

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
Пермского национального
исследовательского политехнического
университета,
доктор технических наук, профессор
Коротаев Владимир Николаевич

2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация **«Идентификация параметров жесткости конечноэлементных моделей конструкций на основе минимизации расхождений расчетных и натуральных динамических характеристик»** выполнена на кафедре «Строительные конструкции и вычислительная механика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Новиков Павел Игоревич работал в инжиниринговом центре ГОЧС «БАЗИС» в должности инженера, ведущего инженера, руководителя группы моделирования, в центре СМИС «БАЗИС» – в должности руководителя группы моделирования.

В 2011 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный строительный университет по специальности «Прикладная математика». В 2014 году окончил аспирантуру очной формы обучения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по специальности 05.13.18 –

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (период обучения с 01.10.2011 по 31.10.2014). С 01 марта 2020 года прикреплен для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель – Белостоцкий Александр Михайлович, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, доктор технических наук, профессор, генеральный директор Закрытого акционерного общества «Научно-исследовательский центр СтаДиО», по совместительству: профессор кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

По итогам обсуждения диссертации «Идентификация параметров жесткости конечноэлементных моделей конструкций на основе минимизации расхождений расчетных и натурных динамических характеристик» принято следующее заключение:

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

- Проведен обзор различных постановок задач идентификации механических свойств, математически формализованных процедур идентификации дефектов и повреждений с учетом современных достижений численных методов и строительной механики. Акцент сделан на особенностях разработки и апробации методов, использующих чувствительность модальных параметров пространственных составных многоэлементных механических систем.

- Сформулированы концептуальная и математическая постановки задачи идентификации механических повреждений и дефектов на основе минимизации расхождений расчетных и натурных динамических характеристик. Математическая постановка учитывает особенности сравнения полученных численно и найденных экспериментально частот и форм собственных колебаний (с учетом значимых

критериев сравнения) и применение универсальных многодисциплинарных программных средств. Подход может применяться для идентификации характеристик других типов конструкций (оболочечных, объемных).

- Предложен способ выделения приоритетных компонент минимизации, который предусматривает выделение отдельных значимых компонент вектора состояния модели до старта процедуры минимизации. Способ обеспечивает кратное уменьшение времени расчета и улучшение результатов идентификации в части локализации области параметров, определяющих поврежденность.

- Разработана программная реализация численно-аналитической методики идентификации с применением универсальных многодисциплинарных программных средств ANSYS Mechanical, MATLAB (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020617551).

- Проведена апробация численно-аналитической методики на двух конструктивно различных экспериментальных стендах «Конструктор» (преимущественно стержневая система) и «Этажерка» (плитно-стержневая система), как контролируемых аналогов многоэлементных механических систем зданий (сооружений). Рассмотрено суммарно пять различных состояний стендов.

2. Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

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

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

- Введено понятие “приоритетных компонент минимизации”, которое показало практическую эффективность при решении обратных 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.

3. Достоверность и обоснованность результатов подтверждается удовлетворительным соответствием полученных оптимальных решений задачи определения параметров жесткости с исследованными по методу стоячих волн заданными состояниями стенов.

4. Практическая значимость работы заключается в выявлении изменений и уточнении параметров жесткостных характеристик адаптивных конечноэлементных моделей механических систем относительно заданных проектом значений; в приведении в соответствие конечноэлементных моделей, используемых для анализа реальных механических систем, и измеряемых натурных динамических характеристик объекта. Численно-аналитическая методика позволяет исследовать фактическое состояние пространственных статически неопределимых несущих конструкций с учетом результатов динамических измерений и обеспечивает новый (математически формализованный) уровень решения задач современной практики эксплуатации, мониторинга, обследования и диагностики состояния реальных механических систем.

5. Ценность научных работ соискателя и полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 10 работах, в том числе 5 работ опубликованы в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, и/или приравненных к ним, из них 3 статьи – в сборниках материалов конференций, индексируемых в международных базах цитирования Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

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. (**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 (совместно с соавтором) выполнен обзор проблемы идентификации свойств конечноэлементных моделей путем сопоставления расчетных и измеренных для реальных объектов строительства динамических характеристик. Рассмотрены способы решения задачи идентификации с использованием адаптивных процедур и методов решения обратных задач.

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)*)

Изложена методика идентификации и локализации изменений жесткостных характеристик конструктивных элементов натуральных объектов на основе адаптивных математических моделей. Для сравнения векторов форм собственных колебаний предложена мультимодальная целевая функция специального вида, чувствительная к варьированию модуля упругости различных элементов конструкций рассматриваемого объекта с последующим анализом локальных экстремумов.

