Результаты исследований показали, что оптимальным режимом является 6 вариант (табл. 4), который соответствует максимальному выходу товарного газа (98450 кг/ч) при выполнении требований ГОСТ по качеству его подготовки.

Таким образом, разработанный модуль оптимизации МС позволяет автоматизировать процесс выбора наиболее эффективного технологического режима работы установки промысловой подготовки газового конденсата, а модернизированная МС дает возможность оперативного расчета и прогнозирования технологических показателей работы УКПГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология переработки природного газа и конденсата / под ред. В.И. Мурина. – М.: ОО «Недра Бизнесцентр», 2002. – Ч. 1. – 517 с.
2. Сергеев О.А., Князев А.С., Кравцов А.В., Ушева Н.В., Мойзес О.Е., Кузьменко Е.А., Рыжакина А.Н. Моделирование процессов отделения водометанольных растворов при промысловой подготовке газового конденсата // Газовая промышленность. – 2008. – № 4. – С. 24–27.
3. Кравцов А.В., Ушева Н.В., Мойзес О.Е., Кузьменко Е.А., Рейзлин В.И., Гавриков А.А. Информационно-моделирующая система процессов промысловой подготовки газа и газового конденсата // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 132–137.
4. Кравцов А.В., Ушева Н.В., Мойзес О.Е., Кузьменко Е.А., Ануфриева О.В. Анализ влияния технологических параметров и оптимизация процессов низкотемпературной сепарации // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 3. – С. 57–60.
5. Тронов В.П. Промысловая подготовка нефти. – Казань: ФЭН, 2000. – 417 с.
6. Баталин О.Ю., Брусиловский А.И., Захаров М.Ю. Фазовые равновесия в системах природных углеводородов. – М.: Недра, 1992. – 272 с.
7. Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 416 с.

Поступила 26. 06. 2012 г.

УДК 004.415.2:533.9

АНАЛИЗ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ФОРМЫ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА ТОКАМАКА КТМ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

А.М. Ли, А.А. Саньков, В.М. Павлов, А.С. Абанькин

Томский политехнический университет
E-mail: alee@tpu.ru

Приведен анализ алгоритма расчета формы плазменного шнура на предмет параллельных вычислений, получены оценки показателей эффективности параллельного алгоритма и необходимого числа процессоров для достижения максимального быстродействия расчета формы плазмы токамака КТМ. На основе полученных значений показателей эффективности сформулировано требование по вычислительной производительности многопроцессорной системы, необходимой для расчета формы плазмы и управления плазмой в реальном масштабе времени. По результатам работы произведен выбор многопроцессорного DSP кластера, который будет использован в контуре управления плазмой.

Ключевые слова:
Токамак, плазменный шнур, реконструкция формы, метод токовых нитей, параллельные вычисления.
Key words:
Tokamak, plasma column, shape identification, filament current method, parallel computing.

Эффективное и безопасное проведение экспериментов на современных установках типа токамак [1] невозможно без точного управления положением и формой плазменного шнура. Для Казахстанского материаловедческого токамака КТМ задача управления положением и формой плазмы особенно актуальна в связи с тем, что установка предназначена для создания специальных плазменных конфигураций (лимитерной, диверторной, с различными параметрами вытянутости и треугольности), обеспечивающих требуемые уровни энергетических воздействий на внутрикамерные элементы КТМ [2].

Высокие скорости протекания физических процессов в плазме токамаков требуют использования в контуре управления плазмой высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем, позволяющих эффективно распараллеливать алгоритмы управления и идентификации границы плазмы в реальном масштабе времени. В частности на токамаке JT-60 в контуре управления плазмой используется многопроцессорный DSP кластер [3], который позволяет визуализировать положение и форму плазмы в реальном масштабе времени.

Для восстановления границы плазмы и ее положения используют результаты измерений сигналов с датчиков электромагнитной диагностики токамака [4, 5]. В состав электромагнитной диагностики токамака КТМ [6, 7] входят 36 двухкомпонентных магнитных зондов для измерения тангенциальной и нормальной составляющей полоидального магнитного поля, 12 датчиков для измерения полоидального потока, ток плазмы измеряется с использованием поясов Роговского.

