

© 2012 г. В.А. КОЛОСКОВ, д-р техн. наук,
Д.В. ПАВЛЮЧЕНКО, аспирант,
ДИНЬ ТУАН ЛОНГ, аспирант
(«МАТИ» – РГТУ имени К.Э.Циолковского, Москва)

КЛЕТОЧНЫЕ АЛГОРИТМЫ РЕКОНФИГУРАЦИИ И МАРШРУТИЗАЦИИ НА БАЗЕ ЕСТЕСТВЕННО-ПОДОБНОЙ СРЕДЫ

Представлен подход к реконфигурации и маршрутизации в однородных структурах многопроцессорных систем на основе клеточной среды реконфигурации. Даны клеточные алгоритмы реконфигурации и маршрутизации отказоустойчивой многопроцессорной системы, использующие модель естественно-подобной среды.

CELLULAR ALGORITHMS OF RECONFIGURATION AND ROUTING BASED ON THE NATURAL SIMILAR ENVIRONMENT FOR THE CONFERENCE PACO'2012 / V.A. Koloskov, D.V. Pavlyuchenko, Din Tuan Long ("MATI" – Russian State Technological University, Orshanskaya 3, Moscow 121552, Russia, E-mail: v_koloskov@mail.ru, pavlyuch@list.ru). The approach to the reconfiguration and routing in similar multiprocessor systems is presented, which is based on the cellular environment of reconfiguration. There are given cellular algorithms of reconfiguration and routing of failure-tolerance multiprocessor systems, which use the model of the natural similar environment.

1. Введение

Для восстановления работоспособности отказоустойчивых многопроцессорных систем (МПС) при отказах процессорных элементов (ПЭ) применяется метод общего скользящего резервирования. Указанный метод динамического резервирования характеризуется высокими надежностными показателями[1,2]. При реализации метода в МПС элементы магазина резерва хранят все программные модули, исполняемые в системе, и могут заменить любой из основных ПЭ. Для обеспечения связности между элементами путем адаптивной маршрутизации в реконфигурированной МПС каждый ПЭ (основной и резервный) запоминает расположение отказавших узлов и новые текущие координаты (физические адреса) заменивших их элементов. При этом каждый программный модуль идентифицируется своим логическим адресом. Соответствие физических и логических адресов фиксируется в таблице соответствия, перекодирование которой при отказах выполняет программа реконфигурации, хранящаяся в одном или нескольких ПЭ [3]. Централизованный характер управления реконфигурацией требует сбора, хранения и обработки глобальных данных об отказах элементов, что нарушает однородность системы. При наращивании МПС необходимо увеличивать число хранимых копий ПМ в резервных элементах и корректировать адресное пространство и таблицы соответствия логических и физических адресов всех ПЭ, что снижает гибкость отказоустойчивой МПС, лишает ее свойства масштабируемости.

Сохранить положительные качества систем с общим скользящим резервированием (отказоустойчивость, оперативность замены) и устранить указанные недостатки позволяет клеточная организация реконфигурируемой МПС. Авторами разработан и исследуется клеточный подход [4-6] к реконфигурации и маршрутизации типовых решетчатых структур с размещенными в них резервными элементами.

В отличие от известных методов, использующих глобальные обновленные данные о перезагрузке системы, рассматриваемый подход впервые использует качественно новую, распределенную по всем узлам локальную информацию, обеспечивающую возможность реконфигурации и оптимального достижения приемника из любого узла. Клеточная среда реконфигурации и маршрутизации, интегрируемая в МПС, основана на распределенной обработке минимальных локальных данных, которые не зависят от размеров МПС, числа и глобального расположения в сети отказавших и резервных узлов.

В настоящей работе рассмотрены клеточная структура отказоустойчивой МПС, клеточные алгоритмы реконфигурации и маршрутизации, реализуемые на базе модели управляемой токопроводящей среды. Показан механизм получения решений путем управления связями в естественно-подобной вычислительной среде. Клеточные алгоритмы используют результаты взаимодействия клеток среды, что упрощает получение решений по восстановлению системы и передаче данных в реконфигурируемой МПС.

2. Структура МПС и механизм клеточного восстановления

Структура клеточной отказоустойчивой МПС представляется ортогональной графовой решеткой из $m \times n$ узлов (вершин) где m, n – число узлов по оси ординат и абсцисс.

При свертывании границ решетки по вертикали и горизонтали, она превращается в тор. Расстояние между соседними вершинами по всем $k \in (1, 2, 3, 4)$ (1 – вправо, 2 – вверх, 3 – вниз, 4 – влево) направлениям постоянно и равно шагу решетки d , расстояние между удаленными друг от друга вершинами определяется в ортогональной метрике. ПЭ имеет физический адрес (i, j) (координаты расположения элемента) и логический адрес исполняемого элементом ПМ. Каждый ПЭ клеточной МПС является самоконтролируемым, многопрограммным и настраиваемым элементом.

Реконфигурация клеточных МПС основана на взаимном резервировании физически соседних ПЭ, поскольку в памяти ПЭ предусмотрено хранение кроме основного ПМ копий программных модулей физических соседей. При этом (i, j) -ый ПЭ является элементом замены для соседних элементов с номерами: $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$, $(i, j+1)$. Процесс реконфигурации инициируется отказавшим элементом, который замещается одним из соседних узлов. Далее охваченный реконфигурацией ПЭ замещается одним из своих соседей, пока не будет достигнут ближайший резервный элемент. Хранение в ПЭ копий ПМ соседних элементов позволяет оперативно без задержек на перезагрузку ПМ в реконфигурируемой МПС восстанавливать функции элементов. Замещение отказавшего или захваченного элемента заключается в активизации его логического адреса у соседнего элемента до наступления следующей реконфигурации. Каждая последующая реконфигурация предполагает изменение состава перенастраиваемых на новые логические адреса ПЭ в соответствии с текущей отказовой ситуацией.

