Property-based testing и зависимые типы

и немножко функционального программирования

Денис Буздалóв

11 и 18 февраля 2026

О докладе

О докладе

- Познавательно-развлекательный

О докладе

- Познавательно-развлекательный
- Хотелось познакомить с конкретной работой

О докладе

- Познавательно-развлекательный
- Хотелось познакомить с конкретной работой
- Придётся знакомиться с целой областью

О докладе

- Познавательно-развлекательный
- Хотелось познакомить с конкретной работой
- Придётся знакомиться с целой областью
- Упрощения, заметания под ковёр

О докладе

- Познавательно-развлекательный
- Хотелось познакомить с конкретной работой
- Придётся знакомиться с целой областью
- Упрощения, заметания под ковёр
- Если покажется, что всё понятно в чём-то новом, это только кажется ;-)

О докладе

- Познавательно-развлекательный
- Хотелось познакомить с конкретной работой
- Придётся знакомиться с целой областью
- Упрощения, заметания под ковёр
- Если покажется, что всё понятно в чём-то новом, это только кажется ;-)
- Будет много кода разных синтаксисов

О докладе

- Познавательно-развлекательный
- Хотелось познакомить с конкретной работой
- Придётся знакомиться с целой областью
- Упрощения, заметания под ковёр
- Если покажется, что всё понятно в чём-то новом, это только кажется ;-)
- Будет много кода разных синтаксисов
- Вопросы по существу стоит задавать сразу

Что такое *хорошее тестирование*?

Что такое *хорошее тестирование*?

- Формальная верификация? ;-)

Что такое *хорошее тестирование*?

- Формальная верификация? ;-)
- Находит баги?

Что такое *хорошее тестирование*?

- Формальная верификация? ;-)
- Находит баги?
- Покрывает код?

Что такое *хорошее тестирование*?

- Формальная верификация? ;-)
- Находит баги?
- Покрывает код?
- Покрывает функциональность/требования?

Что такое *хорошее тестирование*?

- Формальная верификация? ;-)
- Находит баги?
- Покрывает код?
- Покрывает функциональность/требования?
- Повышает уверенность?

Что такое *хорошее тестирование*?

- Формальная верификация? ;-)
- Находит баги?
- Покрывает код?
- Покрывает функциональность/требования?
- Повышает уверенность?
- Много тестов?

Что такое *хорошее тестирование*?

- Формальная верификация? ;-)
- Находит баги?
- Покрывает код?
- Покрывает функциональность/требования?
- Повышает уверенность?
- Много тестов?
- Быстро работает?

Что такое *хорошее тестирование*?

- Формальная верификация? ;-)
- Находит баги?
- Покрывает код?
- Покрывает функциональность/требования?
- Повышает уверенность?
- Много тестов?
- Быстро работает?
- Легко разрабатывается?

Что такое *хорошее тестирование*?

- Формальная верификация? ;-)
- Находит баги?
- Покрывает код?
- Покрывает функциональность/требования?
- Повышает уверенность?
- Много тестов?
- Быстро работает?
- Легко разрабатывается?
- Хотя бы присутствует?

Что такое *хорошее тестирование*?

- Формальная верификация? ;-)
- Находит баги?
- Покрывает код?
- Покрывает функциональность/требования?
- Повышает уверенность?
- Много тестов?
- Быстро работает?
- Легко разрабатывается?
- Хотя бы присутствует?
- Создаёт ситуации, о которых автор тестов даже не думал?

Property-based testing

Property-based testing

- Тестирование функции/системы на *произвольном* интересном входе

Property-based testing

- Тестирование функции/системы на *произвольном* интересном входе
- Оценка, а не предугадывание результата

Property-based testing

- Тестирование функции/системы на *произвольном* интересном входе
- Оценка, а не предугадывание результата
- Рандомизированная генерация входных значений

Property-based testing

- Тестирование функции/системы на *произвольном* интересном входе
- Оценка, а не предугадывание результата
- Рандомизированная генерация входных значений
- Десятки библиотек под множество языков

  Haskell, Erlang, Scala, Python, Coq, Idris, C#, C++, Clojure, D, Elixir, Elm, F#, Go, Java, JavaScript, Julia, Kotlin, Nim, OCaml, Prolog, Racket, Ruby, Rust, Swift, TypeScript, ...

