

СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СНИЖЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

И. Ю. Пчелинцева

*Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»,
irina_yu_10@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: база данных; гальваническое покрытие; задача оптимизации; кластер; параллельные вычисления.

Аннотация: Разработана структура информационной системы параллельных вычислений в распределенной компьютерной среде для решения задачи оптимизации – минимизации критерия неравномерности гальванического покрытия на плоской детали. Разработанное программное обеспечение позволяет принять решение (поиск конфигурации токонепроводящего экрана в гальванической ванне), обеспечивающее минимальную неравномерность покрытия. Проведен вычислительный эксперимент на кластере из трех узлов.

Введение

Одной из важных промышленных задач на сегодняшний день является нанесение равномерных гальванических покрытий на детали для защиты их от коррозии, повышения износостойкости и т.д. Как известно, основной трудностью при этом являются краевые эффекты в получаемом покрытии, то есть, если рассмотреть его профиль, то на краях детали толщина нанесенного металла будет больше, чем в середине.

Существует множество различных способов снижения неравномерности гальванических покрытий, например, использование многоанодных ванн [1, 2]. Главный недостаток в данном случае – подведение различных источников постоянного тока к анодам, что достаточно трудно обеспечить. Другим способом является создание тонкого токонепроводящего экрана с отверстиями, который устанавливается вблизи детали-катода. Варьируя количеством, шириной и расположением отверстий, изменяется профиль получаемого покрытия. Можно подобрать такую конфигурацию экрана, которая обеспечит минимальную неравномерность покрытия.

Для численной характеристики вводят критерий неравномерности гальванического покрытия R , выраженный через функцию распределения толщины металла по поверхности катода [3]. Чтобы вычислить значения данной функции, следует численно рассчитать распределение электрического потенциала в гальванической ванне, используя математическую модель – уравнение Лапласа и нелинейные краевые условия III рода на поверхности анода и катода [4]. Конфигурация токонепроводящего экрана определяет вид краевых условий на границе изоляционных частей экрана.

Таким образом, необходимо минимизировать величину R , выбирая конфигурацию экрана. Рассматриваемая математическая модель является, по сути, уравнениями связи для критерия R . Процесс изготовления самого экрана (обычно его

вырезают из тонкого листа стеклотекстолита [5]) по результатам расчетов не представляет особых трудностей в сравнении, например, со сборкой много-анодной ванны.

Как было показано в статье [6], рассматриваемая задача оптимизации требует много времени для ее численного решения методом полного перебора, так как для одного шага алгоритма (одной конфигурации экрана) необходимо численно решать большую систему нелинейных алгебраических уравнений из 900 уравнений, но используемый алгоритм можно распараллелить для повышения эффективности вычислительного метода.

Цель работы – разработка информационной системы численного поиска оптимальных параметров токонепроводящего экрана гальванической ванны, обеспечивающих наименьшее значение критерия R , используя распараллеливание метода полного перебора в распределенной компьютерной среде.

Дискретный аналог математической модели процесса нанесения гальванического покрытия

Рассмотрим гальваническую ванну, имеющую форму параллелепипеда, с плоскими бесконечно тонкими анодом и катодом, которые имеют прямоугольную форму. Пусть электроды располагаются по центру вдоль соответствующих стен напротив друг друга. Размеры дна ванны – $l \times l$. Внутри ванны параллельно электродам располагается поперечный бесконечно тонкий плоский токонепроводящий экран (стенка), который имеет отверстия прямоугольной формы. Высота экрана и таких отверстий совпадает с высотой ванны, ширина экрана равна l .

Таким образом, в любом горизонтальном сечении ванны конфигурация электрического поля не будет изменяться. Пример расположения элементов в данном случае представлен на рис. 1. Указанные размеры взяты из эксперимента.

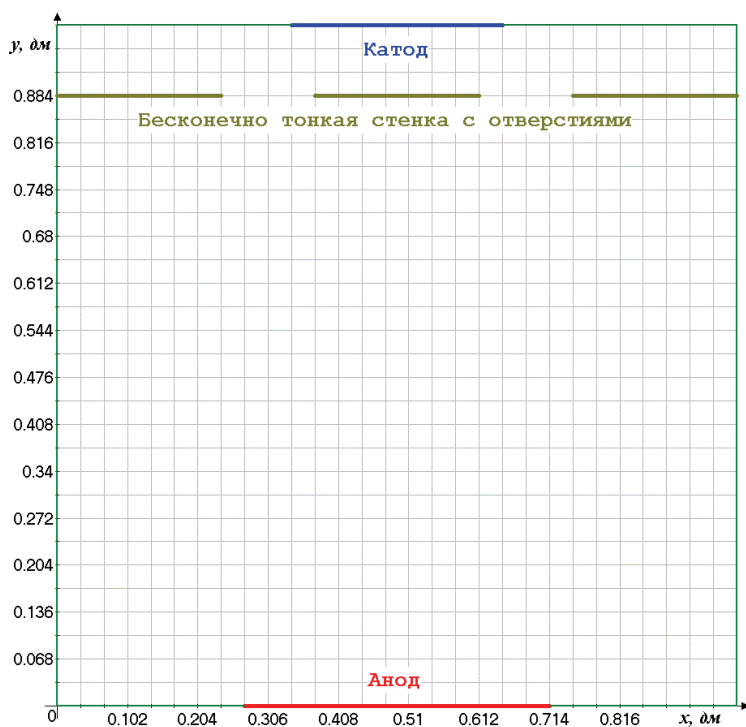


Рис. 1. Горизонтальное (продольное) сечение гальванической ванны с сеткой по координатам x и y

