



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080
office@spbstu.ru

№ _____
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО СПбПУ
член-корреспондент РАН,
д. т. н., профессор

Сергеев В. В.

«21» ноября 2020 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу *Новикова Павла Игоревича*
“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

В представленной на рассмотрение кандидатской диссертации *П. И. Новикова* разработана и верифицирована на серии экспериментов методика идентификации параметров жесткости пространственных конструкций, основанная на минимизации расхождений расчетных и натуральных динамических характеристик.

Актуальность исследования связана с развитием методик численного моделирования зданий и сооружений, сейсмологических методов обследования инженерных сооружений, достижениями прикладной математики и отсутствием в настоящее время достаточно универсальных методик контроля физико-механических свойств конструктивных элементов. Такие процедуры наиболее востребованы для уточнения расчетных параметров конечноэлементных моделей, а также для задач мониторинга, обследования и диагностики состояния

009028

зданий (сооружений). Цель работы – разработка математически формализованной процедуры идентификации параметров жесткости адаптивных конечноэлементных моделей на базе минимизации расхождений расчетных и натурных динамических характеристик как основы систем динамического мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений. 009024

Для достижения поставленной цели диссертантом обоснованно поставлены и решены *задачи*, среди которых:

– аналитический обзор современных подходов и методов идентификации жесткостных параметров конструкций зданий, сооружений, стендов по результатам натурных динамических экспериментов;

– разработка, программная реализация и верификация математически формализованной методики идентификации параметров жесткости конструкций по данным экспериментально определенных динамических характеристик на базе конечноэлементных моделей;

– применение 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 жесткостных характеристик конструкций развернутых на базе НИУ МГСУ стендов «Конструктор» и «Этажерка» с использованием частот и векторов форм собственных колебаний пространственных конечноэлементных моделей и результатов динамических измерений.

Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и трех приложений, изложена на 268 страницах текста и качественно иллюстрирована. Содержание работы включает следующие основные блоки.

Введение – обоснование актуальности работы, степени разработанности темы, определение объекта, предмета, цели и задач исследования, основные научные и практические результаты, краткое содержание диссертации по главам.

Первая глава – обзор современных математически формализованных процедур идентификации изменений и повреждений конструкций. Рассмотрены различные постановки и способы решения различных задач идентификации жесткостных параметров для пространственных многократно статически неопределимых систем.

Вторая глава – основные положения разработанной автором численно-аналитической методики параметрической идентификации пространственных механических систем, включающие расчетные исследования спектра, инструментальное исследование системы с использованием сейсмологического метода стоячих волн, формулировку процедуры нелинейного программирования и гипотез изменения жесткости системы.

Автором предложена постановка задачи нелинейного программирования с ограничениями в виде неравенств для частот собственных колебаний, а также способ для эффективного преодоления параметрической избыточности подробной конечноэлементной модели механической системы за счет априорно задаваемого набора гипотез изменения жесткости элементов конструкций и способа выбора наиболее значимых параметров жесткости системы с точки зрения поиска минимума целевой функции. Предложен критерий идентификации дефекта.

Третья глава – апробация методики на пространственной, симметричной в плане, трехуровневой стальной раме стенда «Конструктор» (развернут в НИУ МГСУ). Рассмотрено два состояния стенда: проектное и намеренно повреждённое, которое характеризуется разрывом горизонтального стального стержня в нижнем поясе консольной части.

Приведенные автором результаты апробации методики показывают хороший результат. В части повреждённого состояния наблюдается точная локализация внесённого повреждения и оценка изменения жесткости элемента

конструкции в виде снижения модуля Юнга с $2,0 \cdot 10^{11}$ Па до 20 Па (полная потеря жесткости стержня). В части бездефектного “проектного” состояния наблюдаются местные вариации параметров жесткости, что, согласно оценке автора, объясняется погрешностями оцифрованных данных эксперимента.

Четвертая глава – апробация методики на пространственной регулярно-ортогональной стальной раме стенда «Этажерка» (развернут в НИУ МГСУ). Рассмотрено три состояния стенда: проектное и два повреждённых, которые характеризуется разрывом вертикальных стальных стержней у основания стенда.

