

УДК 681

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МЕМВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ДЛЯ УПРОЩЕНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ**

Макашов М.И., студент гр. ГЭС191-4, I курс  
Научный руководитель: Рудакова А.А., ст.преподаватель  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Междуреченск  
г. Междуреченск

Технический и информационный прогресс всё больше входят в нашу жизнь. Уже невозможно представить развитие общества без компьютеров, предприятий без планирования, расчётов и современных технологий. Следовательно, важно иметь точные и правильные результаты/вычисления/продукты, для удовлетворения потребностей заказчика/производства. И тут люди сталкиваются с проблемой сложных вычислений, затратных по времени, ресурсам, или вовсе невыполнимым по ряду причин. Чтобы справиться с этими трудностями используют и модернизируют эвристические алгоритмы, высокопроизводительные вычисления (НРС), облачные вычисления, разрабатывают технологии квантовых вычислений, биокомпьютеры и т.д. Некоторые из способов используют физические явления для решения поставленных непростых задач. Типичным примером является простая факторизация, которая может быть решена за полиномиальное время путем использования квантовой запутанности на квантовом компьютере. Однако существуют и другие типы, не считая квантовых, физических свойств, которые можно использовать для эффективного вычисления широкого круга сложных задач. Одним из таких свойств является память. Компьютеры: от смартфонов, навигаторов, ноутбуков до самого большого суперкомпьютера, работают на архитектуре фон Неймана. Память и вычисления в этой архитектуре разделены. Однако, есть подход, в котором к взаимодействию памяти и вычислений подошли с другой стороны, то есть, память может быть использована в новом физическом подходе к вычислениям. Технологию назвали Memcomputing (Memory + Computing = Memcomputing=>Мемвычисление).

Мем-элементы можно определить, как элементы электрической схемы с памятью. Было продемонстрировано, что Мем-элементы являются хорошими кандидатами не только для хранения данных, но и для создания нового поколения вычислительных запоминающих устройств, т. е. запоминающих устройств, которые могут выполнять основные вычислительные задачи непосредственно в памяти. Беспрецедентная производительность мемвычислительной технологии основана на основополагающей теоретической концепции универсального мемвычислительного устройства (УМУ). УМУ – это класс масштабируемых мемвычислительных машин, построенных с исполь-

зованием взаимосвязанных блоков памяти (мемпроцессоров), способных выполнять вычисления. УМУ реализуются на практике в виде цифровых мемвычислительных устройств (ЦМУ, Digital Memcomputing Machines/DMMs). ЦМУ используют мощь самоорганизующихся логических схем (СЛС), которые отличаются от традиционных схем, благодаря уникальным свойствам самоорганизующихся логических элементов (СЛЭ, Self-Organizing Logic Gates/SOLGs), используемых при их построении. СЛС, в свою очередь, могут быть реализованы в аппаратном обеспечении с помощью доступной технологии (неквантовой) или эффективно смоделированы в программном обеспечении.

Рассмотрим подробнее принцип действия СЛЭ. Наиболее существенной особенностью СЛЭ являются их проявленные дальнедействующие порядки. Дальнедействующий порядок описывает физические системы, которые демонстрируют коррелирующее поведение между удаленными частицами. Другими словами, системы с дальним порядком содержат компоненты, соответствующие состояниям других компонентов независимо от расстояния. Эта одновременная коллективная отзывчивость отдельных частей описывает временную и пространственную нелокальность системы. Способность СЛЭ реализовывать дальнедействующий порядок обусловлена существованием инстантонов. Инстантоны соединяют топологически неравнозначные критические точки в фазовом пространстве. Они являются классическим аналогом квантового туннелирования. Инстантоны создают нелокальность в системе, которая порождает коллективное динамическое поведение СЛЭ для корреляции на произвольном расстоянии. В сущности, такое коллективное поведение позволяет СЛЭ эффективно адаптировать значение истинности для удовлетворения логического суждения из другого логического элемента, не нарушая при этом своего собственного внутреннего логического суждения. Нелокальность СЛЭ допускает одновременное переключение переменных, что является необходимой задачей, которую комбинаторные подходы не могут выполнить, как только они достигают определенного числа соответствующих ограничений. Именно дальнедействующий порядок СЛЭ приводит к ускорению вычислений на несколько порядков. Сравним методики обработки данных в цифровых и в мемвычислительных устройствах.

Объединения центральных процессоров (многоядерность в устройствах) и машины с параллельной обработкой данных становятся нормой при построении структуры компьютеров в наши дни.