Для нахождения потенциалов в узлах сетки численно решается следующая система нелинейных алгебраических уравнений [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Phi_{i-1,j} - 2\Phi_{i,j} + \Phi_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{\Phi_{i,j-1} - 2\Phi_{i,j} + \Phi_{i,j+1}}{h_y^2} = 0, \\ i = 2, \dots, N_x - 1 \ \& \ j = 2, \dots, N_y - 1 \ \& \ j \neq N_p, \\ i = p_r^{(k)} + 1, \dots, p_l^{(k+1)} - 1 \ \& \ j = N_p, \ k = 1, \dots, N_{pl}; \\ \frac{\Phi_{2,j} - \Phi_{1,j}}{h_x} = 0, \ j = 2, \dots, N_y - 1 \ \& \ j \neq N_p; \\ \frac{\Phi_{N_x,j} - \Phi_{N_x-1,j}}{h_x} = 0, \ j = 2, \dots, N_y - 1 \ \& \ j \neq N_p; \\ \frac{\Phi_{i,2} - \Phi_{i,1}}{h_y} = 0, \ i = 1, \dots, a_l - 1, a_r + 1, \dots, N_x; \\ \frac{\Phi_{i,N_y} - \Phi_{i,N_y-1}}{h_y} = 0, \ i = 1, \dots, c_l - 1, c_r + 1, \dots, N_x; \\ \frac{\Phi_{i,N_p} - \Phi_{i,N_p-1}}{h_y} = 0, \ i = p_l^{(m)}, \dots, p_r^{(m)}, \ m = 1, \dots, N_{pl} + 1; \\ \Phi_{i,1} + F_a \left(-\chi \frac{\Phi_{i,2} - \Phi_{i,1}}{h_y} \right) - U = 0, \ i = a_l, \dots, a_r; \\ \Phi_{i,N_y} - F_c \left(-\chi \frac{\Phi_{i,N_y} - \Phi_{i,N_y-1}}{h_y} \right) = 0, \ i = c_l, \dots, c_r, \end{array} \right.$$

где h_x, h_y – шаги сетки по x и y , дм; N_x, N_y – максимальные номера узлов сетки по x и y ; N_p – номер слоя сетки по j , где располагается изоляционный экран; N_{pl} – количество отверстий прямоугольной формы в токонепроводящем экране; a_l, a_r, c_l, c_r – номера узлов сетки, где находятся левый и правый край анода и катода соответственно; $p_l^{(m)}, p_r^{(m)}$ – номера узлов сетки, соответствующих краям частей изоляционного экрана; $m = 1, \dots, N_{pl} + 1$ (количество таких частей на единицу больше числа N_{pl}); $F_a(i_a)$ и $F_c(i_c)$ – функции анодной и катодной поляризации соответственно, В; i_a, i_c – соответственно анодная и катодная плотности тока, А/дм²; χ – удельная проводимость электролита, Ом·дм⁻¹; U – анодное напряжение, В.

Предположим, что отверстия имеют одинаковый размер и для введенной сетки $h_x = h_y$.

Приведенная нелинейная система алгебраических уравнений имеет количество неизвестных, равное $g = N_x N_y$.

Для дальнейших рассуждений объединим неизвестные величины

$$\Phi_{1,1}, \Phi_{1,2}, \dots, \Phi_{1,N_y}, \Phi_{2,1}, \Phi_{2,2}, \dots, \Phi_{2,N_y}, \dots, \Phi_{N_x,1}, \Phi_{N_x,2}, \dots, \Phi_{N_x,N_y}$$

в вектор $\Psi = [\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_g]^T$.

Как принято в литературе по вычислительной математике, система нелинейных уравнений переписывается в векторной форме

$$\Lambda(\Psi) = 0, \quad (1)$$

где $\Lambda(\Psi)$ – векторная функция от Ψ из g -компонент.

Для нахождения приближенного решения Ψ^* системы (1) в статьях [6, 7] используется метод Ньютона. Методика выбора начального приближения $\Psi^{(0)}$ представлена в работе [6]. При этом имплементация самого метода находится в математическом пакете *Mathima*. Разработанная программа на языке C++ готовит для пакета скрипт (текстовый файл) с командами, символьным видом каждого уравнения системы (1) и начальным приближением. Далее с помощью библиотечной функции `system()` вызывается *Mathima*. После этого программа через перенаправление ввода/вывода считывает результаты работы – поле потенциалов в гальванической ванне.

Например, для сетки из 900 узлов время, затрачиваемое пакетом на решение системы нелинейных уравнений, на компьютере с процессором Intel Core i5-9400 с тактовой частотой 2,9 ГГц составляет примерно 18 мин с точностью 0,01. Отметим, что в реализации метода Ньютона в библиотеке пакета на каждой итерации якобиан системы не обращается, а используется LU-разложение для быстрого решения получаемой линеаризованной системы алгебраических уравнений.

