

Математические методы верификации схем и программ

Лекторы:

Захаров Владимир Анатольевич

Подымов Владислав Васильевич

е-mail рассказчика:

valdus@yandex.ru

Осень 2018

Семинар 7

Spin
(обзор средства)

Рассматриваемая ЗАДАЧА

Даны

- ▶ неформальное описание системы
- ▶ содержательное описание требований к системе

Требуется проверить,

удовлетворяет ли система набору требований



Схема решения ЗАДАЧИ

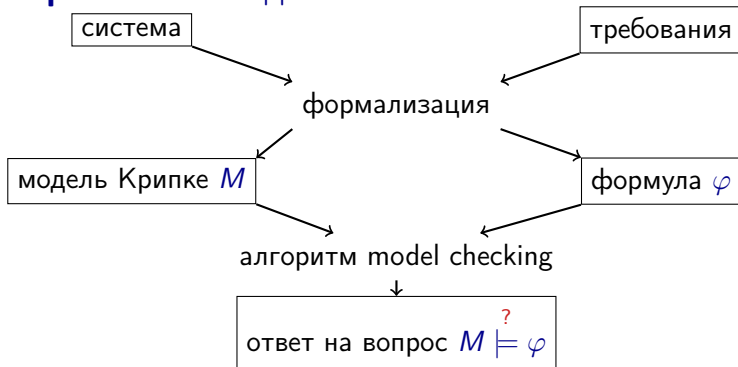
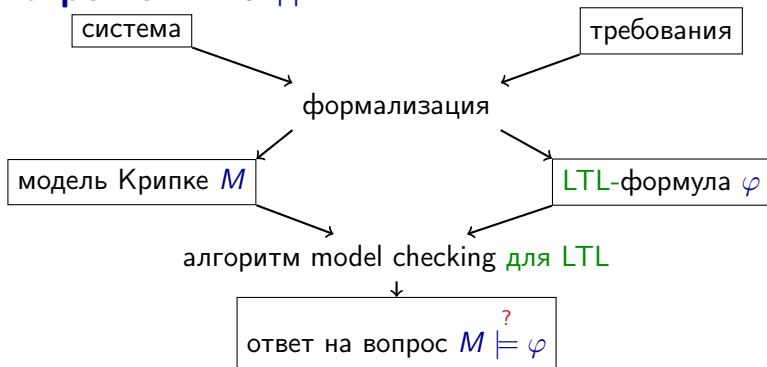
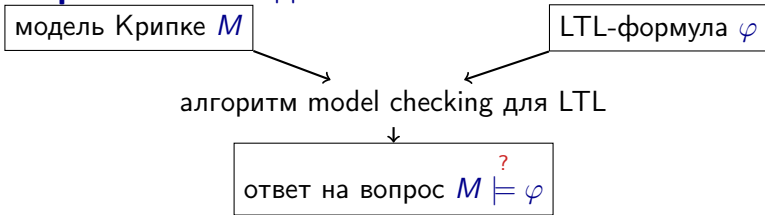


Схема решения ЗАДАЧИ



На ближайших семинарах будет рассматриваться логика линейного времени

Схема решения ЗАДАЧИ



Вам известно (как минимум) два алгоритма проверки LTL-формул:

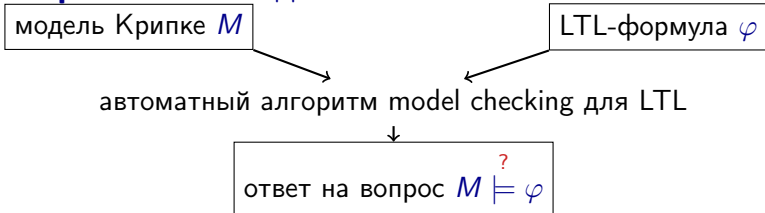
- ▶ **табличный алгоритм**

- ▶ наглядный, хотя и не такой понятный, как для CTL
- ▶ лежит в основе всех других алгоритмов
- ▶ крайне неэффективный

- ▶ **автоматный алгоритм**

- ▶ более сложно устроенный
- ▶ намного эффективнее табличного (?)

Схема решения ЗАДАЧИ

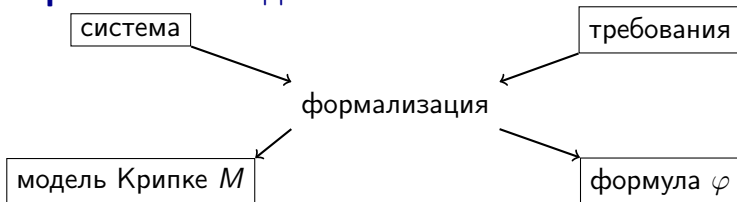


Эффективность автоматного алгоритма model checking для LTL обеспечивается двумя составляющими:

1. эффективно работающее представление автоматов Бюхи
2. эффективный алгоритм поиска компонент сильной связности, достижимых из входов автомата

В программном средстве LTL-верификации, как правило, эффективно реализована вариация автоматного алгоритма

Схема решения ЗАДАЧИ



Этап формализации модели и требований по-прежнему остаётся и мало чем отличается от того, что происходило на семинарах, посвящённых CTL

А может, никто так не делает,
и вообще верификация LTL никому не нужна?