Механизм реконфигурации базируется на вычислении кратчайших непересекающихся маршрутов от отказавших элементов к резервным узлам. Множество элементов маршрутов определяет минимальное подмножество ПЭ, изменяющих логические адреса. Конечные пункты маршрутов соответствуют ближайшим к местам отказов резервным элементам и обеспечивают восстановление исходного числа работоспособных ПЭ. Распределение логических адресов реализуется настройкой каждого ПЭ маршрута на

функцию своего предшественника, что заменяет перезагрузку системы автоматической перенастройкой подмножества ПЭ на исполняемые резервные копии ПМ. Перечисленные функции реализуются клеточной средой реконфигурации МПС.

Передача сообщений в реконфигурируемой МПС выполняется в условиях виртуальных перемещений программных модулей источников и приемников сообщений в процессе реконфигурации. Поиск нового расположения перемещенных при реконфигурации абонентов определяется клеточным путем на основании локальной информации о результатах реконфигурации, обеспечивающей возможность оптимального достижения приемника из любого узла. Информация о достижимости приемника формируются автоматически клеточным путем на основании простой обработки минимальных данных о состоянии только смежных соседей.

Клеточные среды реконфигурации и маршрутизации распределяется в решеточной структуре МПС (рис.1,а). При этом каждый ПЭ (P_{ij}) с резервными копиями ПМ соседних элементов имеет собственный элемент управления реконфигурацией и маршрутизацией (C_{ij}) (рис.1,б), включающий ячейку реконфигурации ($ЯР_{ij}$), ячейку маршрутизации ($ЯМ_{ij}$), ячейку формирования данных ($ЯД_{ij}$) фронта волны захвата ПЭ. Ячейка $ЯР_{ij}$ управляет настройкой процессоров МПС в режиме реконфигурации. Ячейка $ЯМ_{ij}$, обеспечивает поиск приемника сообщения и выбор направления маршрута для каждого промежуточного узла. Элемент $ЯД_{ij}$ используется как при реконфигурации, так и при маршрутизации и формирует данные фронтов распространения волн захвата ПЭ от источника сообщения к приемнику, либо от отказавших элементов к резервным элементам в зависимости от решаемой задачи.

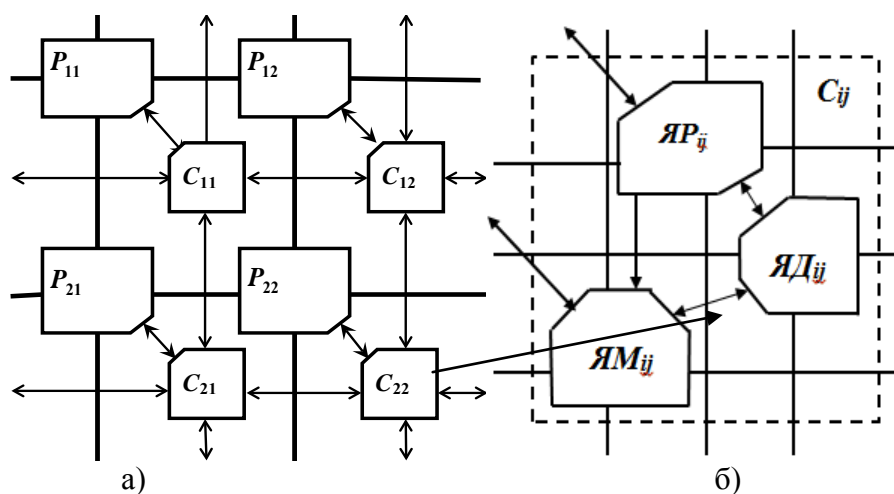


Рис.1. Структура реконфигурируемой МПС (а) и элемента клеточной среды (б)

3. Управляемая естественно-подобная среда поиска маршрутов

Для снижения числа обрабатываемых переменных и функциональной сложности клеточной вычислительной среды реконфигурации и маршрутизации целесообразно использовать естественно-подобные среды, физические законы функционирования которой позволяют получать значения требуемых величин.

В настоящей работе для параллельного вычисления непересекающихся маршрутов восстановления МПС и маршрутов передачи сообщений применена управляемая токопроводящая решетка (ТПР), обеспечивающая получение непрерывных значений характеристик длин маршрутов.

Реконфигурация МПС или формирование канала передачи сообщения в реконфигурированной системе являются результатом ответной реакции клеточной среды на возникающие отказы или запросы на маршрутизацию. Реакция клеточной среды заключается в перенастройке связей между узлами токопроводящей решетки до получения в ней устойчивой структуры. Устойчивой является структура из непересекающихся маршрутов передачи максимальных токов между узлами-источниками (отказавший элемент/источник сообщения) и приемниками (резервный элемент/приемник сообщения). Маршруты тока в токопроводящей решетке указывают на направление «перемещения» ПМ в процессе реконфигурации или передачи сообщения при маршрутизации в реконфигурированной системе с отказавшими элементами. В результате снимаемая с узла ТПР информация позволяет ПЭ определить выполняемый ПМ или установить связи с соседями в канале передачи данных с обходом отказавших элементов.

