

Динамическая проверка HDL-описаний на основе исполнимых моделей

Александр Камкин, Михаил Чупилко
kamkin@ispras.ru



Институт системного программирования РАН (ИСП РАН)
<http://www.ispras.ru>

Содержание

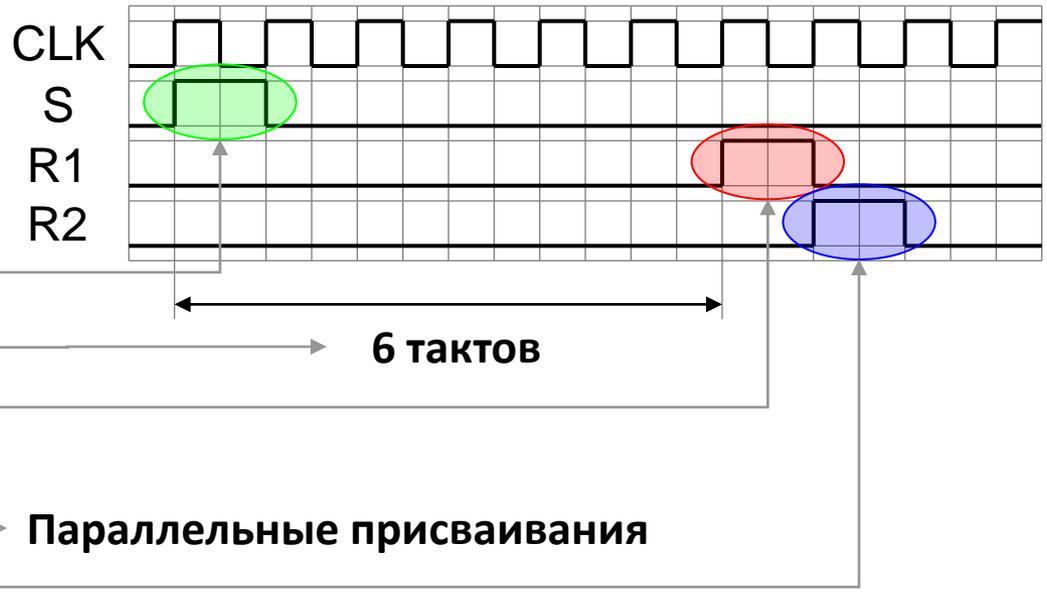
- Цифровая аппаратура
- Динамическая проверка поведения
- Формализация отношения соответствия
- Заключение

Цифровая аппаратура

- Аппаратура проектируется на языках описания аппаратуры (HDL), например, Verilog или VHDL
- Результат проектирования – программа, которую можно выполнять в HDL-симуляторе
- Основной подход к верификации аппаратуры – тестирование HDL-описания
- Для автоматизации тестирования применяются исполнимые модели (C/C++)

HDL-описание аппаратуры

```
input S;  
output R1, R2;  
void design() {  
    while(true) {  
        wait(S);  
        delay(6);  
        R1 = 1;  
        delay(1);  
        [ R1 = 0;  
          R2 = 1; ]  
        delay(1);  
        R2 = 0;  
    }  
}
```



Поведение цифровой аппаратуры

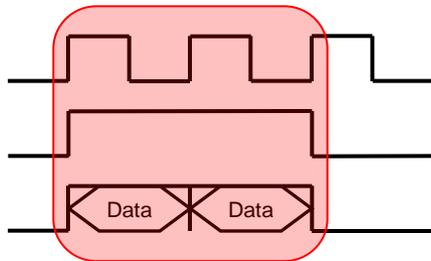


Модели уровня транзакций (TLM)

Разделение блоков обработки и передачи данных

Инкапсуляция деталей передачи данных

Соединения/контакты



Дискретные сигналы во времени

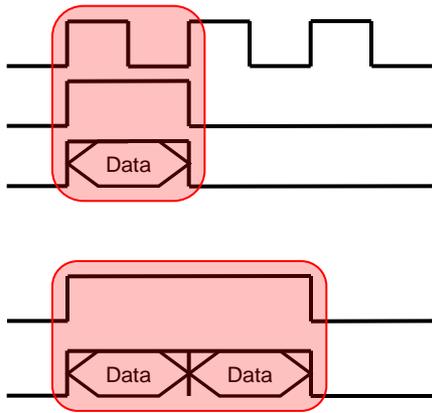
Каналы/порты



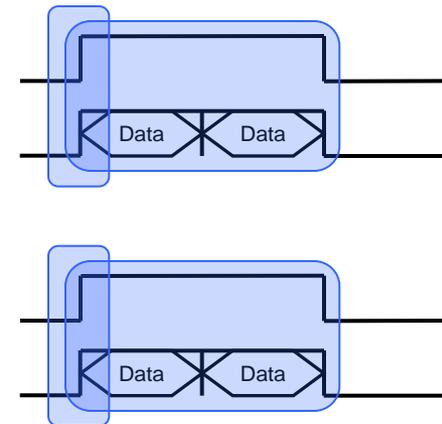
Пакет данных (сообщение)

Преобразование интерфейсов

Входной интерфейс #1

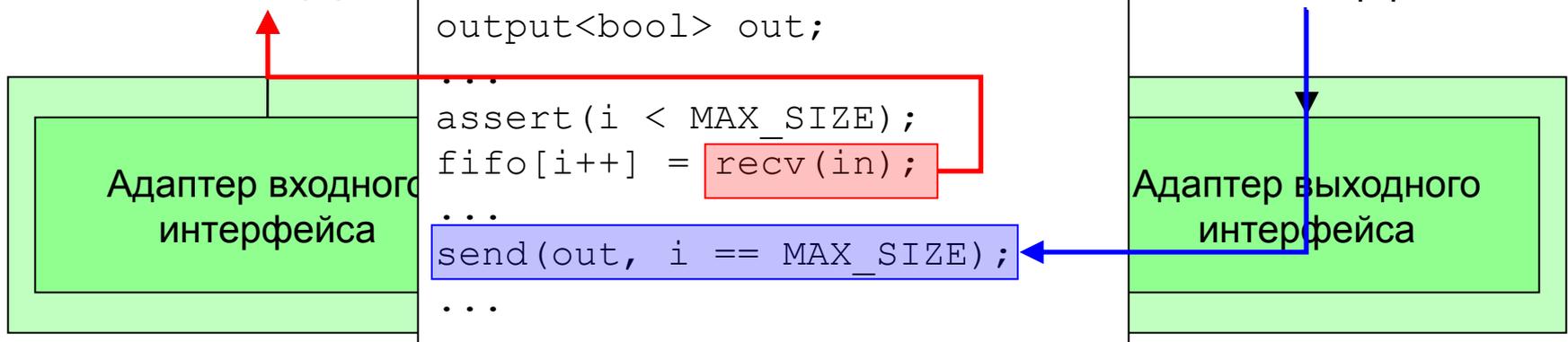


Выходной интерфейс #1



Входной интерфейс

Выходной интерфейс #M



Содержание

- Цифровая аппаратура
- Динамическая проверка поведения
- Формализация отношения соответствия
- Заключение