Распределение толщины получаемого покрытия на детали вычисляется по следующей формуле:

$$\delta_i = \frac{k_{Me}\chi}{\rho} \frac{\varphi_{i, N_y-1} - \varphi_{i, N_y}}{h_y} \Delta t, \quad (2)$$

где $i = c_l, \dots, c_r$; k_{Me} – электрохимический эквивалент металла покрытия, г/(А·ч); ρ – плотность металла покрытия, г/см³; Δt – время процесса (нанесения покрытия), ч.

Критерий неравномерности гальванического покрытия вычисляется по формуле [6]

$$R = \frac{1}{c_r - c_l} \left(\frac{\delta_{c_l} + \delta_{c_r}}{2\delta_{\min}} + \frac{\sum_{i=c_l+1}^{c_r-1} \delta_i}{\delta_{\min}} + c_l - c_r \right) 100 \%,$$

где $\delta_{\min} = \min_i \delta_i$.

Таким образом, после расчета δ_i , определяемых по полученным значениям потенциалов вблизи катода, можно вычислить значение критерия R .

Постановка задачи оптимизации

Как показали многочисленные расчеты, на значение критерия R слабо влияет положение отверстий в экране (изменение на 1 – 2 %), но сильно воздействует количество N_{pl} и ширина PL отверстий, когда экран достаточно близок к катоду [6]. Будем считать, что положение N_p экрана фиксировано.

Далее в оптимизационной задаче варьируемыми параметрами будут величины N_{pl} и PL . При этом все прямоугольные отверстия имеют одинаковые размеры и расположены симметрично относительно середины экрана.

Так как все вычисления проводятся на сетке, то значение PL нужно брать как количество шагов сетки, которые покрывает отверстие. Тогда ширина каждого отверстия вычисляется достаточно просто – как PLh_x .

Поскольку значения N_{pl} и PL целые, имеем задачу дискретного программирования.

Затем определим диапазоны изменения N_{pl} и PL . Зададим N_{\max} – максимальное число отверстий в экране. Таким образом, целая величина N_{pl} будет меняться от 1 до N_{\max} .

Чтобы поле проходило через отверстия, минимальная величина PL равна двум. Максимальное значение ширины $PL = PL_{\max}$ нужно брать, задав минимальное значение ширины $L_{pr_{\min}} = 2$ изоляционных частей экрана, измеряемое в шагах сетки. Если задается количество отверстий в экране, то понятно, что величина $PL_{\max}(N_{pl})$ будет зависеть от N_{pl} . Тогда имеем равенство

$$\begin{aligned} \text{количество шагов сетки по } x &= \text{количество шагов сетки под отверстия} + \\ &+ \text{количество шагов сетки под изоляционные части} \end{aligned}$$

или по-другому

$$N_x - 1 = PL_{\max}(N_{pl})N_{pl} + L_{pr_{\min}}(N_{pl} + 1). \quad (3)$$

Тогда с учетом целочисленного значения PL_{\max} получаем формулу

$$PL_{\max}(N_{pl}) = \left\lceil \frac{N_x - 1 - L_{pr_{\min}}(N_{pl} + 1)}{N_{pl}} \right\rceil,$$

где $[a]$ – целая часть числа a .

Однако не все комбинации параметров N_{pl} и PL допустимы. Например, при заданных значениях N_{pl} и PL может получиться дробное значение ширины $L_{pr}(N_{pl}, PL)$ каждой изоляционной части экрана, то есть их нельзя уложить на заданной сетке. Тогда запишем соотношение, аналогичное формуле (3):

$$N_x - 1 = PLN_{pl} + L_{pr}(N_{pl}, PL)(N_{pl} + 1),$$

откуда имеем

$$L_{pr}(N_{pl}, PL) = \frac{N_x - 1 - PLN_{pl}}{N_{pl} + 1}.$$

Следовательно, если получаемое значение L_{pr} – целое, то пара N_{pl} и PL допустима.

Система (1) и соотношение (2) будут являться уравнениями связи. Рассмотрим формирование некоторых уравнений системы (1) по заданным значениям пары N_{pl} и PL .

Чтобы вычислить номер узла $p_l^{(m)}$ ($m = 1, \dots, N_{pl} + 1$) сетки, соответствующего левой границе m -й части изоляционного экрана, следует сложить $m - 1$ отверстий PL и изоляционных частей L_{pr} , а также прибавить единицу, то есть

$$p_l^{(m)} = (m - 1)(PL + L_{pr}) + 1.$$

Для правой границы

$$p_r^{(m)} = p_l^{(m)} + L_{pr}.$$

Таким образом, получаем следующую задачу дискретного программирования:

$$\left\{ \begin{array}{l} R(N_{pl}, PL) \rightarrow \min; \\ N_{pl} \in [1, N_{\max}]; \\ PL \in [2, PL_{\max}(N_{pl})]; \\ L_{pr}(N_{pl}, PL) - \text{целое}; \\ N_{pl}, PL - \text{целые}; \\ \text{Система (1) и соотношение (2) - уравнения связи.} \end{array} \right. \quad (4)$$

Поскольку правая граница для варьируемого параметра PL зависит от выбора значения параметра N_{pl} , то для решения задачи (4) будем использовать метод полного перебора [6], который имеет два преимущества: простоту и гарантированное нахождение оптимального решения.

