

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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

Оценка технического состояния сооружений, а также выявление их остаточных функциональных свойств является чрезвычайно актуальной проблемой, напрямую связанной с решением вопросов о целесообразности проведения реконструкции, вплоть до полной утилизации в случае невозможности дальнейшей эксплуатации. Отдельную трудность представляет разработка проектных решений по усилению зданий посредством устранения дефектов. Возникает вопрос о степени потери несущей способности на основе выявления уровня дефектности. Очевидно, что накопление дефектов различного рода сопровождается неизбежной потерей жесткостных свойств несущих элементов сооружения, что и составляет предмет исследования в оппонируемой диссертационной работе. Задача изменений параметров жесткостных характеристик механических систем решается на основе сопоставления расчетных и выявленных экспериментально динамических характеристик значимой части спектра собственных частот. При этом задача модального анализа механической системы является известной, а задача интерпретации наблюдаемых динамических свойств объекта представляет обратную некорректную задачу.

Как справедливо отмечает автор, в настоящее время методы идентификации, основанные на решении обратных некорректных задач, достаточно развиты, как в России, так и за рубежом. В отечественной практике наиболее полно эта проблема исследована научным коллективом АСФ ГС СО РАН, где в основу положен метод стоячих волн. Однако вопросы адекватности этих методов, их адаптация для решения математически формализованной задачи идентификации свойств несущих конструкций сооружений до сих пор остаются актуальными.

Целью диссертационной работы как раз и является разработка математически формализованной процедуры идентификации параметров жесткости конечноэлементных моделей на основе минимизации невязок известных расчетных и полученных в результате натуральных испытаний динамических характеристик несущих конструкций зданий и сооружений. Для достижения этой

цели разработанная методика выявления изменений жесткости конструкций относительно проектных значений была доведена до программной реализации, произведена также ее верификация на задачах идентификации жесткостных характеристик пространственных конечноэлементных моделей, развернутых на стендах НИУ МГСУ.

Диссертация состоит из следующих разделов: введение, 4 главы основного текста, основные результаты и выводы по работе, 3 приложения. В конце каждой главы даются пунктам изложенные выводы. Список литературы содержит 218 наименований. Общий объем работы 268 стр.

В первой главе дается достаточно обширный аналитический обзор современных методик идентификации дефектов конструктивных элементов для пространственных расчетных схем. Приведено условие корректности, на основе которого дается определение класса корректных и некорректных, а также условно-корректных задач. Рассмотрены методы решения обратных некорректных задач. Отдельное внимание уделено интерпретации метода итерационного обновления параметров КЭ-моделей, основанной на различии расчетных и выявленных экспериментально значений частот и векторов форм собственных колебаний и, полученных на этой основе, отличий параметров жесткости. В этой связи дается обзор методов безусловной и условной минимизации.

Во второй главе приводится описание авторской методики идентификации жесткостных характеристик пространственных конструкций с использованием КЭ моделей, которая включает в себя 3 самостоятельных задачи. Первоначально решается прямая задача по определению частот и форм собственных колебаний исследуемого объекта в форме частичной проблемы собственных колебаний линейной механической системы без демпфирования, построенная на базе проектного варианта.

Далее на основе инструментальных исследований, в основу которых положен метода стоячих волн, определяются натурные динамические характеристики, а именно, набор частот и форм значимой части спектра реального объекта.

Третья задача включает авторскую формулировку условно-экстремальной задачи, где минимизируются невязки в параметрах проектной и реальной жесткости исследуемого объекта. Искомыми параметрами являются значения модуля Юнга локальных зон конструктивных элементов. Таким образом, цель минимизации – найти конфигурацию глобальной матрицы жесткости с учетом выявленной по результатам динамических измерений ча-

стот и форм колебаний, что составляет обратную некорректную задачу идентификации физико-механических свойств.

Задача нелинейного программирования в условно-экстремальной постановке сводится к задаче на безусловный экстремум при помощи функции Лагранжа, для минимизации которой использован метод квадратичного программирования.

Авторский вклад в данную методику состоит из разработки критерия идентификации повреждений. Предложена схема сокращения размерности вектора параметров состояния путем анализа градиента целевой функции и градиента функции энергии деформации системы. Такой подход существенно повышает вычислительную эффективность исследуемой задачи.

Для отображения меры соответствия измеренных форм колебаний с результатами моделирования используется широко используемый критерий модального соответствия.

Программная реализация алгоритма построена на взаимодействии нескольких программных средств. Решение задачи нелинейного программирования и ряд вычислительных операций выполнены в среде программирования пакета *MATLAB*, который реализует широкий набор встроенных программ и функций. Задача модального анализа выполнена средствами *ПК Ansys Mechanical* с использованием блочного метода Ланцоша, что видится вполне обоснованным с точки зрения функциональных возможностей этого программного комплекса.

Автором разработан собственный программный модуль, где помимо взаимосвязи данных, полученных из различных программ, реализованы такие важные процедуры как: сборка и импорт оцифрованных результатов динамических исследований по методу стоячих волн; аналитическое вычисление производных глобальной матрицы жесткости и производных собственных значений и собственных векторов по варьируемым параметрам; сборка глобального ансамбля КЭ-модели, а также процедура выделения приоритетных компонент минимизации, позволяющая сокращать размерность вектора параметров состояния без потери значимых результатов идентификации, что является несомненным достоинством работы.

Методика идентификации параметров жесткости конечноэлементных моделей конструкций достаточно наглядно и полно проиллюстрирована на примерах, приведенных в главах 3 и 4.