В физике токамаков широко используется цилиндрическая система координат (r,φ,z), а также вводится допущение об осевой (тороидальной) симметрии, что позволяет рассматривать задачу равновесия плазмы в токамаках на полоидальной плоскости (r,z). Точку на полоидальной плоскости будем описывать радиус-вектором $\mathbf{r}=(r,z)$.

Одним из наиболее часто используемых методов оценки границы плазмы в режиме реального времени является метод токовых нитей (метод филаментов) [8]. Данный метод основан на вычислении функции распределения полоидального магнитного потока $\psi(\mathbf{r})$ путем аппроксимации плотности тока плазмы $J_p(\mathbf{r})$ конечным числом n_f токовых нитей:

$$J_p(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{n_f} I_{f\,i}\,\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_{f\,i}), \qquad (1)$$

где $\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_{f,i})$ – дельта-функция Дирака.

Положение $\mathbf{r}_{f,i}$ и величина тока $I_{f,i}$ нитей находится таким образом, чтобы восстановленная функция магнитного потока согласовывалась с результатами магнитных измерений по критерию наименьших квадратов. На практике часто поиск границы плазмы осуществляют либо при фиксированных положениях токовых нитей (метод фиксированных нитей), либо при фиксированных токах в нитях (метод подвижных нитей). В [9] предлагается модифицированный метод фиксированных нитей, когда на положение токовых нитей накладывают ряд ограничений, при которых нити располагаются вдоль замкнутого контура – эллипса, положение фокусов которого оценивается по результатам магнитных измерений с использованием моментов плотности тока, малая полуось эллипса определяется как наименьшее расстояние между лимитером и любым из фокусов.

Следуя [9], расположим токовые нити вдоль контура $l(\mathbf{r}_c,a,b,\gamma)$, т. е. $\mathbf{r}_{f,i}\in l(\mathbf{r}_c,a,b,\gamma)$, где a, b, γ – неизвестные параметры, отвечающие за вытянутость и треугольность контура. В качестве $l(\mathbf{r}_c,a,b,\gamma)$ выбран контур, заданный в параметрической форме:

$$\begin{cases} r(t) = r_c + a\cos(t+\gamma\sin t), \\ z(t) = z_c + b\sin t, \quad t\in[0,2\pi]. \end{cases}$$

Характеристики распределения тока (1) $\mathbf{r}_c$, a, b, γ и $I_{f,i}$ можно найти, минимизируя квадратичную ошибку:

$$\varepsilon(\xi) = \sum_i w_i (M_i(\xi) - \tilde{M}_i)^2, \qquad (2)$$

где w – вектор весовых коэффициентов; ξ – вектор искомых параметров; $\tilde{M}$ – вектор, заданный в пространстве наблюдений, компоненты которого составляют измеренные значения характеристик полоидального магнитного поля $\tilde{\psi}$, $(\tilde{B}_n,\tilde{B}_\tau)$ и ток плазмы $\tilde{I}_p$; $M(\xi)$ – вектор теоретических значений (B_n,B_τ), ψ и I_p. Поиск минимума (2) осуществляется по методу градиентного спуска за фиксированное число итераций N.

Для начального приближения, координаты центра плазменного шнура можно оценить, используя моменты плотности тока, определяемые выражением [10, 11]:

$$Y_m = \mu_0 \int_S f_m J_p\, dS = \oint_L (f_m B_\tau + r g_m B_n)\, dl, \qquad (3)$$

где f_m и g_m – функции, удовлетворяющие однородному уравнению Грэда–Шафранова и уравнению Лапласа соответственно [8]. Для оценки токового центра плазменного шнура можно ограничиться вычислениями моментов плотности тока до второго порядка включительно, а в качестве f_m и g_m можно выбрать следующий набор функций [9, 12]:

$$\begin{cases} f_0 = 1, & g_0 = 0, \\ f_1 = z, & g_1 = -\ln(r), \\ f_2 = r^2, & g_2 = 2z. \end{cases}$$