Схема решения ЗАДАЧИ

Вот список программных средств, способных проверять выполнимость LTL-формул в *каких-то* моделях:

(на случай если захотите их использовать)

BANDERA CADENCE SMV LTSA LTSmin

NuSMV PAT ProB SAL

SATMC SPIN Spot ...

*Disclaimer: список неполный, и я не знаю большинства этих средств;
информация взята из соответствующей страницы в википедии*

Некоторые из этих средств работают и с CTL

В курсе сосредоточим внимание на средстве Spin:

- ▶ оно открытое и бесплатное
- ▶ оно довольно популярно
- ▶ его язык (**P**romela: **P**rocess **m**eta **l**anguage) достаточно прост для понимания

(и намного более приятен, чем язык NuSMV)

(S) Hello, World!

```
1 bool b;  
2  
3 active proctype P() {  
4     do  
5         :: b = !b;  
6     od  
7 }  
8  
9 ltl f1 {[<>b}  
10 ltl f2 {<>[b]}
```

На этом примере можно разобрать основы того,

- ▶ как описывать желаемые модели Крипке на языке Promela
- ▶ как применять средство средство Spin для верификации LTL-формул

Многие конструкции языка Promela схожи с *такими же конструкциями C/C++ и/или NuSMV* как по синтаксису, так и по семантике (вплоть до того, что некоторые части C/C++-кода можно особнным образом вставлять в модель Promela, но эти возможности в обзоре не обсуждаются)

(S) Модель Крипке: состояния

```
1 bool b;
2
3 active proctype P() {
4     do
5         :: b = !b;
6     od
7 }
8
9 ltl f1 {[<>b}
10 ltl f2 {<>[b]}
```

В примере *объявлена* одна *глобальная переменная* `b` типа `bool`

Эта переменная

- ▶ может принимать два значения: 0 и 1, они же `false` и `true` соответственно
- ▶ инициализируется значением 0

(S) Модель Крипке: состояния

```
1 bool b;  
2  
3 active proctype P() {  
4     do  
5         :: b = !b;  
6     od  
7 }  
8  
9 ltl f1 {[<>b}  
10 ltl f2 {<>[b]}
```

В примере описан один **тип процесса** (*~объект/функция в C/C++, ~модуль в NuSMV*)

Описание типа процесса имеет следующий вид:

`proctype тип_процесса(аргументы) {тело_процесса}`

(S) Модель Крипке: состояния

```
1 bool b;  
2  
3 active proctype P() {  
4     do  
5         :: b = !b;  
6     od  
7 }  
8  
9 ltl f1 {[<>b}  
10 ltl f2 {<>[b]}
```

Система на каждом шаге работы содержит некоторое число запущенных процессов

Каждый процесс

- ▶ заданным образом **последовательно** изменяет переменные системы согласно описанию в теле типа процесса
- ▶ на каждом шаге работы системы имеет текущее **состояние управления**: значение счётчика команд, указывающее на команду, которая должна выполняться следующей

(S) Модель Крипке: состояния

```
1 bool b;  
2  
3 active proctype P() {  
4     do  
5         :: b = !b;  
6     od  
7 }  
8  
9 ltl f1 {[<>b}  
10 ltl f2 {<>[b]}
```

Ключевое слово `active` перед типом процесса означает, что в начале работы запускается один процесс этого типа

Состояние управления запускаемого процесса — это первая команда в теле процесса

Состояние модели Крипке, соответствующей системе на языке `Promela`, в числе прочего содержит

- ▶ текущие значения всех глобальных переменных
- ▶ текущие состояния управления всех запущенных процессов

(S) Модель Крипке: состояния

```
1 bool b;  
2  
3 active proctype P() {  
4     do  
5         :: b = !b;  
6     od  
7 }  
8  
9 ltl f1 {[<>b}  
10 ltl f2 {<>[b]}
```

Модель Крипке для этого примера имеет два состояния, среди которых ровно одно начальное:

b/0

b/1

Состояния управления процессов будут опускаться в иллюстрациях моделей для краткости и наглядности

