Санкт-Петербургский государственный университет

Разработка прототипа специализированного процессора, основанного на Interaction Nets

Кубышкин Ефим Алексеевич

Научный руководитель: доцент кафедры системного программирования, к. ф.-м. н., Григорьев С. В.
Рецензент: инженер-исследователь, «Лаборатория YADRO», Косарев Д. С.

Санкт-Петербург
2025

Введение

- Современные вычислительные системы сталкиваются с растущей потребностью в параллельной обработке данных
- Традиционные архитектуры процессоров неэффективны для нерегулярного параллелизма[1]

👍 Interaction Nets — формализм, предложенный Ивом Лафоном в 1989 году, для которого нерегулярный параллелизм естественен

👎 На данный момент существуют только программные реализации

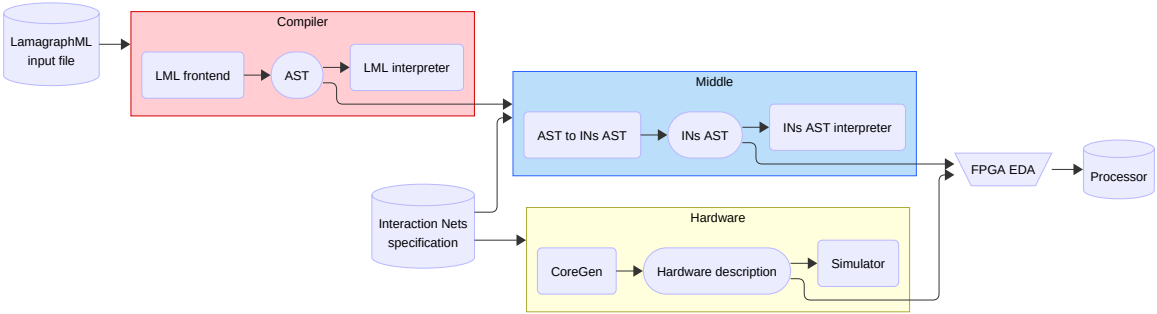
[1] Нерегулярный параллелизм — параллельные вычисления с непредсказуемым доступом к данным и динамическим изменением количества независимых подзадач

Interaction Nets

- Математическая модель, основанная на графовых грамматиках
- Переписывания (редукции) независимы
- Доказана полнота по Тьюрингу и свойство независимости от порядка вычислений
- Метки на вершинах и правила грамматики можно менять $\Rightarrow$ высокая степень параметризуемости

Lamagraph

- Над проектом работает два человека
- Данная работа фокусируется на Hardware компоненте



