

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Нагибовича
Александра Игоревича «Суперэлементное моделирование
динамических характеристик большеразмерных комбинированных
систем «основание – железобетонные конструкции – металлические
конструкции», представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Современные технологии 3D проектирования объектов строительства, основанные на информационной модели сооружений, предполагают интегрированную работу многих инженерных групп, создающих единую базу данных объекта из различных модулей, обеспечивающих интеллектуальный обмен между ними, что позволяет в любой момент времени получать актуальную проектную документацию и визуализации, а также анализировать их. В этой цепочки одним из наиболее ответственных является, безусловно, расчетный модуль, связанный с выявлением НДС системы, а также определением динамических характеристик сооружения. Такой подход требует хранения и обработки огромного объема данных. И хотя аппаратные и программные средства за последние десятилетия получили достаточно интенсивное развитие, проблема построения расчетных моделей сложных уникальных сооружений, позволяющих получать адекватные параметры их напряженно-деформированного состояния при оптимальных вычислительных затратах является, несомненно, актуальнейшей, во многом отражающей квалификацию инженера-расчетчика. Особую значимость такая проблема приобретает при реализации динамических расчетов.

В оппонируемой диссертационной работе дается научное обоснование одного из направлений решения задачи численного анализа большеразмерных систем, где использованы методики суперэлементного моделирования.

Цель исследования состоит в разработке, верификации и апробации методики суперэлементного моделирования динамических характеристик большеразмерных систем «основание – железобетонные конструкции – металлоконструкции покрытия» на примере современных футбольных стадионов. Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи.

– Аналитический обзор современных математических моделей, численных методов и программных средств, используемых при реализации суперэ-

лементных статических и динамических расчетов комбинированных больше-размерных строительных сооружений.

- Разработка методики суперэлементного моделирования, позволяющая обоснованно разделить исходную систему на связанные подсистемы «основание», «железобетонные конструкции», «металлические конструкции», с целью снизить вычислительную размерность задачи.

- Программная реализация и верификация разработанной методики на модельных тестовых задачах.

- Апробация разработанной методики на основе расчетов реальных большеразмерных сооружений футбольных стадионов.

Диссертация состоит из следующих разделов: введение, 4 главы основного текста, основные результаты и выводы по работе. В конце каждой главы даются краткие по пунктам изложенные выводы. Список литературы содержит 129 наименований. Общий объем работы 161 стр.

В первой главе приведен аналитический обзор состояния современных методик суперэлементного моделирования динамических характеристик систем «основание – железобетонные конструкции фундаментов и трибун – металлические конструкции покрытия» футбольных стадионов. Выделено две составляющих, на основе которых строятся методики суперэлементного моделирования: аналитические зависимости, описывающие НДС континуальных систем; численные алгоритмы, реализующие эти методики

Отмечено, что суперэлементные методики реализованы только в «тяжелых» универсальных программных комплексах (ПК): *ANSYS Mechanical*, *ABAQUS/Simulia*, *MSC NASTRAN*, а также в исследовательском ПК *СТАДИО*. В специализированных ПК, которые используются в российском проектировании объектов строительства, подобные методики не поддерживаются.

В конце главы на основании анализа состояния заявленной темы сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во второй главе предложена и теоретически обоснована методика суперэлементного моделирования динамических характеристик комбинированных большеразмерных систем объектов уникального строительства, которая реализована на основе универсального программного комплекса конечно-элементного моделирования *ANSYS Mechanical* и собственных программных разработок автора. Выбор ПК *ANSYS Mechanical* представляется достаточно обоснованным с учетом того, что он содержит одну из наиболее развитых библиотек конечных элементов, позволяющих решать широкий спектр инженерных и наукоемких задач механики деформируемого твёрдого

тела. Следует отметить также тот факт, что этот ПК сертифицирован по основным зарубежным и отечественным стандартам, а также прошёл процедуру верификации согласно требованиям РААСН.

Общая структура методики суперэлементного моделирования динамических характеристик систем «основание – железобетонные конструкции – металлические конструкции», предложенная автором, достаточно наглядно представлена в блочном виде со всеми взаимосвязями и последовательностями производимых операций.

Выделено две основных ветви расчета системы. *Ветвь 1* реализует построение КЭ модели полной системы, а также 2-х образующих её подсистем. Критерием разделения на подсистемы является тип материала: железобетонные конструкции фундаментов и трибун (подсистема 1) и металлические конструкции покрытия (подсистема 2), что, безусловно, логично с точки зрения существенного различия в динамическом отклике этих двух конструктивных блоков. Далее исследуется динамическое взаимодействие этих подсистем, на основании чего делается вывод о возможности статического и динамического расчета всей системы в рамках отдельных подсистем. В случае отсутствия такой возможности автор предлагает проводить расчет полной системы или воспользоваться *суперэлементным* подходом путем перехода к *ветви 2*, где на основании полученных КЭ моделей подсистем может быть выполнен суперэлементный статический расчет (используется метод статической конденсации), либо динамический расчет с использованием метода динамического синтеза подконструкций.