(S) Модель Крипке: переходы

```
1 bool b;  
2  
3 active proctype P() {  
4     do  
5         :: b = !b;  
6     od  
7 }  
8  
9 ltl f1 {[<>b}  
10 ltl f2 {<>[b]}
```

Переменные изменяются совокупностью параллельно работающих процессов согласно семантике чередующихся вычислений

В частности, если в системе запущен один процесс, то он

- ▶ в рамках перехода выполняет следующую команду
- ▶ если выполнил все команды, то может **завершиться** (исчезнуть из системы)

(S) Модель Крипке: переходы

```
1 bool b;  
2  
3 active proctype P() {  
4     do  
5     :: b = !b;  
6     od  
7 }  
8  
9 ltl f1 {[<>b}  
10 ltl f2 {<>[b]}
```

Единственный процесс, запущенный в примере,

- ▶ выполняет безусловный бесконечный цикл do-od
- ▶ на каждом витке цикла выполняет *присваивание* значения !b в переменную b

Семантика языка устроена так, что в **данном примере** один виток цикла выполняется за один переход в модели Крипке, то есть после каждого перехода счётчик команд указывает на начало цикла

(S) Модель Крипке: переходы

```
1 bool b;  
2  
3 active proctype P() {  
4     do  
5         :: b = !b;  
6     od  
7 }  
8  
9 ltl f1 {[<>b}  
10 ltl f2 {[<>[]b}
```

Модель Крипке для этого примера выглядит так:



(S) Язык LTL-формул

```
1 bool b;  
2  
3 active proctype P() {  
4     do  
5         :: b = !b;  
6     od  
7 }  
8  
9 ltl f1 {[<>b}  
10 ltl f2 {<>[b]}
```

Описание системы включает в себя список проверяемых LTL-свойств

Описание свойства располагается вне тел всех процессов и выглядит так:

- ▶ `ltl имя_свойства { тело_свойства }` — для именованных свойств
- ▶ `ltl { тело_свойства }` — для безымянных свойств
 - ▶ безымянное свойство рекомендуется использовать только в том случае, если оно одно во всей системе

(S) Язык LTL-формул

```
1 bool b;  
2  
3 active proctype P() {  
4     do  
5         :: b = !b;  
6     od  
7 }  
8  
9 ltl f1 {[<>b}  
10 ltl f2 {<>[b]}
```

БНФ, описывающая синтаксис LTL-свойств (φ):

$\varphi ::= \text{булево_выражение} \mid \varphi \ \&\& \ \varphi \mid \text{“}\varphi \mid\mid \varphi\text{”} \mid !\varphi \mid$
 $\varphi \rightarrow \varphi \mid \varphi \text{ implies } \varphi \mid \varphi \leftrightarrow \varphi \mid \varphi \text{ equivalent } \varphi$
 $[] \varphi \mid \text{always } \varphi \mid <> \varphi \mid \text{eventually } \varphi \mid$
 $\varphi \text{ U } \varphi \mid \varphi \text{ until } \varphi$

Операция	В БНФ	Операция	В БНФ
импликация	\rightarrow , eventually	равносильность	\leftrightarrow , equivalent
G	$[]$, always	F	$<>$, eventually
U	U , until	X	отсутствует

Использование средства Spin

Способ 1: консоль Linux

1. По исходному тексту модели получить исполняемый файл верификатора

```
> ls
helloworld.pml
> spin -a helloworld.pml
ltl f1: [] (<=> (b))
ltl f2: <=> ([] (b))
  the model contains 2 never claims: f2, f1
  only one claim is used in a verification run
  choose which one with ./pan -a -N name (defaults to -N f1)
  or use e.g.: spin -search -ltl f1 helloworld.pml
> ls
helloworld.pml pan.b pan.c pan.h pan.m pan.p pan.t _spin_nvr.tmp
> gcc -o pan pan.c
> ls
helloworld.pml pan pan.b pan.c pan.h pan.m pan.p pan.t _spin_nvr.tmp
```

Использование средства Spin

Способ 1: консоль Linux

- 2а. Запустить верификатор с флагом “проверь это свойство” и убедиться, что свойство выполнено

```
> ./pan -a -N f1
pan: ltl formula f1

(Spin Version 6.4.7 -- 19 August 2017)
  + Partial Order Reduction

Full statespace search for:
  never claim           + (f1)
  assertion violations  + (if within scope of claim)
  acceptance cycles    + (fairness disabled)
  invalid end states    - (disabled by never claim)

State-vector 28 byte, depth reached 3, errors: 0
   3 states, stored
   1 states, matched
   4 transitions (= stored+matched)
   0 atomic steps
hash conflicts:      0 (resolved)

Stats on memory usage (in Megabytes):
  0.000    equivalent memory usage for states (stored*(State-vector + overhead))
  0.290    actual memory usage for states
 128.000   memory used for hash table (-w24)
  0.534    memory used for DFS stack (-m10000)
 128.730   total actual memory usage

unreached in proctype P
  helloworld.pml:7, state 5, "-end-"
  (1 of 5 states)
unreached in claim f1
  spin nvr.tmp:10, state 13, "-end-"
  (1 of 13 states)

pan: elapsed time 0 seconds
```