Свойство insert?

```
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  insert 2 [1, 3, 5] === [1, 2, 3, 5]
```

Свойство insert?

```haskell
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  insert 2 [1, 3, 5] === [1, 2, 3, 5]
```

```python
def insertOk():
  xs = [1, 3, 5]
  insort(xs, 2)
  assert xs == [1, 2, 3, 5]
```

Свойство insert?

```
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  insert ?x ?xs === ?result
```

```
def insertOk(x, xs):
  insort(xs, x)
```

Свойство insert?

```
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  insert x ?xs === ?result
```

```
@given(st.integers())
def insertOk(x, xs):
  insort(xs, x)
```

Свойство insert?

```
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  insert x xs === ?result
```

```
@given(st.integers(),
  sortedLists(st.integers()))
def insertOk(x, xs):
  insort(xs, x)
```

Свойство insert!

```
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
```

```
@given(st.integers(),
  sortedLists(st.integers()))
def insertOk(x, xs):
  insort(xs, x)
  assert is_sorted(xs)
```

Свойство insert!

```haskell
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

```python
@given(st.integers(),
  sortedLists(st.integers()))
def insertOk(x, xs):
  insort(xs, x)
  assert is_sorted(xs)
  assert x in xs
```

Свойство insert!

```
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Свойство insert!

```
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

```
── sorted list insertion ──
  ✓ insertOk passed 100 tests.
```

Свойство insert!

```
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

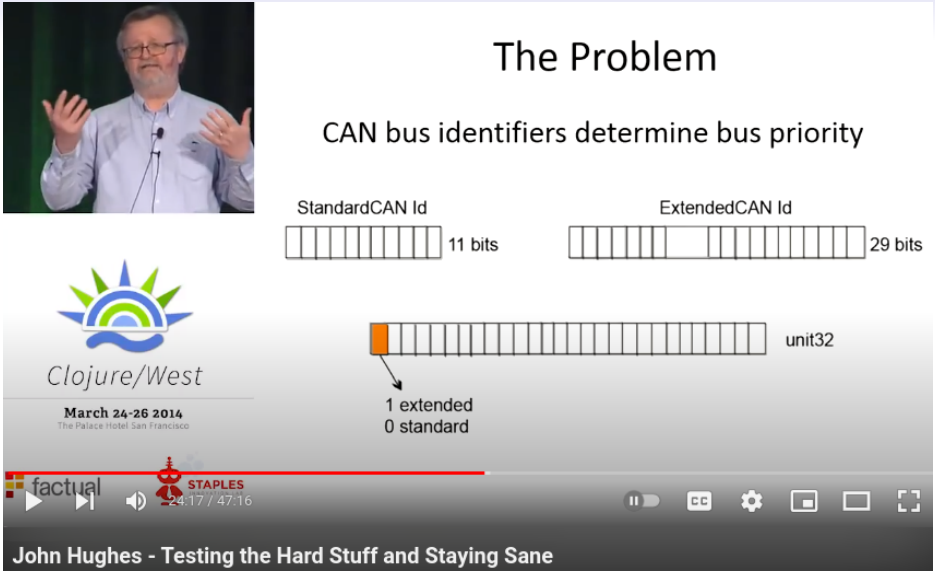
А что, если `insert x xs = x :: xs`?

```
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

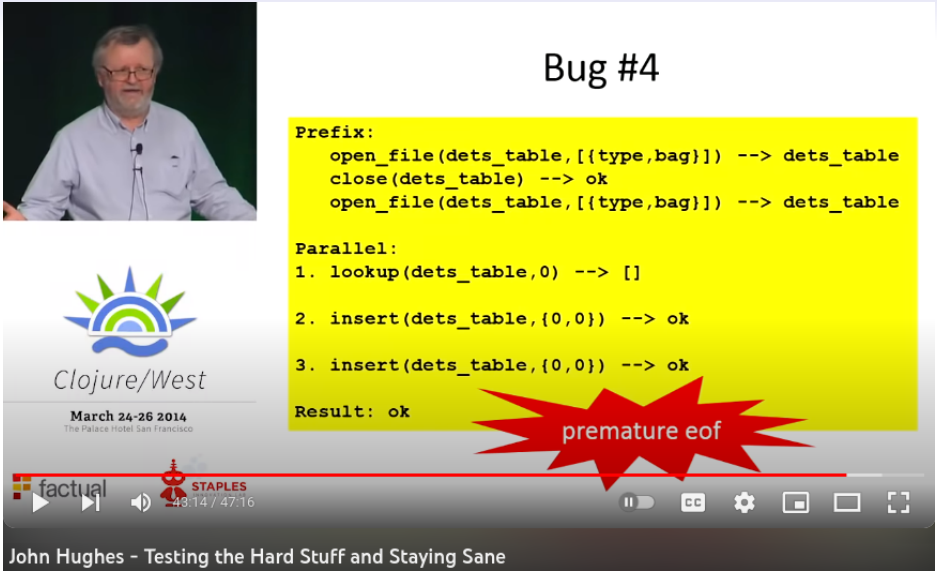
А что, если `insert x xs = x :: xs`?

