

А. СЛАДКОВСКИ (Силезский технический университет, Катовице, Польша)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛИЗАЦИИ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В статье рассматриваются проблемы, связанные с параллелизацией вычислительных процессов при решении связанных термоупругих задач при помощи метода конечных элементов. В качестве примера рассматривается задача генерации тепла в контактной зоне фрикционного гасителя колебаний пассажирских вагонов и определения распределения температур во взаимодействующих деталях.

*Ключевые слова:* параллелизация вычислений, метод конечных элементов, фрикционный гаситель колебаний

### Введение

Метод конечных элементов (МКЭ) является в настоящее время одним из базовых методов решения задач механики. Он широко используется для исследования напряженно-деформированного состояния различных элементов конструкции, а том числе деталей и узлов, используемых на железнодорожном транспорте. Никого не удивит использование сеток конечных элементов (КЭ), содержащих миллионы узлов и еще большее количество степеней свободы. Такие подходы позволяют, например, рассматривать целиком напряженное состояние кузова локомотива или вагона. Это возможно в случае использования линейной постановки задачи.

Появление в задаче различного рода нелинейностей может существенно замедлить процесс их решения, поскольку в этом случае чаще всего приходится использовать итерационные методы решения и могут появиться проблемы сходимости таких процессов. Здесь следует говорить о задачах с сильной или слабой нелинейностью. Например, если в задаче учитываются также упруго-пластические свойства материала или сравнительно большие перемещения (нелинейные соотношения Коши), то следует отнести такую к задачам со слабой нелинейностью. Если к рассматриваемым нелинейностям добавляются другие, связанные, например, с необходимостью решения контактных задач или эффекты, возникающие при необходимости учесть тепловые потоки, то задачи следует относить к задачам с сильной нелинейностью. В плане решения это влияет, прежде всего, на увеличение времени их решения и, несмотря на постоянное усовершенствование вычислительной техники, решение подобных задач следует ограничить сравнительно небольшим количеством узлов, исчисляемым, например, в десятках тысяч.

Одним из способов ускорения решения таких задач могло бы быть использование параллелизации вычислительных процессов на машинах, имеющих процессоры с несколькими ядрами, многопроцессорных машинах или с использованием мощных суперкомпьютеров, построенных на кластерной схеме. Наиболее сложной задачей для создателей соответствующего программного обеспечения является обеспечение возможности параллелизации процессов. Чаще всего процесс решения является последовательным, т.е. если решение выполняется в перемещениях, то от перемещений в каком-то узле зависят перемещения во всех оставшихся. Тем не менее, существуют возможности параллелизации, в основе которых лежит разделение КЭ сетки на отдельные области (домены), для которых может быть найдено отдельное решение, зависящее от перемещений в стыковочных узлах. В любом случае, программное обеспечение, реализующее подобные процедуры решения должно быть изначально специализировано для выполнения параллелизации процесса решения задачи при помощи МКЭ.

Одним из программных пакетов, в рамках которого существует такая возможность, является MSC.MARC. Данное программное обеспечение является весьма специфическим в достаточно широком ряду ПО, позволяющих проводить расчеты с использованием МКЭ. Особенностью MSC.MARC является то, что данный пакет изначально был ориентирован на решение задач с сильной нелинейностью. Это позволяет считать, что именно этот пакет обеспечивает возможность решения наиболее широкого спектра механических, термических, электростатических, электромагнитных, гидравлических, акустических и ряда других физических проблем. В качестве альтернативы может быть указан только аналогичный пакет Abaqus FEA фирмы Dassault Systèmes Simulia Corp.

В статье сделана попытка выяснить целесообразность использования параллелизации процесса решения задачи для достаточно сложного класса связанных задач термоупругости.

### Постановка задачи

В качестве примера рассмотрим задачу определения напряженно-деформированного состояния и поля температур для фрикционного гасителя колебаний вагонов. Конструкция такого гасителя колебаний была разработана в работах проф. Л. А. Губачевой [1, 2]. Основными элементами, участвующими в контактном взаимодействии, являются цилиндрическая втулка, в центральной части которой изготавливается призматическая шестигранная поверхность. К указанной втулке в месте данной контактной поверхности прижимаются фрикционные сухари. Относительное движение втулки и сухарей позволяет генерировать на контактной поверхности тепловой поток. В данном месте происходит преобразование кинетической энергии вертикального движения тележки вагона в тепловую, что, в конечном счете, способствует гашению колебаний. На рис. 1 показано геометрическое моделирование основных элементов фрикционного гасителя колебаний [3]. В цитируемой статье были рассмотрены проблемы, связанные с генерацией КЭ сетки. В результате удалось упростить решение задачи, рассматривая в силу ее симметричности только 1/12 часть приведенных на рис. 1 объектов. Удалось также в полуавтоматическом режиме сгенерировать КЭ сетку, которая позволяла получить адекватное решение контактной задачи.