Информационная система реализации метода полного перебора в распределенной компьютерной среде

Как отмечено в статье [6], время, затрачиваемое на последовательный алгоритм полного перебора для решения задачи (4) (17 комбинаций), на компьютере с процессором Intel Core i5-9400 составляет 5 ч 6 мин. Для уменьшения времени вычислений такой алгоритм может быть распараллелен.

Опишем алгоритм работы программы параллельных вычислений решения задачи (4) на вычислительном кластере. Кластер [8] – это группа компьютеров (вычислительных узлов), к которой можно получить доступ как к единой системе (распределенной компьютерной среде).

Алгоритм проведения параллельных вычислений представлен на рис. 2.

Поскольку параллельные процессы могут быть запущены не только на одном компьютере, но и в рамках компьютерной сети на разных ЭВМ (вычислительных узлах), то здесь необходима общая память. Такой памятью будет сетевая база данных. Предполагаем, что на одном узле будет запущен один процесс.

Главный процесс формирует задания, записывая в базу возможные значения пар N_{pl} и PL , запускает M параллельных процессов перебора возможных значений вариантов конфигурации токонепроводящего экрана для решения уравнений соответствующих дискретных моделей (1), а затем ищет такую конфигурацию, которая обеспечивает минимум критерию R , извлекая полученные данные из базы.

Предположим, что каждый узел имеет одинаковую производительность. Тогда главный процесс должен распределить примерно одинаковое количество C_i заданий на каждый узел, $i = 1, \dots, M$.

Для решения данной задачи обозначим через N_{conf} число комбинаций допустимых значений N_{pl} и PL для задачи (4). Первоначально следует присвоить

$$C_i := \left[\frac{N_{conf}}{M} \right].$$

Далее вычислить остаток от деления

$$r := N_{conf} \bmod M$$

и распределить его по r узлам, то есть

$$C_j := C_j + 1$$

для $j = 1, \dots, r$.

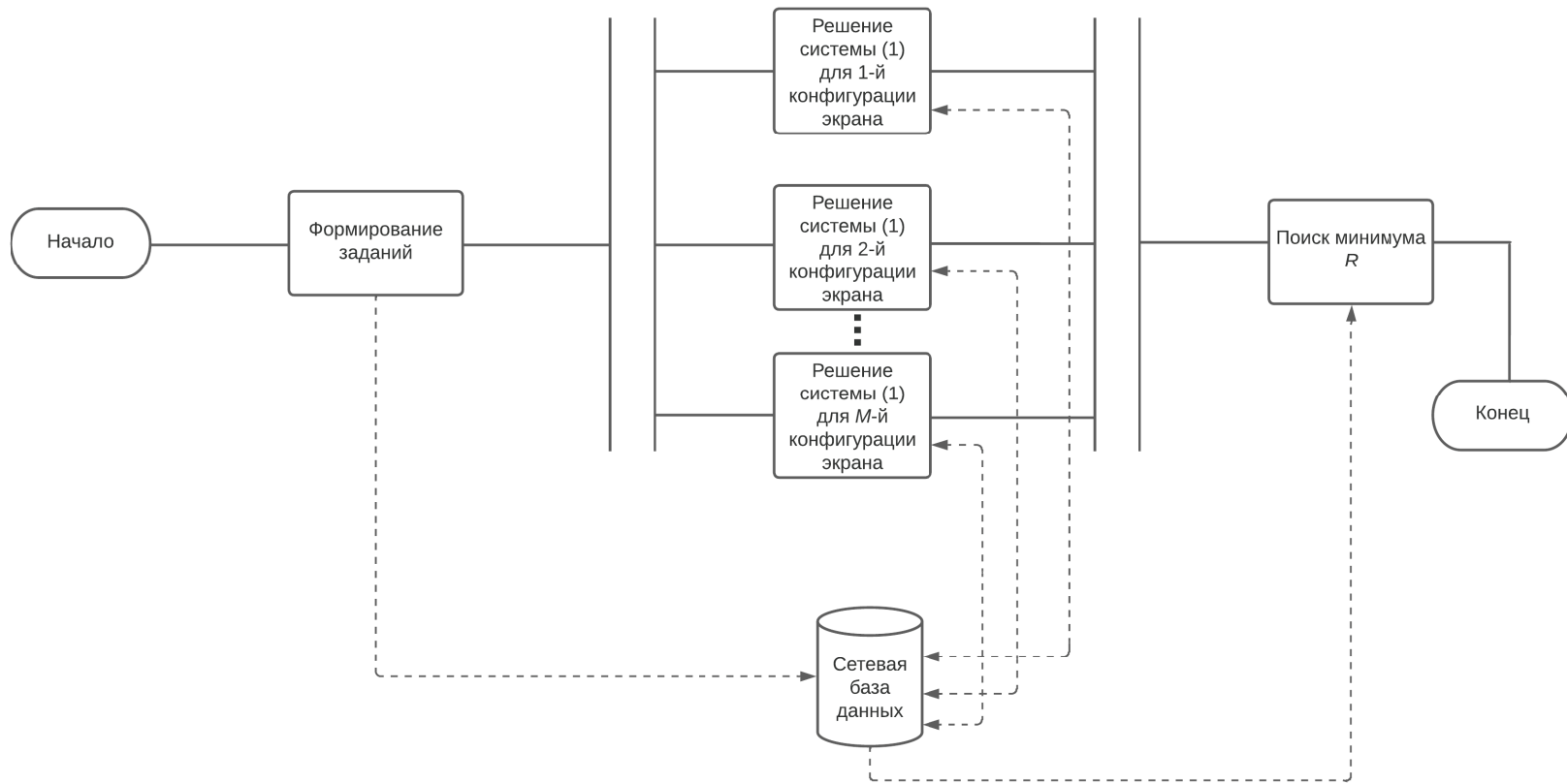


Рис. 2. Алгоритм проведения параллельных вычислений в распределенной компьютерной среде

Когда $N_{conf} > M$, то хотя бы на один узел будет выдано более одного задания. Рассмотрим алгоритм формирования номеров заданий.