Координаты токового центра плазмы можно оценить по следующим формулам:

$$r_c = \sqrt{\frac{Y_2}{Y_0}} = \sqrt{\frac{Y_2}{\mu_0 I_p}}, \quad z_c = \frac{Y_1}{Y_0} = \frac{Y_1}{\mu_0 I_p}.$$

Полоидальное магнитное поле $\mathbf{B}_p(\mathbf{r})$ и поток $\psi(\mathbf{r})$ определяются тороидальным током в токамаке, которое задается распределением тока плазмы (1) и тока в обмотках полоидального поля:

$$J(\mathbf{r}) = J_p(\mathbf{r}) + J_{ext}(\mathbf{r}), \qquad (4)$$

Распределение тока в обмотках полоидального поля может быть задано аналогично (1):

$$J_{ext}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{n_{ext}} I_{ext\,i}\,\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_{ext\,i}), \qquad (5)$$

здесь $\mathbf{r}_{ext,i}$ – координаты обмоток на полоидальной плоскости; $I_{ext,i}$ – ток в обмотках. В ходе эксперимента ток в обмотках измеряется поясами Роговского.

Принимая во внимание (1), (4) и (5), значение функции полоидального потока в точке наблюдения $\mathbf{r}_k$ определяется с использованием функции Грина $G(\mathbf{r}_k,\mathbf{r}')$ как суперпозиция потоков, создаваемых каждым током:

$$\psi(\mathbf{r}_k) = \int_S G(\mathbf{r}_k,\mathbf{r}')J(\mathbf{r}')dS' = \sum_{i=1}^{n_f} G(\mathbf{r}_k,\mathbf{r}_{f\,i}) I_{f\,i} + \sum_{j=1}^{n_{ext}} G(\mathbf{r}_k,\mathbf{r}_{ext,j}) I_{ext,j} = \sum_{i=1}^{n_f+n_{ext}} G_{ki} I_i. \qquad (6)$$

Явный вид функций Грина можно найти в [4]. Компоненты полоидального магнитного поля, в свою очередь, можно определить, используя выражения:

$$\begin{cases} B_r(\mathbf{r}_k) = \dfrac{1}{r_k}\dfrac{\partial\psi(\mathbf{r}_k)}{\partial z} = \sum\limits_{i=1}^{n_f+n_{ext}} D_{r,ki} I_i \\ B_z(\mathbf{r}_k) = -\dfrac{1}{r_k}\dfrac{\partial\psi(\mathbf{r}_k)}{\partial r} = \sum\limits_{i=1}^{n_f+n_{ext}} D_{z,ki} I_i \end{cases}. \quad (7)$$

Задача оценки параметров ξ распределения тока плазмы, заданного выражением (1), в алгоритме восстановления формы плазмы является наиболее трудоемкой с точки зрения затрат времени на выполнение, поэтому ограничимся рассмотрением лишь описанного участка алгоритма. Отметим лишь, что определение самой границы плазмы сводиться к идентификации плазменного режима (диверторная либо лимитерная плазма) и определению величины потока ψ_B на границе плазмы, что позволит с использованием выражения (6) восстановить форму плазмы (более подробно см. в [5]).

Анализ описанного выше алгоритма на предмет параллельных вычислений проводился с использованием модели, построенной на ациклическом ориентированном графе «операции-операнды» $\Gamma=(V,R)$ [13, 14]. Через $V=\{1,2,...,|V|\}$ обозначено множество вершин графа, представляющее операции алгоритма, через R – множество всех дуг графа, причем дуга $(i,j)\in R$ показывает, что операция, относящаяся к вершине j, использует результат операции, относящейся к вершине i. За время выполнения любых операций принималась одна условная единица времени, кроме того, использовалось допущение, что все процессоры в вычислительной системе имеют общую разделяемую память, что позволило пренебречь затратами времени на передачу данных между вычислительными устройствами. Показатели эффективности параллельного алгоритма определяют в терминах ускорения $S_p(n)$ (8) и эффективности использования процессоров $E_p(n)$ (9) [14]:

