работа демонстрирует высокий уровень владения современными программными комплексами и инструментальными методами измерений. По теме исследования соискателем опубликовано более пяти работ в рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ по специальности 05.13.18. Три публикации представлены в изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus. Перечень публикаций включает

как завершающие итоговые публикации, так и предварительные поисковые исследования.

Представленная диссертация заслуживает высокой оценки, а ее автор, *Новиков Павел Игоревич*, достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

«25» ноября 2020 г.

Официальный оппонент,
Мелешко Владимир Аркадьевич,
к. т. н., доцент кафедры строительной
механики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный
университет»,
190005, г. Санкт-Петербург
Красноармейская ул., д. 4
+7 (812) 575-05-50,
vl-meleshko@yandex.ru



Подпись Мелешко В. А. за