

Литература

1. Погосян М. А., Савельевских Е. П., Шагалиев Р. М. и др. Применение отечественных суперкомпьютерных технологий для создания перспективных образцов авиационной техники // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2013. Вып. 2. С. 3–18.
2. Hendrickson B., Leland R. The Chaco user's guide: Version 2.0: Tech. Rep. // SAND95-2344, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, July 1995.
3. Karypis G., Kumar V. MeTiS: A software package for partitioning unstructured graphs, partitioning meshes, and computing fill-reducing orderings of sparse matrices, version 4.0: Technical report // Univ. of MN, Dept. of Computer Sci. and Engr. September 20, 1998.
4. Pellegrini F. Scotch and libScotch 5.1 User's Guide, INRIA Bordeaux Sud-Ouest, ENSEIRB & LaBRI, Universite Bordeaux, FRANCE, August 29, 2010.
5. Karpusenko V., Vladimirov A. Configuration and Benchmarks of Peer-to-Peer Communication over Gigabit Ethernet and InfiniBand in a Cluster with Intel Xeon Phi Coprocessors, March 11, 2014. [Electronic resource]. Mode of access: <http://research.colfaxinternational.com/post/2014/03/11/InfiniBand-for-MIC.aspx>.
6. Gansner E. R., North S. C. An open graph visualization system and its applications to software engineering // SOFTWARE – PRACTICE AND EXPERIENCE. 2000. 30. 11. P. 1203–1233. [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.graphviz.org>.

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУРАХ РЕАКТОРА ИТЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ЭВМ

*А. Б. Алексеев, В. М. Амосков, А. М. Базаров, А. В. Белов, В. А. Беляков,
Е. И. Гапионов, Ю. В. Грибов, В. П. Кухтин, Е. А. Ламзин, Н. А. Максименкова,
С. Е. Сычевский, О. Г. Филатов*

ОАО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», г. Санкт-Петербург

Введение

Эксплуатация токамака ИТЭР предполагает необходимость планирования и предварительного численного моделирования физических экспериментов с тем, чтобы не выйти за границы допустимого операционного пространства установки. При этом управление плазмой и реактором в целом является сложной задачей из-за достаточно малых технических запасов, принятых при конструировании, что является следствием жесткого ограничения стоимости проекта ИТЭР. Решение задачи управления требует наличия симуляторов, моделирующих поведение плазмы, плазменной диагностики и инженерных систем реактора, а также использования многочисленных баз данных, характеризующих работу этих систем.

Симуляторы ИТЭР – это специализированные быстродействующие компьютерные программы, адаптированные к особенностям установки. Отдельную группу составляют симуляторы, моделирующие работу различных инженерных систем (все системы, кроме плазмы и ее диагностики) и, в частности, их электромагнитное поведение, анализ которых, как правило, требует привлечения полномасштабных вычислительных моделей.

Ряд специфических требований, предъявляемых к симуляторам, в частности, высокое быстродействие с целью оперативного получения информации, предполагает глубокую модернизацию подходов и существующих численных кодов, используемых для проведения вычислительного эксперимента прикладных исследований. Организация высокопроизводительных параллельных вычислений с использованием многопроцессорных ЭВМ позволяет, в принципе, решить задачу разработки симуляторов. Однако переход к параллельным вычислениям требует поиска и разработки новых алгоритмов для обеспечения максимальной эффективности использования ресурсов таких ЭВМ.

В работе представлены первые результаты, связанные с разработкой «инженерного» симулятора, предназначенного для анализа электромагнитных процессов, протекающих в проводящих структурах (системах) установки ИТЭР, с использованием численного кода TUPHOON [1]. Предлагаемые методы решения этой задачи ориентированы на эффективное применение параллельных вычислений. Для проведения тестовых расчетов использовалась многопроцессорная компактная суперЭВМ, разработанная ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (г. Саров, Россия) [2].

Устройство токамака ИТЭР

ИТЭР – проект международного экспериментального термоядерного реактора [3], целью которого является демонстрация научной и технической возможности получения термоядерной энергии для мирных целей. Устройство ИТЭР изображено на рис. 1.