$$S_p(n) = \frac{T_1(n)}{T_p(n)}, \quad (8)$$

$$E_p(n) = \frac{S_p(n)}{p}, \quad (9)$$

где $T_1(n)$ – время выполнения алгоритма на одном процессоре, $T_p(n)$ – время выполнения алгоритма на p процессорах (p – целое положительное число), величина n параметризует вычислительную сложность решаемой задачи, в качестве n можно принять объем входных данных. Так как решение задачи требуется осуществлять в режиме реального времени, приоритетным является показатель $S_p(n)$, а $E_p(n)$ приведен для полноты картины. Для оценки (8) и (9) можно принять $T_1=|V|$, в случае неограниченной вычислительной мощности $T_p=d(\Gamma)$, где $d(\Gamma)$ – диаметр (длина максимального пути) графа [14].

Нетрудно заметить, что расчет выражений (2), (3), (6) и (7) сводятся к типовым матричным вычислениям, в частности, умножению матрицы на вектор. Известен ряд публикаций (см., например, [13, 14]), в которых подробно рассмотрены способы распараллеливания типовых вычислительных задач и приведены оценки показателей эффективности параллельных алгоритмов, а также число процессоров и топология связей между процессорами, необходимые для достижения максимального быстродействия решения задачи.

Так как алгоритм является неоднородным, т. е. разные участки алгоритма характеризуются разным ускорением и числом процессоров, то удобнее показатели эффективности (8) и (9) параллельного алгоритма характеризовать средними значениями ускорения и эффективности использования процессоров вычислительной системы:

$$\bar{S}_p = \frac{\sum\limits_{i=1}^{q} T_{1,i} + N\sum\limits_{j=q+1}^{h} T_{1,j}}{\sum\limits_{i=1}^{q} T_{p,i} + N\sum\limits_{j=q+1}^{h} T_{p,j}}, \quad \bar{E}_p = \frac{\bar{S}_p}{P},$$

где $T_{1,i}$, $T_{p,i}$ – время вычисления i-го участка алгоритма на одном процессоре и p процессорах соответственно, здесь учтено, что часть вычислений укладывается в итерационную процедуру поиска минимума квадратичной ошибки (2), которая повторяется N раз. Для достижения максимального быстродействия выполнения алгоритма необходимое число процессоров P можно определить из условия:

$$P = \max\{p_1, p_2, ...p_k, ..., p_h\},$$

где p_k – число процессоров, необходимое для достижения максимального быстродействия вычислений на k-м участке алгоритма.

Для токамака КТМ были получены следующие значения $\bar{S}_p$, $\bar{E}_p$ и P:

$$\bar{S}_p = 2400; \;\; \bar{E}_p = 0,3; \;\; P = 7600. \quad (10)$$

Оценки были получены с учетом того, что в состав электромагнитной системы токамака КТМ входят n_{ext}=7 катушек полоидального поля, плазма аппроксимируется n_f=7 числом токовых нитей, поиск минимума (2) осуществляется за N=5 итераций.

Долю последовательных вычислений в алгоритме из общего числа вычислений можно определить как величину обратную ускорению (см. (8)), применим закон Амдала для рассматриваемого алгоритма с учетом (10):

$$S(p) = \left.\frac{1}{\bar{S}_p^{-1} + (1-\bar{S}_p^{-1})/p}\right|_{p<<P,\, \bar{S}_p^{-1}<<1} \approx p. \quad (11)$$

Из (11) видно, что при малом числе процессоров ускорение будет приблизительно равно числу процессоров p. Такую зависимость можно объяснить тем, что значительная часть вычислений из общего числа может быть проведена независимо на каждом процессоре, (применяя, например, метод каскадного суммирования числовых последовательностей на p вычислителях).

Приведем оценку мощности вычислительной системы. Время цикла τ управления положением и формой плазмы имеет порядок 1 мс, общее число операций с плавающей точкой в алгоритме можно оценить как T_1 (применительно к токамаку КТМ T_1 имеет порядок 10^6), тогда производительность вычислительной системы можно оценить как:

$$F > \frac{T_1}{\tau} = 1 \text{ Гфлопс.} \qquad (12)$$

Оценки (11) и (12) позволяют сформулировать одно из требований при выборе конкретного многопроцессорного вычислительного устройства – число процессоров и вычислительную мощность.