В таких параллельно-организованных машинах все процессоры синхронизированы (Рис. 1): каждый из них выполняет задачу в интервале времени  $T$ . В конце тактового цикла все процессоры делятся своими результатами и переходят к следующей задаче.

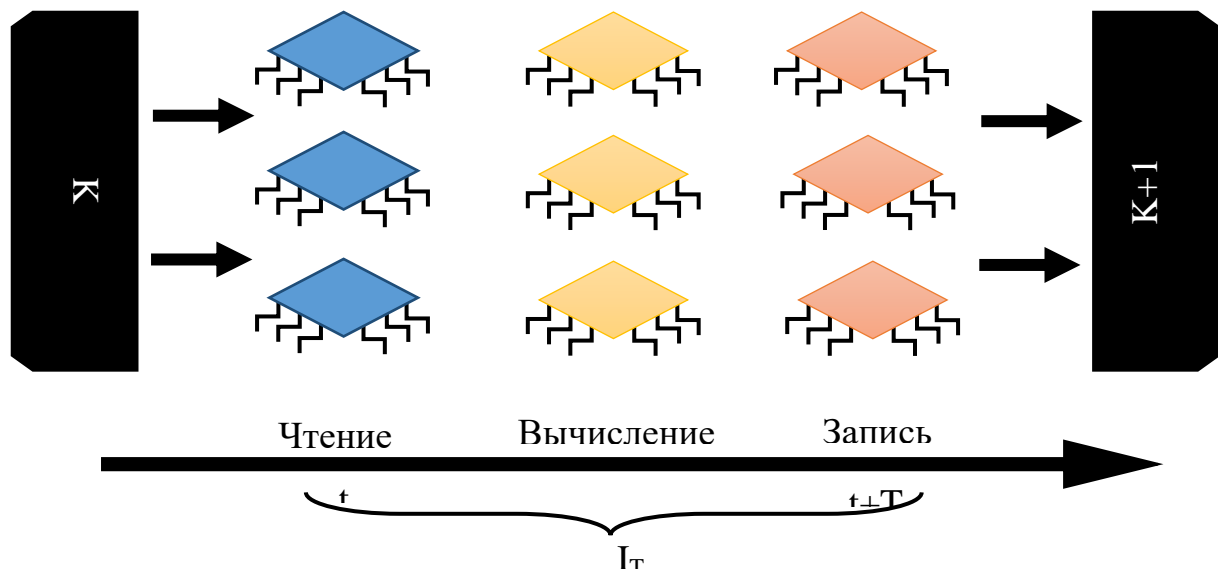


Рис. 1. Стандартный параллелизм

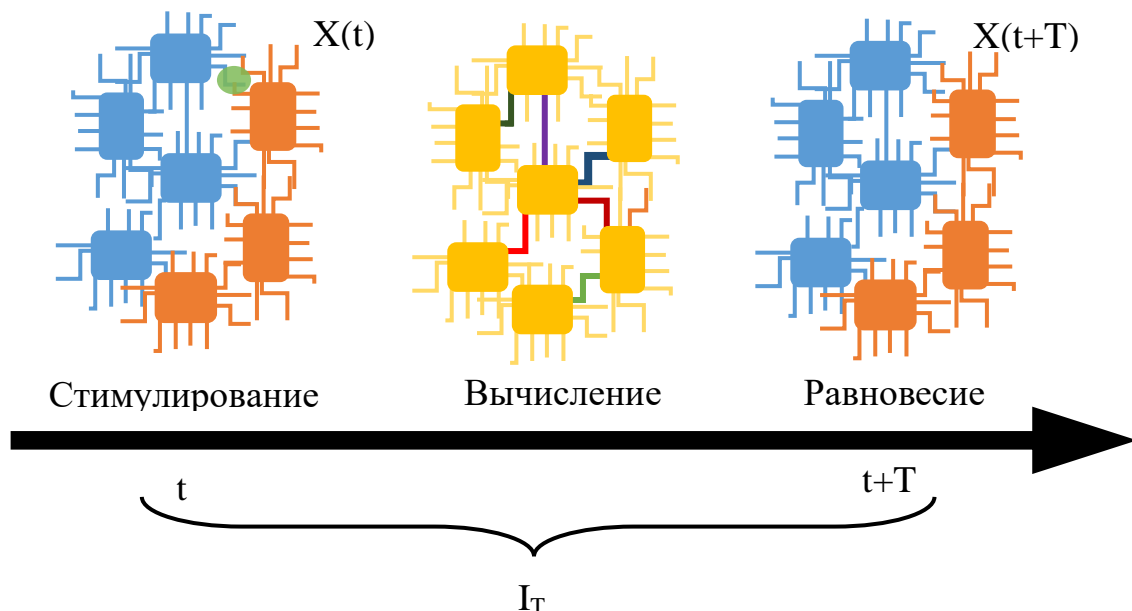


Рис. 2. Внутренний параллелизм

В любой момент времени любой элемент устройства «знает» (Рис. 2), что делают другие элементы. Физическое взаимодействие между различными составляющими устройства обеспечивает коллективную динамику всей системы.

