

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.01.09
по диссертации Новикова Павла Игоревича
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Диссертация «Идентификация параметров жесткости конечноэлементных моделей конструкций на основе минимизации расхождений расчетных и натурных динамических характеристик» по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 14.10.2020 г. (протокол заседания № 9), диссертационным советом Д ПНИПУ.01.09, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета № 24-О от 03.03.2020 г. в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым–четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. № 1792-р.

Диссертация выполнена на кафедре «Строительные конструкции и вычислительная механика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, доктор технических наук (05.23.07), профессор Белостоцкий Александр Михайлович, ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО» (ЗАО НИЦ СтаДиО), генеральный директор.

Официальные оппоненты:

Дмитриева Татьяна Львовна – доктор технических наук (05.13.18), доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, кафедра «Механика и сопротивление материалов», заведующий кафедрой;

Мелешко Владимир Аркадьевич – кандидат технических наук (05.23.17), Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-

Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, кафедра «Строительная механика», доцент кафедры.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГБОУ ВО «СПбПУ») Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Санкт-Петербург. Отзыв ведущей организации утвержден проректором по научной работе, член-корр. РАН, д-ром техн. наук, проф. Сергеевым Виталием Владимировичем, заслушан на заседании Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института и подписан профессором Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства СПбПУ, д-ром техн. наук, проф. Лалиным Владимиром Владимировичем.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

- официальные оппоненты являются ведущими специалистами в области разработки и применения современных методов математического моделирования механических систем, численных методов оптимизации, в том числе в строительной отрасли. Оппоненты имеют публикации, соответствующие тематике диссертации, в ведущих рецензируемых научных изданиях, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

- ведущая организация, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», хорошо известна своими исследованиями в области математического моделирования.

По теме диссертации соискателем опубликовано 10 научных трудов, в том числе 5 работ – в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени, из них 3 работы – в изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus, соискателем получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах. Наиболее значимые работы:

1. Белостоцкий А.М., Новиков П.И. Идентификация действительных инерционно-жесткостных свойств конструктивных элементов адаптируемых конечноэлементных 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. (**перечень ВАК**) (*переводная 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)*)).

Соискателем выполнен обзор работ по проблеме идентификации свойств конечноэлементных моделей путем сопоставления расчетных и измеренных для объектов строительства динамических характеристик. Предложена концепция варианта решения указанной проблемы, проанализированы алгоритмы решения обратных некорректных задач идентификации для разработки адаптивной процедуры.

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. (**перечень ВАК**) (*переводная 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)*)).

Соискателем изложена методика идентификации изменений жесткостных характеристик конструктивных элементов натуральных объектов на основе адаптивных математических моделей. Предложена целевая функция специального вида, чувствительная к варьированию модуля упругости различных элементов конструкций объекта, разработана процедура идентификации на основе варьирования параметров жесткости всех связей системы и анализом локальных экстремумов целевой функции.

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. (**перечень ВАК**) (*переводная 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)*)).

Публикация содержит полученные соискателем результаты апробации разработанной методики идентификации изменений жесткостных параметров элементов

конструкций на примере стенда «Конструктор». Осуществлены реализация методики (с применением программных комплексов ANSYS Mechanical и Matlab) и верификация на базе сопоставления расчетных динамических параметров и результатов динамического эксперимента на стенде. Показано, что результаты проведенного динамического эксперимента содержат информацию о вносимом повреждении и могут быть интерпретированы с применением математически формализованной процедуры идентификации.

4. Новиков П.И. Численно-аналитическая методика идентификации параметров жесткости пространственных конструкций на основе минимизации различия расчетных (конечноэлементных) и натурных динамических характеристик // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18. – № 3. – С. 64-71. **(перечень ВАК)**

Описан рациональный вариант математической формализации задачи идентификации параметров жесткости пространственных составных многоэлементных конструкций на основе минимизации расхождений расчетных и натурных динамических характеристик с учетом выявленных особенностей инструментального метода. Проблема идентификации ставится как задача нелинейного программирования с ограничениями в виде неравенств для расчетных частот собственных колебаний. Для решения использован градиентный подход с включением в расчеты производных глобальной матрицы жесткости, набора собственных значений и набора собственных векторов по выбранному параметру системы. Для решения задачи в условиях “контрастного” изменения спектра частот / форм собственных колебаний и увеличения вычислительной эффективности процесса минимизации предложен оригинальный алгоритм выделения наиболее чувствительных параметров конечноэлементной модели (алгоритм выделения приоритетных компонент минимизации).

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. **(перечень ВАК)**

Соискателем описаны и проанализированы полученные лично результаты апробации методики на двух конструктивно различных экспериментальных стендах «Конструктор» и «Этажерка». Специалистами-сейсмологами А.А. Бахом и А.А. Красниковым выполнены динамические измерения и подготовлены результаты обработки по методу стоячих волн. Для реализации методики соискателем использован метод конечных элементов и метод последовательного квадратичного программирования. Выполнена идентификация параметров жесткости различных

состояний стенов, включая намеренно поврежденные состояния. Показана вычислительная эффективность предложенного алгоритма выделения наиболее чувствительных параметров конечноэлементной модели (алгоритм выделения приоритетных компонент). Для целей идентификации параметров жесткости впервые применены инструментальные данные метода 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».