Неизменность клеточного алгоритма перенастройки ТПР для МПС с произвольной размерностью, с различным числом и расположением отказавших и резервных элементов, с постоянным составом ПМ позволяет его использовать для масштабируемых отказоустойчивых систем.

Узел решетки (рис.2) в каждом направлении $k = \overline{1,4}$ включает резистор R для снятия значения тока, ключ связи с соседним узлом sw_k^{ij} . Состоянием ключа sw_k^{ij} (замкнуто/разомкнуто) управляет сигнал y_k^{ij} . Общая точка узла, связывающая резисторы R , через ключи sw_0^{ij}, sw_E^{ij} , соединена с потенциалами E и 0 соответственно. При выполнении реконфигурации узел, соответствующий отказавшему процессорному элементу P_{ij} ($x_o^{ij} = 1$), получает потенциал E , а узел, используемый в качестве резерва ($x_r^{ij} = 1$), получает нулевой потенциал. В режиме маршрутизации узел источника подключается к потенциалу E , на узле приемника фиксируется нулевой потенциал. Для узлов, принадлежащих отказавшим ПЭ, на этапе маршрутизации сообщений связи с соседними узлами разрываются. Значения I_k^{ij} и φ_k^{ij} характеризуют ток и потенциал на k -том выходе узла.

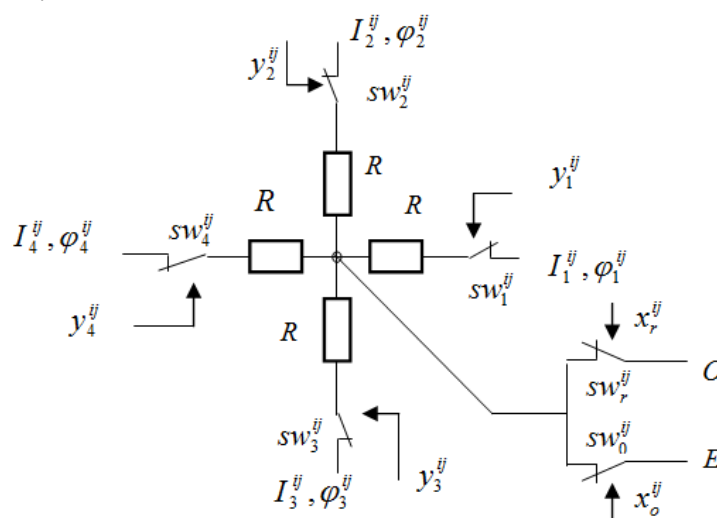


Рис. 2. Структура узла токопроводящей решетки

Построение маршрутов в решетке базируется на следующем утверждении.

Утверждение 1. Направление максимального вытекающего тока из узла соответствует направлению кратчайшего маршрута к резервному элементу.

Доказательство. Представим, что общая точка узла с потенциалом E соединена через проводники с двумя узлами с нулевым потенциалом в различных направлениях. В одном направлении проводник имеет длину l_1 , а в другом l_2 . Удельное сопротивление проводников ρ и площадь их сечений одинаковы. Значения токов, протекающих через проводники R_1 и R_2 , определяются по формулам

$$(1) \quad I_1 = \frac{E-0}{R_1} = \frac{E \cdot S}{\rho \cdot l_1},$$

$$(2) \quad I_2 = \frac{E-0}{R_2} = \frac{E \cdot S}{\rho \cdot l_2}, \quad \text{отсюда}$$

$$(3) \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{E \cdot S \cdot \rho \cdot l_2}{E \cdot S \cdot \rho \cdot l_1} = \frac{l_2}{l_1}.$$

Из утверждения следует, что максимальный ток определяет направление минимальной удаленности узла с потенциалом E от узла с нулевым потенциалом. Поскольку нулевой потенциал имеют узловые точки резервных элементов на этапе реконфигурации и узлы приемников сообщений на этапе маршрутизации, то направление максимального вытекающего тока соответствует направлению минимального маршрута к узлу (резервному ПЭ/приемнику сообщения) с нулевым потенциалом.

Рассмотрим варианты поведения токопроводящей среды при решении задачи реконфигурации. На рис.3 представлен пример распределения потенциалов и токов в решетке с отказавшим элементом в позиции (3,2) и двумя резервными элементами в позициях (2,1) и (1,4). По максимальным значениям вытекающих токов (15,8 и 9,2) из узлов (3,2) и (3,1) достигается ближайший резервный элемент по кратчайшему маршруту. В ортогональной метрике длина такого маршрута равна двум шагам решетки.

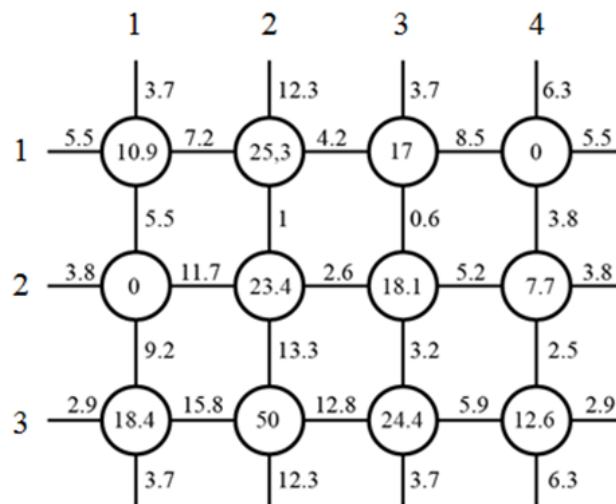


Рис.3. Пример распределения токов и потенциалов

Если для нескольких отказавших узлов ближайшим оказывается один и тот же резервный элемент, возможны пересечения маршрутов. Так, для отказавших элементов (3,2) и (2,3) максимальные значения вытекающих токов приводят к одному резервному элементу (2,2) (рис. 4). Появление подобных ситуаций требует корректировки связей токопроводящей решетки для устранения конфликтов минимальных маршрутов.