Проверка корректности поведения

Функциональные свойства

- Множество реакций корректно
- Каждая реакция корректна

- Порядок реакций корректен
- Задержки между реакциями корректны

Временные ограничения

Потактовая проверка поведения

Эталонные реакции

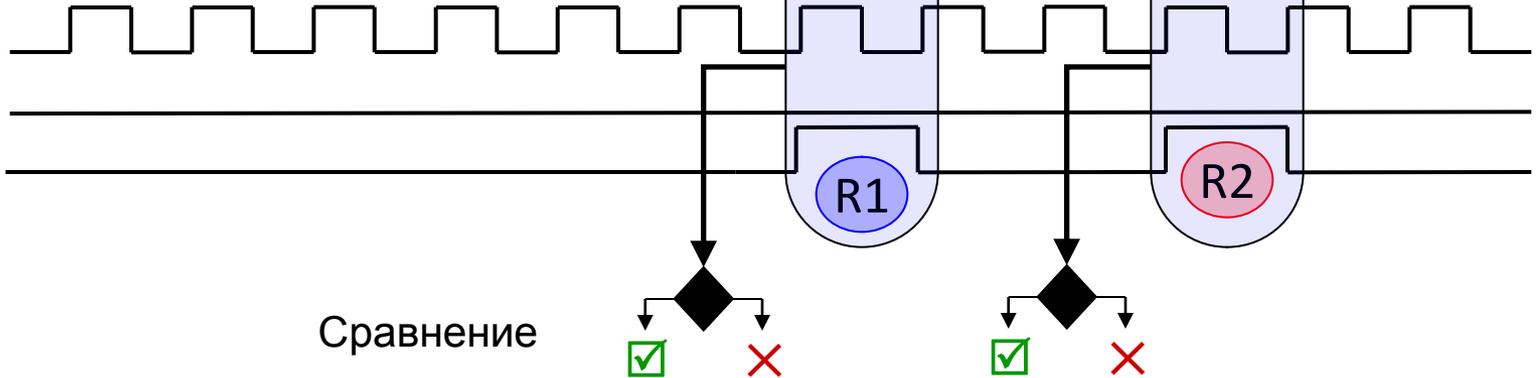
`send (R1) ;`

`delay (3)`

`send (R2) ;`

3 такта

Реакции HDL-модели



Неоднозначность порядка реакций

Выполнение эталонной модели

```
recv(in_iface, S);
```

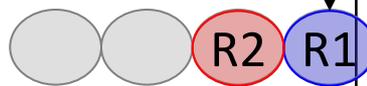
...

```
send(out_iface, R1);
```

...

```
send(out_iface, R2);
```

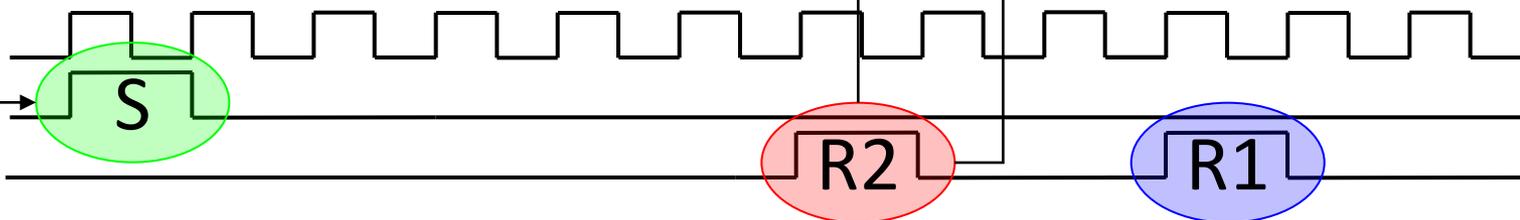
Очередь реакций



Ошибко: $R2 \neq R1$

Допустимо: $R2 \in \text{Очередь}$

Выполнение HDL-модели

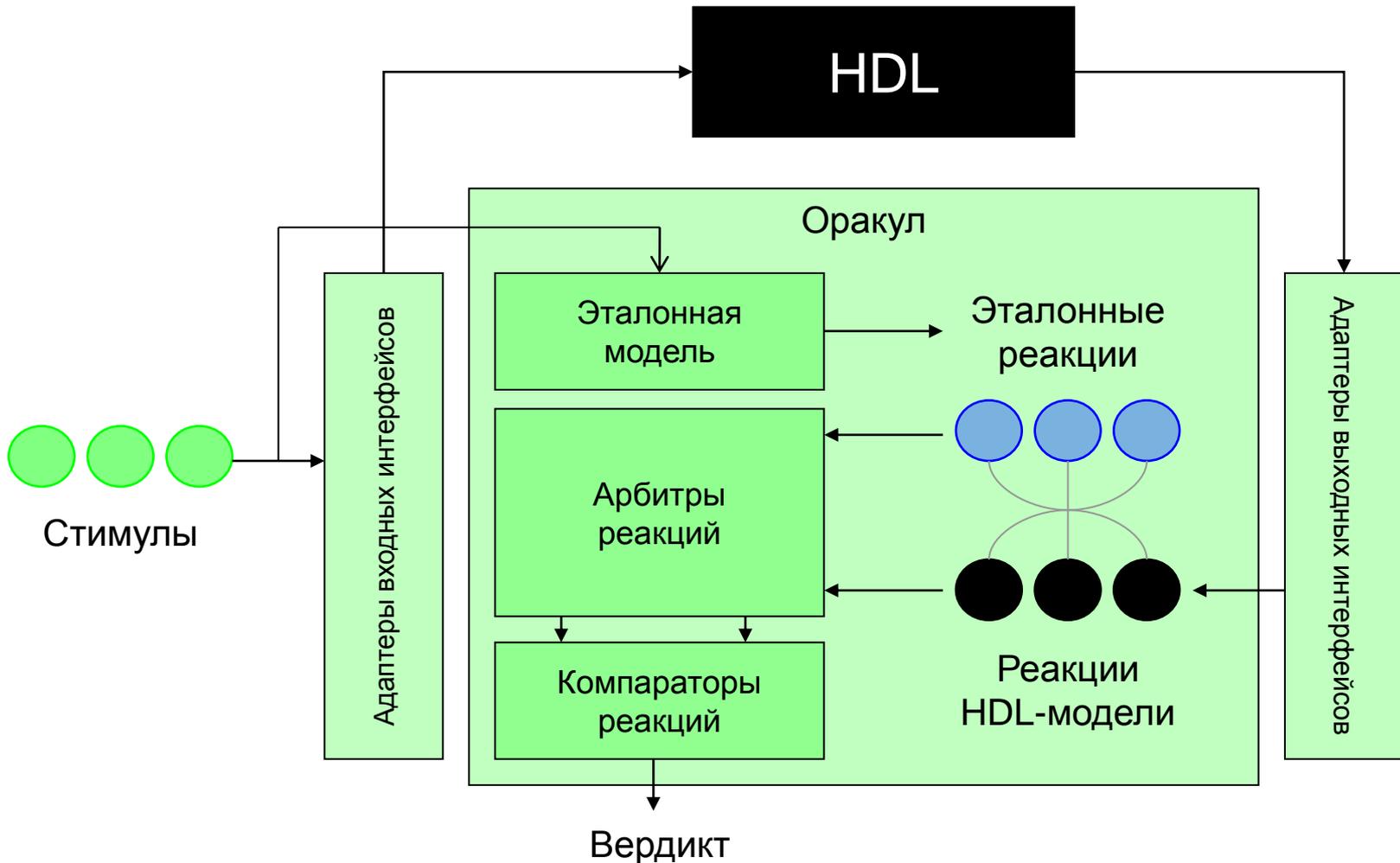


Обратный порядок

Арбитраж реакций

- Арбитр реакций находит эталонную реакцию, соответствующую реакции HDL-модели