Занумеруем допустимые комбинации значений N_{pl} и PL (то есть задания) для задачи (4) от 1 до N_{conf} . Тогда для i -го процесса номера заданий берутся от

$$P_i = \sum_{q=1}^{i-1} C_q + 1$$

до

$$P_i + C_i - 1.$$

Работа параллельных процессов в распределенной компьютерной среде осуществляется с помощью функций библиотеки языка C, входящей в программный пакет MPICH. Запущенный процесс, используя библиотечную функцию `MPI_Comm_rank()`, получает свой номер, по которому извлекает из базы данных задания для расчетов.

Структура базы данных

В базе данных будет храниться следующая информация: номер задания, то есть идентификатор `idconf` конфигурации экрана, флаг `flcalc` расчета (0 – не досчитали (возникла ошибка), 1 – все удачно вычислено), значения N_{pl} , PL и критерия R , номер `numproc` вычислительного процесса и пару – номер `NumCoord` координаты (на сетке) на катоде, для которой вычислена толщина покрытия, и само значение `delta` толщины.

Заметим, что поле `idconf` имеет уникальное значение и определяет всю информацию для рассматриваемого задания. Поэтому `idconf` будет первичным ключом. Полученная структура сетевой базы данных представлена на рис. 3.

Для создания связанных таблиц в СУБД MySQL приведем запросы на языке SQL:

```
/* Данные об обрабатываемых конфигурациях экрана */
CREATE TABLE ConfigTable (
  idconf INT NOT NULL, /* ID конфигурации */
  flcalc INT DEFAULT 0, /* Флаг расчета: 0 - не досчитали,
                        1 - все удачно вычислено */
  Npl INT, /* Количество отверстий в экране */
  PL INT, /* Ширина отверстий */
  R INT, /* Величина неравномерности покрытия в % */
  numproc INT, /* Номер вычислительного процесса */
  PRIMARY KEY (idconf)
)ENGINE=InnoDB;
```

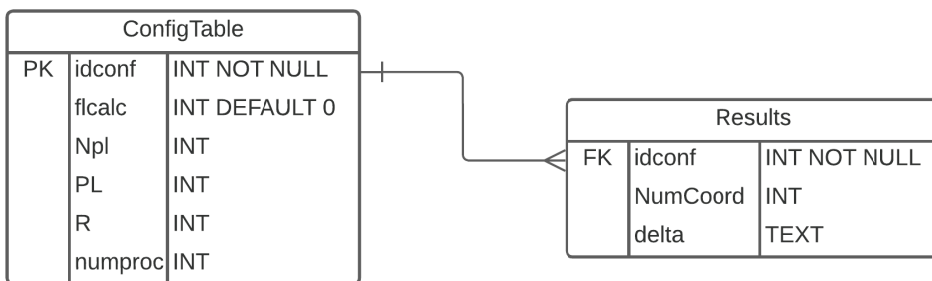


Рис. 3. Даталогическая модель базы данных


```

/* Таблица с результатами вычислений */
CREATE TABLE Results (
  idconf INT NOT NULL,
  NumCoord INT, /* Номер координаты */
  delta TEXT, /* Толщина покрытия */
  FOREIGN KEY (idconf) REFERENCES ConfigTable (idconf)
  ON UPDATE CASCADE ON DELETE CASCADE
) ENGINE=InnoDB;

```

Отметим, что каждый из параллельных процессов при запуске по своему номеру numproc из таблицы ConfigTable извлекает набор соответствующих записей с заданиями. Приведем пример такого запроса:

```
SELECT idconf, Npl, PL FROM ConfigTable WHERE numproc = 1;
```

Программная реализация метода решения задачи (4)

Для решения задачи (4) взяты следующие функции и параметры [6]:

$$F_a(i_a) = 1, 2; F_c(i_c) = 0,0016i_c^2 + 0,055i_c + 1,347;$$

$$\chi = 0,35 (\text{Ом} \cdot \text{дм})^{-1}; k_{Me} = 1,22 \text{ г}/(\text{А} \cdot \text{ч}); \rho = 7,133 \text{ г}/\text{см}^3; \Delta t = 0,67 \text{ ч}; U = 3,67 \text{ В};$$

$$N_x = N_y = 30; N_p = 27; a_l = 9; a_r = 22; c_l = 11; c_r = 20; h_x = h_y = 0,034 \text{ дм}.$$

Пусть $N_{\max} = 7$. В этом случае получаем $N_{\text{conf}} = 17$ комбинаций допустимых значений N_{pl} и PL для задачи (4) [6].

