Конспект по курсу Паралелльное программирование [1]

Александра Лисицына [2]

12 ноября 2018 г.

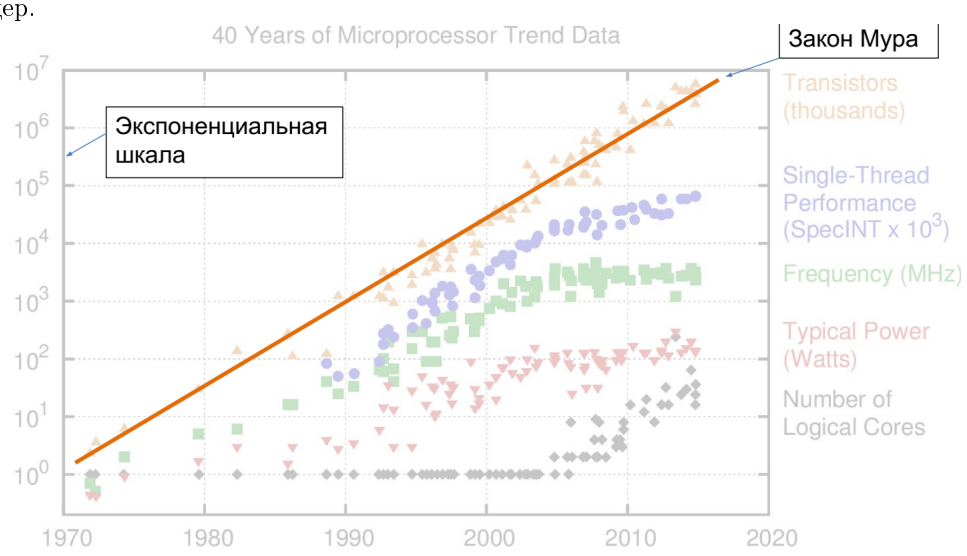
[1] Читаемый Романом Елизаровым Никитой Ковалем в 2018-2019 годах
[2] Студентка группы M3334