Использование средства Spin

Способ 1: консоль Linux

26. Запустить верификатор с флагом “проверь это свойство” и убедиться, что свойство не выполнено

```
> ./pan -a -N f2
pan: ltl formula f2
pan:1: acceptance cycle (at depth 0)
pan: wrote helloworld.pml.trail

(Spin Version 6.4.7 -- 19 August 2017)
Warning: Search not completed
+ Partial Order Reduction

Full statespace search for:
  never claim           + (f2)
  assertion violations   + (if within scope of claim)
  acceptance cycles      + (fairness disabled)
  invalid end states     - (disabled by never claim)

State-vector 28 byte, depth reached 3, errors: 1
  2 states, stored (3 visited)
  1 states, matched
  4 transitions (= visited+matched)
  0 atomic steps
hash conflicts:          0 (resolved)

Stats on memory usage (in Megabytes):
  0.000    equivalent memory usage for states (stored*(State-vector + overhead))
  0.290    actual memory usage for states
 128.000   memory used for hash table (-w24)
  0.534    memory used for DFS stack (-m10000)
 128.730   total actual memory usage

pan: elapsed time 0 seconds
```

"есть бесконечный цикл, опровергающий свойство"

трасса, для которой свойство не выполнено, записана в этот файл

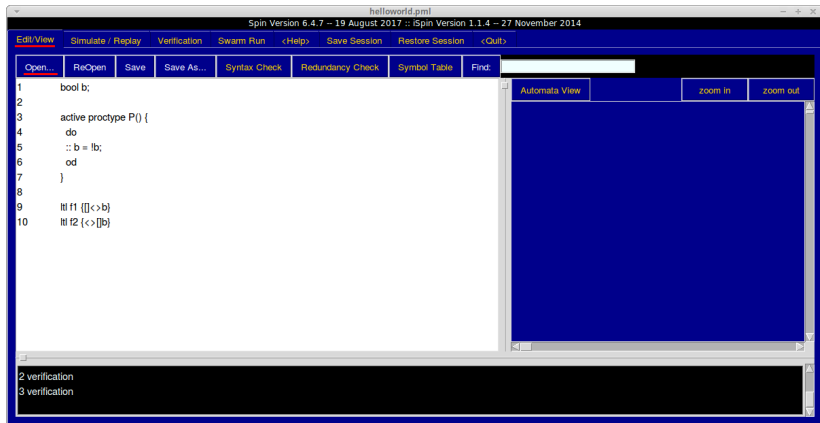
что-то не выполнено

Использование средства Spin

Способ 2: GUI ispin

ispin — это графическая оболочка от разработчиков Spin, написанная на tcl/tk

```
> ./iSpin/ispin.tcl
```

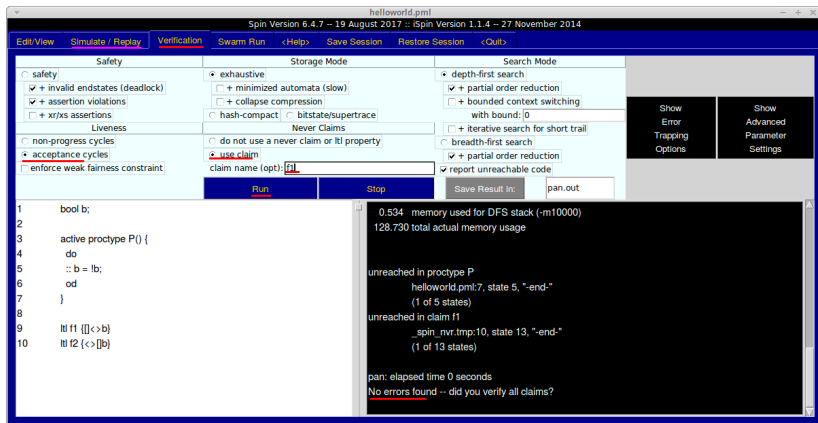


Использование средства Spin

Способ 2: GUI ispin

ispin — это графическая оболочка от разработчиков Spin, написанная на tcl/tk

```
> ./iSpin/ispin.tcl
```