Управление связями модели токопроводящей среды позволяет адаптироваться к появлению столкновений маршрутов и обеспечить построение минимальных непересекающихся маршрутов от мест отказов к резервным элементам. Переназначение логических адресов выполняется для минимального множества работоспособных элементов, принадлежащих маршрутам.

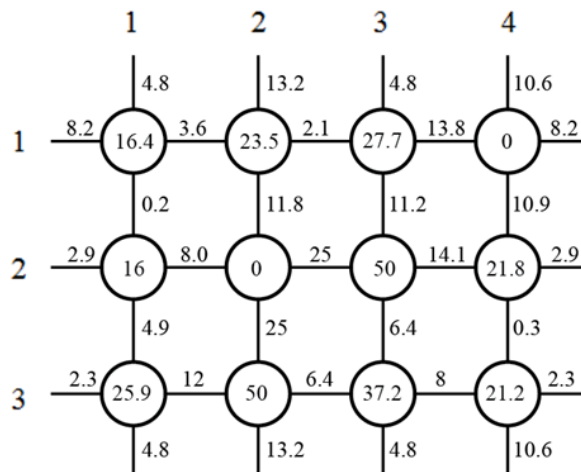


Рис. 4. Пример конфликтного распределения потенциалов

На этапе маршрутизации сообщений управление токопроводящей средой упрощается, так как определяется только один маршрут от узла с высоким потенциалом (источника) к узлу с нулевым потенциалом (приемнику) при изоляции (разрыве связей) узлов в позициях отказавших элементов.

4. Клеточный алгоритм реконфигурации

Рассмотрим стратегию клеточного построения маршрутов из перенастраиваемых ПЭ путем сохранения связей узлов естественно-подобной среды с максимальным вытекающим током и разрывом остальных связей. При этом максимальное значение по модулю переменной I_k^{ij} токопроводящей решетки соответствует переменной M_k^{ij} направления маршрута из узла (i,j) .

Клеточный алгоритм реконфигурации представляется системой параллельных замещающих операций $\Theta = \{\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4, \Theta_5, \Theta_6, \Theta_7\}$, где операции Θ_1, Θ_2 моделируют процесс получения устойчивых значений токов и потенциалов в управляемой токопроводящей решетке, операции $\Theta_3, \Theta_4, \Theta_5$ обеспечивают управление состоянием ключей токопроводящей решетки, Θ_6 – фиксирует фатальный отказ МПС, Θ_7 – управляет перенастройкой логических адресов ПЭ.

Система Θ описывает итерационные операции обработки клеточного массива $\{S_{ij}\}$, $(i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)$. Слово состояния S_{ij} любой клетки для разработанного алгоритма определяется значениями множества переменных $S_{ij} = \{x_o^{ij}, x_r^{ij}, \Phi^{ij}, I^{ij}, M^{ij}, Y^{ij}\}$, где $x_o^{ij} \in \{1,0\}$ – отказ/работоспособность узла (i,j) ; $x_r^{ij} \in \{1,0\}$ – резервный/основной элемент; $\Phi^{ij} = \{\phi_k^{ij}\}$ – множество значений потенциалов узла (i,j) на выходах $k \in (1,2,3,4)$;

$I_k^{ij} = \{I_k^{ij}\}$ – значения токов узла (i,j) по направлениям $k = \overline{1,4}$; $M_k^{ij} = \{M_k^{ij}\}$ – наличие/отсутствие маршрутов перенастройки узла (i,j) в направлениях $k \in (1,2,3,4)$; $Y_k^{ij} = \{Y_k^{ij}\}$ – переменные состояния ключей (замкнут - 1, разомкнут - 0) по каждому из направлений $k = \overline{1,4}$.

На каждой итерации для всех клеток выполняются все правила обработки и вырабатывается промежуточное значение клеточного массива. Итоговое состояние клеточного массива после выполнения всех операций Θ представляет результат клеточной реконфигурации МПС для исходной комбинации отказов и заданного размещения резервных элементов.

Правила формирования значений переменных клетки определим с учетом обозначений входных направлений для узла (i,j) переменными $(p,q) \in \{(i,j-1), (i+1,j), (i-1,j), (i,j+1)\}$.

Вычисление установившихся значений потенциалов узла (i,j) по направлениям связей ($k = \overline{1,4}$) для текущего варианта расположения отказавших и резервных узлов выполняется в соответствии с клеточной операцией Θ_1 :

$$(4) \quad \Theta_1: \varphi_k^{ij} = \begin{cases} \varphi_H, & \text{если } y_k^{ij} (x_o^{ij} x_r^{ij} \vee \bigwedge_s (\varphi_{5-s}^{pq} = \varphi_H)) \vee \bar{y}_k^{ij} = 1, \\ E, & \text{если } x_o^{ij} \wedge \bar{x}_r^{ij} \wedge y_k^{ij} = 1, \\ 0, & \text{если } \bar{x}_o^{ij} \wedge x_r^{ij} \wedge y_k^{ij} = 1, \\ \sum_{s=1}^4 (\varphi_{5-s}^{pq} * y_s^{ij} * (y_{5-s}^{pq} \neq \varphi_H)) / \sum_{s=1}^4 (y_s^{ij} * (y_{5-s}^{pq} \neq \varphi_H)), & \text{если иначе,} \end{cases}$$

где φ_H - значение потенциала разрыва связи между вершинами (i,j) и (p,q) .