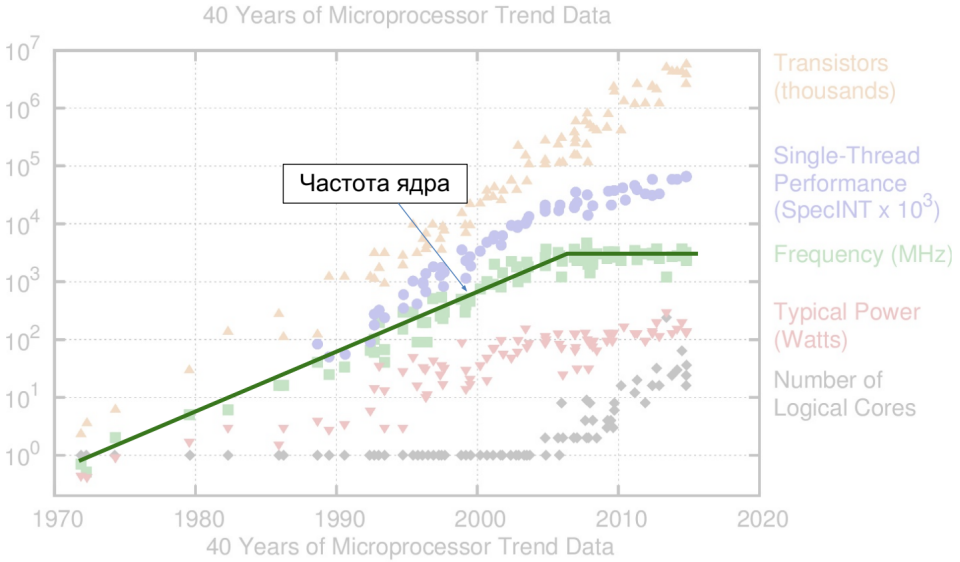
Содержание

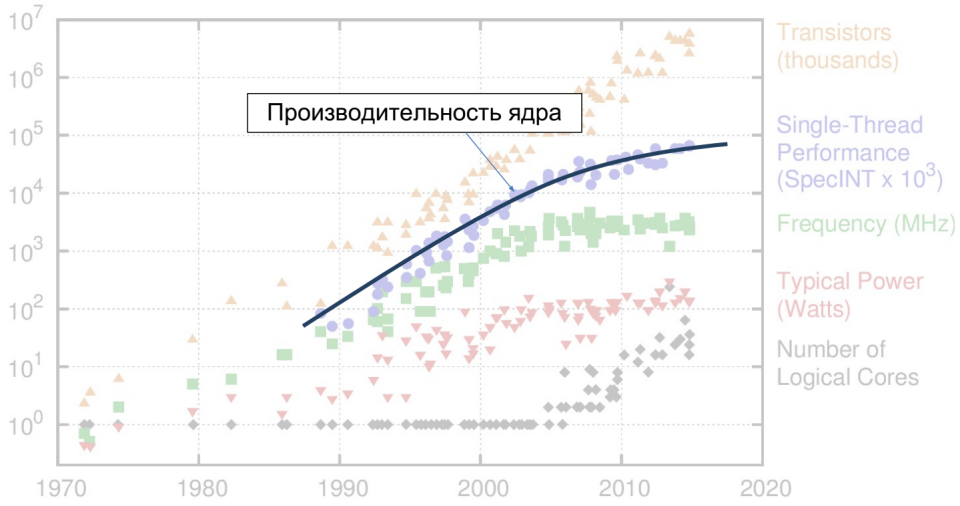
1 Intoduction

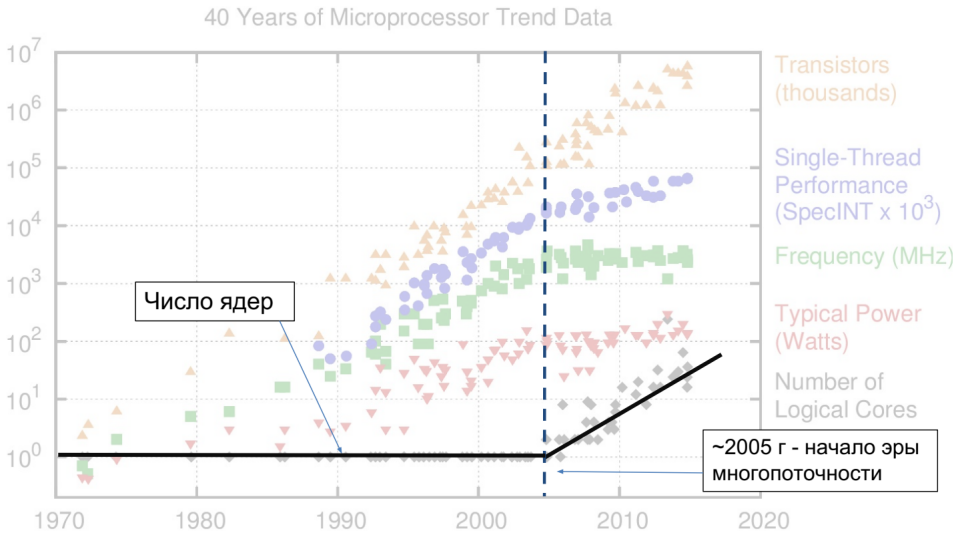
1.1 Закон Мура

Каждые 2 года количество транзисторов на процессоре удваивается. До, примерно, 2005 года также росла частота ядра. Также начал замедляться рост производительность ядра. С 2005 года начался рост числа ядер.









Масштабирование - свойство системы выполнять больше действий при увеличении мощности(традиционное), количества ядер(многопоточное). В реале не получается сделать все идеально и для этого нужно изучать многопоточное программирование.

1.2 Закон Амдала

$$S = \frac{1}{N}$$

где S - это ускорение кода

Или

$$S = \frac{1}{1 - P + P/N}$$

где P - доля параллельного кода

Максимальное ускорение кода достигается при $N \to \infty$ и равно $1/(1-P)$

P	S
60%	2.5
95%	20
99%	100

Поэтому нам необходимо увеличивать долю параллельного кода для достижения наилучшей масштабируемости.