6. Новиков П. И. Программный модуль идентификации параметров жесткости пространственных конструкций на основе минимизации различий расчетных и натуральных динамических характеристик (Mechanical system identification module). – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617551 Российская Федерация / заявитель и правообладатель П. И. Новиков. – № 2020616502; заявл. 19.06.2020; опубл. 08 июля 2020 г.

Свидетельство подтверждает регистрацию программной реализации алгоритма решения задачи идентификации параметров жесткости с использованием программных комплексов ANSYS Mechanical, MATLAB и разработок, выполненных соискателем. Программа реализует процедуру нелинейного программирования с ограничениями в виде неравенств для расчетных частот собственных колебаний, алгоритм выделения приоритетных направлений минимизации, импорт оцифрованных инструментальных данных динамических характеристик, вычисление целевой функции и ее первой производной (включая расчет производных глобальной матрицы жесткости, набора собственных значений, набора собственных векторов по выбранному параметру системы), экспорт результатов и параметров решения. Соискателем выполнена разработка алгоритмов, реализация методов вычисления производных глобальной матрицы и набора собственных векторов по параметру системы, разработка и отладка кода, а также процедура интеграции программных комплексов ANSYS Mechanical и MATLAB.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **разработана** математическая модель для идентификации параметров жесткости (прежде всего, повреждений) пространственных конструкций, основанная на решении задачи нелинейного программирования целевой функции несоответствия расчетных и определенных по результатам динамических измерений векторов форм собственных колебаний;

- предложенная математическая модель **верифицирована** на серии задач идентификации различных состояний двух экспериментальных стендов;
- **предложена и апробирована** схема выделения наиболее чувствительных параметров конечноэлементной модели для идентификации исследуемого состояния реальной системы;
- для целей идентификации параметров состояния системы **впервые использованы** оцифрованные результаты (набор резонансных частот и форм колебаний), полученные с использованием инструментального метода стоячих волн.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- **разработана** численно-аналитическая модель для идентификации параметров жесткости механических систем (с учетом их возможных повреждений) на основе минимизации расхождений расчетных и инструментально выявленных динамических характеристик с применением современных апробированных методов моделирования механических систем и минимизации целевых функций;
- разработанная математическая модель основана на **новой** формулировке задачи нелинейного программирования для минимизации расхождения расчетного и экспериментального наборов форм собственных колебаний с ограничениями в виде неравенств для расчетных частот собственных колебаний;
- показана применимость численно-аналитической модели для выявления поврежденности строительных конструкций как составных механических систем, для анализа которых применяется метод конечных элементов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- **разработан** программный модуль, реализующий предложенную математическую модель и позволяющий идентифицировать параметры жесткости строительных конструкций (стержневых, плитно-стержневых составных систем) с использованием оцифрованных результатов динамических измерений для целей безопасной эксплуатации, мониторинга, обследования и диагностики состояния элементов конструкций. Разработанная численно-аналитическая методика и комплекс программ могут быть использованы в практике исследования состояния различных пространственных многоэлементных механических систем, включая объекты строительства;
- методикой **обеспечивается** выявление значимых изменений (включая повреждения) и уточнение параметров жесткостных характеристик конечноэлементных моделей механических систем относительно заданных проектных значений;

– для исследования фактического состояния пространственных статически неопределимых механических систем **обосновано** использование современного инструментального метода определения значимых динамических характеристик – метода стоячих волн;

– результаты моделирования **использованы** для решения задач современной практики строительства, эксплуатации, мониторинга и обследования состояния зданий.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

– **использован** апробированный математический аппарат универсального программного комплекса ANSYS Mechanical (в части реализации метода конечных элементов в форме метода перемещений, решение частной проблемы собственных значений) и программной среды MATLAB (в части метода нелинейного программирования SQP с ограничениями различного вида);

– **установлено** качественное и количественное соответствие получаемых решений с заданными контролируемыми параметрами, определяемыми с помощью испытаний на экспериментальных стендах.

Личный вклад соискателя состоит в следующем: проведен аналитический обзор современных подходов к идентификации жесткостных характеристик многоэлементных конструкций, на основе которого сформированы требования и структура разрабатываемой численно-аналитической модели идентификации; сформулированы концептуальная и математическая постановки задачи динамической идентификации; выполнена программная реализация разработанной математической модели; проведена верификация методики на двух конструктивно различных экспериментальных стендах; выполнен анализ полученных результатов; подготовлены публикации по выполненной работе.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 09 января 2018 г. № 1-О: в ней содержится разработанная соискателем новая, научно обоснованная, верифицированная математическая модель для решения задачи идентификации параметров жесткости конструкций на основе минимизации расхождений расчетных и натурных динамических характеристик, имеющая важное значение для развития методов математического моделирования для идентификации дефектов и повреждений в различных многоэлементных составных механических системах.

На заседании 15 декабря 2020 года диссертационный совет Д ПНИПУ.01.09 принял решение присудить *Новикову Павлу Игоревичу* ученую степень *кандидата технических наук* (протокол заседания № 10).

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 6 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящего в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 14, против присуждения ученой степени – нет, воздержавшихся – нет.

Председатель диссертационного совета Д ПНИПУ.01.09,

д-р физ.-мат. наук, профессор

/ Трусов Петр Валентинович /

Ученый секретарь диссертационного совета Д ПНИПУ.01.09,

канд. физ.-мат. наук, доцент

/ Швейкин Алексей Игоревич /

«17» декабря 2020 г.