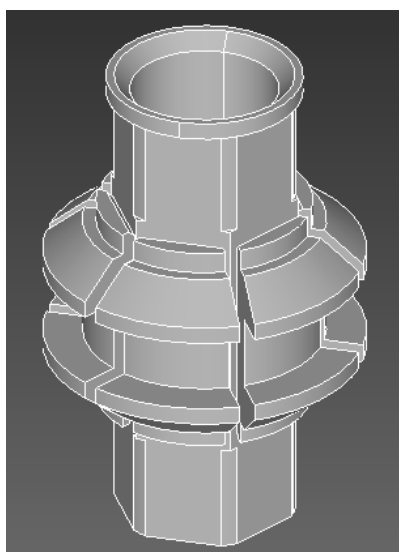


Рис. 1. Геометрическое моделирование фрикционного гасителя колебаний

Очевидно, что при генерации теплового потока происходит повышение температуры в указанной зоне. При этом величина генерируемого теплового потока зависит от величины контактных узловых сил. С другой стороны, распределение температур влияет на деформирование взаимодействующих тел, и, соответственно, на распределение контактных напряжений. Таким образом, задача определения генерируемых тепловых потоков в контактной зоне и последующей теплопроводности не может рассматриваться отдельно от контактной задачи теории упругости. Т.е. имеет место достаточно сложная нестационарная связанная задача термоупругости. При этом контактное взаимодействие осуществляется не только в контактной зоне между втулкой и сухарями, но и на конических поверхностях сухарей, где последние взаимодействуют с нажимными кольцами.

Описанную задачу удалось решить с использованием пакета MSC.MARC. В статье [4] были приведены результаты расчета взаимодействия деталей фрикционного гасителя колебания в течение 30 секунд с шагом интегрирования 0,015 с. Время решения задачи при помощи пакета MSC.MARC 2005r2 на компьютере с процессором Athlon 3000 64b и оперативной памятью 2 Гб составляло 21463 с. В настоящее время в рассматриваемое ПО внесены ряд изменений и новые версии работают более быстро. И тем не менее, повторение расчетов для той же задачи на более мощном компьютере с процессором AMD Phenom II X4 955 с частотой 3,2 ГГц и оперативной памятью 4 Гб (задействовано 3 Гб при установленной 32-битной операционной системе Windows 7), а также новой версии MSC.MARC 2011 все равно было достаточно длительным – 11941 с.

### Результаты

Использование параллелизации для программы MSC.MARC 2011 не представляет значительных трудностей, если вычислительный процесс организовывается на одном компьютере. В этом случае используется сервис Intel MPI, программные модули которого поставляются в комплекте поставки с пакетом MSC.MARC. При этом предварительно должна быть проведена необходимая для данного сервиса регистрация.

Подготовленная к решению задача должна быть поделена на КЭ зоны (домены), количество которых должно соответствовать количеству процессоров, на которых будет решаться зада-

ча. При запуске на счет также необходимо указать в параметрах решения указанное количество процессоров. Деление КЭ сетки задачи на отдельные домены является специальной задачей исследования. В пакете MSC.MARC предусмотрено 2 режима деления (ручной и автоматический). При этом автоматический режим также позволяет использовать несколько алгоритмов.

В новой версии MSC.MARC 2011 использовано несколько алгоритмов разработанных в Университете Миннесоты, которые называются алгоритмами доменной декомпозиции Metis [5]. В данной статье рассматривается доменная декомпозиция, основанная на алгоритме Metis Best. Этот алгоритм является комбинацией алгоритмов Metis Element Based (т.е. алгоритма основанного на анализе элементов) и алгоритма Metis Node Based (основанного на анализе узлов КЭ сетки). На рис. 2 показано деление КЭ сетки рассматриваемой задачи на 2 домена. При этом алгоритм декомпозиции не обращает внимания на существующие контактные тела, включая в домены конечные элементы, относящиеся к разным контактным телам. В частности, домен 1 на рис. 2 включает все элементы втулки, а также часть элементов сухаря.

Последующее решение задачи с использованием параллельных двух процессоров было успешным только относительно. Решения, полученные при помощи однопроцессорной и двухпроцессорной схем, совпадали. Но решение с использованием двух процессоров оказалось значительно более длительным. Время счета было равно 18794 с.