- Проверка поведения зависит не только от эталонной модели, но и от арбитража реакций
- Каждый выходной интерфейс имеет свою очередь реакций и свой арбитр реакций
- Арбитры реакций инкапсулируют все детали оракула, связанные с проверкой порядка реакций

Оракул на основе эталонной модели



Типы арбитров реакций

- Детерминированный арбитр на основе модели

$$\text{arbiter}: 2^{\text{Reaction}} \rightarrow \text{Reaction} \cup \{\text{fail}\}$$

- Адаптивный арбитр

$$\text{arbiter}: 2^{\text{Reaction}} \times \text{Reaction} \rightarrow \text{Reaction} \cup \{\text{fail}\}$$

- Двухуровневый арбитр

$$\text{arbiter}(\text{reactions}) \equiv \text{arbiter}_2(\text{arbiter}_1(\text{reactions}), \text{reaction})$$

- Недетерминированный арбитр
- Адаптивный арбитр

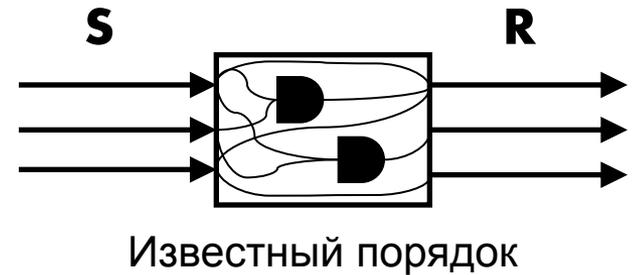
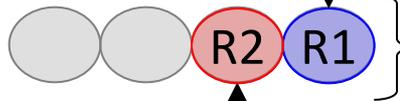
Детерминированный арбитр