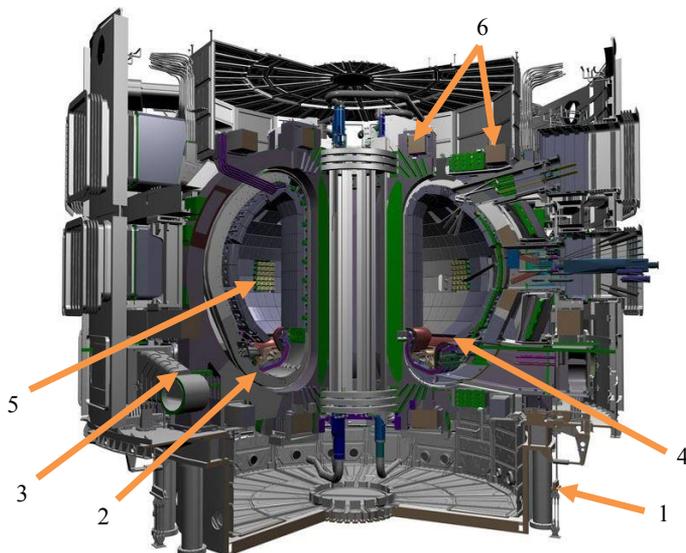


Рис. 1. Токамак ИТЭР: 1 – криостат, 2 – вакуумная камера, 3 – бланкетные модули, 4 – дивертор, 5 – системы нагрева плазмы, 6 – магниты

Магнитная система ИТЭР включает в себя 18 сверхпроводящих катушек тороидального поля, 6 катушек полоидального поля, центральный соленоид и набор корректирующих катушек. Магнитное поле индуцируется как магнитами, так и самим током, протекающим в плазме.

Проводящими структурами, в которых наводятся вихревые токи, являются криостат и его тепловая защита, вакуумная камера с патрубками, тепловая защита вакуумной камеры.

Криостат, сделанный из нержавеющей стали, содержит в себе вакуумную камеру и сверхпроводящие магниты. Вакуумная камера представляет собой герметичный стальной контейнер в форме тора. Внутри нее происходит термоядерная реакция, в ходе которой частицы плазмы движутся по спиралевидным траекториям, долгое время не касаясь стенок.

Вакуумная камера имеет двойные стенки с полостью между ними для циркуляции воды. Вакуумная камера имеет порты, обеспечивающие доступ в нее системам диагностики, системам нагрева плазмы и вакуумным системам. В нижней части вакуумной камеры расположен дивертор.

Внутренняя поверхность вакуумной камеры обложена бланкетными модулями, обеспечивающими экранирование вакуумной камеры и сверхпроводящих магнитов от нейтронного потока и теплового потока термоядерной реакции. Получаемые в ходе термоядерной реакции нейтроны влетают в бланкетные модули и замедляются внутри них, их кинетическая энергия переходит в тепловую энергию и передается охлаждающей жидкости. Эта энергия затем используется для производства электрической энергии установки.

Математическая постановка задачи

Для квазистационарных полей [4] решение краевой задачи Коши [5] сводится к нахождению функции источника. Для интегро-дифференциальной постановки задачи T - Ω метода [6, 7] рассматриваемая область ограничена пространством, занимаемым проводящими структурами. Решением задачи является векторный электрический потенциал \vec{T} , который, при использовании метода тонких проводящих оболочек [8], имеет вид

$$T(x, t) = \int_0^t d\tau \int_V G(x, \xi, t - \tau) f(\xi, \tau) d\xi, \quad (x \in V), \quad (1)$$

где $G(x, \xi, t - \tau)$ – функция источника (влияния), являющаяся аналогом функции Грина [5], и представляющая собой отклик системы в точке x на единичное импульсное воздействие источника $\delta_+(\xi, t - \tau)$, расположенного в точке ξ . При этом $G(x, \xi, t - \tau) = 0$ при $t \leq \tau$. Таким образом, исключаются «мгновенные» влияния и воздействия «будущих» значений от непрерывно распределенных источников с плотностью $f(\xi, \tau)$ (так называемое условие физически реализуемых задач [9]).

В практических приложениях при анализе квазистационарных электромагнитных полей источниками обычно являются катушки с токами. При анализе режимов работы токамаков к источникам также относится распределенный по сечению ток плазмы. Функция влияния $G(x, \xi, t - \tau)$ находится численным способом.

Для конечного набора источников $i = \overline{1, m}$ решение (1) преобразуется к виду

$$T(x, t) = \int_0^t d\tau \sum_{i=1}^m G_i(x, t - \tau) f_i(\tau), \quad (x \in V), \quad (2)$$

В дальнейшем для упрощения записи индекс i будет опускаться.

