

/ S. Pozdniakov, I. Posov, A. Pukhov, I. Tsvetkova // J. of Digital Literacy and Digital Competence (IJDLDC). 2012. Vol. 3, № 2. P. 17–31.

3. Posov I., Pozdniakov S. Implementation of Virtual Laboratories for a Scientific Distance Game-Competition for Schoolchildren // The 2013 Intern. Conf. on Advanced ICT (Information and Communication Technology) for Education (ICAICTE2013), Hainan, China. Sept. 20–22, 2013.

4. Рукшин С. Е. Задачи, как цель и средство обучения математике // Всерос. конф. «Математика и общество. Математическое образование на рубеже веков». М.: МЦНМО, 2000. С. 231–233.

5. Пойа Д. Математическое открытие. М.: Наука, 1970.

6. Пейперт С. Переворот в сознании. Дети, компьютеры и плодотворные идеи / пер. с англ. М.: Педагогика, 1989.

7. Bogdanov M., Pozdniakov S., Puhov A. Multiplicity of the knowledge representation forms as a base of using a computer for the studying of the discrete mathematics // The 9th Intern. Conf. "Teaching Mathematics: Retrospective and Perspectives". Vilnius Pedagogical University, 16-17 May 2008 (with coauthors).

8. Анализ данных и процессов / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, И. И. Холод и др. СПб.: БХВ-Петербург, 2009.

V. A. Akimushkin

Saint-Petersburg state university

Athit Maytarattanakhon

Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

AUTOMATION TECHNOLOGY WITH RESEACH TASKS IN EXAMPLE PROBLEM «CLOCK – CALENDAR»

In this paper represented a new approach to support automation independent student research by introducing a system of evaluation criteria builds user, when interacting with the simulation model. Submitted by the analysis protocols work with the plot which shows a wide variability of decision of participants that confirms to use the proposed approach to support individual routes and characterize the creative component of the education work.

Automation support research activities, simulation model, control criteria, creative competition

УДК 681.5

Ю. В. Ильюшин, И. А. Кучеренко, А. Л. Ляшенко

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

И. М. Новожилов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Моделирование температурных процессов на суперкомпьютере

Проведен синтез закона распределения температурного поля в изотропном стержне на основе импульсных переходных функций – функций Грина. Проведено математическое моделирование полученного закона на гибридном суперкомпьютере по технологии NVidia CUDA. На основании математического моделирования сделан вывод о возможности оптимизации температурных режимов в рассматриваемой системе управления. Сделаны выводы о количестве нагревательных элементов и числе членов ряда Фурье.

Синтез, системный анализ, математическая модель

Синтез программных управлений осуществляется на основе моделей процессов формализацией требований в виде односточных или многоточечных целевых условий (равенств, неравенств), представленных требованиями минимизации функционалов качества. Для взаимоотношения между

управляемыми координатами (факторами) используются аналитические решения операторов теплопроводности или разностные схемы для соответствующих им задач. Это позволяет приобрести большое многообразие алгоритмов программного управления. Такие алгоритмы при соответствующим

шем обобщении могут предназначаться для создания систем локально-оптимального или локально-целевого управления. Подход к синтезу локально-оптимального управления для температурных процессов может базироваться на задачах теплопроводности с использованием разностных схем. Эти схемы дают возможность «алгебраизовать» оптимизационные задачи синтеза управлений, что в свою очередь позволит свести их к решению счетного числа конечномерных задач математического программирования. В модальном изображении аналитическое решение представляет собой бесконечные или конечные линейные комбинации «мод». Как совокупности экспоненциально-периодических базисных функций времени и координат.

Подходы к синтезу стабилизирующих управлений могут рассматриваться на основе вариантных целевых условий с разрешением задач математического программирования численными методами. Данная задача была решена А. Н. Тихоновым и А. А. Самарским при рассмотрении первой краевой задачи, математическая модель которой задана следующими уравнениями [1]:

$$\begin{cases} u_t = a^2 u_{xx} + f(x, t), & 0 < x < l, 0 < t \leq T, \\ u(0, t) = \mu_1(t), & 0 \leq t \leq T, \\ u(l, t) = \mu_2(t), & 0 \leq t \leq T, \\ u(x, 0) = \varphi(x), & 0 \leq x \leq l, \end{cases}$$

где t – время; x – точка (координата по оси X) расположения датчика температуры; ξ – точка (координата по оси X) расположения нагревательного элемента; $f(x, t)$ – входное воздействие в точке x в момент времени t ; a^2 – заданный коэффициент теплопроводности материала объекта управления.