Использование средства Spin

Способ 3: GUI jspin

jspin — это сторонняя графическая оболочка, написанная на Java

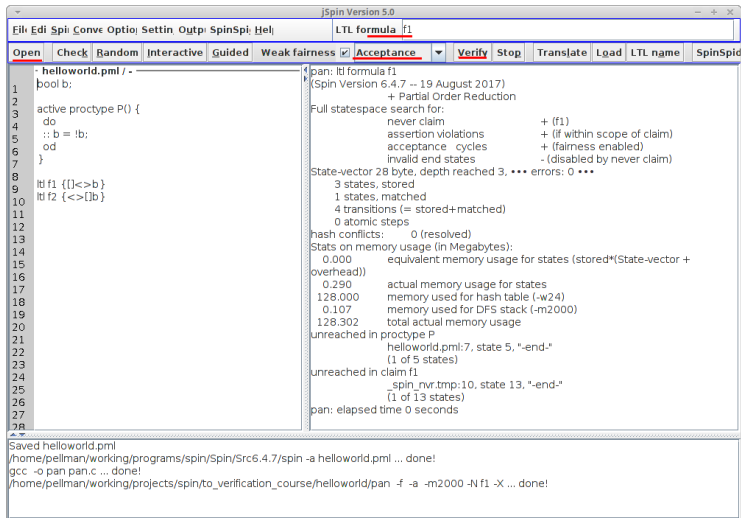
```
config.cfg
1 #jSpin configuration file
2 #Wed Dec 15 09:27:07 IST 2010
3 VERIFY_OPTIONS=-a
4 FONT_SIZE=14
5 PAN_OPTIONS=-X
6 WIDTH=1000
7 INTERACTIVE_OPTIONS=-i -X
8 SELECT_MENU=5
9 WRAP=true
10 SELECT_BUTTON=220
11 SPIN=/path/to/spin/binary/spin
12 LR_DIVIDER=400
13 CHECK_OPTIONS=-a
14 VERIFY_MODE=Safety
15 VARIABLE_WIDTH=10
16 MSC=false
17 SOURCE_DIRECTORY=jspin-examples
18 TAB_SIZE=4
19 RAW=false
20 C_COMPILER_OPTIONS=-o pan pan.c
21 VERSION=6
22 COMMON_OPTIONS=-g -l -p -r -s
23 TRAIL_OPTIONS=-t -X
24 MAX_DEPTH=2000
25 TRANSLATE_OPTIONS=-f
26 C_COMPILER=gcc
27 STATEMENT_TITLE=Statement
28 DOT=dot
29 TRAIL_FILE_NAME=txt\copyright
```

```
> java -jar ./jspin-5-0/jspin.jar
```

Использование средства Spin

Способ 3: GUI jspin

jspin — это сторонняя графическая оболочка, написанная на Java



(S) Простые типы данных

Многие встроенные типы данных, имеющиеся в Promela, *аналогичны типам с теми же названиями в C*:

- ▶ `bool`: значения 0 и 1, они же `false` и `true`
- ▶ `bit`: синоним `bool`
- ▶ `byte`: значения — целые числа от 0 до 255
- ▶ `short`: значения — целые числа от $-2^{15} - 1$ до $2^{15} - 1$
- ▶ `int`: значения — целые числа от $-2^{31} - 1$ до $2^{31} - 1$
- ▶ `unsigned`: беззнаковые числа, хранящиеся в заданном числе бит, явно указываемом при объявлении
 - ▶ `unsigned x : 5 = 2;` — объявление беззнакового пятибитового числа `x` с начальным значением 2

Переменные всех этих типов инициализируются значением 0

(S) Непростые типы данных

- ▶ разрешено объявление одномерных массивов, *и выглядит это так же, как и в C*, с поправкой на инициализацию:
 - ▶ `byte state[4] = 1;` — объявление массива `state` из 4-х элементов типа `byte`, **каждый** из которых инициализируется числом 1
- ▶ `typedef` — это ключевое слово, *аналогичное `struct` в C*:
 - ▶ `typedef T {bool a; int b;};` — тип `T` с двумя полями
 - ▶ `typedef onedim {bool a[4];};` — “костыль”, позволяющий работать с многомерными массивами

(S) Непростые типы данных

- ▶ перечисление: `mtype = {имена_через_запятую}`
 - ▶ *аналогично `enum` в C* с некоторыми поправками
 - ▶ тип перечисления всегда один, и это тип `mtype`
 - ▶ `mtype x;` — объявление перечисляемой переменной `x`
 - ▶ несколько перечислений “сливаются” в одну записью перечисляемых имён в порядке следования в тексте
 - ▶ нумерация перечисляемых объектов начинается с 1, то есть перечисляемая переменная инициализируется значением 0, отличающимся от всех числовых эквивалентов перечисляемых имён