1.3 Разные виды параллелизма

1.3.1 Параллелизм на уровне инструкций (ILP)

Способы использования ILP

- Конвейер
- Суперскалярное исполнение[1]
  - Внеочередное исполнение
  - Переименование регистров[2]
  - Спекулятивное исполнение[3]
  - Предсказание переходов
- Длинное машинное слово (VLIW[4])
- Векторизация (SIMD)

У параллелизма на уровне инструкций есть предел, поэтому нам необходимо параллельное программирование

[0] Instuction Level Parallelism
[1] Несколько операций за такт
[2] Чтобы не возникало ложной зависимости по регистрам
[3] Начинает выполнять одну из веток перехода, пытаясь ее предсказать
[4] Very Long Instuction Word

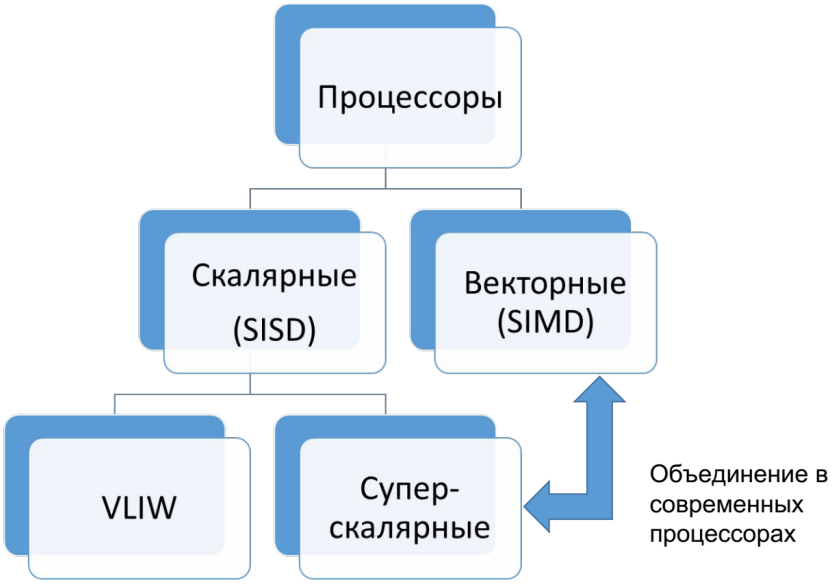


Рис. 1:

Симметричная мультипроцессорность (SMP) Несколько вычислительных ядер у каждого свой поток исполняемых ресурсов

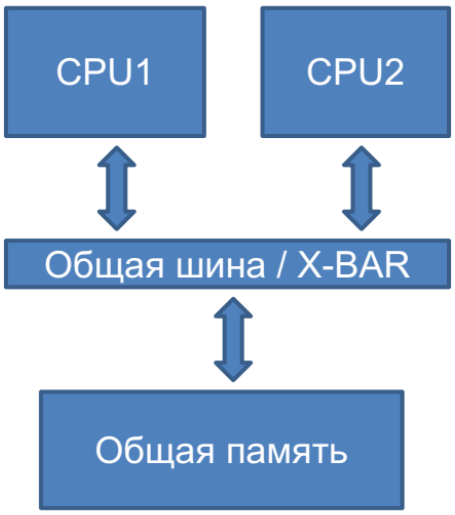


Рис. 2: SMP

Одновременная многозадачность (SMT) Два или более потока одновременно исполняются одним физическим ядром. Снаружи выглядит как SMP.

Ассимметричный доступ к памяти (NUMA) Модель программирования та же, что в SMP, но без общей памяти.