Расчеты проводились на вычислительном кластере из трех узлов, на котором развернута система виртуализации Proxmox Virtual Environment, управляемая удаленно через веб-интерфейс. На каждом узле установлена операционная система Arch Linux x86_64 с версией ядра 5.13.19-2-pxve, математический пакет Maxima 5.46.20 и библиотека параллельных вычислений MPICH. На одном из узлов также развернут сервер СУБД MySQL. 17 комбинаций допустимых значений N_{pl} и PL распределены по 17 параллельным процессам, то есть по одной задаче на каждый процесс. При этом каждый узел имеет центральный процессор Intel Xeon CPU E5-2620 с 12-ти ядрами и тактовой частотой 2,1 ГГц. Поэтому схема запуска MPI-приложения на таком кластере следующая (с наименьшей неравномерной загрузкой):

5:6:6.

Здесь каждое число отвечает за количество параллельных процессов, запущенных на соответствующем узле. При этом уже на один узел распределяется более одного процесса, так как работа ведется с многоядерной системой.

Динамика загрузки процессоров по всем узлам приведена на рис. 4 (данные получены из Proxmox).

Главный процесс после занесения в базу данных заданий запускает параллельные процессы командой

```
mpiexec -n 17 -f machinefile ./pcalcs
```

Содержимое файла machinefile (схема запуска MPI-приложения):

```

node1:5
node2:6
node3:6

```

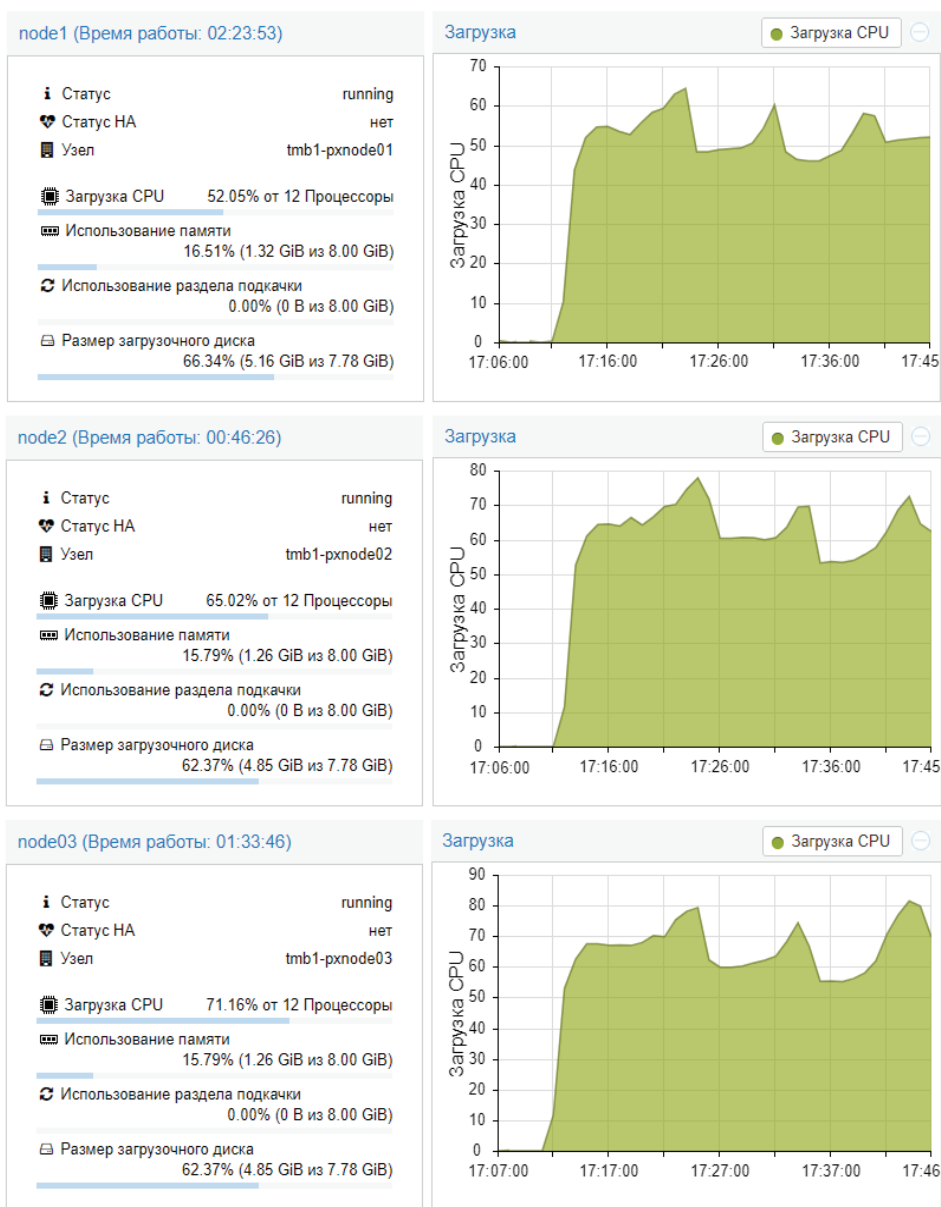


Рис. 4. Динамика загрузки узлов вычислительного кластера

Из динамики загрузки двенадцати ядер можно сказать, что работа шести параллельных процессов часто распределяется в *среднем* по двум ядрам процессора на каждый процесс, при этом наблюдается пиковая нагрузка (см. рис. 4). Откуда можно сделать вывод, что для данной задачи и конфигурации кластера 6 – это максимальное число параллельных процессов, которые можно запустить на одном 12-ядерном узле.