Ремарка: “`mtype`” = “`message type`”; изначальное назначение типа `mtype` — перечисление типов сообщений в каналах связи между процессами; но `mtype` можно использовать и в других целях, а о каналах будет рассказано дальше

(S) Непростые типы данных

Пример

```
mtype = {A, B, C};  
typedef T {  
    bool a[5];  
};  
mtype = {D, E, F};  
T twodim[3];  
mtype symvar;
```

Здесь объявлены

- ▶ переменная `symvar`, которой можно присаивать значения A, B, C, D, E, F
- ▶ массив `twodim`, содержащий три элемента типа T:
 - ▶ каждый элемент содержит массив `a` из пяти булевых значений

(S) Композиция процессов

Каждая команда в теле процесса описывает **недетерминированный** способ изменения состояния системы: выполнение команды соответствует одному, нескольким или ни одному переходу в модели Крипке

Если процесс не может сделать ни одного перехода, то он **заблокирован** в текущем состоянии, а иначе — **активен**

Шаг выполнения системы (*переход в модели Крипке*) выглядит так:

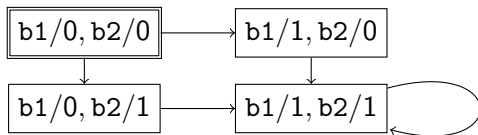
- ▶ недетерминированно выбирается активный процесс
- ▶ недетерминированно выполняется следующая команда процесса

Если Spin применяется согласно инструкции, то в случае, когда все процессы заблокированы, в систему добавляется переход, при выполнении которого состояние системы не изменяется

(S) Композиция процессов

```
1 bool b1;  
2 bool b2;  
3  
4 active proctype P() {b1 = !b1;}  
5 active proctype Q() {b2 = !b2;}
```

Модель Крипке в примере выглядит так:



(S) Тело процесса

Как и в C, каждая команда может быть предварена **меткой**:
имя_метки : команда

Тело процесса содержит последовательность команд, разделённых “;”, включающую

- ▶ присваивания
- ▶ условия
- ▶ ветвления
- ▶ циклы
- ▶ *команду goto*

(S) Тело процесса: присваивание

Присваивания выглядят *примерно так же, как и в C с сильно ограниченным синтаксисом:*

имя = выражение

имя ++

имя --

(S) Тело процесса: присваивание

В выражениях используются переменные, константы (целые числа, true, false, имена перечисления) и многие операторы, *аналогичные тем же операторам языка C*, например:

- ▶ +, -, *, /
- ▶ <<, >>, ~, &, ^, |
- ▶ <, >, <=, >=, ==, !=
- ▶ !, &&, ||
- ▶ ->: (*аналог ?:*), [] (индексирование массивов),
 . (обращения к полям структур)

Присваивание всегда активно и выполняется за один переход в модели Крипке:

- ▶ переменная изменяется так же, *как в C*
- ▶ управление передаётся следующей команде последовательности

(S) Тело процесса: условие

Любое булево выражение может быть записано как **условная команда**

Условная команда активна \Leftrightarrow значение выражения — true

При выполнении условной команды

- ▶ значения всех переменных остаются неизменными
- ▶ управление передаётся следующей команде последовательности

(S) Тело процесса: ветвление

```
if  
  :: последовательность_команд  
  ...  
  :: последовательность_команд  
fi
```

Альтернатива — это последовательность команд после “::”

Голова альтернативы — это первая команда последовательности

Альтернатива **активна**, если активна её голова

(S) Тело процесса: ветвление

```
if  
  :: последовательность_команд  
  ...  
  :: последовательность_команд  
fi
```

Команда ветвления активна \Leftrightarrow активна хотя бы одна альтернатива

При выполнении активной команды ветвления

- ▶ недетерминированно выбирается одна из активных альтернатив
- ▶ команда ветвления заменяется на выбранную альтернативу, и переходы совершаются согласно этой альтернативе
 - ▶ первый переход для команды ветвления — это первый переход для выбранной альтернативы
- ▶ когда все команды альтернативы выполнены, управление передаётся следующей команде

(S) Тело процесса: ветвление

```
if  
  :: последовательность_команд  
  ...  
  :: последовательность_команд  
fi
```

Ключевое слово `else` — это специальная команда, работающая так:

- ▶ её можно написать только в голове одной альтернативы ветвления
- ▶ команда `else` активна \Leftrightarrow все остальные альтернативы неактивны
- ▶ при выполнении команды `else` значения переменных не изменяются