1.4 Операционные системы

- Типы
  - Однозадачные

[4]Symmetric Multiprocessing
[4]Simultaneous Multithreading
[4]Non-uniform memory access

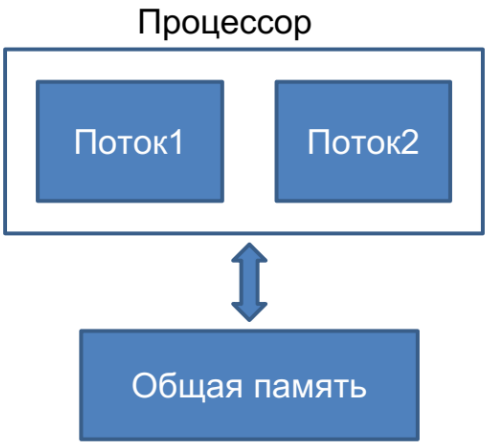


Рис. 3: SMT

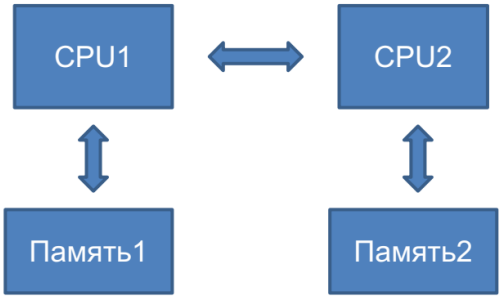


Рис. 4: NUMA

  - Системы с пакетными задачами (batch processing)
  - Многозадачные / с разделением времени (time sharing)
    * Кооперативная многозадачность (cooperative multitasking)
    * Вытесняющая многозадачность (preemptive multitasking)

- История многозадчности
  - Изначально нужно было для раздела одной дорогой машины между несколькими пользователями
  - Теперь нужно для использования ресурсов одной многоядерной машины для множества задач

1.5 Основные понятия в современных ОС

- Процесс — владеет памятью и ресурсами
- Поток — контекст исполнения внутри процесса
  - В одном процессе может быть несколько потоков
  - Все потоки работают с общей памятью процесса
- Но в теории мы их будем смешивать

1.6 Формализм

1.6.1 Модели программирования

- «Классическое» однопоточное / однозадачное
  - Можем использовать ресурсы многоядерной системы только запустив несколько независимых задач
- Многозадачное программирование

- Возможность использовать ресурсы многоядерной системы в рамках решения одной задачи
- Варианты:
  * Модель с общей памятью
  * Модель с передачей сообщений (распределенное программирование)

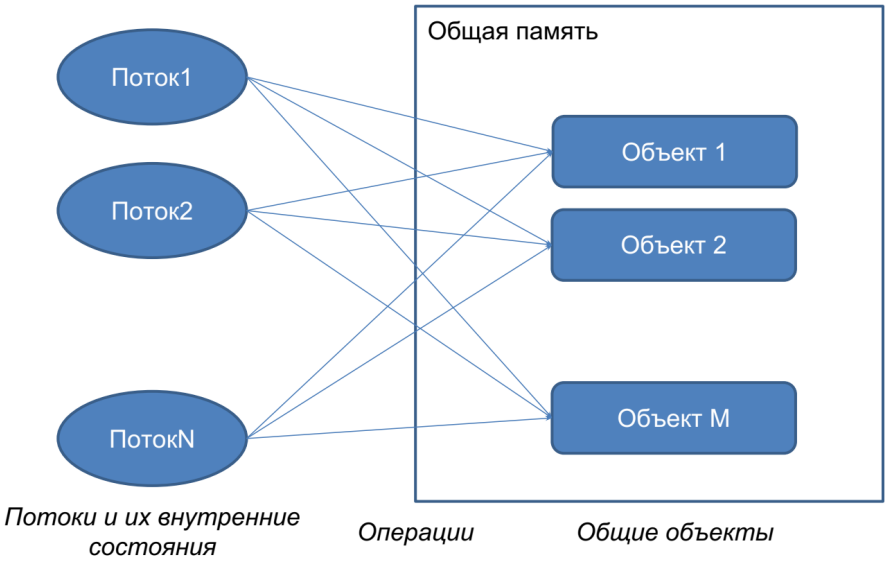


Рис. 5: Модель с общими объектами (общей памятью)

1.6.2 Общие объекты

- Потоки выполняют операции над общими, разделемыми объектами
- В этой моделе не важны операции внутри потоков
- Важна только коммуникация между потоками
- В этой моделе единственный тип коммуникации между потоками — это работа с общими объектами