Процесс вычисления завершается, когда ни одна клетка не может изменить свои данные S_{ij} . Процесс образования потенциалов заканчивается после получения значений, удовлетворяющих условию: $\forall(i,j): \varphi^{ij}(t+1) - \varphi^{ij}(t) \leq \Delta$, где Δ – заданная погрешность вычислений. Установившиеся значения потенциалов $\{\varphi_k^{ij}\}$ позволяют получить значения токов $\{I_k^{ij}\}$ (при сопротивлениях $R=1$) узла (i,j) по всем направлениям $k = \overline{1,4}$ в соответствии с операцией Θ_2 :

$$(5) \quad \Theta_2: I_k^{ij} = \begin{cases} \varphi_k^{ij} - \varphi_{5-k}^{pq}, & \text{если } y_k^{ij} \wedge (y_{5-k}^{pq} \neq \varphi_H), \\ 0, & \text{если иначе.} \end{cases}$$

Значения переменных токов и потенциалов описывают состояние токопроводящей среды, на базе которой вычисляются минимальные маршруты перенастраиваемых ПЭ от мест отказов до ближайших резервных узлов с обходом отказавших элементов.

Для определения маршрутов перенастройки разработаны клеточные операции управления связями токопроводящей решетки: разрыва связей с не максимальным вытекающим током (Θ_3), формирования переменной M_k^{ij} наличия маршрута и разрыва связей с не минимальным и нулевым втекающим током (Θ_4), восстановления связей узлов, не принадлежащих маршрутам (Θ_5), а также операции фатального отказа (Θ_6) и перенастройки логических адресов (Θ_7). Правила выполнения операций имеют вид:

$$(6) \quad \Theta_3: y_k^{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } (I_k^{ij} = \max_{s=1,4}\{I_s^{ij}\}) \wedge (I_k^{ij} > 0) \\ 0, \text{ если } (I_k^{ij} \neq \max_{s=1,4}\{I_s^{ij}\}) \wedge (I_k^{ij} > 0) \\ y_k^{ij}, \text{ если } I_k^{ij} \leq 0, \end{cases}$$

$$(7) \quad \Theta_4: y_k^{ij} = M_k^{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } (I_k^{ij} = \min_{s=1,4}\{I_s^{ij}\}) \wedge (I_k^{ij} < 0) \\ 0, \text{ если } (I_k^{ij} \neq \min_{s=1,4}\{I_s^{ij}\}) \wedge (I_k^{ij} \leq 0) \\ y_k^{ij}, \text{ если } I_k^{ij} > 0, \end{cases}$$

$$(8) \quad \Theta_5: y_k^{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } (\bigwedge_{s=1}^4 (I_s^{ij} = 0)) = 1, \\ 0, \text{ если иначе,} \end{cases}$$

$$(9) \quad \Theta_6: FO^{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } (x_0^{ij} = 1) \wedge (\bigwedge_{k=1}^4 (I_k^{ij} = 0)) = 1 \\ 0, \text{ если иначе,} \end{cases}$$

$$(10) \quad \Theta_7: L^{ij} = \begin{cases} (p, q) \text{ если } I_{5-k}^{pq} < 0, \\ (i, j), \text{ если иначе.} \end{cases}$$

Обобщенный алгоритм функционирования клеточной среды реконфигурации включает этапы:

1. Инициализация клеточных переменных по сигналам от средств контроля: $\forall (i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}) x_0^{ij} \in \{1, 0\}$ - отказ/работоспособность узла (i, j) ; $x_r^{ij} \in \{1, 0\}$ - резервный/основной элемент; $\Phi^{ij}, I^{ij}, M^{ij}$ – установка в нулевые значения; Y^{ij} - установка в единичные значения (ключи замкнуты).
2. Вычисление установившихся значений потенциалов на выходах узла и токов в связях узлов (i, j) ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$) с соседними клетками (операции Θ_1, Θ_2).
3. Разрыв связей с не максимальными вытекающими токами (операция Θ_3).
4. Вычисление установившихся значений потенциалов узлов ТПП (операции Θ_1, Θ_2).
5. Разрыв связей с не максимальными и нулевыми втекающими токами (операция Θ_4).
6. Вычисление установившихся значений потенциалов токов (операции Θ_1, Θ_2).
7. Если значения переменных клеточного массива изменились, восстановление связей узлов, не принадлежащих маршрутам (операция Θ_5), возврат к п.2.
8. Вычисление переменной фатального отказа (операция Θ_6). Если $FO^{ij} = 1$ хотя бы для одного узла, то фиксация фатального отказа в МПС. Переход к п.10.
9. Перенастройка логических адресов элементов маршрутов (операция Θ_7).
10. Конец.

На рис.5,а приведены этапы построения маршрутов в соответствии с представленным алгоритмом, на рис. 5,б – результат реконфигурации МПС.