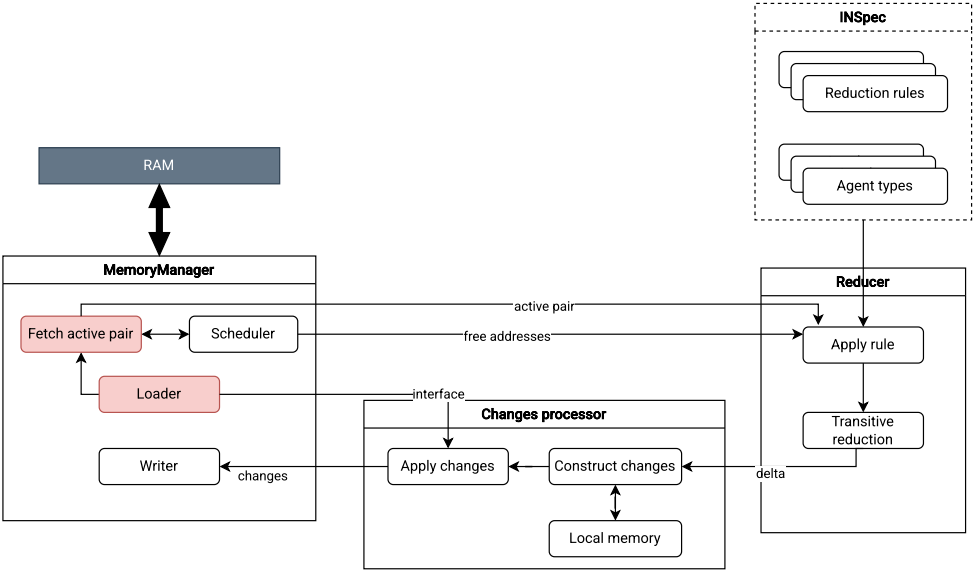
Постановка задачи

Цель: Реализация прототипа параметризуемого вычислителя на основе Interaction Nets

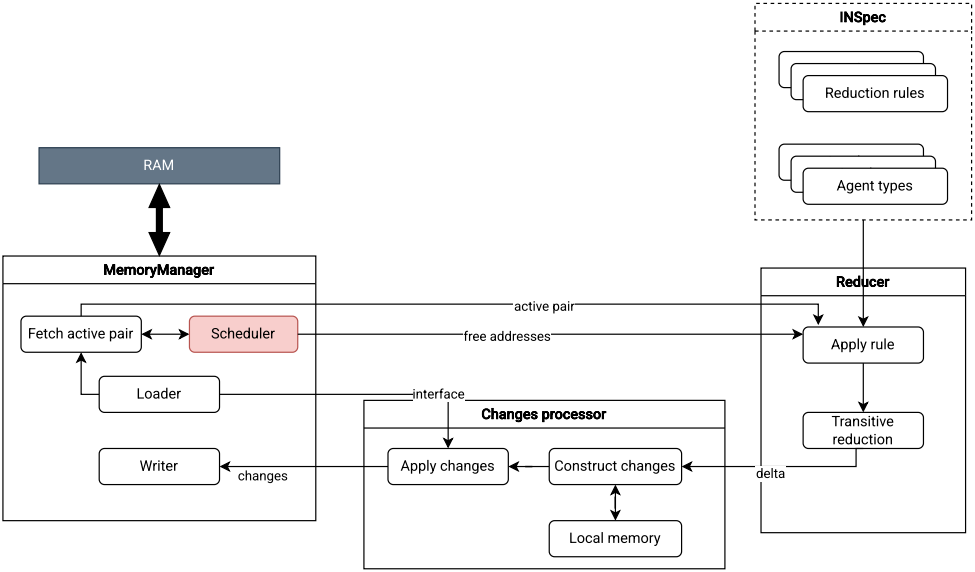
Задачи:

1. Спроектировать архитектуру ядра вычислителя
2. Реализовать одноядерный прототип вычислителя
3. Оценить жизнеспособность и масштабируемость прототипа