Будем считать заданным сценарий изменения полного тока $I(t)$ в источнике поля. Для описания этого сценария будем использовать аппроксимирующую функцию $g(t)$ следующего вида:

$$I(t) \approx g(t) = \sum_j a_j \varphi(t - t_j), \quad (3)$$

а в качестве базисных выберем линейные функции

$$\varphi(t - t_j) = \begin{cases} 0, & t \leq t_j, \\ (t - t_j)/\theta, & t > t_j, \end{cases} \quad j = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Произвольная константа θ имеет размерность времени, $[\theta] = c$. Ее введение позволяет рассматривать базисные векторы $\varphi(t - t_j)$ как безразмерные величины. При этом размерность физиче-

ских величин в такой базисной системе приписывается коэффициентам a_j . Отметим, что аппроксимация (3) с использованием базисных функций (4) является глобальной на интервале наблюдения.

Выбор базисных функций (4) обусловлен соображениями практического удобства и предполагаемого табличного представления исходных данных с малыми временными шагами на характерном интервале наблюдения, что позволяет использовать кусочно-линейную аппроксимацию для описания сценария тока в источнике с заданной точностью.

В распространенном частном случае, когда источники тока электрически изолированы от области растекания индуцированных вихревых токов, внешнее воздействие на систему в виде заданного распределения токов $I(t)$ эквивалентно заданию скорости их изменения $I'(t) = dI(t)/dt$. При этом для описания источников $I'(t)$ базисной является функция $\varphi'(t-t_j) = U_+(t-t_j)/\theta$, где $U_+(t-t_j)$ – единичная ступенчатая функция [9], отвечающая линейному во времени росту тока источника.

Будем определять коэффициенты a_j в (3) путем построения так называемого «наилучшего приближения» [10]. Это означает, что требуется найти линейную комбинацию (3), реализующую

$$\inf_{a_j} \left\| I(t) - \sum_{j=1}^n a_j \varphi_j(t-t_j) \right\| \quad (5)$$

с нормой $\int_0^t |g(t)| dt$.

Будем предполагать, что функция кусочно-гладкая на интервале наблюдения и на каждом интервале $\Delta t_j = t_{j+1} - t_j$ является линейной. Это означает, что аппроксимирующая функция (3) должна точно приближать функцию $I(t)$, а нижняя граница (5) равна нулю. Для определения коэффициентов a_j найдем интеграл от $I(t)$ на интервале $\Delta t_j = t_{j+1} - t_j$.

$$F_j = \int_{t_j}^{t_{j+1}} I(t) dt = \sum_{i=1}^{j-1} a_i \int_{t_j}^{t_{j+1}} \varphi(t-t_i) dt + a_j \int_{t_j}^{t_{j+1}} \varphi(t-t_i) dt, \quad (6)$$

тогда

$$a_j = \frac{1}{\Phi_j} \left(F_j - \sum_{i=1}^{j-1} a_i \int_{t_j}^{t_{j+1}} \varphi(t-t_i) dt \right), \quad \Phi_j = \int_0^{\Delta t_j} \varphi(t) dt. \quad (7)$$

Окончательно можно получить, для любого j :

$$\begin{cases} a_j = (\Delta I_j / \Delta t_j - \Delta I_{j-1} / \Delta t_{j-1}) \theta, \\ \Delta I_j = I_{j+1} - I_j, \\ \Delta t_j = t_{j+1} - t_j. \end{cases} \quad (8)$$

Таким образом, рассчитав отклик системы (функцию источника) на элементарное воздействие источника, соответствующее линейному во времени росту тока и численно равное $\frac{U_+(t-t_j)}{\theta}$,

определив коэффициенты a_j (8) линейной комбинации (3), принятой для описания сценария тока источника, можно получить решение задачи на всем интервале наблюдения в виде суперпозиции

(сборки) решений от каждого воздействия $\frac{a_j U_+(t-t_j)}{\theta}$ в отдельности. Окончательно, решение кра-

евой задачи Коши строится путем суперпозиции решений от каждого источника поля. Отметим, что принцип суперпозиции справедлив для линейных и линеаризованных систем.