Эталонные реакции

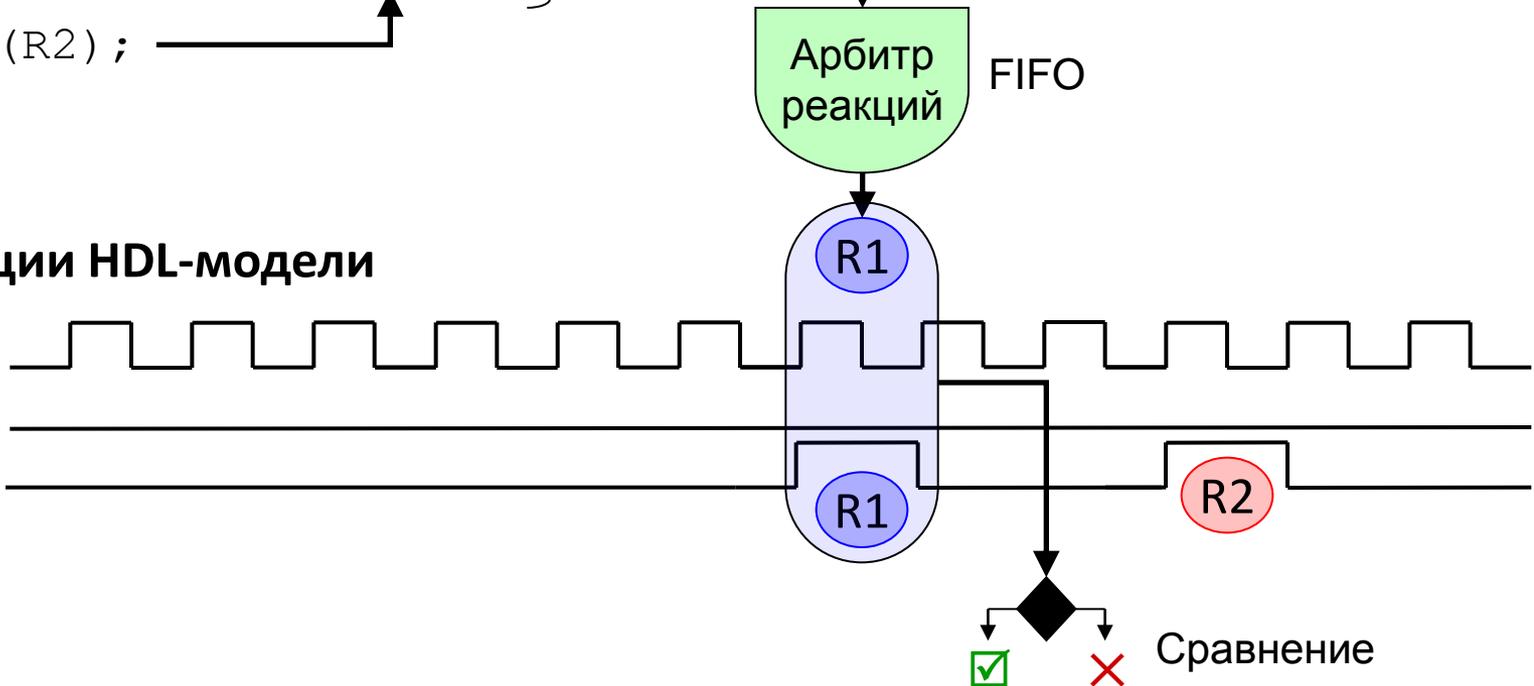
`send (R1) ;`

...

`send (R2) ;`

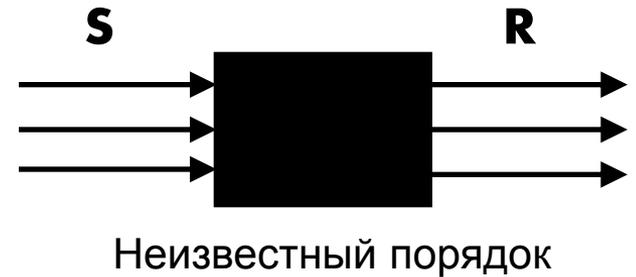
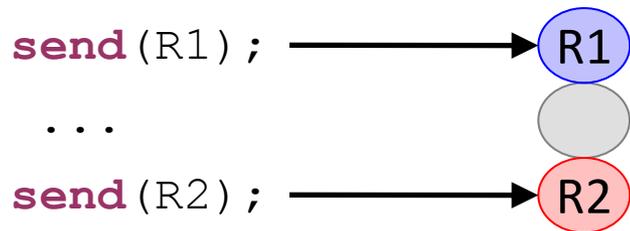


Реакции HDL-модели

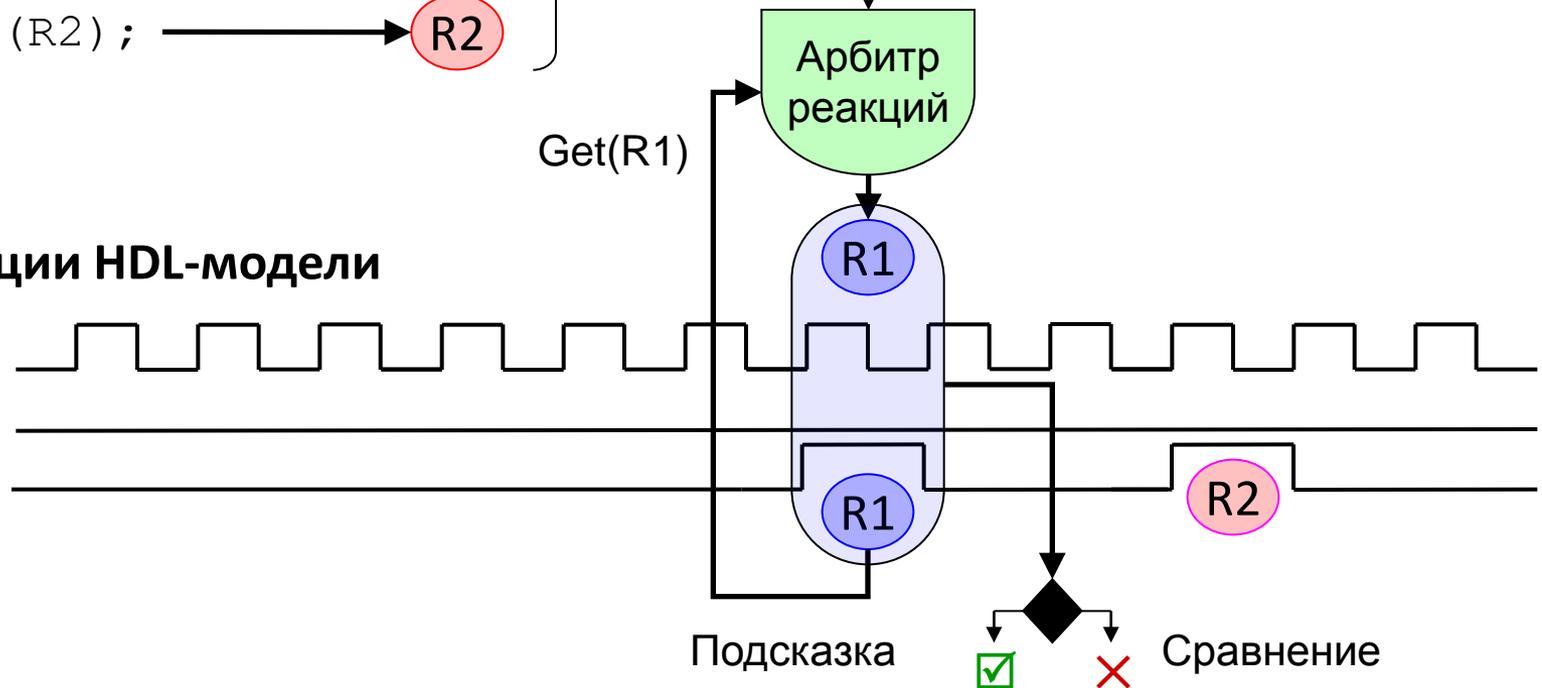


Адаптивный арбитр

Эталонные реакции

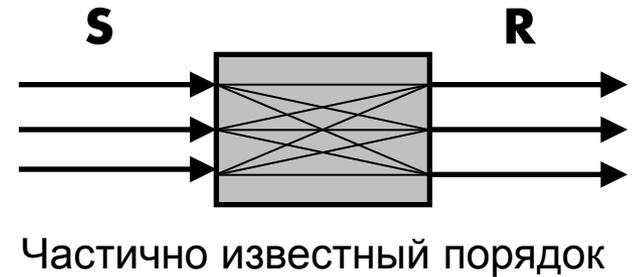
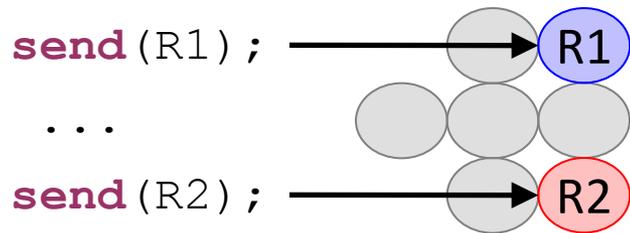