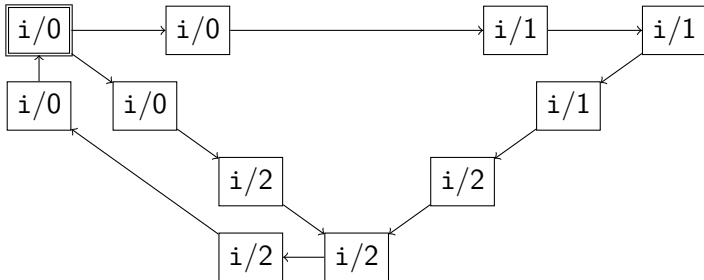
Запись “`->`” — это синоним “`;`”, повышающий наглядность записи альтернатив

(S) Тело процесса: ветвление

Пример

```
1 byte i;  
2  
3 active proctype P() {  
4   L1: if  
5     :: i < 1 -> i++;  
6     :: i < 2 -> i = i + 2;  
7     :: else -> i = 0;  
8     fi;  
9     goto L1  
10 }
```

Модель Крипке для этого примера выглядит так:



(S) Тело процесса: цикл

```
do
  :: последовательность_команд
...
  :: последовательность_команд
od
```

Команда цикла работает почти так же, как и команда ветвления

Единственное отличие: после выполнения альтернативы управление не передаётся следующей команде, а возвращается в начало цикла

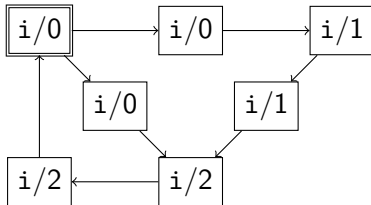
Ключевое слово `break` — это всегда активная команда, не изменяющая данных и принудительно передающая управление инструкции, следующей за ближайшим по вложенности циклом

(S) Тело процесса: цикл

Пример

```
1 byte i;  
2  
3 active proctype P() {  
4   do  
5     :: i < 1 -> i++;  
6     :: i < 2 -> i = i + 2;  
7     :: else -> i = 0;  
8   od  
9 }
```

Модель Крипке для этого примера выглядит так:



(S) Запуск и аргументы процессов

Специальной командой можно запускать новые процессы в системе:

```
run тип_процесса (параметры)
```

Эта команда всегда активна

Команда выполняется за один переход, выполнение передаётся следующей команде, и в системе запускается процесс указанного типа

В общем случае тип процесса имеет аргументы:

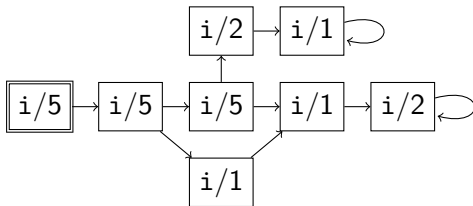
- ▶ аргументы — это список *объявлений*, разделённых “;”
- ▶ *объявление* ::= *тип список_имён_через_запятую*

Параметры запускаемого процесса и аргументы в описании процесса работают так же, как и *передача параметров по значению при вызове функции в C/C++*

(S) Запуск и аргументы процессов

```
1 byte i = 5;  
2  
3 proctype Q(byte a) {i = a;}  
4  
5 active proctype P() {  
6     run Q(1);  
7     run Q(2);  
8 }
```

Модель Крипке для этого примера выглядит так:



(S) Локальные переменные

Помимо глобальных переменных, Promela позволяет объявлять и **локальные переменные** в начале текста тела процесса

Объявления локальных переменных выглядят так же, как и объявления глобальных

Локальные переменные создаются для каждого процесса в момент его запуска

Инициализация локальных переменных работает так же, как и для глобальных переменных

Объявление локальной переменной не является командой

(S) Каналы связи

Язык Promela позволяет объявлять каналы связи двух видов:

- ▶ синхронные
- ▶ асинхронные

Асинхронный канал способен хранить количество сообщений, не превосходящее его **ёмкость** (положительное целое число) и объявляется так:

```
chan имя_канала = [ёмкость] of {тип_сообщений}
```

Синхронный канал связи — это канал ёмкости 0:

```
chan имя_канала = [0] of {тип_сообщений}
```

(S) Каналы связи

Команда отправки сообщения в канал имеет вид

<имя канала>!<выражение>

Команда приёма сообщения из канала имеет вид

<имя канала>?<имя переменной>

или

<имя канала>?<выражение>

В зависимости от ёмкости канала эти команды работают по-разному

Асинхронный канал:

- ▶ команда отправки сообщения активна \Leftrightarrow канал хранит сообщений меньше, чем его ёмкость
- ▶ команда приёма сообщения активна \Leftrightarrow канал хранит хотя бы одно сообщение и (в случае инструкции второго вида) значение сообщения совпадает со значением выражения