Для управления плазмой в токамаке КТМ выбрана восьмипроцессорная TigerSHARC® DSP VME карта TS-V39, которая состоит из двух кластеров, по четыре DSP процессора ADSP-TS101 в каждом с разделяемой памятью. Вычислительная производительность TS-V39 составляет 12 Гфлопс. Ключевой особенностью карты TS-V39 является топология связей между DSP процессорами в кластере, которая позволяет организовать высокоскоростную связь между процессорами – полный граф.

Дальнейшая работа будет сосредоточена на оптимизации алгоритма восстановления формы плазменного шнура под архитектуру вычислительной системы TS-V39 и разработке соответствующего программного обеспечения.

Выводы

Проведен анализ алгоритма восстановления формы и положения плазменного шнура токамака КТМ, показана высокая степень параллелизма алгоритма, получены оценки его эффективности и требуемой производительности вычислительной системы. Произведен выбор VME карты с DSP кластерами для контура управления плазмой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по государственному контракту № 07.514.11.4069 от 12.10.2011 г. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wesson J. Tokamaks. – Oxford: Clarendon Press, 2004. – 749 p.
2. Азизов Э.А., Велихов Е.П., Тажибаева И.Л. Казахстанский материаловедческий токамак КТМ и вопросы управляемого термоядерного синтеза / под ред. акад. Е.П. Велихова. – Алматы: Национальный ядерный центр РК, 2006. – 236 с.
3. Kimura T., Kurihara K., Kawamata Y., Akiba K., Adachi H. DSP application to fast parallel processing in JT-60U plasma control // 18th Symposium on Fusion Technology. – Karlsruhe, Germany, 1994. – P. 691–694.
4. Ariola M., Pironti A. Magnetic control of tokamak plasmas. – London: Springer-Verlag, 2008. – P. 161.
5. Beghi A., Cenedese A. Advances in real-time plasma boundary reconstruction // IEEE Control Syst. Mag. – 2005. – V. 25. – № 5. – P. 44–64.
6. Обходский А.В., Байструков К.И., Павлов В.М., Меркулов С.В., Голобоков Ю.Н. Система измерения электромагнитных параметров для электрофизической установки ТОКАМАК КТМ // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 6. – С. 23–28.
7. Обходский А.В. Разработка системы измерения электромагнитных параметров материаловедческого токамака КТМ: дис.... канд. тех. наук. – Томск, 2010. – 160 с.
8. Swain D.W., Neilson G.H. An efficient technique for magnetic analysis of noncircular, high-beta tokamak equilibria // Nucl. Fusion. – 1982. – V. 22. – № 8. – P. 1015–1030.
9. Vasiliev V.I., Kostsov Yu.A., Lobanov K.M., Makarova L.P., Mineev A.B., Gusev V.K., Levin R.G., Petrov Yu.V., Sakharov N.V. On-line plasma shape reconstruction algorithm in tokamaks and its verification in the Globus-M // Nucl. Fusion. – 2006. – V. 46. – № 8. – P. 625–628.
10. Захаров Л.Е., Шафранов В.Д. Равновесие плазмы с током в тороидальных системах // Вопросы теории плазмы. – 1982. – Вып. 11. – С. 118–233.
11. Shkarofsky P. Evaluation of multipole moments over the current density in a tokamak with magnetic probes // Phys. Fluids. – 1982. – V. 25. – № 1. – P. 89–96.
12. Van Milligen B.Ph. Exact relations between multipole moments of the flux and moments of the toroidal current density in tokamaks // Nucl. Fusion. – 1990. – V. 30. – № 1. – P. 157–160.
13. Bertsekas D.P., Tsitsiklis J.N. Parallel and Distributed Computation. Numerical Methods. – New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989. – 108 p.
14. Гергель В.П., Стронгин, Р.Г. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем. – Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2003. –184 с.

Поступила 04.05.2012 г.