На первом этапе сформированы только два маршрута в виде изолированных связанных компонент в токопроводящей решетке. Для отказавшей вершины (1,2) на первом этапе все связи с резервными узлами оказались разорванными. На втором этапе после восста-

новления связей в области решетки, не принадлежащей маршрутам, построен третий маршрут от узла (1,2) до резервной вершины (4,4). Итоговые состояния клеточных переменных резервных узлов приведены на рис. 6.

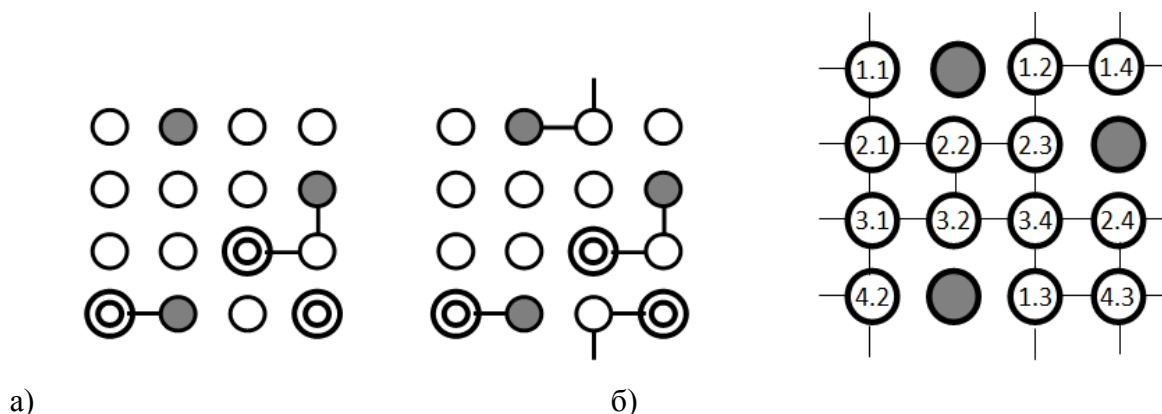


Рис.5. Этапы построения маршрутов (а) и результат реконфигурации МПС (б)

(3,3)	
φ	0
I_1	-25.00
I_2	0
I_3	0
I_4	0
γ	1 0 0 0

(4,1)	
φ	0
I_1	-50
I_2	0
I_3	0
I_4	0
γ	1 0 0 0

(4,4)	
φ	0
I_1	0
I_2	0
I_3	0
I_4	-16.67
γ	0 0 0 1

Рис. 6. Итоговые состояния клеточных переменных резервных узлов

5. Клеточный алгоритм адаптивной маршрутизации

Поиск оптимальных маршрутов передачи сообщений в реконфигурированной структуре с произвольными отказами узлов должен учитывать возможность изменения физического расположения источника и/или приемника сообщения. В результате маршрутизатору необходимо учитывать результаты реконфигурации и решать следующие задачи:

1. Коррекции координат расположения приемника при перемещении ПМ-источника после реконфигурации.
2. Поиска первоначального расположения приемника.
3. Определения позиции приемника по результатам реконфигурации.
4. Определение кратчайшего маршрута от источника до приемника в условиях произвольных отказов.

Клеточный алгоритм адаптивной маршрутизации представляется системой параллельных операций $\Theta = \{\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4, \Theta_8, \Theta_9, \Theta_{10}, \Theta_{11}\}$, где операции $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4$ идентичны соответствующим операциям алгоритма реконфигурации, $\Theta_8, \Theta_9, \Theta_{10}$ — обеспечивают поиск приемника в МПС с перемещающимися источником и приемником, Θ_{11} — организует канал передачи сообщения от источника к приемнику.

Слово состояния S_{ij} клетки среды маршрутизации определяется значениями переменных $S_{ij} = \{x_o^{ij}, x_{\Pi}^{ij}, x_{\Pi}^{ij}, \Delta x^{ij}, \Delta y^{ij}, \Phi^{ij}, I^{ij}, Y^{ij}, M^{ij}, N^{ij}\}$, где $x_o^{ij} \in \{1,0\}$ – отказ/работоспособность узла (i,j) ; $x_{\Pi}^{ij}, x_{\Pi}^{ij} \in \{1,0\}$ – переменные принадлежности узла (i,j) к приемнику или источнику сообщения соответственно; $\Delta x^{ij} \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$, $\Delta y^{ij} \in \{0, 1, 2, \dots, m\}$ – значения отклонений по осям X, Y от узла (i, j) до приемника; $\Phi^{ij}, I^{ij}, Y^{ij}, M^{ij}$ – переменные, идентичные соответствующим переменным алгоритма реконфигурации; $N^{ij} = \{N_k^{ij}\}$ – переменные выбора направлений передачи сообщения из узла (i,j) . Направления приема сообщения в узел (i,j) обозначаются как $N^{pq} = \{N_s^{pq}\}$, где $(p,q) \in \{(i,j-1), (i+1,j), (i-1,j), (i,j+1)\}$, $s \in (1,2,3,4)$.

Рассмотрим правила выполнения клеточных операций среды маршрутизации.

Коррекция координат расположения приемника.