(S) Каналы связи

Команда отправки сообщения в канал имеет вид

<имя канала>!<выражение>

Команда приёма сообщения из канала имеет вид

<имя канала>?<имя переменной>

или

<имя канала>?<выражение>

В зависимости от ёмкости канала эти команды работают по-разному

Асинхронный канал:

- ▶ по выполнении команды отправки сообщения в канал добавляется сообщение с тем же значением, что и выражение справа от “!”
- ▶ по выполнении команды приёма первого вида в переменную записывается значение сообщения, посланного раньше остальных
- ▶ по выполнении команды приёма обоих видов прочитанное сообщение удаляется из канала

(S) Каналы связи

Команда отправки сообщения в канал имеет вид

<имя канала>!<выражение>

Команда приёма сообщения из канала имеет вид

<имя канала>?<имя переменной>

или

<имя канала>?<выражение>

В зависимости от ёмкости канала эти команды работают по-разному

Синхронный канал:

- ▶ команды отправки и приёма сообщения выполняются **одновременно**, каждая ровно в одном процессе
- ▶ посылаемое значение передаётся напрямую принимающему процессу и не хранится в канале
- ▶ в остальном передача сообщения происходит так же, как для асинхронных каналов

(S) Каналы связи

```
1 chan c = [0] of {byte};
2 byte i, j;
3
4 active proctype P() {
5     do
6         :: c! j+1;
7         :: c? j;
8     od
9 }
10
11 active proctype Q() {
12     do
13         :: c! i+1;
14         :: c? i;
15     od
16 }
```

В этой системе два процесса постепенно увеличивают значения переменных i , j (с переполнением) пересылая увеличенные значения через синхронный канал связи

Команда “!” одного процесса и команда “?” другого процесса выполняются одновременно за один переход

(S) Неделимые последовательности инструкций

Иногда бывает необходимо выполнить несколько команд языка Promela как **одну неделимую команду**

Например, при анализе *протоколов доступа к критической секции*, основанных на семафорах, важно уметь моделировать проверку значения переменной и её изменение, происходящие **одновременно**

Неделимая последовательности команд описывается в языке Promela так:

```
atomic{<команды>}
```

Как это работает: (в простом случае)

1. если на предыдущем шаге выполнялась команда блока `atomic` и сейчас активна следующая команда этого блока, то эта команда выполняется в обязательном порядке

(S) Неделимые последовательности инструкций

Иногда бывает необходимо выполнить несколько команд языка Promela как **одну неделимую команду**

Например, при анализе *протоколов доступа к критической секции*, основанных на семафорах, важно уметь моделировать проверку значения переменной и её изменение, происходящие **одновременно**

Неделимая последовательности команд описывается в языке Promela так:

```
atomic{<команды>}
```

Как это работает: (в простом случае)

- если на предыдущем шаге выполнялась команда из блока `atomic`, но сейчас неактивна следующая команда этого блока, то выполнение системы происходит обычным образом (процесс с блоком `atomic` заблокирован)

(S) Неделимые последовательности инструкций

Иногда бывает необходимо выполнить несколько команд языка Promela как **одну неделимую команду**

Например, при анализе *протоколов доступа к критической секции*, основанных на семафорах, важно уметь моделировать проверку значения переменной и её изменение, происходящие **одновременно**

Неделимая последовательности команд описывается в языке Promela так:

```
atomic{<команды>}
```

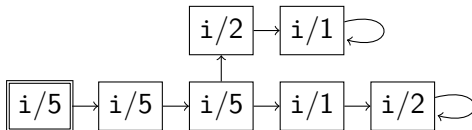
Как это работает: (в простом случае)

3. если при выполнении системы обычным образом *вдруг* стала активной и выполнилась следующая команда блока `atomic`, то дальнейшее выполнение опять происходит согласно пунктам 1, 2

(S) Неделимые последовательности инструкций

```
1 byte i = 5;  
2  
3 proctype Q(byte a) {i = a;}  
4  
5 active proctype P() {  
6     atomic{  
7         run Q(1);  
8         run Q(2);  
9     }  
10 }
```

Модель Крипке для этого примера выглядит так:



(S) Пример для размышлений

```
bool near, dead, hunted;  
mtype = {ping};  
chan c = [0] of {mtype};
```

```
active proctype mosquito() { do  
  :: !near && !dead -> near = true; c!ping;  
  :: near && !hunted && !dead -> near = false;  
od }
```

```
active proctype bird() { do  
  :: c?ping -> hunted = true;  
  :: atomic{hunted && near -> dead = true; hunted = false;}  
  :: hunted && !near -> hunted = false;  
od }
```

```
ltl f1 {<>(near && <> dead)}  
ltl f2 {[ ](near -> <> dead)}  
ltl f3 {[ ](hunted -> <> dead)}
```

Что здесь происходит, и какие свойства выполнены?