Реакции HDL-модели

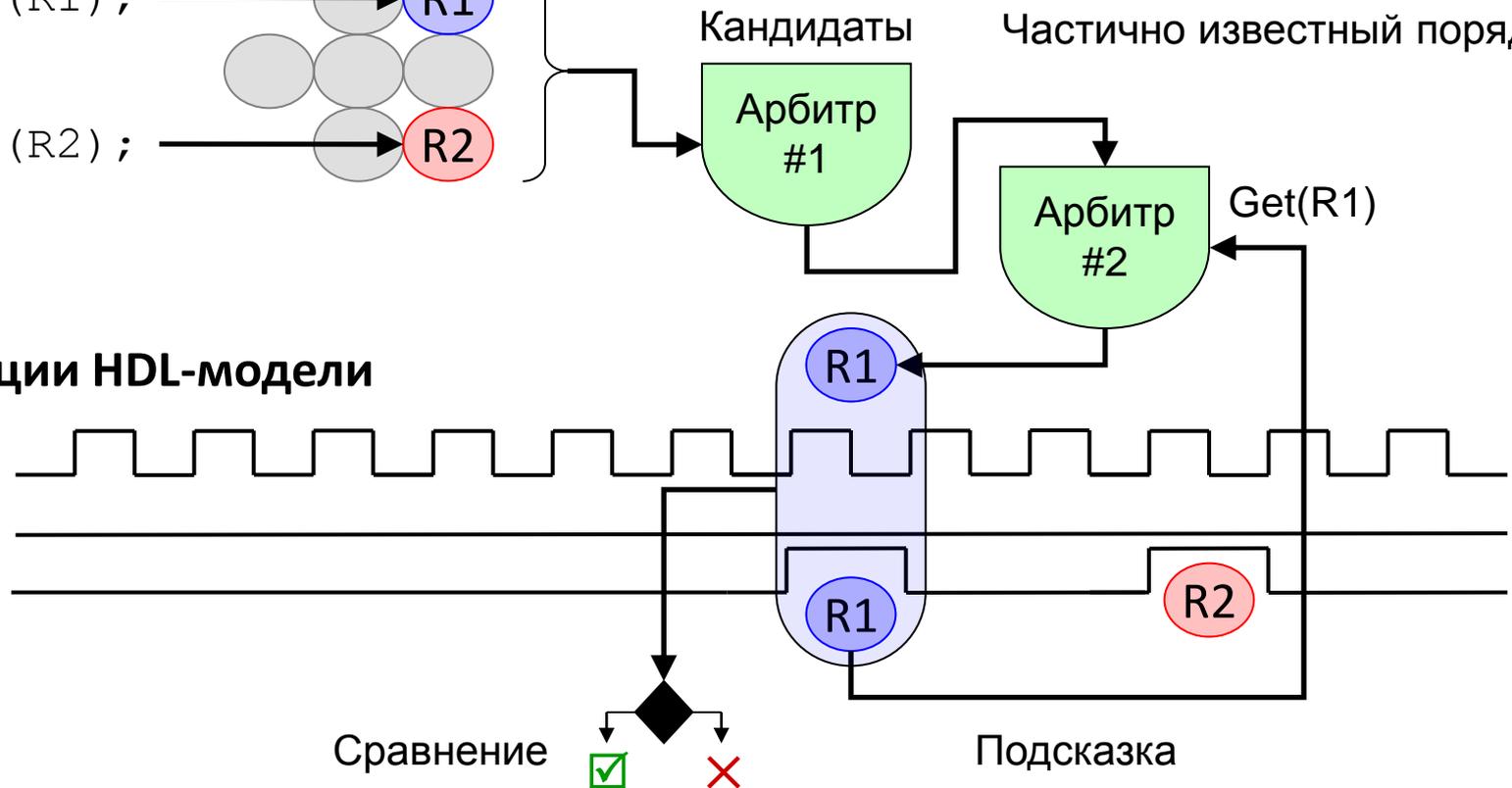


Двухуровневый арбитр

Эталонные реакции



Реакции HDL-модели



Содержание

- Цифровая аппаратура
- Динамическая проверка поведения
- Формализация отношения соответствия
- Заключение

Временная последовательность (Timed word – Alur & Dill, 1994)

Σ – алфавит событий

\mathbf{T} – временная область ($\mathbf{R}^{\geq 0}$ или \mathbf{N})

$w = (a_0, t_0)(a_1, t_1), \dots \in (\Sigma \times \mathbf{T})^{\omega^{(*)}}$

- $\forall i . t_i < t_{i+1}$ ($t_i \leq t_{i+1}$) – монотонность
- $\forall T \exists i . t_i > T$ – прогресс (если $|w| = \infty$)

Трасса Мазуркевича (Trace – Mazurkiewicz, 1977)

Σ – алфавит событий

$I \subset \Sigma \times \Sigma$ – отношение независимости

Эквивалент.: $u \equiv v \Leftrightarrow u$ получается из v путем перестановки соседних независимых событий

Трасса – класс эквивалентности цепочек событий по отношению эквивалентности \equiv

Трасса Мазуркевича

(Trace – Mazurkiewicz, 1977) : пример

$$\Sigma = \{ a, b, c, d \}$$

$$\Gamma = \{ (a, b), (c, d) + \text{симметрия} \}$$

$$[ab]_{\equiv} = \{ ab, ba \}$$

$$[bc]_{\equiv} = \{ bc \}$$

$$[abcd]_{\equiv} = \{ abcd, bacd, abdc, badc \}$$

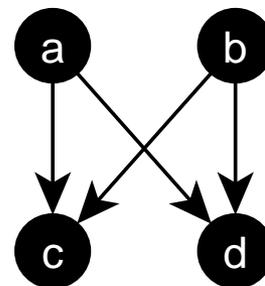
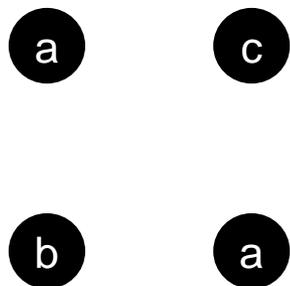
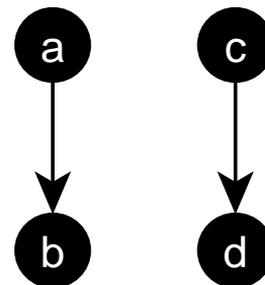
Частично упорядоченное мультимножество (Pomset – Pratt, 1982)