В формате сообщения для поиска приемника вводятся переменные смещения координат источника (i_1, j_1) относительно координат приемника (i_2, j_2) по осям абсцисс ($\Delta x^{ij} = |i_2 - i_1|$) и ординат ($\Delta y^{ij} = |j_2 - j_1|$). Из-за возможных перемещений физического расположения источника введена клеточная операция Θ_8 коррекции смещений:

$$(11) \quad \Theta_8: \begin{cases} \Delta x^{ij} = \begin{cases} \Delta x^{ij} - 1, \text{ если } M_4^{ij} = 1, \\ \Delta x^{ij} + 1, \text{ если } M_1^{ij} = 1, \\ \Delta x^{ij}, \text{ если иначе,} \end{cases} \\ \Delta y^{ij} = \begin{cases} \Delta y^{ij} - 1, \text{ если } M_2^{ij} = 1, \\ \Delta y^{ij} + 1, \text{ если } M_3^{ij} = 1, \\ \Delta y^{ij}, \text{ если иначе.} \end{cases} \end{cases}$$

Единичные значения переменных M_4^{ij}, M_1^{ij} показывают, что до реконфигурации программный модуль источника располагался слева или справа от узла (i,j) соответственно, либо сверху (при $M_2^{ij} = 1$) или снизу (при $M_3^{ij} = 1$) от него.

Поиск первоначального расположения приемника.

Позиция первоначального расположения приемника соответствует его физическому размещению до реконфигурации и определяется клеточной операцией Θ_9 поиска узла с нулевыми значениями смещений $\Delta x^{ij}, \Delta y^{ij}$:

$$(12) \quad \Theta_9: \begin{cases} \Delta x^{ij} = \begin{cases} \Delta x^{ij}, \text{ если } x_{\Pi}^{ij} = 1, \\ \Delta x^{ij-1} - 1, \text{ если } (\Delta x^{ij-1} \neq n) \vee (\Delta x^{ij-1} \neq 0), \\ 0, \text{ если } \Delta x^{i-1,j} = 0, \\ n, \text{ если } \Delta x^{i,j-1} = 0, \\ \Delta x^{ij}, \text{ если иначе,} \end{cases} \\ \Delta y^{ij} = \begin{cases} \Delta y^{ij}, \text{ если } x_{\Pi}^{ij} = 1, \\ \Delta y^{i-1,j} - 1, \text{ если } (\Delta y^{i-1,j} \neq m) \vee (\Delta y^{i-1,j} \neq 0), \\ 0, \text{ если } \Delta y^{i-1,j} = 0, \\ m, \text{ если } \Delta y^{i,j-1} = 0, \\ \Delta y^{ij}, \text{ если иначе.} \end{cases} \end{cases}$$

Определение позиции приемника по результатам реконфигурации

После реконфигурации приемник может находиться в позиции (i,j) в двух случаях. Так, если при нулевых смещениях $(\Delta x^{ij}, \Delta y^{ij}) = (0,0)$ программный модуль (i,j) не участвовал в реконфигурации, то (i,j) - реальная позиция приемника. Кроме того, приемник может находиться в узле (i,j) в результате его перемещения из соседней позиции $(p,q) \in \{(i,j-1), (i+1,j), (i-1,j), (i,j+1)\}$, для которой $(\Delta x^{pq}, \Delta y^{pq}) = (0,0)$. На участие любого узла в реконфигурации указывает единичное значение переменной M_k^{ij} . Клеточная функция операции Θ_{10} определения реальной позиции приемника в реконфигурированной структуре имеет вид:

$$(13) \quad \Theta_{10}: x_{\Pi}^{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если } ((\Delta x^{ij}, \Delta y^{ij}) = (0,0)) \wedge \left(\bigvee_{k=1}^4 M_k^{ij} = 0 \right) \cdot \bar{x}_o^{ij} \vee \\ \vee \bigvee_s \left((\Delta x^{pq}, \Delta y^{pq}) = (0,0) \wedge (M_s^{ij} = 1) \right) = 1, \\ 0, \text{ если иначе,} \end{cases}$$

где $(p,q) \in \{(i,j-1), (i+1,j), (i-1,j), (i,j+1)\}$, $s = \overline{1,4}$, $s \neq k$.

Определение кратчайших маршрутов передачи сообщений

Для вычисления минимального маршрута передачи сообщения используется клеточная естественно-подобная токопроводящая среда. Среда в режиме маршрутизации функционирует так же, как и при реконфигурации, отличие состоит в предварительной настройке переменных, выполняемой по запросу от ПЭ на передачу сообщения.

Инициализация клеточных переменных и настройка среды маршрутизации: $\forall (i = \overline{1,m}, j = \overline{1,n}) x_o^{ij} \in \{1,0\}$ - отказ/работоспособность узла (i,j) ; $x_{\Pi}^{ij}, x_r^{ij}, \Phi^{ij}, I^{ij}$ - нулевые значения; M^{ij} - направления маршрутов реконфигурации; Y^{ij} устанавливаются в нуль (связи размыкаются) для позиций отказавших узлов и в единицу для остальных узлов решетки; к узлу источника подключается потенциал E , а к узлу приемника - нулевой потенциал.

Позиция источника ($x_{\Pi}^{ij} = 1$) определяется при появлении запроса от соответствующего ПЭ, позиция приемника вычисляется с помощью клеточных операций $\Theta_8, \Theta_9, \Theta_{10}$.

Потенциалы Φ^{ij} и токи I^{ij} решетки определяются с помощью операций Θ_1, Θ_2 , с той разницей, что вместо переменной x_r^{ij} используется переменная x_{Π}^{ij} , а вместо переменной x_o^{ij} переменная x_{Π}^{ij} . Направления маршрутов передачи сообщений вычисляются при выполнении операций Θ_3, Θ_4 . При этом единичное значение y_k^{ij} (операция Θ_3) определяет выходное направление N_k^{ij} передаваемого из позиции (i,j) сообщения, а единичное значение y_s^{ij} (операция Θ_4) дает входное направление N_s^{pq} приема сообщения в (i,j) - ый ПЭ.