В последующих разделах этой главы дается вариационная постановка задачи нестационарной динамики континуальных систем в упругой постановке, а также алгоритмы, используемые при численной КЭ реализации предложенной методики. В отдельном разделе дано подробное описание метода суперэлементов применительно к задачам статики и динамики.

Метод динамического синтеза подконструкций реализован в двух вариантах: *метод фиксированной границы* и *метод свободной границы*. Такое сочетание позволяет достаточно корректно учитывать взаимодействие между подсистемами через узловые соединения. Так, для опорной подсистемы применяется метод свободной границы, т.к. узлы стыковки опорной подсистемы с покрытием приняты не закрепленными (подсистема «металлические конструкции покрытия» достаточно гибкая). Для подсистемы «металлические конструкции покрытия» применим метод фиксированной границы. Это

связано с тем, что стыковочные узлы, в которых эта система соединена с более жесткой опорной подсистемой, приняты закрепленными.

В конце главы дается список собственных программных разработок, написанных на встроенном в ПК ANSYS Mechanical языке программирования APDL. Эти программные модули позволяют: оптимизировать процесс создания расчетных КЭ-моделей на уровне препроцессора ANSYS-Pre, задавать параметры расчета в «Решателе» ANSYS-Solver, а также обрабатывать и визуализировать полученные результаты в постпроцессоре ANSYS-Post.

В третьей главе на двух верификационных примерах исследована применимость разработанной суперэлементной методики.

В качестве первого выбран верификационный тест из сопроводительной документации к ANSYS Mechanical: задача определения собственных частот и форм колебаний камертона, работающего в условии плоского напряженного состояния. Дается сопоставление результатов расчета полной КЭ модели камертона с результатами расчета по суперэлементной модели, где выделено 3 суперэлемента. Причем во втором случае использованы 3 варианта метода динамического синтеза, реализованных в ПК ANSYS Mechanical: метод фиксированной границы; метод свободной границы; метод остаточной гибкости свободной границы. Сравнительный анализ вычисленных собственных частот и форм показал практическое совпадение результатов для всех проведенных вариантов расчетов.

Второй пример представляет реальный объект – входной блок ТЦ «Волгамолл» в г. Волжский, конструктивная схема которого схожа с исследуемым типом большеразмерных систем. Выполнено 5 вариантов расчета на основе следующих моделей:

А. Без применения суперэлементов: расчет полной КЭ модели объекта; расчет подсистемы 1 «основание – железобетонные конструкции каркаса»; расчет подсистемы 2 «металлические конструкции покрытия».

Б. С применением суперэлементов: модель подсистемы «основание – железобетонные конструкции каркаса» с учетом металлических конструкций покрытия как суперэлемента; модель подсистемы «металлические конструкции покрытия» с учетом подсистемы «основание – железобетонные конструкций каркаса» как суперэлемента.

Постановка и результаты решения данного примера охватывают широкий спектр научных исследований.

– Проанализированы способы разбиения КЭ сетки с точки зрения адекватности результатов при минимальных вычислительных затратах, на осно-

вании чего получена оптимальная модель сетки (3-4 конечных элемента на один конструктивный элемент сооружения).

- Выполнен сравнительный анализ динамических характеристик полной системы и подсистем, который показал существенное влияние податливости опорной подсистемы на поведение подсистемы конструкций покрытия, что указывает на невозможность проведения независимых расчетов подсистем.

- Сопоставлены динамические характеристики расчета по суперэлементной модели с результатами расчета полной системы. Различие по собственным частотам при учете достаточного количества внутренних форм колебаний подконструкций для метода фиксированной границы составило до 0,295 %, а для метода свободной границы до 0,038%, т.е. получены практически идентичные результаты.

- Выявлено количество внутренних форм колебаний подконструкций, необходимых для получения адекватного результата. Показано, что это формы колебаний, которые соответствуют частотному диапазону в 1,5 - 2 раза превышающему частотный диапазон всей системы.

Важно отметить, что выводы, полученные на верификационных примерах, позволили обоснованно реализовать суперэлементную методику для расчета реальных объектов.