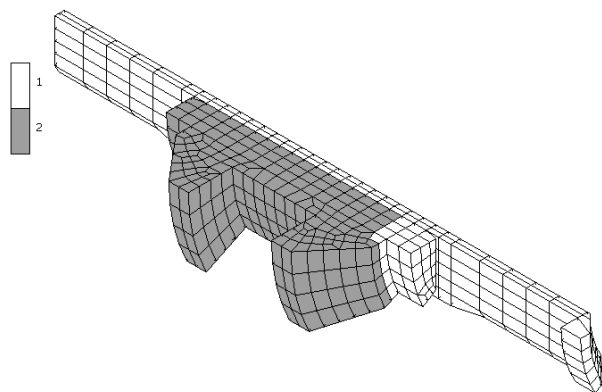


Рис. 2. Доменная декомпозиция КЭ сетки с использованием алгоритма Metis Best (2 домена)

Полученный результат был очень удивительным, поскольку кардинально противоречил ожидаемому эффекту. Использование двух процессоров вместо одного должно было бы ускорить процесс решения задачи, в то время как имело место замедление в 1,57 раза. Чтобы

как-то выяснить указанную ситуацию, была проведена декомпозиция согласно указанного выше алгоритма Metis Best для трех доменов. На рис. 3 показано соответствующее деление КЭ сетки.

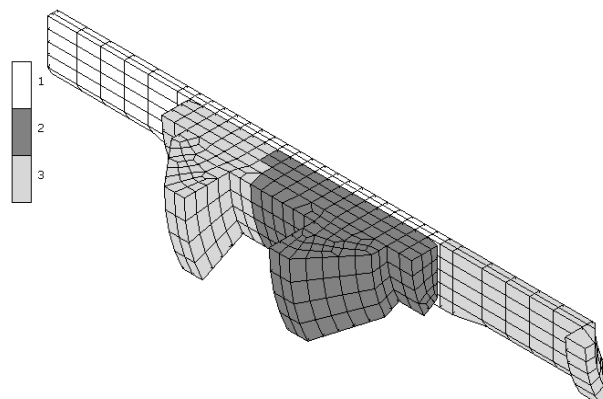


Рис. 3. Доменная декомпозиция КЭ сетки с использованием алгоритма Metis Best (3 домена)

В данном случае сетка была поделена таким образом, что домен 1 включал в себя часть элементов втулки, домен 2 включал часть элементов сухаря, и наконец, домен 3 состоял из оставшихся частей элементов сухаря и втулки не связанных между собой.

Время решения задачи с использованием трех процессоров составляло 11049 с. Указанный факт только запутал понимание проблемы. Поиск решения привел к необходимости проверки эффективности использования различных методов решения систем уравнений, которые реализованы в рамках пакета MSC.MARC 2011. В частности, существует возможность выбора метода решения задачи из нижеследующих (табл. 1).

Таблица 1

**Решатели (методы решения), используемые в пакете MSC.MARC 2011**

1	Multifrontal Sparse
2	Mixed Direct - Iterative
3	Casi Iterative
4	Pardiso Direct Sparse
5	Mumps Parallel Direct
6	Hardware Sparse
7	Iterative Sparse
8	Direct Profile (default)
9	Direct Sparse

Для рассматриваемой задачи были проведены расчеты с использованием всех методов для одно, двух и трех процессорных схем. Полученные результаты представлены на диаграмме (рис. 4).

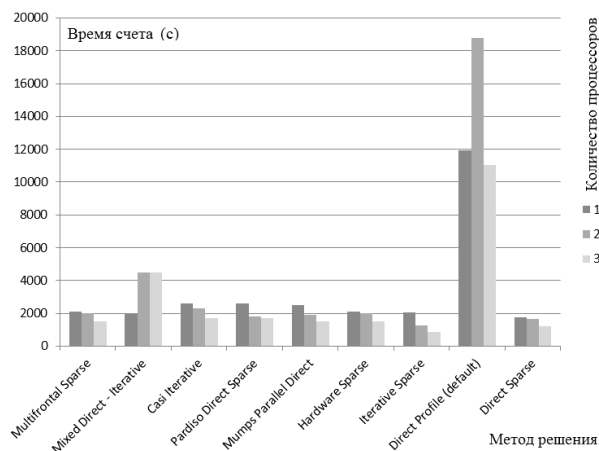


Рис. 4. Время расчета с использованием 1, 2 или 3 процессоров для разных методов решения

Полученные результаты оказались весьма неожиданными. Оказалось, что при использовании одного процессора используемый по умолчанию (default) метод (Direct Profile) оказался наименее эффективным, причем скорость вычислений с использованием метода Direct Sparse оказалась почти в 7 раз больше (время вычислений 1739 с).