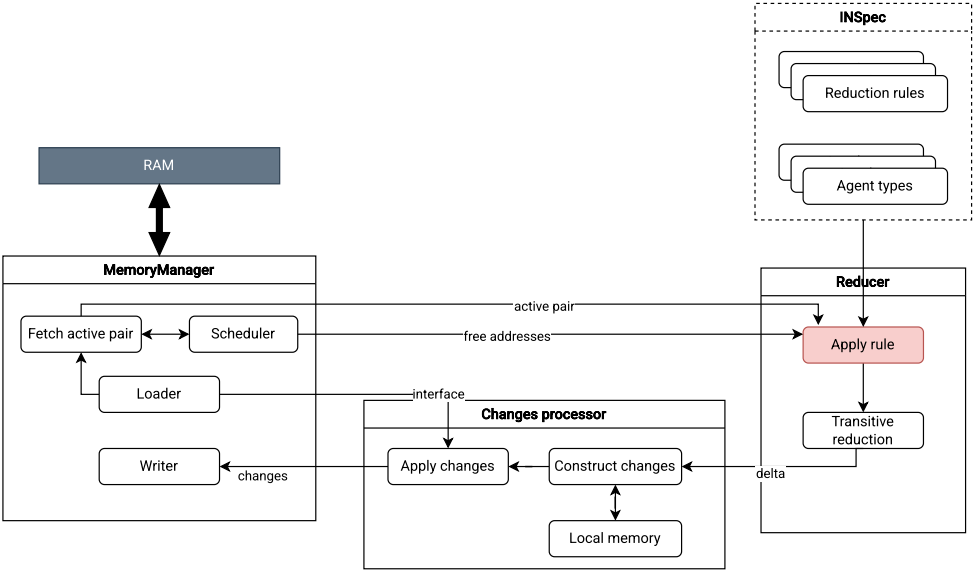
Микроархитектура вычислителя



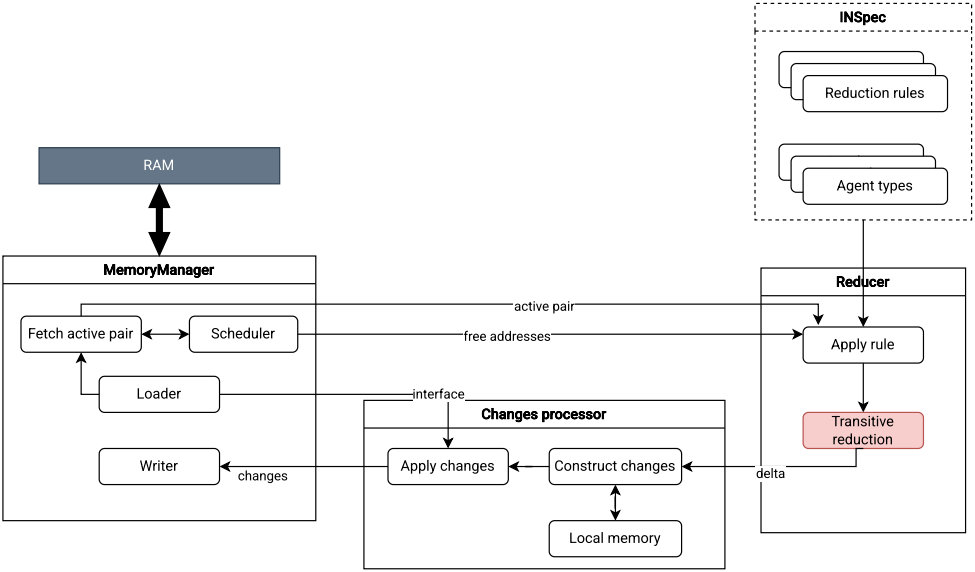
Микроархитектура вычислителя



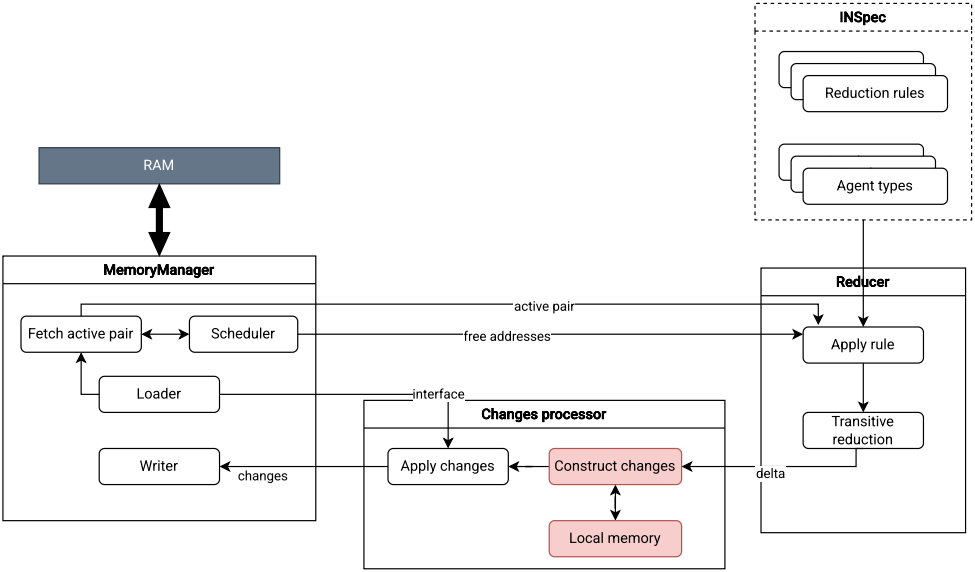
Микроархитектура вычислителя



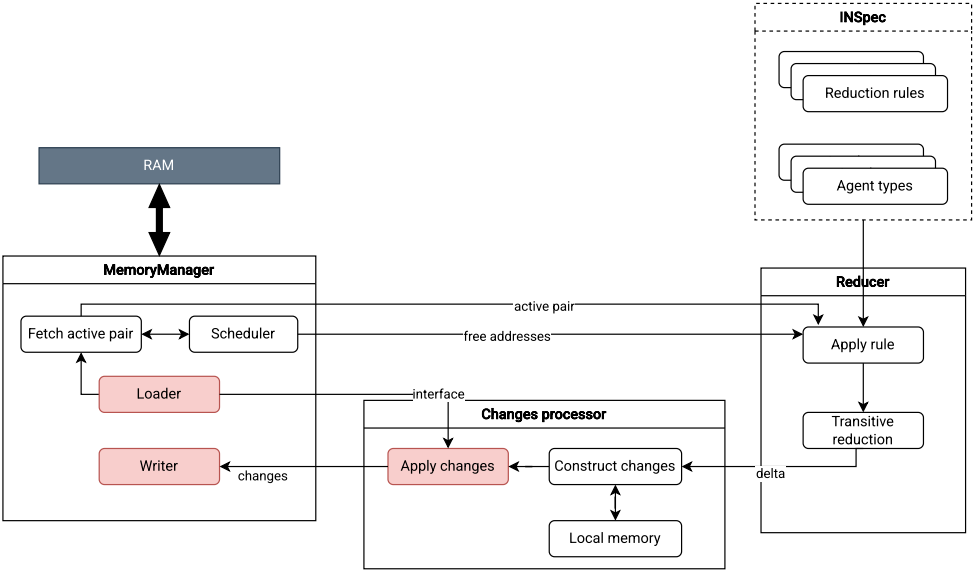
Микроархитектура вычислителя



Микроархитектура вычислителя