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))*

Представлены результаты апробации разработанной методики идентификации и локализации изменений жесткостных характеристик конструктивных элементов натуральных объектов на примере стенда «Конструктор». Показано, что результаты проведенного эксперимента содержат информацию о вносимом повреждении и могут быть интерпретированы с применением математически формализованной процедуры.

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. **(перечень ВАК)**

Описан наилучший вариант математической формализации задачи идентификации параметров жесткости пространственных составных многоэлементных конструкций на основе минимизации расхождений расчетных и натуральных 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. Предусмотрено использование производных глобальной матрицы жесткости, набора собственных значений и набора собственных векторов по выбранному параметру системы. Для решения задачи в условиях “контрастного” изменения спектра собственных частот / форм и увеличения вычислительной эффективности процесса минимизации предложен оригинальный алгоритм выделения приоритетных компонент.

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. – № 3. – С. 44-60. (**перечень ВАК**)

Соискателем приведены результаты апробации методики на двух конструктивно различных экспериментальных стендах «Конструктор» и «Этажерка». Для реализации методики использованы современные численные методы моделирования механических систем (ANSYS Mechanical) и актуальные методы нелинейного программирования (MATLAB). Выполнена идентификация параметров жесткости различных состояний стендов, включая намеренно поврежденные состояния. Показал практическую эффективность предложенный 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”.

б) Новиков П.И. Программный модуль идентификации параметров жесткости пространственных конструкций на основе минимизации различий расчетных и натурных 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.

Список прочих работ по теме диссертации:

1) Белостоцкий А.М., Каличава Д.К., Новиков П.И. Адаптивные динамические конечноэлементные модели в основе мониторинга несущих

конструкций уникальных зданий и сооружений. Основы разработанной методики. // Сборник научных трудов XXII Российско-Польско-Словацкого семинара «Теоретические основы строительства», Словакия, Жилина, 2013. – М.: АСВ, 2013. – С. 59-66.

2) Белостоцкий А.М., Каличава Д.К., Островский К.И., Новиков П.И. Адаптивные динамические конечноэлементные модели в основе мониторинга несущих конструкций уникальных зданий и сооружений. // Труды XXV Международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций» «ВЕМ&FEM-2013», Россия, г. Санкт-Петербург, 2013. – С. 58-60.

3) Белостоцкий А.М., Каличава Д.К., Новиков П.И., Островский К.И. Адаптивные конечноэлементные модели в основе систем мониторинга несущих конструкций уникальных зданий // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 6. – С. 17-23. (**Перечень ВАК**)

4) Белостоцкий А.М., Каличава Д.К., Островский К.И., Новиков П.И. Адаптивные КЭ-модели в основе систем мониторинга несущих конструкций уникальных зданий // Сопротивление материалов и теория сооружений. – 2015. – № 94. – С. 202-216.

6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Представленная Новиковым Павлом Игоревичем диссертационная работа является самостоятельным научным исследованием в области применения математического моделирования, численных методов и создания комплексов программ для решения научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем, в том числе – проблем математически формализованной идентификации дефектов и повреждений пространственных составных многоэлементных механических систем с применением современных математических моделей.

Указанная область исследования соответствует паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: п.2 «Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей», п.3 «Разработка, обоснование и

тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий», п. 5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента», п. 6 «Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента», п. 7 «Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели».

В работе преобладают математические методы минимизации (нелинейное программирование с ограничениями) и численные методы строительной механики (метод конечных элементов), предложена новая численно-аналитическая методика идентификации повреждений пространственных составных механических систем.

7. Соответствие диссертационной работы требованиям, установленным п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней»

В диссертационной работе соискатель приводит ссылки на авторов и источники заимствованных материалов и отдельных результатов. Результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, материалах конференций, соответствующие ссылки присутствуют в тексте диссертации.

Диссертационная работа Новикова Павла Игоревича «Идентификация параметров жесткости конечноэлементных моделей конструкций на основе минимизации расхождений расчетных и натуральных динамических характеристик» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заключение принято на заседании кафедры «Строительных конструкций и вычислительной механики» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Присутствовало на заседании 26 чел. Результаты голосования: «за» – 26 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел. (протокол № 2/21 от 14 сентября 2020 г.).

Заведующий кафедрой
«Строительные конструкции и
вычислительная механика»,
д-р техн. наук, проф.

Кашеварова Галина Геннадьевна

Ученый секретарь кафедры
«Строительные конструкции и
вычислительная механика»,
канд. техн. наук, доц.

 Зуева Ирина Ивановна