Еще одной ключевой особенностью решения мемвычислений является способность ЦМУ масштабироваться полиномиально и особенно линейно, как это показано для наборов задач, которые эффективно сопоставляются с пространством задач Max-SAT. Важно отметить, что линейное масштабирование не зависит от размера входных данных, поскольку число логических элементов линейно растет с каждым шагом, требующим только линейного числа операций с плавающей запятой и линейно растущей памяти. Другими словами, число переменных может быть увеличено без экспоненциального увеличения времени вычислений, что решает основную проблему с обычными вычислительными решениями.

ЦМУ масштабируемы и могут быть реализованы с помощью нелинейных динамических систем с памятью (дополнительная внутренняя степень свободы). Это позволяет нам создать новый тип булевой логики, который является терминально-агностическим (самоорганизующимся), то есть, не различающим вход и выход. Другими словами, каждое подключение у СЛЭ является входом и выходом. Таким образом, сохраняя цифровую структуру входа и выхода (следовательно, требуя конечных средств для чтения/записи, выхода/входа), ЦМУ, построенные из СЛЭ, могут самоорганизовываться коллективно для решения очень сложных задач довольно эффективно. При соответствующей сборке для представления данной комбинаторной/оптимизационной задачи соответствующая самоорганизующаяся схема сходится к точкам равновесия, которые выражают решения рассматриваемой задачи. ЦМУ устойчивы к шуму и структурным нарушениям. Поскольку ЦМУ - это неквантовые системы, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями, они не только могут быть встроены в аппаратное обеспечение с помощью доступных технологий, но и могут быть эффективно смоделированы в программном обеспечении на стандартных компьютерах, используемых сегодня, обеспечивая существенные преимущества по сравнению со стандартными алгоритмами для широкого круга задач комбинаторики/оптимизации. Для воплощения в аппаратном исполнении ЦМУ требуется не больше, чем стандартная комплементарная металл-оксид-полупроводниковая технология (КМОП), если применяются эмуляторы схемных элементов с памятью.

Память и самоорганизация позволяют нам построить новый тип логики, так что мы можем читать и записывать выходы и входы соответственно с конечной точностью. Поскольку конечная точность просто переводится в выражение задачи в двоичном формате, это означает, что ЦМУ идеально подходят для комбинаторных/оптимизационных задач. Булева задача может быть преобразована в физическую задачу, так что мы можем решить ее и в обратном направлении. Это позволяет инвертировать так называемые "односторонние функции", а именно такие задачи, как факторизация на простые числа, легко решаемая в одном направлении, но не в обратном.

Алгоритм решения булевых задач с помощью ЦМУ:

1. Построение булевой схемы, представляющей рассматриваемую задачу;
2. Замена традиционных (однонаправленных) логических элементов этой схемы на СЛЭ;
3. Наличие возможности описания дифференциальными уравнениями составленной электронной схемы на основе СЛЭ;
4. Подача на соответствующие клеммы требуемого "ввода" (например, число, подлежащее факторизации);
5. Построение соответствующей схемы в аппаратном исполнении или моделирование дифференциальных уравнений, заложенных в схеме, в программном обеспечении;

б. Нахождение равновесных (стационарных) точек динамической системы, в которых кодируется решение;

Рассмотрим примеры решения задач при помощи мемвычислительной техники:

**Задача 1.** Машинное обучение. СЛС симуляции:

- Обеспечивают очень хорошую аппроксимацию, близкую к оптимальной;
- Ускорение/акселерация предварительно протестированных симуляций сравнимо с возможностями продемонстрированной аппаратуры с применением метода квантового отжига, реализованного на D-Wave устройствах;
- Значительно лучшая производительность по сравнению с подходом квантового отжига с точки зрения качества обучения: более 1% точности, что соответствует снижению частоты ошибок на 20%;

**Задача 2.** Комбинаторный вызов. Задача о сумме подмножеств:

Задача о сумме подмножеств относится к классу NP-полных. Модели ЦМУ предлагают решения этой задачи в полиномиальном времени по сравнению с экспоненциальными требованиями стандартных подходов.