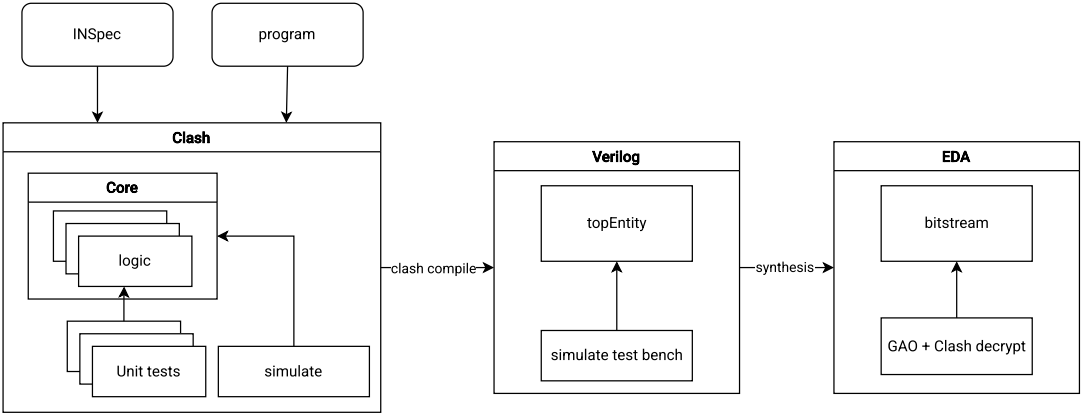
Микроархитектура вычислителя



Технические особенности

- Clash как основной язык
  - Параметризация через программирование на типах (type level programming)
  - Инфрастуктура Haskell
- Параметризуемость
  - Метки на узлах
  - Правила редукции
  - Технические ограничения сети
- Скрипты для платы от компании Gowin