Σ – алфавит событий

Pomset – тройка $\langle V, \leq, \lambda \rangle$

- V – множество вершин
- $\leq \subset V \times V$ – частичный порядок
- $\lambda: V \rightarrow \Sigma$ – функция разметки

Частично упорядоченное мультимножество (Pomset – Pratt, 1982): примеры



Временная трасса

(Timed trace – Chieu & Hung, 2012)

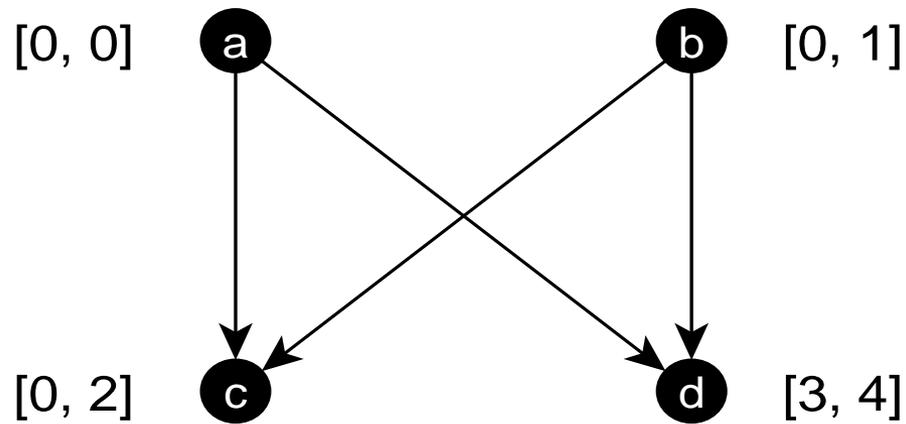
Σ – алфавит событий, \mathbf{T} – временная область

Временная трасса – $\langle \mathbf{V}, \leq, \lambda, \theta [, \delta] \rangle$

- \mathbf{V} – множество вершин
- $\leq \subset \mathbf{V} \times \mathbf{V}$ – частичный порядок
- $\lambda: \mathbf{V} \rightarrow \Sigma$ – функция разметки
- $\theta: \mathbf{V} \rightarrow \mathbf{T}$ – время события
- $\delta: \mathbf{V} \rightarrow \Delta \mathbf{T}$ – допустимый интервал

Временная трасса

(Timed trace – Chieu & Hung, 2012): пример



- { abcd, bacd, abdc, badc }
- { abcd, bacd } – временные ограничения

Поведение реализации и спецификации

Поведение реализации

$$\langle V_I, \emptyset, \lambda_I, \theta_I \rangle$$

Поведение спецификации

$$\langle V_S, \leq, \lambda_S, \theta_S, \delta_S \rangle$$

Допустимый временной интервал

$$\delta_S(x) = [\theta_S(x) - \Delta t(x), \theta_S(x) + \Delta t(x)]$$

Соответствие событий

$$\mathbf{match}(x, y) = (\lambda_I(y) = \lambda_S(x)) \ \& \ (\theta_I(y) \in \delta_S(x))$$