В четвертой главе выполнена апробация разработанной методики на примере расчетов двух реальных объектов, а именно стадионов вместимостью 45000 зрителей, построенных к чемпионату мира по футболу 2018 г. в Нижнем Новгороде и Ростове-на-Дону. В первой части главы дается достаточно полное описание конструктивных особенностей этих объектов. Далее выполнен КЭ расчет с использованием тех моделей и методик, которые были выверены на верификационных примерах. При расчетах стадиона в г. Ростове-на-Дону выделено также 5 расчетных КЭ моделей, где используется расчет полной системы, отдельных подсистем, а также суперэлементный подход. Отличие в расчете стадиона в Ростове-на-Дону состоит в том, что использовано 6 расчетных моделей, т.к. принято 3 подсистемы (металлические конструкции левого и правого крыла разделены на отдельные подсистемы).

Результаты расчета этих объектов подтвердили вычислительную эффективность разработанной суперэлементной методики. Отмечено, что время вычислений на формирование суперэлемента и расчет динамических характеристик подсистемы с его применением, при учете достаточного количества внутренних форм колебаний подконструкции, сопоставимо со временем КЭ-

расчета полной системы. Особое преимущество здесь может быть получено при многовариантных расчетах подсистем, так как не требуется многократно формировать модель суперэлемента.

Оценивая работу в целом, хочется отметить её научную новизну, которая связана с исследованием достаточно обширного материала, полученного на основе авторской методики, и обработкой результатов многочисленных расчётов.

Как тестовые, так и практические расчеты, приведенные в диссертации, позволили сделать важные практические выводы и рекомендации к использованию предложенной методики для широкого класса комбинированных большеразмерных систем «основание – железобетонные конструкции – металлические конструкции покрытия». Данное направление, безусловно, может быть успешно продолжено применительно к исследованию моделей подобных объектов с учетом различного рода нелинейностей.

По оппонируемой работе отмечены следующие вопросы и замечания:

1. В работе проведено много исследований, касающихся точности результатов для той или иной модели, но в численных расчетах реальных объектов точность – понятие весьма относительное. Хотя автором правильно отмечено, что в вопросах достоверности результатов речь может идти о «*достаточной степени сходства результатов с альтернативными*» (стр. 11), или о «*сравнении с эталонным решением*» (стр. 94).

2. Автором используется определение *Метод динамического синтеза подконструкций*, однако, во всех англоязычных источниках, на которые даются ссылки, этот метод носит название *Component mode synthesis* - Покомпонентный синтез форм. И, хотя авторы работ, безусловно, могут использовать принятые ими названия, в первый момент не понятно – о каком методе идет речь.

3. На общей структурной схеме (рис. 2.1) показаны две ветви вычислительных операций. Возникает вопрос – переход ко второй ветви возможен только через первую? Тогда зачем там дублируется операция построение КЭ моделей подсистем? Если возможно независимое вхождение во вторую ветвь, то на каком условии?

4. На этой же схеме показано однородное уравнение динамики без учета демпфирования, из которого определяются собственные формы и частоты колебаний. Возникает вопрос – почему в описании метода статической конденсации применительно к задачам динамики и метода динамического син-

теза подконструкций (выражения 47, 48, 52) дается постановка задачи с учетом демпфирования?

5. В разделе 2.2.1 даются постановки трехмерной задачи нестационарной динамики упругой среды. Восприятие материала несколько затруднено обилием индексов: i, j, k без указания пределов изменения (хотя понятно, что в целом для трехмерной задачи они должны меняться от 1 до 3-х). В выражении тензора дисторсии (у автора – дисторции), нет соответствия индексов.

6. В разделе 2.3.2.2 форма записи матричных выражений отличается от принятых ранее, а итерационный алгоритм сопряженных градиентов с предобуславливанием изложен не достаточно четко. Непонятно – где система уравнений (22)?

7. В работе есть редакционные погрешности: несоответствие ссылок на формулы – (2.1) стр. 38, (2.34) стр. 45. Несколько разнится формат подписей к рисункам.

Замечания не снижают общую положительную оценку работы. Основные результаты диссертационных исследований достаточно полно представлены в 8-ми публикациях в рецензируемых научных изданиях, в том числе входящих в Перечень ВАК РФ по специальности 05.13.18, а также в издании, индексируемом в международных базах цитирования Scopus. Программные разработки подтверждены свидетельством государственной регистрации программы для ЭВМ.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация «Суперэлементное моделирование динамических характеристик большеразмерных комбинированных систем «основание – железобетонные конструкции – металлические конструкции» 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, Нагибович Александр Игоревич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Дмитриева Татьяна Львовна, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83 (тел./факс 8(3952)405-100, 405-009, 405-000; e-mail: dmitrieva@list.ru); ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов

«29» мая 2019 г. —