Инфраструктура



Оценка аппаратных затрат

RQ Остаётся ли разработанное ядро в «разумных» рамках потребления аппаратных ресурсов?

Вычислитель	Макс. частота (МГц)	LUTs[2]	Регистры
Interaction Nets-core	7.5↓	2900↓	351↓
Heron	173	12257	782
Vortex	300	23884	29494

Heron — вычислитель, основанный на редукции графов с открытым исходным кодом

Vortex — GPU общего назначения с открытым исходным кодом

Данные для всех трёх вычислителей взяты для одного ядра

[2] **L**ook-**U**p **T**ables — базовые логические блоки, хранящие предопределённые логические функции для реализации цифровых схем

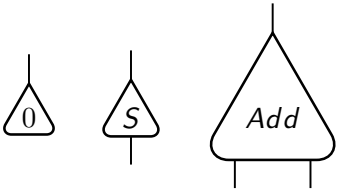
Результаты

1. Спроектирована общая структура проекта
   - Продуман пайплайн: от написания программы на высокоуровневом языке до получения прошивки
2. Спроектирована архитектура ядра вычислителя
   - Выделены этапы выполнения редукции
   - Продуманы низкоуровневые особенности работы с Interaction Nets
3. Реализован одноядерный прототип вычислителя
   - Написаны все спроектированные компоненты
   - Реализованы абстракции для поддержки параметризуемости
   - Задокументирован пайплайн для сборки и синтеза прошивки
4. Проведена оценка жизнеспособности и масштабируемости вычислителя

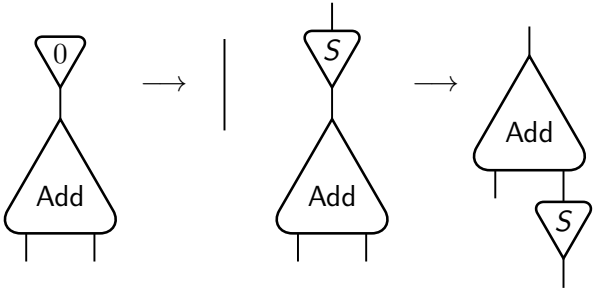
Исходный код находится в репозитории:
`https://github.com/Lamagraph/interaction-nets-in-fpga`
Имя коммитера: `KubEf`