И, тем не менее, не этот метод решения оказался лидером. При использовании метода Iterative Sparse для трех параллельных процессоров удается решить задачу в течение 850 с. Т.е. если принять решение для одного процессора на основе принятого по умолчанию метода, то использование указанной выше схемы решения позволяет в 14 раз! ускорить решение задачи.

Автор не ставил своей целью выяснение математических причин столь существенных ускорений. Можно при этом их найти в статье [6], где указывается, что с использованием профильного метода факторизации (Direct Profile) быстро решаются конструкции вытянутые в одном направлении. В рассматриваемом случае детали таковыми не являются. Так что ожидать высоких результатов от профильного метода не приходится. Хотя, конечно, в сравнении с другими методами, использующими разреженную оптимизацию (Sparse) отличие является разительным. В данном случае вызывает недоумение, почему создатели пакета MSC.MARC выбрали метод Direct Profile в качестве метода решения задач по умолчанию. Все-таки конструкции, вытянутые в одном направлении, не

являются наиболее часто встречающимися в конструкторской практике.

Сравнивая остальные методы решения следует отметить, что для метода Mixed Direct - Iterative использование многопроцессорных схем также противопоказано, хотя для одного процессора этот метод показал вполне хорошую скорость решения (1959 с).

Все остальные методы показали ожидаемый результат, т.е. с увеличением количества параллельных процессов время решения сокращается. При этом для каждого решателя такое сокращение разное. Если для лидера Iterative Sparse оно составляет 2,4 раза при использовании трех процессоров вместо одного, то, например, для Hardware Sparse оно равно только 1,4 раза.

## Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что при решении сложных нестационарных механических и термических задач с использованием МКЭ применение параллелизации вычислений является целесообразным. Тем не менее, не следует опираться на решения предлагаемых разработчиками по умолчанию. Вопрос выбора решателя является ключевым и в каждом случае требует проведения дополнительных исследований. Указанные выводы являются весьма существенными при расчетах деталей и узлов подвижного состава, где зачастую приходится решать задачи указанного типа.

В дальнейшем планируется провести исследование влияния доменной декомпозиции на скорость решения задачи.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Губачева, Л. А. Исследование изнашивания деталей фрикционного гасителя колебаний тележек пассажирских вагонов [Текст] / Л. А. Губачева // Новини науки Придніпров'я. – 2005. – Вип. 5. – С. 31-35.
2. Gubacheva, L. A. Assurance of operate reliability of rolling stock [Text] / L. A. Gubacheva, N.M. Naish // Journal of Guangdong non-ferrous metals. – 2005. – Vol. 15. – No. 2. – P. 200–212.
3. Губачева, Л. А. Контактные задачи механики при расчете подвижных сопряжений железнодорожного транспорта [Текст] / Л. А. Губачева, А. В. Сладковский, В. П. Щербаков // Вісник Східноукраїнського національного університету. – 2006. – № 8 (102), ч.1. – С. 111–114.
4. Sładkowski, A. Rozwiązanie problemu termospężystości dla współpracy kontaktowej elementów ciernego tłumika drgań / A. Sładkowski,

- L. Gubachova // I Kongres Mechaniki Polskiej. Materiały kongresowe. – Warszawa, 2007. – 8 s. (CD).
5. METIS - Serial Graph Partitioning and Fill-reducing Matrix Ordering // <http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/metis/metis/overview> (29.02.2012).
6. Мухин, А. Н. Новый разреженный прямой решатель (sparse direct solver) в системе ИСПА /

А. Н. Мухин, А. А. Мухин [Электрон. ресурс] – Режим доступа : <http://www.ispa-soft.ru/statxi/statxq15.htm> (29.02.2012).

Поступила в редколлегию 19.12.2011.  
Принята к печати 22.12.2011.

A. СЛАДКОВСЬКИ

## **ВИКОРИСТАННЯ ПАРАЛЕЛІЗАЦІЇ ОБЧИСЛЕНЬ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

У статті розглядаються проблеми паралелізації обчислювальних процесів при вирішенні пов'язаних термомпружних завдань за допомогою методу кінцевих елементів. Як приклад розглядається задача генерації тепла в контактній зоні фрикційного гасителя коливань пасажирських вагонів і визначення розподілу температур у взаємодіючих деталях.

*Ключові слова:* паралелізація обчислень, метод кінцевих елементів, фрикційний гаситель коливань

A. SŁADKOWSKI

## **THE USE OF COMPUTING PARALLELIZING FOR SOLVING OF THE PROBLEMS OF RAILWAY TRANSPORT**

The article deals with the problems related to parallelize of computational processes for solving problems connected with the thermal stress by the finite element method. As an example, here considered the problem of heat generation in the contact zone of a friction damper of passenger wagons and determined the temperature distribution in the interacting parts.

*Keywords:* parallelization of computations, finite element method, friction damper