Разработанная математическая модель для описания электромагнитных процессов с использованием сборки отдельных решений ориентирована на эффективное использование параллельных вычислений. Введение параллелизма достигается за счет применения принципа суперпозиции, вытекающего естественным образом из линейной формы (3) и используемого для получения решения как от отдельного источника, так и от всех источников поля. Дополнительные возможности распараллеливания вычислений связаны с рекурсивными соотношениями (8).

Моделирование тока плазмы

В установке ИТЭР анализ эволюции плазмы в процессе управляемых и неуправляемых сценариев проводится на основе осесимметричного плазмо-физического кода DINA [11, 12]. Полученные результаты решения совместной электромагнитной задачи используются в качестве входных данных для последующего проведения трехмерных электромагнитных расчетов. При этом распределенный по сечению тороидальный ток плазмы моделируется подвижными токовыми витками.

В рамках разработанного алгоритма удобно описывать ток плазмы с помощью неподвижных в пространстве токовых витков. С этой целью вводится в рассмотрение прямоугольная равномерная сетка, перекрывающая сечение вакуумной камеры установки. Координаты фиксированных узлов сетки определяют положение токовых витков, моделирующих распределенный ток плазмы. Таким образом, для описания плазмы как источника тока, требуется предварительный расчет функции влияния каждого из токовых витков, расположенных внутри вакуумной камеры.

Ток каждого подвижного витка, попавшего в ячейку сетки, пересчитывается в узлы ячейки в соответствии с интерполяционными соотношениями, используемыми в методе конечных элементов для аппроксимации функций на элементе. Для прямоугольных элементов сетки (ячеек) удобно использовать барицентрическую систему координат ξ, η , в которой безразмерные координаты внутри элемента изменяются в интервале $(-1, +1)$, а функции формы имеют вид [13]

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i), \quad i = \overline{1, 4}, \quad (9)$$

при этом

$$I_i = I(\xi, \eta)N_i(\xi, \eta), \quad (10)$$

а

$$\sum_i N_i(\xi, \eta) \equiv 1. \quad (11)$$

в любой точке (ξ, η) элемента. Здесь (ξ_i, η_i) – барицентрические координаты i -го узла сетки, принимающие целочисленные значения ± 1 ; (ξ, η) – барицентрические координаты токового витка, попавшего внутрь ячейки сетки, I_i – часть полного тока $I(\xi, \eta)$, «переходящая» в i -й узел.

Окончательно, в каждый момент времени ток в узле сетки определяется суммированием по всем неподвижным виткам узловых значений токов, полученных согласно описанной процедуре. Для выделенного узла эта процедура затрагивает только ячейки сетки, примыкающие к этому узлу.

Программная реализация алгоритма

Разработанный алгоритм решения задачи нахождения распределения вихревых токов с использованием известных функций источников был реализован в программном комплексе на языке Fortran. Параллельные вычисления организованы с помощью директив OpenMP [14] – открытого стандарта для распараллеливания программ, поддерживающегося практически всеми платформами. Разработанное программное обеспечение ориентировано на высокопроизводительные вычислительные многопроцессорные системы.

Программная реализация алгоритма предоставляет возможность распараллеливания вычислений по временным точкам сценария изменения токов, по выходным временным точкам, по источникам поля и по областям расчетной модели.

В состав программного комплекса входят программы для подготовки базы данных функций источников, пересчета сценария изменений токов в источниках в разложения, сборки решения, а также средства, обеспечивающие интерфейс с численным кодом TYPHOON. Функциональная блок-схема подготовки базы данных, работы симулятора и их интерфейса представлена на рис. 2.

