Гетманский Виктор Викторович, к.т.н., м.н.с. каф. ВМ ВолгГТУ
Горобцов Александр Сергеевич, д.т.н., зав. каф. ВМ ВолгГТУ

Волгоградский государственный технический университет
e-mail:vm@vstu.ru

Особенности решения связанных задач динамики машин на вычислительном кластере

Ключевые слова: динамика систем тел, связанные задачи, вычислительный кластер, MPI.

Введение

В машиностроительном объекте параллельно протекают несколько физических процессов, связанных между собой. Каждый физический процесс описывается системой дифференциальных уравнений, которая связана с одной или более других систем по наборам параметрам. При анализе динамики автомобиля решение связанных задач требуется, например, при расчете тепловых режимов работы амортизаторов и напряженно-деформированного состояния рычагов подвески [1].

Чтобы построить вычислительную модель, учитывающую такие физические процессы, необходимо организовать взаимодействие связанных моделей. Рассмотрим задачу, в которой основная модель машиностроительного объекта представляет собой систему тел со связями, а вспомогательные модели описывают физические процессы в отдельных телах.

Математическая модель

Моделирование динамики систем тел проводится с помощью численного интегрирования системы дифференциально-алгебраических уравнений в расширенной постановке Лагранжа первого рода [2]:

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} - \mathbf{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\alpha}(2\boldsymbol{\mu}\boldsymbol{\Omega}^2\dot{\boldsymbol{\Phi}} + \boldsymbol{\Omega}^2\boldsymbol{\Phi}) + \mathbf{D}^{\mathrm{T}}\mathbf{p} = \mathbf{q}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, t), \\ \mathbf{D}\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{h}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, t). \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{x}$ –координаты тел, t –время, $\mathbf{M}$ – матрица инерции, $\mathbf{D}$ – матрица частных производных уравнений связей ($\mathbf{D} = \boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{x}}$), $\boldsymbol{\alpha}$ –диагональная матрица коэффициентов, $\boldsymbol{\mu}$ – коэффициенты демпфирования, $\boldsymbol{\Omega}$ –диагональная матрица собственных частот, $\mathbf{q}$ и $\mathbf{h}$ – правые части.

Расчетные области для вспомогательных моделей отдельных деталей конструкции строятся на основе твердотельной геометрии. При этом происходит ее дискретизация и построение модели из дискретных элементов [3].

Система уравнений для дискретноэлементной модели напряженно-деформированного состояния тела соответствует системе (1) без жестких связей:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} = \mathbf{g}(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y}, t) + \mathbf{f}(\ddot{\mathbf{x}}_s, \dot{\mathbf{x}}_s, \mathbf{x}_s, t), \quad (2)$$

где $\mathbf{g}$ – внутренние силы реакций в связях дискретных элементов, $\mathbf{f}$ – внешние силы реакций.

Правая часть кроме стандартного слагаемого сил реакций в связях между дискретными элементами $\mathbf{g}$ включает вектор внешних сил $\mathbf{f}$. Движение дискретных элементов рассматривается в неинерциальной системе отсчёта опорного тела из модели системы тел, поэтому **f** состоит из реакций в связях опорного тела с другими телами и сил инерции, вычисляемых через ускорение.

Система уравнений для решения задачи теплопередачи методом дискретных элементов имеет вид.

$$\dot{\mathbf{u}} = \gamma \boldsymbol{\Delta}(\mathbf{u}) + \mathbf{q}(\mathbf{y}, \dot{\mathbf{x}}_s, \mathbf{x}_s, t), \quad (3)$$

где $\mathbf{u}$ – температура узла, $\mathbf{y}$ – координаты узла, γ – коэффициент температуропроводности, $\mathbf{q}$ – вектор правых частей, учитывающий подмножество $\mathbf{x}_s$ параметров $\mathbf{x}$ системы (1), влияющих на диссипативные силы. Оператор Лапласа Δ в дискретной форме вычисляется методом конечных разностей с использованием семиточечной схемы с поправками на краях расчётной области.

Программная реализация

Для расчета модели динамики системы тел используется решатель программного комплекса ФРУНД, который был адаптирован для работы на вычислительном кластере [4]. Для процессов теплопередачи и динамического напряженно-деформированного состояния используются дополнительно написанные расчетные модули, выполняющие численное интегрирование уравнений (2) и (3) явными методами. Таким образом, вычислительная сложность решателей линейно зависит от размерности расчетной области (от числа неизвестных).

Вычислительная сложность расчетного модуля для решения системы (1) зависит от размерности задачи нелинейно, но она существенно ниже, чем вычислительная сложность для вспомогательных расчетных модулей, так как количество неизвестных в системах уравнений (2) и (3) не несколько порядков больше, чем в системе (1).

На каждой расчетной итерации параметры между расчетными модулями обмениваются с помощью пересылки сообщений с помощью библиотеки MPI.

Параллельный расчет на кластере выполняется по следующему алгоритму:

1. Выполнение итерации для решения системы (1) в момент времени t
2. Вычисление зависимых параметров $\mathbf{x}_s$
3. Пересылка средствами библиотеки MPI зависимых параметров $\mathbf{x}_s$ во вспомогательные расчетные модули для решения уравнений (2) и (3).
4. Выполнение итерации для решения систем (2) и (3) параллельно
5. Барьерная синхронизация средствами библиотеки MPI
6. Переход к моменту времени $t + \Delta t$ и шагу 1

Результаты моделирования

Были проведены расчеты для различных моделей транспортных средств, в составе которых были рассчитаны вспомогательные модели теплопередачи в амортизаторах и модели напряженно-деформированного состояния рычагов подвесок. Пример модели автомобиля и расчета динамики в системе ФРУНД показаны на рис. 1.