1.6.3 Общие переменные

- Общие переменные — это простейший тип общего объекта:
  - У него есть значение определенного типа
  - Есть операция чтения (read) и записи (write)
- Общие переменные — это базовые строительные блоки для многопоточных алгоритмов
- Модель с общими переменными — это хорошая абстракция современных многопроцессорных систем и многопоточных ОС
  - На практике, это область памяти процесса, которая одновременно доступна для чтения и записи всем потокам этого процесса

В теоретических трудах общие переменные называют регистрами

1.6.4 Свойства многопоточных программ

- Последовательные программы детерминированы
  - Если нет использования случайных чисел и другого явного общения с недетеминированным миром
  - Их свойства можно установить анализируя последовательное исполнение при данных входных параметрах

- Многопоточные программы в общем случае недетерминированы
  - Даже если код каждого потока детерминирован
  - Результат работы зависит от фактичекого исполнения при данных входных параметрах
  - А этих исполнений может быть много
- Говорим «Программа A имеет свойство P» если она имеет это свойство при любом исполнении

1.6.5 Моделирование многопотчного исполнения

```
1        shared int x = 0, y = 0
```

Thread P:

```
1    x = 1
2    r1 = y
3    stop
```

Thread Q:

```
1    y = 1
2    r2 = x
3    stop
```

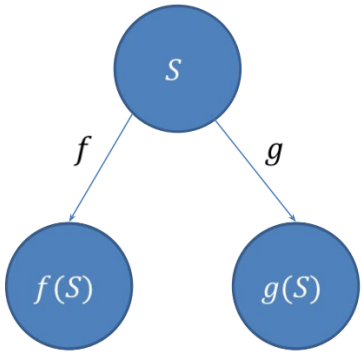


Рис. 6:

Моделирование исполнений через чередование операций

- S — это общее состояние:
  - Состояние всех потоков (IP+locals)
  - И состояние всех общих объектов
- f и g — это операции
  - Количество различных операций в каждом состоянии равно количеству потоков
- $f(S)$ — это новое состояние после применения операции f к состоянию S

После исполнеия этого кода для r1, r2 возможны следующие пары значений: (0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1). Хотя при моделировании через чередование первого варианта не получается. Это случается, так как в современном процессоре запись не попадает сразу в общую память, а в начале буферизируется (т.к. запись долгая операция). Поэтому мы можем прочитать старое значение, т.к. чтение быстрая операция и новые значения еще лежат в буфере. Процессор может переставить инструкции, т.к. это может ускорить однопоточный код (процессро не знает о параллельности).

Модель чередования не параллельна

На самом деле в настоящих процессорах операции чтения и записи не мгновенные. Они происходят паралелльно как в разных ядрах, так и в одном.

И вообще процессор обменивается с памятью сообщениями о чтении / записи и таких сообщений одновременно в обработке может быть очень много.

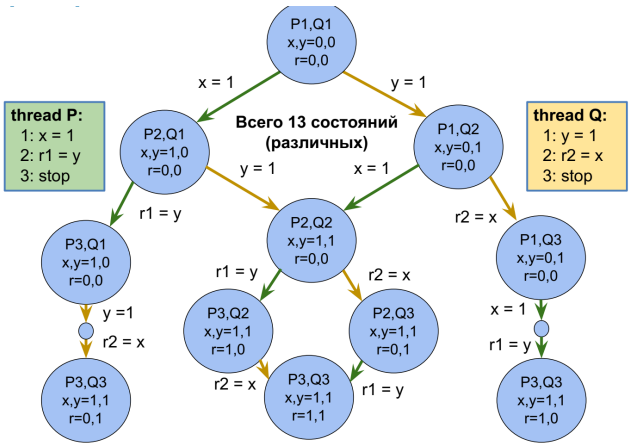


Рис. 7:

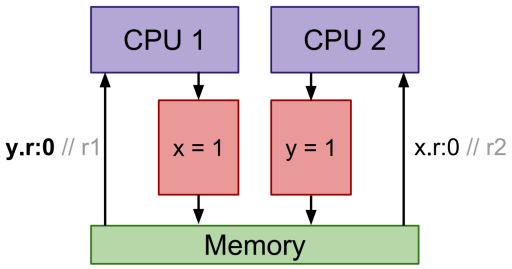


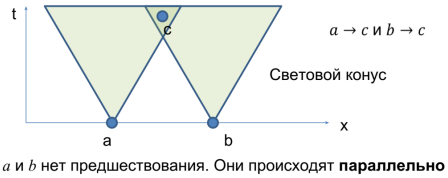
Рис. 8:

2 Lock-free Treiber Stack and Michael-Scott Queue

3 Определения и формализм

3.1 Физическая реальность

- Свет (электромагнитные волны) в вакууме распространется со скоростью $\sim 3 \cdot 10^8$ м/с.
  - Это максимальный физический предел скорости
  - За один такт процессора с частотой 3 ГГц ($3 \cdot 10^9$ Гц) свет в вакууме проходит всего 10 см.
- Соседние процессоры физически не могут синхронизировать свою работу и физически не могут определить порядок происходящих в них событиях.
  - Они работают действительно физически параллельно
- Пусть $a, b, c \in E$ — это физически атомарные (неделимые) события, происходящие в пространстве–времени
  - Говорим «a предшествует b» или «a произошло до b» (и записываем $a \to b$), если свет от точки пространства–времени a успевает дойти до точки пространства–времени b.
  - Это отношение частичного пордка на событиях



Между a и b нет предшествования. Они происходят **параллельно**

Рис. 9:

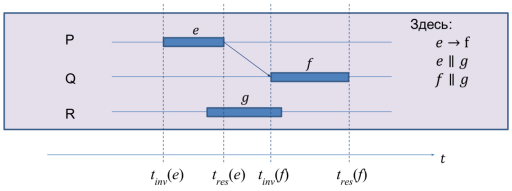


Рис. 10:

3.2 Модель «произошло до» (happens before)

- Впервые введена Л. Лампортом в 1978 году.
- Исполнение системы — это пара $(H, \rightarrow_H)$
  - H — это множество операций $e, f, g, \ldots$ (чтение и запись ячеек памяти и т. п.) произошедших во время исполнения
  - $\rightarrow_H$ — это транзитивное, антирефлексивное, ассимметричное отношение (частичный строгий порядок) на множестве операций
  - $e \rightarrow_H f$ означает, что «e произошло до f в исполнении H». Чаще всего исполнение H понятно из контекста и опускается
- Две операции e и f параллельны ($e \parallel f$), если $e \nrightarrow f \wedge f \nrightarrow e$.
- Система — это набор всех возможных исполнений системы
- Говорим, что «система имеет свойство P», если каждое исполнение системы имеет свойство P.

3.3 Модель глобального времени

В этой моделе каждая операция — это временный интервал $e = [t_{inv}(e), t_{res}(e)]$ где $t_{inv}(e), t_{res}(e) \in \mathbb{R}$ и

$$e \rightarrow f \stackrel{\text{def}}{=} t_{res}(e) < t_{inv}(f)$$

3.4 Обсуждение глобального времени

На самом деле никакого глобального времени нет и не может быть из–за физических ограничений.

- Это всего лишь механизм, позволяющий визуализироватьфакт существования параллельных операций.
- При доказательстве различных фактов и анализе свойств [исполнений] системы время не используется
  - Анализируютя только операции и отношения «произошло до»

3.5 «Произошло до» на практике

- Современные языки программирования предоставляют программисту операции синхронизации:
  - Специальные механизмы чтения и записи переменных
  - Создание потоков и ожидание их завершения
  - Различные другие библиотечные примитивы для синхронизации
- Модель памяти языка программирования определяет то, каким образом исполнение операций синхронизации создает отношение «произошло до»
  - Без них разные потоки выполняются параллельно
  - Можно доказать те или иные свойства многопоточного кода, используя гарантии на возможные исполнения, которые дает модель памяти