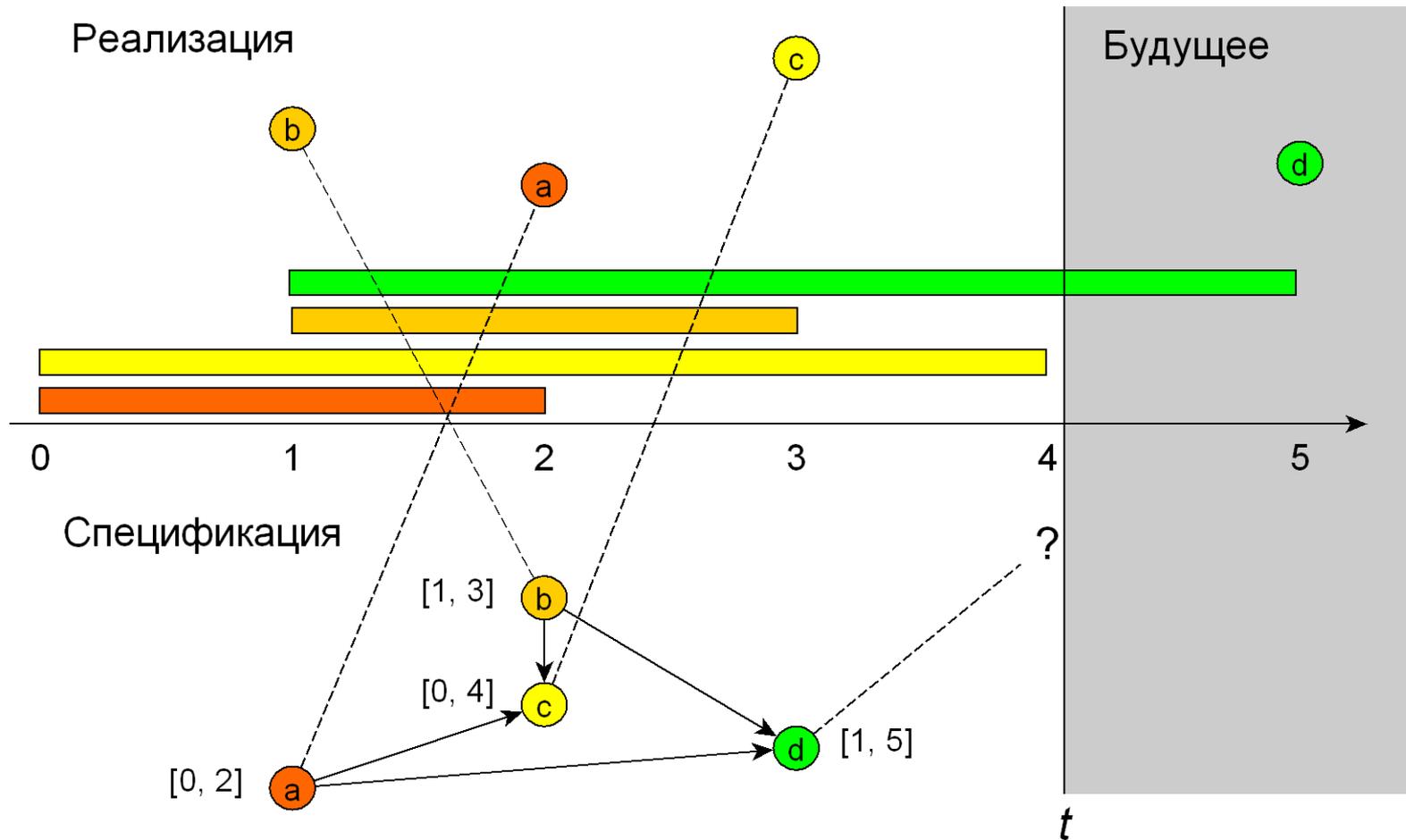
Отношение соответствия

$$I \sim S \Leftrightarrow \forall t \in \mathbf{T} .$$

$$\exists \mathbf{M} \subseteq \{ (x, y) \in \mathbf{past}_S(t) \times \mathbf{past}_I(t) \mid \mathbf{match}(x, y) \}$$

- \mathbf{M} – взаимно однозначное отношение
- $\forall x \in \mathbf{past}_S(t - \Delta t) \exists y \in \mathbf{past}_I(t) . (x, y) \in \mathbf{M}$
- $\forall y \in \mathbf{past}_I(t - \Delta t) \exists x \in \mathbf{past}_S(t) . (x, y) \in \mathbf{M}$
- $\forall (x, y), (x', y') \in \mathbf{M} . x \leq x' \Rightarrow \theta(y) \leq \theta(y')$

Отношение соответствия: пример



Арбитры реакций

$$\mathbf{arbiter}_1 = \min_{\leq}(X)$$

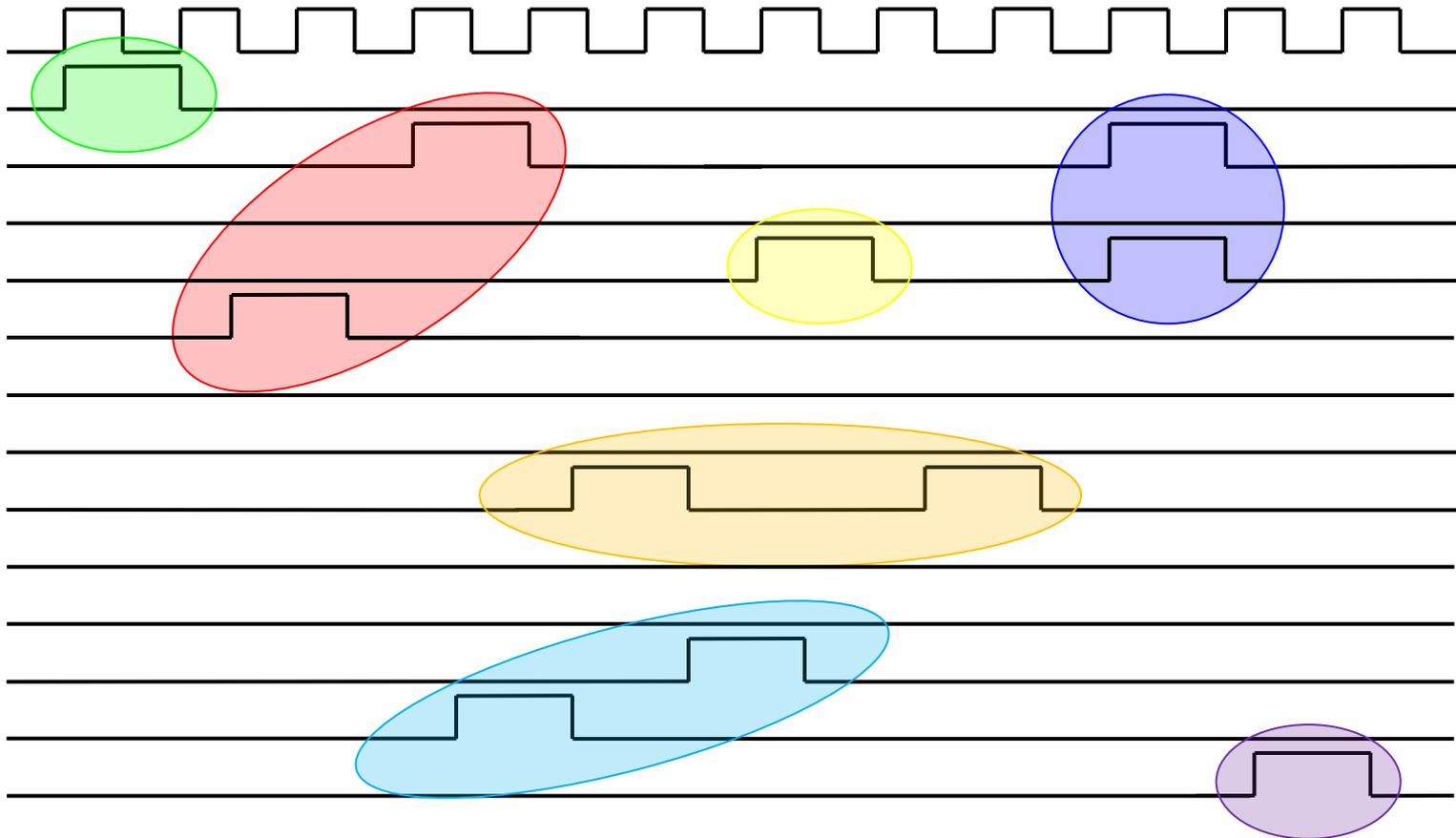
$$X \subseteq \mathbf{V}_S$$

$$\mathbf{arbiter}_2(y, X) = \begin{cases} x, & \exists x \in X . \mathbf{match}(x, y) \\ \epsilon, & \nexists x \in X . \mathbf{match}(x, y) \end{cases}$$
$$y \in \mathbf{V}_I, X \subseteq \mathbf{V}_S$$