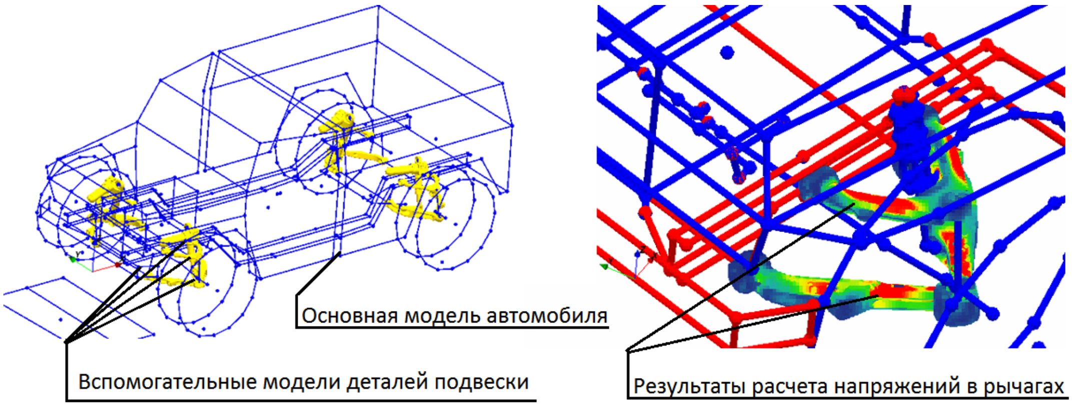

Рис. 1 – Расчетная схема и результаты расчета модели динамики автомобиля в программном комплексе ФРУНД

Для модифицированной модели автомобиля с 6 независимыми подвесками исследовано напряжение в верхних и нижних рычагах подвесок и теплопередача в корпусе и штоке амортизатора. На каждую из 6 подвесок приходилось по 4 решателя. Параллельные расчеты ускорили вычисления, но из-за связанности задач при увеличении числа процессов наблюдается падение эффективности (рис. 2), что связано с увеличением времени синхронизации при увеличении объема пересылаемых данных и числа параллельных процессов.

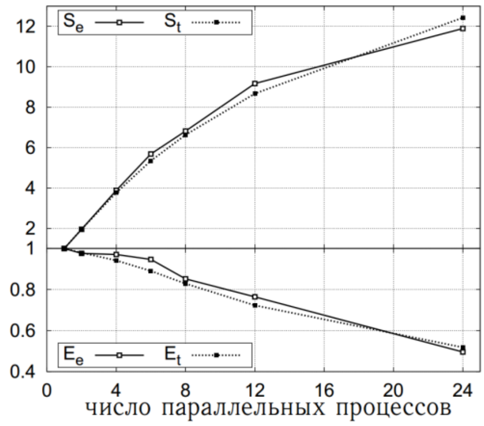

Рис. 2 – Ускорение и эффективность расчета модели динамики автомобиля на кластере

Ускорение измерено при сбалансированной вычислительной сложности за счет подбора размерности расчетных областей с учетом линейной зависимости вычислительной сложности вспомогательных моделей от размерности. Расчет теоретического и экспериментального ускорения и эффективности с использованием сетевого Амдала:

$$S_t(N) = \frac{t_1}{t_s + (t_1 - t_s)/N + t_1 \cdot \alpha \cdot (N-1)}, E_t(N) = \frac{S_t(N)}{N},$$

$$S_e(N) = \frac{t_1}{t_e(N)}, E_e(N) = \frac{S_e(N)}{N}, \tag{4}$$

где N – число параллельных процессов, t_1 – время последовательного расчета, t_s – время на последовательную часть кода, α –постоянный коэффициент для учета сетевой деградации вычислений. Для используемого кластера ВолгГТУ было определено значение коэффициента α =0,019. При постоянном значении коэффициента сетевой деградации расчет теоретического значения ускорения хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Дальнейшее увеличение числа параллельных процессов при добавлении вспомогательных моделей для различных деталей машин будет снижать эффективность параллельного расчета, но при этом ускорение будет иметь место. Рассмотренный класс связанных задач плохо масштабируется на большое число процессов, но при ограниченном количестве моделируемых деталей в конструкции позволяет ускорить вычисления на кластере.

Список литературы

[1] V.V. Getmanskiy, A.S. Gorobtsov, E.S. Sergeev, T.D. Ismailov, O.V. Shapovalov, “Concurrent simulation of multibody systems coupled with stress-strain and heat transfer solvers”, Journal of Computational Science, 3(6), 492-497, 2012.

[2] E. Bayo, J. Garcia de Jalon, M.A. Serna, “A modified Lagrangian formulation for the dynamic analysis of constrained mechanical systems”, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 71(2), 183-195, 1988.

[3] Гетманский, В.В. Распараллеливание расчёта напряжённо-деформированного состояния тела в многотельной модели методом декомпозиции расчётной области / В.В. Гетманский, А.С. Горобцов, Т.Д. Измайлов // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 16 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - № 8 (111), 2013. - С. 5-10.

[4] Сергеев, Е.С. Перенос системы многотельной динамики на вычислительный кластер / Е.С. Сергеев, В.В. Гетманский, А.С. Горобцов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского гос. политехн. ун-та. - 2010. - Вып. 101. - С. 93-99.