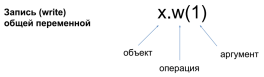


Рис. 11:

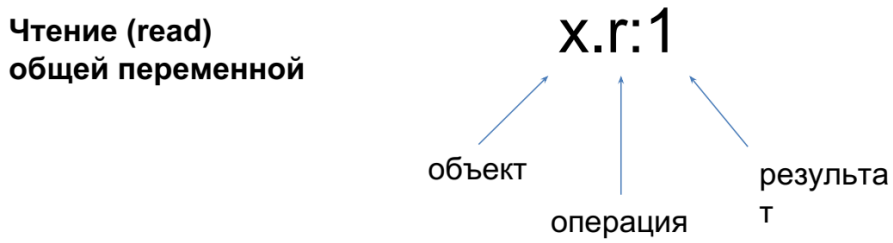


Рис. 12:

3.6 Свойства исполнений над общими объектами

3.6.1 Операции над общими объектами

3.6.2 Последовательное исполнение

Исполнение системы называется последовательным, если все операции линейно–упорядочены отношением «произошло до», то есть $\forall e, f \in H : (e = f) \vee (e \to f) \vee (f \to e)$.

3.6.3 Конфликты и гонки данных (data race)

- Две операции над одной переменной, одна из которых запись, называются конфликтующими.
- Если две конфликтующие операции произошли параллельно, то такая ситуация называется гонка данных (data race).
  - Это свойство конкретного исполнения.

Программа, в любом допустимом исполнении которой (с точки зрения модели памяти) нет гонок данных, называется корректно синхронизированной.

3.6.4 Правильное исполнение

4 Построение атомарных объектов и блокировки

5 Consensus

5.1 Задача о консенсусе

Каждый поток использует объект Consensus один раз

- Согласованность: все потоки должны вернуть одно и тоже значение из метода decide
- Обоснованность: возвращенное значение было входным значением какого-то из потоков
- Без ожидания

5.2 Консенсусное число

- Если с помощью класса атомарных объектов C и атомарных регистров можно реализовать консенсусный протокол без ожидания с помощью детерминированного алгоритма для N потоков (и не больше), то говорят, что у класса C консенсусное число N.
-

Теорема 5.1. *Атомарные регистры имеют консенсусное число 1.*

Рис. 13:

Рис. 14:

5.3 Модель

- x–валентное состояние системы — консенсус во всех нижестоящих листьях будет x.
- Бивалентное состояние — возможен консенсус как 0, так и 1.
- Критическое состояние — такое бивалентное состояние, у которого все дети одновалентны

5.4 Read–Modify–Write регистры

5.5 Универсальность консенсуса

Теорема 5.2. *Любой последовательный объект можно реализовать без ожидания для N потоков, используя консенсусный проткол для N потоков*

6 Алгоритмы без блокировок: Построение на регистрах

6.1 Безусловные условия прогресса

- Отсутствие помех — Если несколько потоков пытаются выполнить операцию, то любой из них должен выполнить ее за конечное время, если все другие остановить в любом месте
- Отсутствие блокировки — если несколько потоков пытаются выполнить операцию, то хотя бы один из них должен выполнить ее за конечное время, независимо от действия или бездействия других потоков
- Отсутствие ожидания — если поток хочет выполнить операцию, то он выполнит ее за конечное время независимо от других потоков

7 CASN

7.1 Списки против массивов

- Список
  - $3 * N$ слов памяти (минимум)
  - при многопотном использовании хватает одного CAS для добавления элемента
- Массив
  - $5 + N$ слов памяти (до $5 + 2 * N$ при x2 резерве)
  - Как минимум в два раз быстрее работает с памятью (обычно растет на попрядок) (при однопоточной работе)
  - Для добавления нужно CAS2 (для size и элемента) — эта операция не поддерживается на процессорах

7.2 CASn

```
1 class Ref<T>(intial: T) {
2     var _v
3     \\...
```

7.2.1 DCSS

```
1 fun <A,B> dcss(
2       a: Ref
```

7.3 Наблюдения и замечания

7.4 Подход к реализации