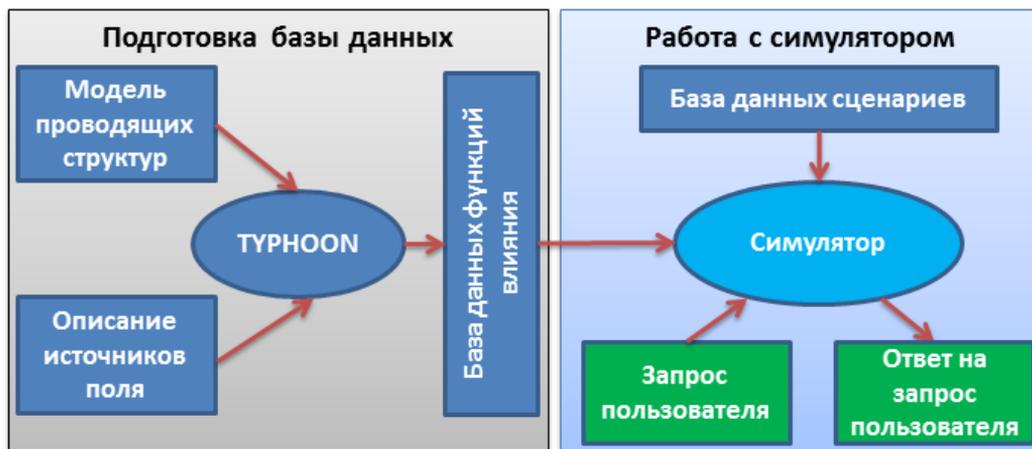


Рис. 2. Функциональная блок-схема подготовки базы данных, работы симулятора и их интерфейса

Процесс подготовки базы данных для конкретной модели установки может занимать длительное время, но он требует однократного выполнения. Обработка симулятором запроса пользователя (временные точки, распределение электромагнитных параметров, интересующих областей и т. д.) должна происходить в реальном времени.

Результаты тестирования

Разработанный векторный алгоритм расчета вихревых токов в проводящих структурах и разработанное на его основе программное обеспечение были верифицированы в тестовых расчетах применительно к установке ИТЭР.

Расчеты проводились на компактной суперЭВМ АПК-1 [2], произведенной в РНЦ «ВНИИЭФ», г. Саров, Россия. АПК-1 представляет собой многопроцессорную вычислительную машину, состоящую из двух узлов. На каждом узле расположено 64 процессорных ядра с тактовой частотой 2,1 МГц и 256 Гбайт оперативной памяти. Пиковая производительность суперЭВМ составляет ~1 Тфлоп/с.

Для тестового расчета был выбран сценарий «большого срыва» MD36ms (MajorDisruption-of-TypeII) [15]. В качестве модели проводящих структур использовалась заимствованная из работ [16, 17] глобальная оболочечная 3D расчетная модель проводящих структур ИТЭР, описывающая 20-градусный сектор установки, который включает в себя двухслойную вакуумную камеру с патрубками, тепловую защиту вакуумной камеры с тепловыми защитами криостата и опорных структур, а также кожух криостата (рис. 3). Для описания распределенного тока плазмы в модели неподвижных витков использовалась равномерная сетка с шагом 0,5 м (рис. 4). Ряд характеристик тестового расчета приведен в табл. 1.

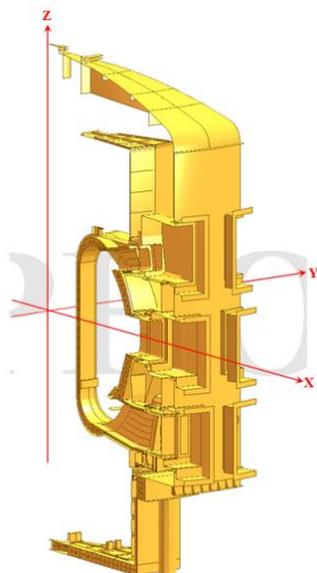


Рис. 3. Расчетная модель проводящих структур ИТЭР

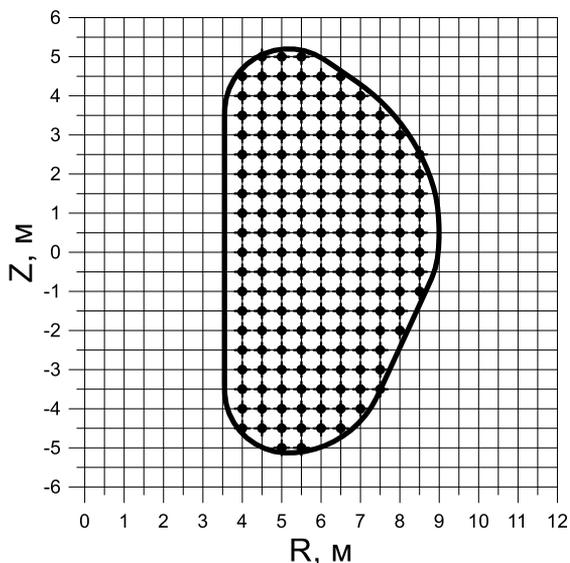


Рис. 4. Пространственное расположение токовых витков внутри вакуумной камеры для описания распределенного тока плазмы

Было получено пространственно-временное распределение вихревых токов в проводящих структурах, наведенных изменениями распределенного тороидального тока плазмы, токов центрального соленоида и катушек полоидального магнитного поля. Данные результаты сопоставлялись с полученными ранее данными [16] с использованием кода TUPHOON. Расхождение результатов во всей расчетной области не превышает 0,4 %. На рис. 5 в качестве иллюстрации приведено сопоставление интегральных значений тороидального вихревого тока на вакуумной камере.