В третьей главе методика верифицирована на экспериментальном стенде «Конструктор» (НИУ МГСУ), где исследовано бездефектное и намеренно

повреждённое состояние (разрыв стержня) рамного каркаса, КЭ модель представлена пространственными стержневыми элементами, соединенными в основании со стальными двутаврами, которые моделируются оболочечеными КЭ-элементами. Варьируются параметры жесткости (степень модуля упругости) в элементах. На основе процедуры выявления приоритетных компонент минимизации из всех КЭ к рассмотрению оставлены пять, у одного из которых (имеющего разрыв) в результате минимизации показатель жесткости снизился от проектного значения до нижнего предела, равного единице. Таким образом, получены удовлетворительные результаты определения вносимого повреждения. Отмечено, что при рассмотрении полного вектора варьируемых параметров наблюдается неудовлетворительный вариант идентификации, что отражает сложность выявления дефектов механической системы при значительном количестве параметров состояния.

В четвертой главе изложены результаты верификации методики, выполненные на экспериментальном стенде «Этажерка», который представляет собой пространственную 5-ти уровневую раму, с перекрытием, выполненным в виде стальных листов. Исследовано бездефектное и 2 намеренно повреждённых (удаление угловой и средней опорной стойки) состояния. Отмечено, что конструкция характеризуется отсутствием значимых изменений частот и форм собственных колебаний при повреждении отдельных стержней. Идентифицировано исходное проектное состояние и первое намеренно повреждённое состояние (удаление угловой стойки) стенда. Для уверенной идентификации второго варианта повреждения рекомендуется расширить исследованную частотную область. Отмечено, что для повышения качества локализации повреждений требуется повышение точности определения компонент форм колебаний и расширение доступной для исследования части спектра собственных частот.

Оценивая работу в целом, хочется отметить объединение в одну методику нескольких самостоятельных научных задач, каждая из которых имеет значимость, требует исследования достаточно обширного материала и обработки результатов.

Исследования, выполненные на экспериментальных стендах, позволили автору сделать важные практические выводы и рекомендации к использованию предложенной методики. Данное направление, безусловно, может быть продолжено применительно к исследованию моделей реальных объектов.

По диссертации отмечены следующие вопросы и замечания:

1. В первой главе дается достаточно обширный обзор и классификация методов решения задач нелинейного программирования. По каким критериям в авторскую методику в качестве алгоритма минимизации выбран именно *SQP* метод?

2. В разделе 2.2.3. *Ключевые особенности метода стоячих волн для задач идентификации* говорится, что «Метод в состоянии указывать области вероятных дефектов и механических повреждений по регистрируемым нарушениям амплитудных, фазовых и когерентных характеристик». Но в следующем предложении сказано, что «Важные задачи практики обследования конструкций инженерных сооружений, такие как подтверждение наличия, подробное исследование и оценка серьезности дефектов и повреждений выходят за рамки МСВ». Нет ли здесь противоречия?

3. В главе 2 приведены постановки задачи нелинейного программирования. Чем обусловлено значение понижающего коэффициента $\alpha = 0,9$ в постановке этой задачи в форме (2.22) на стр. 66?

4. На стр. 69 дана постановка этой же задачи в более общей форме (2.28), а также алгоритм ее решения. По пунктам алгоритма 1-5 возникли следующие вопросы:

– функции ограничений в постановке (2.28) обозначены символом G , однако, в формулах (2.31-2.35), на которые сделаны ссылки, есть обозначения этого вектора как G , так и g . Есть ли разница в этих векторах?

– в пункте 5 говорится о проверке необходимых и достаточных условиях для выхода из цикла минимизации. В чем состоят эти условия?

– в постановке (2.28) указаны границы области изменения аргумента x (u_a, u_b), а как эти параметрические ограничения учтены в выражениях (2.31-2.35).

– небольшое редакционное замечание: ссылки на формулы определения целевой функции (2.23) и ее градиента (2.20) не соответствуют этим выражениям.

5. В разделе *Программная реализация методики* на странице 73-74 дан инструментарий ПК *ANSYS Mechanical* применительно к разработанному алгоритму. С какой целью приведены пункты 3–6 (линейная устойчивость, гармонический анализ задачи установившихся колебаний и др.)?

6. При иллюстрации метода на примере конечноэлементной модели стенда «Конструктор», приведено 2 варианта векторов параметров состояния из набора f -гипотез (32 параметра) и II -гипотез (64 параметра). Далее, при рассмотрении поврежденного состояния стенда, по f гипотезам и II гипотезам

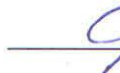
выявлены 2 приоритетные компоненты минимизации. При решении задачи нелинейного программирования применительно к этой модели указаны размерности $p=32$, $l=2$. Вопрос: предусматривается ли выделение компонент минимизации по P -гипотезам? Где используются компоненты P -гипотез?

Замечания не снижают общую положительную оценку работы. Основные результаты диссертационных исследований достаточно полно представлены в 5-ти публикациях в рецензируемых научных изданиях, в том числе входящих в Перечень ВАК РФ по специальности 05.13.18, а также индексируемых в международных базах цитирования Scopus. Программные разработки подтверждены свидетельством государственной регистрации программ для ЭВМ.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация «Идентификация параметров жесткости конечноэлементных моделей конструкций на основе минимизации расхождений расчетных и натурных динамических характеристик», является завершенным научным исследованием, соответствующим требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а ее автор, Новиков Павел Игоревич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Дмитриева Татьяна Львовна, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83 (тел. 8(3952) 405-100, 405-144, 405-425; e-mail: dmitrievat@list.ru); ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой механики и сопротивления материалов

«27» ноября 2020 г.



Дмитриева Т.Л.

Подпись 
ЗАВЕРЯ
Общий отдел