Была получена функция Грина, отражающая поведение температурного поля в любой момент времени в любой точке объекта управления. Приводя ее, А. Н. Тихонов и А. А. Самарский исследовали вопрос сходимости рядов Фурье, на которые раскладывается функция Грина [2], [3]:

$$G(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{l} \sin\left(\frac{\pi n}{l} s\right) \times \sin\left(\frac{\pi n}{l} s\right) \exp\left\{-a^2 \left(\frac{\pi n}{l}\right)^2 t\right\},$$

где n – номер члена ряда Фурье; l – длина стержня; t – время; x – точка (координата по оси X) расположения датчика температуры; ξ – точка (координата по оси X) расположения нагревательного элемента; τ – момент включения точечного ис-

точника; a^2 – заданный коэффициент теплопроводности материала объекта управления.

Таким образом, данная формула позволяет определять поведение температурного поля в произвольной точке изотропного стержня в произвольный момент времени. Однако для исследования температурного поля с течением времени необходимо учитывать функцию начального нагрева, так как значение температуры есть сумма значений функции Грина в текущий момент времени и функции начального нагрева [4], [5].

Таким образом, для анализа температурного поля необходимо применять формулу, учитывающую функцию начального нагрева [4]:

$$T(x_j, t) = \sum_{i=1}^d \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp\left[-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2 t\right] \times \sin\left(\frac{\pi n}{l} x_j\right) \sin\left(\frac{\pi n}{l} \xi_i\right) + \sum_p \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp\left[-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2 (t - \tau_p)\right] \times \sin\left(\frac{\pi n}{l} x_j\right) \sin\left(\frac{\pi n}{l} \xi_{z(p)}\right).$$

Рассмотрим процесс моделирования на примере объекта управления, состоящего из цилиндрического стержня пренебрежимо малой толщины длиной l_1 и расположенных на нем нагревательных элементов k и датчиков температуры d .

Промоделируем поведение температурного поля в изотропном стержне на гибридном суперкомпьютере по технологии CUDA. В качестве исходных данных возьмем следующие: $l_1 = 10$ м, $k = 100$ шт., $d = 100$ шт., $T_{\text{зад}} = 274...5273$ К, $a^2 = 0,00024$ м²/с, $x_1 = y_1 = z_1 = v_1 = p_1 = Q_1 = 1$, $u, x, v, p_i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$, $\tau = 1$ с. Время математического моделирования зададим равным 170 800 с (48 ч).

Требуется определить время, через которое металл потеряет свойства твердого тела. Математическое моделирование данного поля на обычном компьютере не возможно в связи с чрезмерно высокой сложностью вычислений. Для этих целей возьмем 96-ядерный процессор GF108 на базе графического вычислителя GT 630. Следует отметить, что структура чипа CUDA отличается от структуры процессоров для PC.

Процессор Intel Nehalem содержит 4 независимых процессорных ядра, каждое из которых

обладает полной функциональностью центрального процессора. Такое ядро способно обрабатывать системные прерывания, работать с устройствами ввода-вывода, т. е. абсолютно полноценно поддерживать операционную систему. Каждое ядро содержит кеши первого уровня для данных и инструкций, содержит логику выборки инструкций и кеш данных второго уровня. Все ядра абсолютно симметрично присоединены к кешу третьего уровня и к QPI (QuickPath Interconnect) – системе присоединения процессоров к чипсету. Также они присоединены к IMC (Integrated Memory Controller) – системе связи с памятью, пришедшей взамен северного моста.

В некоторых версиях современных процессоров Intel также присутствует встроенный графический контроллер. В свою очередь чип CUDA представляет собой процессор GF108, имеющий 32 потоковых процессора (рисунок).

Также он имеет 2 кеша объемами 32 и 256 Кбайт соответственно с разрядностью шины 128 бит. Данный чип позволяет использовать 2 Гбайт оперативной памяти на процессор. Также в нем имеется возможность поддержки кластерного моделирования потоков и SIMD-инструкции.

Следующий блок программы вычисляет температурное поле:

```
for (i = 1; i <= *d; i++) {
    for (n = 1; n <= *k; n++) {
        vspom = (2/(*1))*_expf(((0-PI)*n*(a)/(1))*(PI*n*(a)/(1))*t1)*
        _sinf(PI*n*x[j]/
        (*1))*_sinf(PI*n*ksi[i]/(1))/(1)+ksi1;
```