Затраты памяти в среднем: на первом узле для пяти параллельных процессов – 1,32 Гбайт, на втором и третьем узлах для шести – по 1,26 Гбайт.

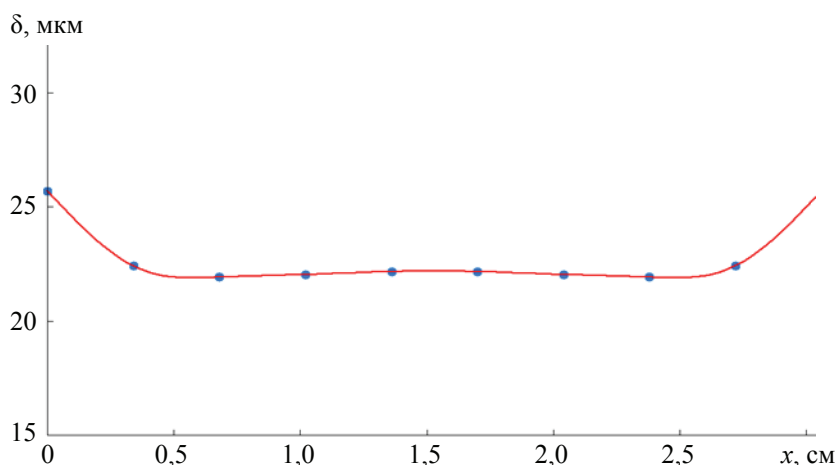


Рис. 5. Распределение покрытия по поверхности детали

Далее приведен итоговый вывод главного процесса.

```
[irina@node1 parallel_wall_zn]$ ./compile
[irina@node1 parallel_wall_zn]$ ./parallel_wall_zn
```

Программа параллельных вычислений оптимальной конфигурации токоне-проводящего экрана в гальванической ванне

Copyright 2022 Пчелинцева И.Ю., Литовка Ю.В. <irina_yu_10@mail.ru>

Npl_min = 2

PL_min = 7

Rmin = 2 %

Время вычислений = 43.5 мин.

На рисунке 5 построен график оптимального распределения толщины получаемого покрытия на детали при минимальном значении $R = 2\%$. Для наглядности точки соединены кубическим сплайном.

Заключение

Разработаны структура информационной системы параллельных вычислений в распределенной компьютерной среде для решения задачи снижения неравномерности гальванических покрытий на плоских деталях прямоугольной формы; специальное программное обеспечение, реализующее такую вычислительную схему, для которого получено свидетельство о государственной регистрации [9]. При этом снижена неравномерность загрузки вычислительных узлов кластера при решении данной задачи. Таким образом, данная информационная система позволяет за наименьшее время принять оптимальное решение для построения токоне-проводящего экрана в гальванической ванне. Для рассматриваемого примера в экране должно быть два симметричных отверстия шириной в $7h_x = 0,238$ дм.

Такая программная реализация показала свою эффективность: время работы для последовательного алгоритма – 5 ч 6 мин, для параллельного алгоритма – 43,5 мин, но при этом повышаются затраты памяти и процессоров вычислительной среды.

Список литературы

1. Конкина, В. В. Постановка задачи оптимального управления реверсивным режимом нанесения гальванического покрытия в ванне со многими анодами / В. В. Конкина, Д. С. Соловьев, Ю. В. Литовка // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 248 – 256. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.248-256
2. Поиск оптимального управления токовыми режимами в гальванических процессах со многими анодами при разнообразии номенклатуры обрабатываемых изделий / А. В. Дутов, Ю. В. Литовка, В. А. Нестеров [и др.] // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2019. – № 1. – С. 78 – 88. doi: 10.1134/S0002338819010062
3. Симагин, Д. Н. Процесс получения наномодифицированных цинковых покрытий с повышенной равномерностью / Д. Н. Симагин, Ю. В. Литовка // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 4. – С. 886 – 889. EDN: RSXNXZ
4. Пчелинцева, И. Ю. Математическая модель и численная схема расчета электрических полей в гальванических ваннах с плоским токонепроводящим экраном / И. Ю. Пчелинцева, Ю. В. Литовка // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2021. – № 3. – С. 85 – 97. EDN: AITOO
5. Пчелинцева, И. Ю. О проверке адекватности модели электрического поля в гальванической ванне с плоским токонепроводящим экраном / И. Ю. Пчелинцева // Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации : материалы XXX Междунар. науч.-техн. конф., 14 – 20 сентября 2021 г., Алушта. – М., 2021. – С. 75–76. EDN: KPENBD
6. Пчелинцева, И. Ю. Система автоматизированного управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с токонепроводящим экраном / И. Ю. Пчелинцева, Ю. В. Литовка // Мехатроника, автоматизация, управление. – Т. 23, № 4. – С. 188 – 196. doi: 10.17587/mau.23.188-196
7. Pchelintseva, I. Yu. Modeling of Metal Distribution when Coating Flat Metal Plates in Electroplating Baths / I. Yu. Pchelintseva, A. N. Pchelintsev, Yu. V. Litovka // International Journal of Numerical Modeling: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2021. – Vol. 34, No. 2. – e2830. doi: 10.1002/jnm.2830
8. Прошин, А. А. Система управления кластерами и сетями «Mosix» / А. А. Прошин, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // NovaInfo.Ru. – 2018. – № 88. – С. 21 – 26. EDN: XWCFPN
9. Свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ № 2022662881. Программа параллельных вычислений оптимальной конфигурации токонепроводящего экрана в гальванической ванне / И. Ю. Пчелинцева, Ю. В. Литовка (РФ). – Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ. – 07.07.2022 г.