Результаты апробации методики для стенда «Этажерка» показывают удовлетворительный результат, изъянами которого выступают систематические ошибки локализации внесённых повреждений по высоте регулярно-ортогонального каркаса стенда. Ошибки локализации по высоте в целом не снижают общей значимости результатов и могут корректироваться по месту другими методами подробной диагностики состояния конструкций.

В части бездефектного “проектного” состояния наблюдаются местные незначительные вариации параметров жесткости. В части первого повреждённого состояния стенда в виде удаления углового стержня наблюдается ошибка локализации по высоте стенда, локализация по плану стенда выполнена удовлетворительно, разрыв стержня оценивается в виде снижения модуля Юнга с $2,0 \cdot 10^{11}$ Па до $2,0 \cdot 10^8$ Па (потеря 99,9% жесткости конструкции). Приведенные результаты для второго повреждённого состояния иллюстрируют один из недостатков предлагаемой методики – критическую зависимость результатов идентификации от шумов и погрешностей оцифрованных данных эксперимента.

Работа обладает необходимыми признаками **научной новизны**:

- решена серия динамических задач идентификации жесткостных характеристик экспериментальных стендов (как достаточно сложных механических систем) с использованием конечноэлементных моделей и частот и форм собственных колебаний, выявленных по результатам динамических измерений;

- предложена формулировка задачи нелинейного программирования для минимизации расхождений расчетных и измеренных частот и 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 и формы собственных колебаний), полученные методом стоячих волн.

Практическая значимость диссертации определяется, прежде всего, доказанной автором возможностью выявления дефектов локальной зоны отдельных конструктивных элементов с использованием найденных экспериментально частот и форм собственных колебаний. Предложенный вариант параметрической идентификации может быть использован для выявления изменений и уточнения параметров жесткостных характеристик конечноэлементных моделей механических систем, что особенно ценно при расчетном исследовании фактического состояния пространственных систем несущих конструкций, при решении задач мониторинга, обследования и диагностики состояния зданий.

По содержанию диссертационной работы имеются следующие **замечания и предложения:**

1. В предлагаемой методике некорректная обратная динамическая задача идентификации сводится к задаче минимизации погрешности ограниченного набора расчетных и натуральных оцифрованных динамических характеристик. Автором не приводятся доказательства единственности полученных решений.

2. При решении серии динамических задач идентификации жесткостных характеристик двух стендов использован лишь один принцип формирования гипотез изменения жесткости в виде варьирования модулем Юнга одного конечного элемента, расположенного у центра стального стержня. Отсутствует обоснование выбранного принципа и возможность альтернативных вариантов формирования гипотез изменения жесткости.

3. В работе не рассматриваются состояния стендов, предусматривающие повреждения двух и более стержней (как аналогов конструктивных элементов), вследствие чего непонятны возможности методики для идентификации сложных состояний, присущих реальным механическим системам.

Указанные замечания имеют характер пожеланий по дальнейшему развитию работы, не снижают **теоретической и практической значимости** представленной диссертационной работы.

Некоторые возможные **рекомендации по практическому использованию** результатов диссертационной работы:

– достаточно обоснованным представляется переход к исследованию реальных механических систем несущих конструкций зданий на этапе эксплуатации;

– наблюдение за жесткостными и инерционными свойствами несущих конструкций путём исследования и контроля частот и, особенно, форм собственных колебаний целесообразно использовать:

○ при проектировании и эксплуатации различных систем мониторинга, обследования и диагностики несущих конструкций зданий, включая автоматизированный мониторинг состояния несущих конструкций;

○ в качестве основы для валидации параметрических КЭ-моделей цифровых двойников зданий (сооружений).

Заключение

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в полной мере отвечающей требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Работа обладает внутренним единством, содержит

новые научные результаты. Автореферат и публикации автора отражают основное содержание выполненной диссертационной работы.

На основании изложенного считаем, что автор диссертации, *Новиков Павел Игоревич*, достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв составлен профессором Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (далее – ФГАОУ ВО СПбПУ) доктором технических наук Лалиным Владимиром Владимировичем.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института ФГАОУ ВО СПбПУ (протокол № 3 от «18» ноября 2020 г).

« 27 » ноября 2020 г.

Профессор Высшей школы
промышленно-гражданского и
дорожного строительства СПбПУ,
д. т. н.

В. В. Лалин



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого» (ФГАОУ ВО СПбПУ);
адрес 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29;
тел. +7 (812) 775-05-30, email office@spbstu.ru.