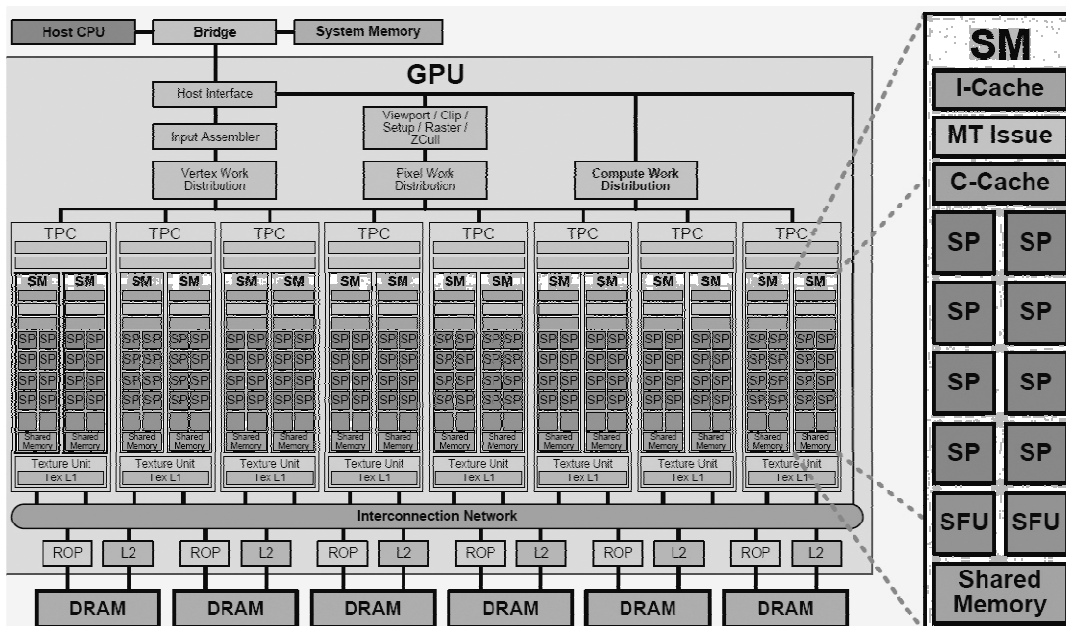
```
g[j] = g[j] + vspom;
    } }
}
```

Следует отметить, что для сохранения объемов памяти была выделена зарезервированная область памяти:

```
HANDLE_ERROR( cudaMalloc(
(void**)&dev_t_mas, I*J* sizeof( float ) ) );
HANDLE_ERROR( cudaMalloc(
(void**)&dev_z, sizeof( int ) ) );
HANDLE_ERROR( cudaMalloc(
(void**)&dev_d, sizeof( int ) ) );
HANDLE_ERROR( cudaMalloc(
(void**)&dev_k, sizeof( int ) ) );
HANDLE_ERROR( cudaMalloc(
(void**)&dev_s, sizeof( int ) ) );
HANDLE_ERROR( cudaMalloc(
(void**)&dev_k1, sizeof( float ) ) );
HANDLE_ERROR( cudaMalloc(
(void**)&dev_k2, sizeof( float ) ) );
HANDLE_ERROR( cudaMalloc(
(void**)&dev_l, sizeof( float ) ) );
HANDLE_ERROR( cudaMalloc(
(void**)&dev_a, sizeof( float ) ) );
HANDLE_ERROR( cudaMalloc(
(void**)&dev_t_zad, sizeof( float ) ) );
```

После копирования данных на вычислительный процессор с помощью программного оператора cudaMemcpyDeviceToHost произошло выделение слеш-памяти для организации вычислений по векторным типам данных. Копирование данных осуществлял следующий программный код:

```
cudaMemcpy( dev_z, &z,
sizeof(int),cudaMemcpyHostToDevice );
```



```

    cudaMemcpy( dev_d, &d,
sizeof(int),cudaMemcpyHostToDevice) );
    cudaMemcpy( dev_k, &k, sizeof( int ),
cudaMemcpyHostToDevice) );
    cudaMemcpy( dev_s, &s, sizeof( int ),
cudaMemcpyHostToDevice) );
    cudaMemcpy( dev_k1, &k1, sizeof( float ),
cudaMemcpyHostToDevice) );
    cudaMemcpy( dev_k2, &k2, sizeof( float ),
cudaMemcpyHostToDevice) );
    cudaMemcpy( dev_l, &l, sizeof( float ),
cudaMemcpyHostToDevice) );
    cudaMemcpy( dev_a, &a, sizeof( float ),
cudaMemcpyHostToDevice) );
    cudaMemcpy( dev_t_zad, &t_zad, sizeof( float ),
cudaMemcpyHostToDevice);

```

Вызов модуля расчета производился по схеме с жесткой привязкой к ядру-исполнителю:

```

add<<<1,1>>>( dev_t_mas , dev_z, dev_k1,
dev_k2, dev_l, dev_a, dev_t_zad, dev_k, dev_d,
dev_s);