A Distributed Information Processing System to Solve the Problem of Reducing Electroplating Unevenness

I. Yu. Pchelintseva

*Department of Automated Decision Support Systems,
irina_yu_10@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: database; electroplated coating; optimization problem; cluster; parallel computing.

Abstract: The structure of an information system for parallel computing in a distributed computer environment has been developed for solving an optimization problem - minimizing the criterion for the non-uniformity of a galvanic coating on a flat part. The developed software makes it possible to make a decision (search for the configuration of a non-conductive screen in a galvanic bath), which ensures the minimum non-uniformity of the coating. A computational experiment was carried out on a cluster of three nodes.

References

1. Konkina V.V., Solov'yev D.S., Litovka Yu.V. [Statement of the problem of optimal control of the reverse mode of electroplating in a bath with many anodes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 248-256, doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.248-256 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Dutov A.V., Litovka Yu.V., Nesterov V.A., Solov'yev D.S., Solov'yeva I.A., Sypalo K.I. [Search for the optimal control of current modes in galvanic processes with many anodes with a variety of processed products], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2019, no. 1, pp. 78-88, doi: 10.1134/S0002338819010062 (In Russ.)

3. Simagin D.N., Litovka Yu.V. [The process of obtaining nanomodified zinc coatings with increased uniformity], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 4, pp. 886-889, EDN: RSXNXZ (In Russ., abstract in Eng.)

4. Pchelintseva I.Yu., Litovka Yu.V. [Mathematical model and numerical scheme for calculating electric fields in electroplating baths with a flat non-conductive screen], *Differentsial'nyye uravneniya i protsessy upravleniya* [Differential equations and control processes], 2021, no. 3, pp. 85-97, EDN: AIJTOO (In Russ.)

5. Pchelintseva I.Yu. *Sovremennyye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii* [Modern technologies in control, automation and information processing], Proceedings of the XXX International Scientific and Technical Conference, 14 - 20 September, 2021, Alushta, Moscow, 2021, pp. 75-76, EDN: KPENBD (In Russ.)

6. Pchelintseva I.Yu., Litovka Yu.V. [Automated control system for the process of electroplating in a bath with a non-conductive screen], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, automation, control], vol. 23, no. 4, pp. 188-196, doi: 10.17587/mau.23.188-196 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Pchelintseva I.Yu., Pchelintsev A.N., Litovka Yu.V. Modeling of Metal Distribution when Coating Flat Metal Plates in Electroplating Baths, *International Journal of Numerical Modeling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2021, vol. 34, no. 2, e2830, doi: 10.1002/jnm.2830

8. Proshin A.A., Goryachev N.V., Yurkov N.K. [Control system for clusters and networks "Mosix"], *NovInfo.Ru*, 2018, no. 88, pp. 21-26, EDN: XWCFPN (In Russ.)

9. Pchelintseva I.Yu., Litovka Yu.V. *Programma parallel'nykh vychisleniy optimal'noy konfiguratsii tokoneprovodyashchego ekrana v gal'vanicheskoy vanne* [Program for parallel computing of the optimal configuration of a non-conductive screen in a galvanic bath], Russian Federation, 2022, Certificate of state registration of the computer program No. 2022662881. (In Russ.)

Verteiltes Datenverarbeitungssystem zur Lösung des Problems der Verringerung der Ungleichmäßigkeit von galvanischen Beschichtungen

Zusammenfassung: Es ist die Struktur des Informationssystems für parallele Berechnungen in einer verteilten Computerumgebung entwickelt, um das Problem der Optimierung zu lösen – das Kriterium für die Ungleichmäßigkeit der galvanischen Beschichtung auf einem flachen Teil zu minimieren. Die entwickelte Software ermöglicht eine Entscheidung zu treffen (Suche nach der Konfiguration des leitenden Schirmes im galvanischen Bad), die eine minimale Ungleichmäßigkeit der Beschichtung gewährleistet. Ein Computereperiment ist auf einem Cluster von drei Knoten durchgeführt.

Système du traitement de l'information distribuée pour résoudre le problème de la réduction de l'hétérogénéité de galvanoplastie

Résumé: Est élaborée la structure du système d'information des calculs parallèles dans un environnement informatique distribué pour résoudre le problème de l'optimisation – minimization du critère de l'hétérogénéité de la galvanoplastie sur une pièce plane. Le logiciel élaboré permet une solution (recherche de la configuration de l'écran conducteur dans le bain galvano) qui assure un minimum de l'hétérogénéité de la couverture. Est réalisée une expérience de calcul sur un cluster de trois nœuds.

Автор: *Пчелинцева Ирина Юрьевна* – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.