Параметризация Interaction Nets

Метки на узлах

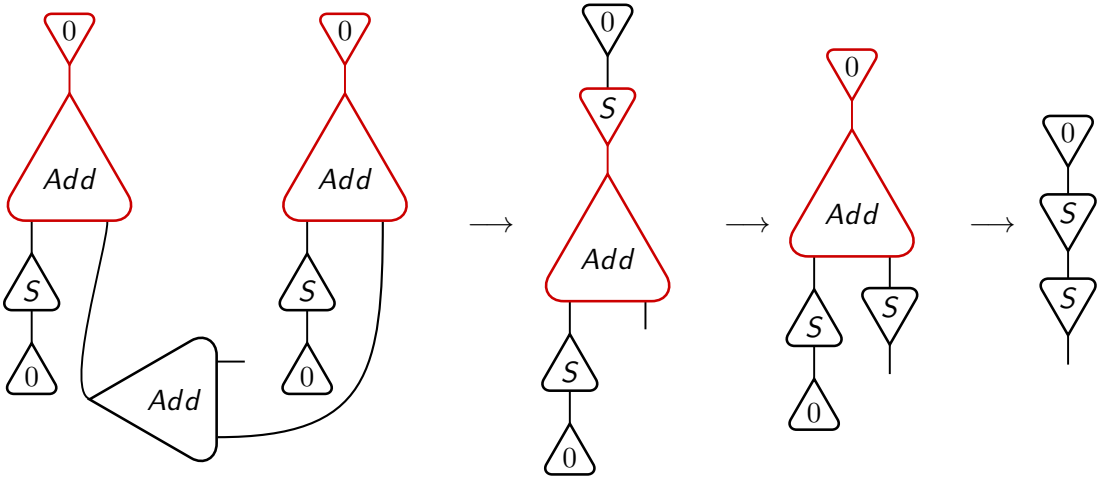


Правила редукции

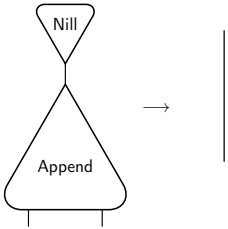


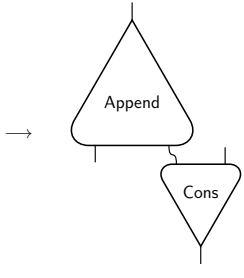
Пример Interaction Nets

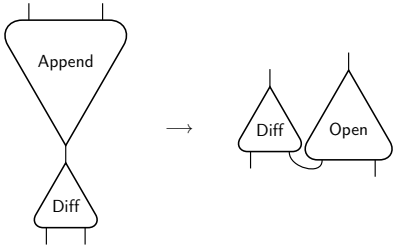
$$(1+0)+(1+0)$$

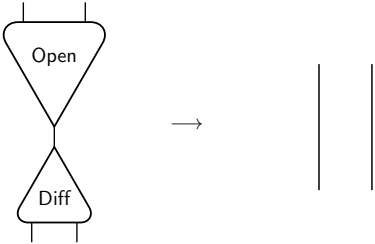


Конкатенация списков два варианта



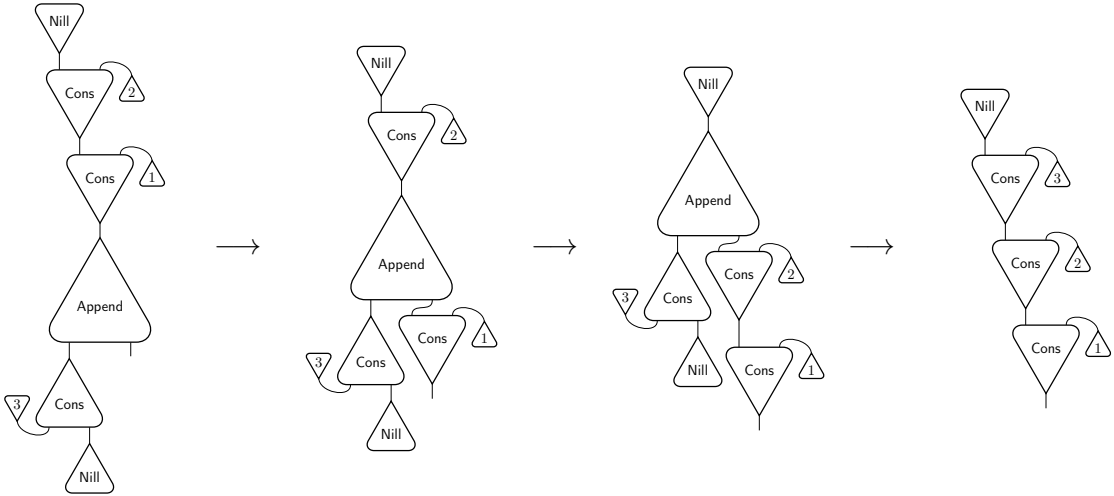






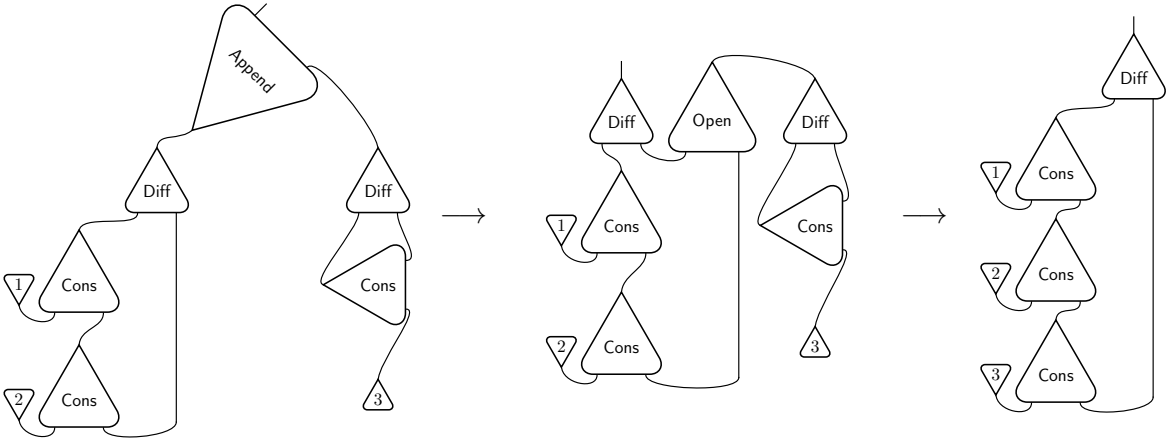
Interaction Nets конкатенация списков I/II

Append(Cons(1, Cons(2, Nill)), Cons(3, Nill)) = Cons(1, Cons(2, Cons(3, Nil)))



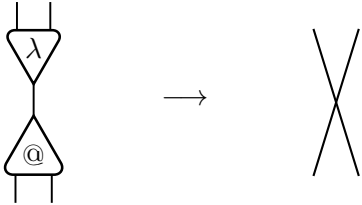
Interaction Nets конкатенация списков II/II

Append(Cons(1, Cons(2, Nill)), Cons(3, Nill)) = Cons(1, Cons(2, Cons(3, Nil)))

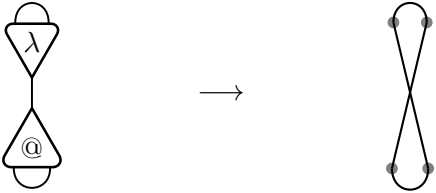


Пример, когда необходимо транзитивное сокращение

Применяемое правило

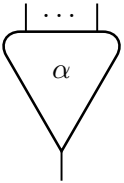


Конкретная ситуация



Формальное определение Interaction Nets I/II

- Σ — множество символов
- Помеченная символом из Σ вершина — *агент*
- Связи между агентами — *провода*
- Места соединения агентов проводами — *порты*
- Каждый агент имеет арность ar
- Если $\alpha \in \Sigma$ и $\mathrm{ar}(\alpha) = n \in \mathbb{N}$, то у α имеется $n + 1$ портов: n *дополнительных* и один выделенный — *главный*.



Формальное определение Interaction Nets II/II

- *Сеть* — неориентированный граф с символами из Σ в его вершинах
- Ребра соединяют порты вершин, в каждый порт приходит не более одного ребра
- Порт не соединенный ни с одним ребром — *свободный*, множество таких портов — *интерфейс*
- Пара агентов $(\alpha, \beta) \in \Sigma \times \Sigma$, соединенных своими главными портами, — *активная пара*
- Правило $((\alpha, \beta) \Longrightarrow N)$ заменяет активную пару (α, β) на сеть N.
- Для каждой пары агентов существует не более одного правила редукции, при этом в процессе редукции интерфейс сохраняется