Полученные значения переменных N_k^{ij}, N_s^{pq} обеспечивают управление коммутацией каналов маршрутизатора при передаче сообщений:

- Для узла источника ($x_{\Pi}^{ij} = 1$) коммутируется канал на k -ый выход при $N_k^{ij} = 1$.
- Для узла - ретранслятора сообщения коммутируются канал от s -го входа на k -ый выход при $N_k^{ij} = N_s^{pq} = 1$.
- Для узла приемника ($x_{\Pi}^{ij} = 1$) коммутируется канал от s -го входа при $N_s^{pq} = 1$.

Работа среды маршрутизации инициируется при появлении запроса на передачу сообщения от ПЭ МПС. Алгоритм построения маршрута передачи сообщения включает следующие этапы:

1. Инициализация клеточных переменных и настройка среды маршрутизации: $\forall (i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}) x_o^{ij} \in \{1, 0\}$ - отказ/работоспособность узла (i, j) ; $x_{\Pi}^{ij} \in \{1, 0\}$ - источник/не источник; $x_{\Pi}^{ij}, \Phi^{ij}, I^{ij}$ - принимают нулевые значения; M^{ij} - вычисленные при реконфигурации направления маршрутов восстановления; Y^{ij} устанавливаются в нуль (связи размыкаются) для позиций отказавших узлов и в единицу для остальных узлов решетки.
2. Присвоение переменным φ_k^{ij} значения E , если x_{Π}^{ij} и y_k^{ij} равны единице.
3. Коррекция координат расположения приемника в формате сообщения (операция Θ_8).
4. Клеточный поиск первоначального расположения приемника (операция Θ_9).
5. Определение позиции приемника по результатам реконфигурации структур (операция Θ_{10}).
6. Вычисление значений переменных φ_k^{ij}, I_k^{ij} (операции Θ_1, Θ_2).
7. Установка нулевых значений переменных y_k^{ij} для не максимальных $I_k^{ij} > 0$ и единичных значений переменных N_k^{ij} для максимальных значений $I_k^{ij} > 0$ (операция Θ_4).
8. Вычисление значений переменных φ_k^{ij}, I_k^{ij} (операции Θ_1, Θ_2).
9. Установка нулевых значений переменных y_k^{ij} для не минимальных значений $I_k^{ij} \leq 0$ и единичных значений переменных N_s^{pq} для минимальных значений $I_k^{ij} < 0$ (операция Θ_5).
10. Коммутация каналов маршрутизатора по значениям переменных N_k^{ij}, N_s^{pq} .

6. Заключение

Рассмотренный клеточный подход к реконфигурации и маршрутизации МПС обеспечивает конфигурирование системы с неисправными элементами и передачу в ней сообщений по минимальным маршрутам независимо от количества и расположения неисправных и резервных элементов без сбора и хранения глобальной информации о размещении отказавших узлов и соответствии физических и логических адресов в каждом ПЭ. Ядром клеточной среды явилась естественно-подобная управляемая среда, формирующая для узлов данные о минимальных длинах маршрутов при решении задач реконфигурации и адаптивной маршрутизации.

Разработанный клеточный алгоритм управления естественно-подобной средой обеспечил создание клетки настройки и маршрутизации. Ее интеграция в процессорный элемент дает возможность построить самореконфигурируемый ПЭ с самомаршрутизацией сообщений. МПС на базе таких элементов масштабируются без потери свойств реконфигурируемости и адаптивной маршрутизации.

Универсальный клеточный подход к реконфигурации, не зависящий от числа и размещения отказавших и резервных элементов, обеспечивает исправление любой комбинации до четырех отказов при числе резервных элементов не менее четырех и обладает высокой корректирующей способностью при большем числе отказов.

Результаты клеточной реконфигурации при определении маршрутов передачи сообщений дали возможность находить новое расположение источников и приемников в ре-

конфигурированной многопроцессорной системе без записи в каждом ПЭ глобальных данных о позициях отказов.

Применение для формирования минимальных длин маршрутов естественно-подобной среды, основанной на закономерностях распределения токов и потенциалов в токопроводящей решетке, позволило ограничиться связями по передаче тока между клетками и снизить коммуникационную сложность клеточной среды. Представленный клеточный алгоритм определения минимальных длин маршрутов обеспечивает поиск маршрутов за две итерации, что снижает временную сложность реконфигурации и маршрутизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Черкесов Н.Г.* Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб.: Питер, 2005.
2. *Ушаков И.А.* Курс теории надежности систем.-М.: Дрофа, 2008.
3. *Катаев О.В.* Об одном подходе к построению отказоустойчивых бортовых многопроцессорных вычислительно-управляющих систем // Искусственный интеллект. 2008. №4. С. 538-544.
4. *Колосков В.А., Медведев А.В., Медведева М.В.* Построение клеточных алгоритмов самоорганизации мультимикроконтроллеров с программируемым резервом // АиТ. 2002. №1. С. 161-172.
5. *Medvedeva M.V., Koloskov V.A.* Self-Organization of Cellular Environment and Reproduction of the Network Logical Structure // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, 2003. Vol.502/2-3, P. 540-542.
6. *Колосков В.А., Римский С.Д.* Использование континуально-логических клеточных автоматов для управления реконфигурацией однородной мультимикроконтроллерной системы // Материалы XVII Всероссийского семинара Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных. Красноярск, ИПК СФУ, 2009. С. 67-69.