Таблица 1

Характеристики тестового расчета

Число неизвестных в расчетной области	30590
Число источников поля	183
Число временных точек для описания сценария тока в источнике	662
Число временных точек для описания «элементарного» отклика	191
Объем входных данных, Мб	8160
Число задействованных процессорных ядер	32
Время сборки решения в одной временной точке, с	0,75

Для оценки эффективности распараллеливания вычислений был проведен ряд расчетов, результаты которых показали линейный рост производительности в зависимости от числа процессорных ядер (рис. 6).

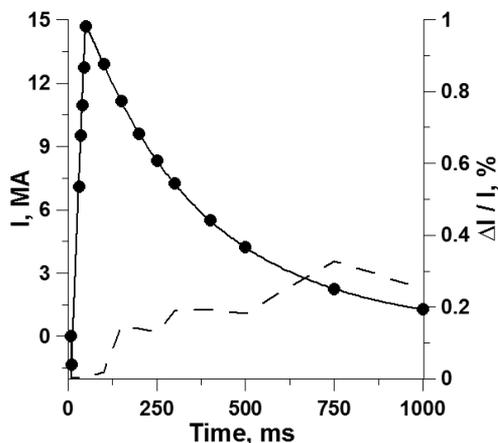


Рис. 5. Тороидальный вихревой ток на вакуумной камере, полученный сборкой решений (точки) и кодом TYPHOON (сплошная линия) и их относительная разница (пунктир)

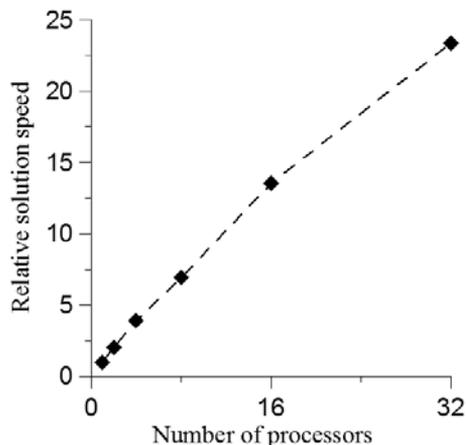


Рис. 6. Скорость вычислений (в разах) в зависимости от количества задействованных процессорных ядер

Заключение

С целью верификации разработанного программного обеспечения и оценки выигрыша производительности, достигнутого за счет векторизации алгоритма, был выполнен тестовый расчет типичного сценария срыва тока плазмы (MD36ms). Расчет проводился на суперЭВМ, произведенной РНЦ «ВНИИЭФ», г. Саров, Россия. Сопоставление с расчетами, выполненными ранее с использованием комплекса программ TYPHOON, показало, что отличие результатов не превышает 0,4 %, и оно в случае необходимости может быть уменьшено. При этом типичное время формирования решения в любой момент времени составило порядка 0,75 с, что на порядки меньше времени численного решения системы дифференциальных уравнений, соответствующих заданному сценарию. Достигнутая эффективность предложенного подхода позволяет исследовать весь спектр регламентированных сценариев, с тем, чтобы достигнуть предельной надежности анализа.

Одним из преимуществ описанного подхода является возможность локализации исследуемой области анализа физического процесса – как во времени, так и в пространстве, – что позволяет сконцентрировать вычислительные ресурсы только на исследуемом объекте и, таким образом, еще более повысить производительность вычислений. В данном случае за счет формирования решения отсутствует необходимость воспроизведения как всей предыстории решения до рассматриваемого момента времени, так и его распределения вне рассматриваемой области пространства. Предельный случай соответствует решению в произвольной точке пространства в произвольный момент времени.