```

Это позволило обеспечить функционирование данного модуля исключительно на первом процессоре вычислителя. Изменяя первый параметр функции можно производить вычисления на других вычислителях, если таковые имеются в системе. Также комбинация данных параметров позволит создавать программные управления для высокопроизводительных систем на базе вычислителей NVidia tesla. Однако в связи с тем, что вычислители tesla обладают встроенными четырьмя процессорами по 2000 ядер каждый, необходим дополнительный расчет потоковых операций. Использование слеш-памяти позволило помимо расчета температурного поля экспериментальным путем установить необходимое число членов ряда Фурье для обеспечения заданной точности вычислений. В системе происходил расчет выборки для 1000, 100 и 10 членов ряда Фурье. Результаты математического моделирования на суперкомпьютере и на обычном персональном компьютере приведены в таблице. Как видно из таблицы, значения идентичны, но время, затраченное на расчет, значительно меньше на суперкомпьютере. Следовательно, математическое моделирование систем автоматического управления существенно увеличит производительность систем. В большей степени это необходимо для систем реального времени.

| Шаг | Значение | |
|------|--------------------|----------------------------|
| | на суперкомпьютере | на персональном компьютере |
| 1 | 120,38692 | 120,38692 |
| 2 | 129,38892 | 129,38892 |
| 3 | 137,39692 | 137,39692 |
| ... | | |
| 100 | 870,19692 | 870,19692 |
| 101 | 890,31292 | 890,31292 |
| 102 | 970,29692 | 970,29692 |
| ... | | |
| 7405 | 2010,25698 | 2010,25698 |
| 7406 | 2013,36551 | 2013,36551 |
| 7407 | 2040,15454 | 2040,15454 |

На основе результатов математического моделирования температурного поля изотропного стержня можно сделать следующие выводы:

1. При минимальном воздействии (0,1 Вт) на объект управления изотропный стержень потеряет свойства физически твердого тела на 8652 секунде эксперимента.
2. При уменьшении числа нагревательных элементов время эксперимента увеличивается, на основании чего можно сделать вывод о возможности разработки системы автоматического управления температурным полем изотропного стержня. При этом можно управлять температурным полем за счет числа и времени включения нагревательных элементов.

3. При моделировании процесса нагрева изотропного стержня импульсными источниками нагрева необходимо и достаточно пяти членов ряда Фурье. Этот результат подтвердил данные из других источников [1]–[3], [6], [7].

4. Моделирование данного процесса на гибридном суперкомпьютере привело к реальному времени расчета 10 мин. В свою очередь линейный алгоритм на обычном компьютере моделирует данный процесс в течение 6 ч. Данная скорость реализуется главным образом за счет 96-ядерного процессора, работающего с более высокой суммарной частотой, чем обычный процессор персонального компьютера.

Анализ результатов математического моделирования показывает, что моделирование систем автоматического управления и систем прогрессирования, в том числе робастного управления, можно значительно расширить за счет применения гибридных суперкомпьютеров. Их использование позволит не только расширить число управляющих воздействий, но и снизить время моделирования переходных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972.
2. Карташов Э. М. Метод функций Грина при решении краевых задач уравнения теплопроводности обобщенного типа // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1979. № 2. С. 108–116.
3. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория переноса энергии и вещества. М.: Машиностроение, 1959. 332 с.
4. Ильюшин Ю. В. Проектирование системы управления температурными полями туннельных печей конвейерного типа // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2011. № 3(126). С. 67–72.
5. Ильюшин Ю. В., Чернышев А. Б. Определение шага дискретизации для расчета теплового поля трехмерного объекта управления // Изв. Южного федерального ун-та. 2011. № 6. С. 192–200.
6. Бутковский А. Г., Малый С. А., Андреев Ю. Н. Оптимальное управление нагревом металла. М.: Металлургия, 1972.
7. Першин И. М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: Изд-во РИА-КМВ, 2007.

Yu. V. Ilyushin, I. A. Kucherenko, A. L. Lyashenko
National Mineral Resources University (University of Mines)

I. M. Novozhilov
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

SIMULATION OF THERMAL PROCESSES ON SUPERCOMPUTERS

The article provides a synthesis of the distribution of temperature field in the isotropic rod on the basis of impulse response functions - the Green's function. The mathematical modeling of the law resulting in the hybrid supercomputer technology NVidia CUDA. On the basis of mathematical modeling of the conclusion of the possibility of optimizing the temperature conditions in the system under control. The conclusions about the number of heating elements and the number of members of the Fourier series.

Synthesis, system analysis, mathematical model