- Решается с использованием стандартного алгоритмического подхода, реализованного в Matlab: 2000 лет;
- Memcomputing: в течение нескольких дней;

**Задача 3.** Задача оптимизации Max-SAT:

Модели СЛС с использованием последовательного кода MatLab работают на порядки лучше, чем победители конкурса Max-SAT 2016 года по широкому спектру оптимизационных задач.

- Random 2 Max-SAT,
- Max-Cut,
- Forced Random Binary problem
- Max-Clique

В некоторых случаях, когда победители конкурса Max-SAT 2016 года не могут найти решение проблемы, мемвычислительный метод находит.

**Задача 4.** Проблема открытой добычи полезных ископаемых.

Разрез может быть описан трехмерным массивом блоков, каждому из которых присвоен ряд значений, определяющих его характеристики. Планирование открытого карьера состоит в нахождении последовательности, в которой блоки должны быть удалены из шахты, чтобы максимизировать общую дисконтированную прибыль от шахты с учетом различных технических и экономических ограничений. Эта проблема является актуальной в промышленном отношении и была тщательно изучена самими организаторами MIPLIB (Mixed Integer Programming Library (<https://miplib.zib.de/>)).

Сравнительные тесты rMine – это серия задач, моделирующих проблему открытой добычи полезных ископаемых. MIPLIB содержит пять версий сравнительных тестов rMine, в которых увеличивается число переменных и сложность задачи. Как описано в научной публикации по этим тестам, Mem

Computing Integer Linear Programming (<https://arxiv.org/abs/1808.09999v1>), исследователи столкнулись с коммерчески доступным, лучшим в своем классе решателем для смешанного целочисленного программирования. Исследование показывает, что для небольших экземпляров задач коммерческий решатель очень быстро сходится к решению в пределах 1% от глобального минимума. Однако, увеличивая число переменных, и тем самым увеличивая сложность задачи, коммерческий решатель достигал только 10000+ % от глобального минимума. Сопроцессор MemCPU сходился немного медленнее на небольших экземплярах, чтобы достичь решения в пределах 1% от глобального минимума. Однако, поскольку сложность задачи возрастала, сопроцессор MemCPU сохранял масштабирование и продолжал обеспечивать решение в пределах 1% от глобального минимума, что на 5 порядков точнее, чем у коммерческого решателя.

Ключевым аспектом мемвычислительной архитектуры является то, что она показывает более хорошие результаты, чем больше и сложнее становится проблема. На небольших примерах проблем более экономично использовать текущие коммерческие решатели. Однако по мере того, как проблемы становятся все более сложными и на их решение начинают уходить часы, дни и даже недели, мемвычислительная архитектура часто может обеспечить эквивалентные или даже лучшие решения за считанные минуты или секунды.

Мемвычислительная архитектура вводит новую парадигму, в которой очень сложные задачи преобразуются из комбинаторной задачи в физическую задачу. Решение физической задачи позволяет избежать экспоненциального взрыва, связанного с текущими лучшими в своем классе эвристическими подходами. Когда СЛЭ заменяют традиционные логические элементы, получается СЛС. Динамическая, коллективная самоорганизация всех СЛЭ в цепи позволяет СЛС сходиться в точки равновесия из любого произвольно выбранного состояния. Равновесие представляет собой либо точное решение данной задачи, либо приближение для оптимизационных задач, аппроксимирующее к глобальному оптимуму лучше, чем существующие решения.

Остальные преимущества мемвычислительной архитектуры:

- Дешевле, проще, на много лет опережает квантовые компьютеры;
- Сверхбыстрые решения, в частности для ранее нерешённых задач;
- Эмулируемая в программном обеспечении архитектура работает на традиционных компьютерах;
- Вычисление и память объединены в одной схеме;
- Совершенно новая компьютерная архитектура;
- Использует классическую маломощную, низкотермичную, транзисторную технологию.

#### Список литературы:

1. Leveraging Physics & Memory A paradigm shift for Efficient Computing // White Paper. URL: <https://memcpu.com/wpcontent/uploads/2019/06/Whitepaper-MemComputing-Memory-and-Physics-v3.pdf>

2. Integer Linear Programming with MemComputing // White Paper. URL:<https://memcpu.com/wp-content/uploads/2019/05/Whitepaper-MemComputing-Integer-Linear-Programming-20190504.pdf>
3. Confirmation of Exponential Speed-up Using MemComputing to Solve Hard Optimization Problems // White Paper. URL:<https://memcpu.com/wp-content/uploads/2019/04/Whitepaper-ExponentialPerformance-20190423-V1.pdf>