Важно подчеркнуть, что при данном подходе производительность достигается не за счет упрощения расчетной модели, а напротив, разработанное программное обеспечение в большей степени ориентировано на работу с максимально детализированной моделью – степень детализации практически не влияет на производительность и поэтому может (и должна) соответствовать требуемой точности, предъявляемой к работе симулятора.

Разработанный подход может быть использован не только как самостоятельный вычислительный инструмент для анализа переходных электромагнитных процессов, но и может быть внедрен или использован совместно с другими программными средствами, моделирующими сопутствующие физические процессы. В частности, одной из таких возможностей является изучение поведения плазмы в токамаках на основе плазмо-физических кодов с детальным учетом согласованного трехмерного распределения магнитного поля, вызванного вихревыми токами в окружающих плазму проводящих структурах.

Предполагается, что разработанное программное обеспечение ляжет в основу симулятора электромагнитных процессов в проводящих структурах установки ИТЭР. На настоящий момент разработанные элементы симулятора электромагнитных процессов в проводящих структурах установки ИТЭР включают учет таких источников нестационарного магнитного поля, как секции центрального соленоида, катушки полоидального поля, тороидальный ток плазмы (с преобразованием описания плазмы из формата выходных данных программы DINA для любого из сценариев в фиксированный набор токовых витков внутри вакуумной камеры). В дальнейшем предполагается учет таких видов источников поля как катушек тороидального поля, тороидального магнитного потока плазмы и гало-токов. Для практических нужд возможна разработка расчетных моделей как с учетом окончательной конструкции установки, так и с учетом доступных вычислительных мощностей. Рассматриваются варианты использования других технологий распараллеливания, в частности, MPI.

Литература

1. Амосков В. М., Белов А. В., Беляков В. А. и др. Регистрационное свидетельство № 2003612496. Программный комплекс для численного моделирования квазистационарных вихревых токов в тонких проводящих пространственных оболочечных конструкциях сложной геометрической формы (ТУРНООН 2.0). М., 12 ноября 2003.
2. Стрюков В. Н. и др. Универсальная компактная суперЭВМ // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2012. Вып. 2. С.78–89.
3. ITER – the way to new energy [Electronic resource]. Mode of access: [http://http://www.iter.org/](http://www.iter.org/)
4. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1976.
5. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966.
6. Carpenter C. Comparison of alternative formulations of 3D magnetic field and eddy current problems at power frequencies // Proc. IEEE. 1977. 124(11). P. 1026.
7. Preston T., Reece A. Solution of 3D eddy current problems: T - Ω method // IEEE Trans. On Magnetics. Vol. 18, N 2. March 1982. P. 486.
8. Kameari A. Transient Eddy Current Analysis on Thin Conductors with Arbitrary Connection and Shapes // J. Comput. Physics. 1981. Vol. 42, N 1. P. 124–140.
9. Korn G., Korn T. Mathematical handbook for scientists and engineers, definitions, theorems and formulas for reference and review. McGraw-Hill Book Company, 1968.
10. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М., С.-Пб.: ФИЗМАТЛИТ, Невский диалект, Лаборатория Базовых Знаний, 2002
11. Khayrutdinov R., Lukash V. Studies of plasma equilibrium and transportation in a tokamak fusion device with the inverse-variable technique // J. Comput. Phys. 1993. Vol. 109. P. 193–201
12. Lukash V., Sugihara M., Gribov Yu., Fujieda H. Analysis of the direction of plasma vertical movement during major disruptions in ITER // Plasma Phys. Control Fusion. 2005. Vol. 47. P. 2077–2086
13. Oden J. Finite Elements of Nonlinear Continua. McGraw-Hill Book Company, 1972.
14. OpenMP: A Proposed Industry Standard API for Shared Memory Programming. [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.openmp.org/>
15. LoadSpecifications (LS). Version 6.0, ITER_D_222QGL, 20 Apr. 2012, ITER private communication.
16. Belov A., Gapionok E., Kukhtin V. et al. Electromagnetic Analyses for Thermal Shield (TS) and Thermal Shield Manifold (TS Manifold): Final Report on the Contract ITER/CT/09/4300000073. St.-Petersburg, December 2010.
17. Alekseev A., Arslanova D., Belov A. et al. Computational models for electromagnetic transients in ITER vacuum vessel, cryostat and thermal shield // Proc. of the 27-th Symposium on Fusion Technology. Liege, Belgium. Sept. 24–28, 2012. P. 1904–1907.