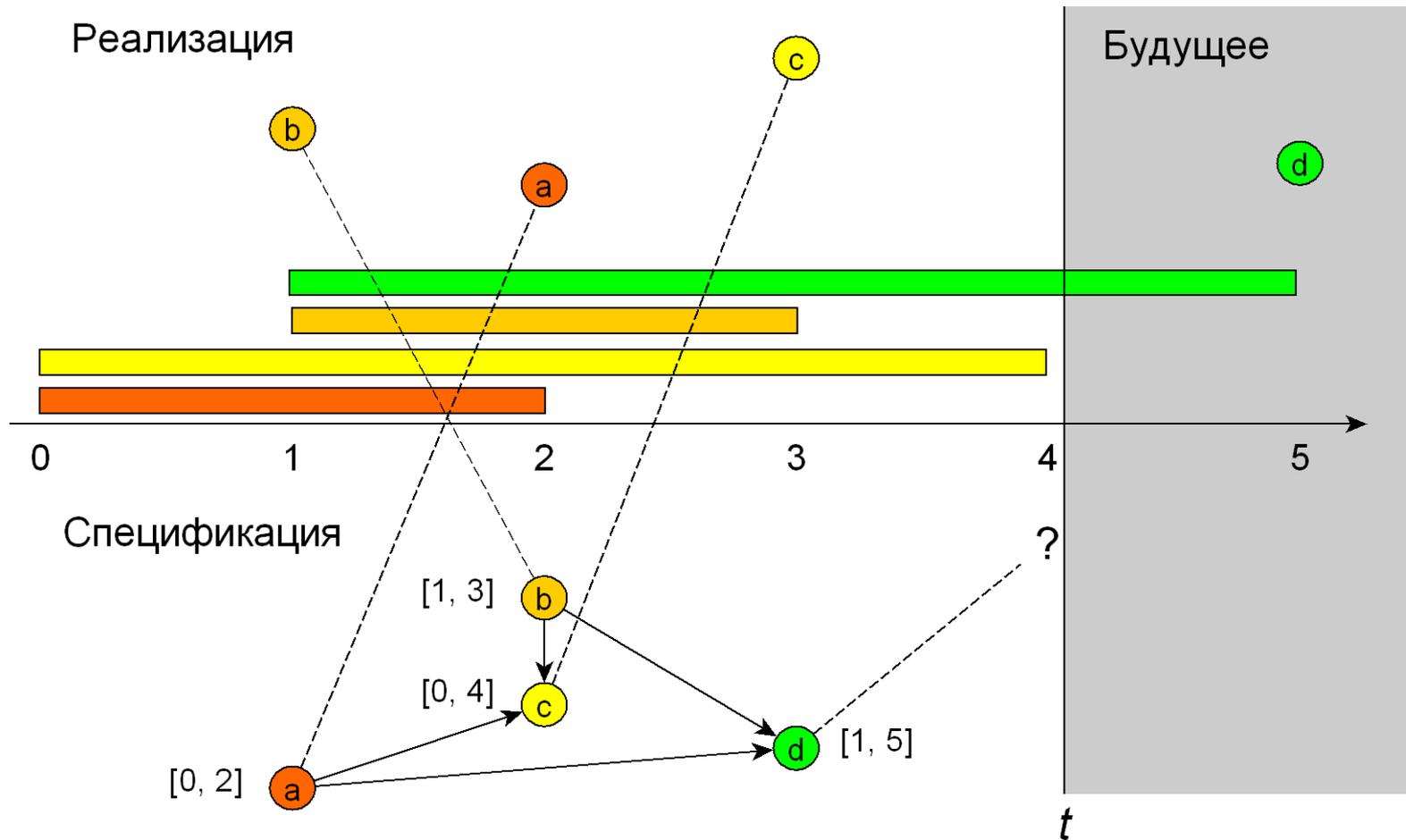
Содержание

- Цифровая аппаратура
- Динамическая проверка поведения
- Формализация отношения соответствия
- Заключение

Резюме: сообщения



Резюме: соответствие



Инструмент C++TESK

Web: <http://forge.ispras.ru/projects/cpptesk-toolkit>

E-mail: cpptesk-support@ispras.ru

Home My page Projects Help

ISPRAS C++TESK Testing ToolKit

Overview Activity Roadmap Issues New issue Gantt Calendar News Documents Wiki **Files** Repository Hudson Settings

Files

File ▲	Date	Size	D/L
 1.0			
cpptesk-toolkit-1.0.1-beta-110415.tar.gz	04/15/2011 04:17 pm	2.1 MB	12
cpptesk-toolkit-1.0.2-beta-110504.tar.gz	05/04/2011 03:14 pm	2.6 MB	6
cpptesk-toolkit-1.0.3-beta-110510.tar.gz	05/10/2011 10:32 pm	4 MB	8
cpptesk-toolkit-1.0.4-beta-110520.tar.gz	05/20/2011 07:31 pm	5.9 MB	5
cpptesk-toolkit-1.0.5-beta-110528.tar.gz	05/28/2011 07:22 pm	6.5 MB	3
cpptesk-toolkit-1.0.6-beta-110621.tar.gz	06/21/2011 09:10 pm	6.8 MB	3
cpptesk-toolkit-1.0.7-beta-110625.tar.gz	06/25/2011 07:10 pm	7.5 MB	1
cpptesk-toolkit-src-1.0.1-beta-110415.tar.gz	04/15/2011 04:17 pm	916.3 kB	23
cpptesk-toolkit-src-1.0.2-beta-110504.tar.gz	05/04/2011 03:14 pm	3.8 MB	12
cpptesk-toolkit-src-1.0.3-beta-110510.tar.gz	05/10/2011 10:32 pm	5.4 MB	19
cpptesk-toolkit-src-1.0.4-beta-110520.tar.gz	05/20/2011 07:31 pm	7.6 MB	9
cpptesk-toolkit-src-1.0.5-beta-110528.tar.gz	05/28/2011 07:22 pm	8.7 MB	13
cpptesk-toolkit-src-1.0.6-beta-110621.tar.gz	06/21/2011 09:10 pm	9.2 MB	4
cpptesk-toolkit-src-1.0.7-beta-110625.tar.gz	06/25/2011 07:10 pm	10 MB	7

Спасибо!