```
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

```
── sorted list insertion ──
  ✗ insertOk failed after 14 tests.

    forAll 0 =
      1

    forAll 1 =
      [0]
```



[1] https://www.youtube.com/watch?v=zi0rHwfiX1Q



[1] https://www.youtube.com/watch?v=zi0rHwfiX1Q

Хорошо применённый property-based testing

Хорошо применённый property-based testing

- ✔ одна спецификация находит ошибки в разных местах

Хорошо применённый property-based testing

- ✔ одна спецификация находит ошибки в разных местах
- ✔ высокоуровневая спецификация может находить низкоуровневые проблемы

Хорошо применённый property-based testing

- ✔ одна спецификация находит ошибки в разных местах
- ✔ высокоуровневая спецификация может находить низкоуровневые проблемы
- ✔ может найти практически ненаходимое ручным тестированием

Хорошо применённый property-based testing

- ✔ одна спецификация находит ошибки в разных местах
- ✔ высокоуровневая спецификация может находить низкоуровневые проблемы
- ✔ может найти практически ненаходимое ручным тестированием
- ✔ находит то, о чём не подозревали, *хороший* метод

Хорошо применённый property-based testing

- ✔ одна спецификация находит ошибки в разных местах
- ✔ высокоуровневая спецификация может находить низкоуровневые проблемы
- ✔ может найти практически ненаходимое ручным тестированием
- ✔ находит то, о чём не подозревали, *хороший* метод
- ✔ сложность тестирования растёт медленнее сложности SUT

Хорошо применённый property-based testing

- ✔ одна спецификация находит ошибки в разных местах
- ✔ высокоуровневая спецификация может находить низкоуровневые проблемы
- ✔ может найти практически ненаходимое ручным тестированием
- ✔ находит то, о чём не подозревали, *хороший* метод
- ✔ сложность тестирования растёт медленнее сложности SUT
- ✘ надо уметь выбирать подходящие свойства

Хорошо применённый property-based testing

- ✔ одна спецификация находит ошибки в разных местах
- ✔ высокоуровневая спецификация может находить низкоуровневые проблемы
- ✔ может найти практически ненаходимое ручным тестированием
- ✔ находит то, о чём не подозревали, *хороший* метод
- ✔ сложность тестирования растёт медленнее сложности SUT
- ✘ надо уметь выбирать подходящие свойства
- ✘ reimplementation trap

Хорошо применённый property-based testing

- ✔ одна спецификация находит ошибки в разных местах
- ✔ высокоуровневая спецификация может находить низкоуровневые проблемы
- ✔ может найти практически ненаходимое ручным тестированием
- ✔ находит то, о чём не подозревали, *хороший* метод
- ✔ сложность тестирования растёт медленнее сложности SUT
- ✘ надо уметь выбирать подходящие свойства
- ✘ reimplementation trap
- ✘ формализация требований, нужен опыт и mindsetting

Хорошо применённый property-based testing

- ✔ одна спецификация находит ошибки в разных местах
- ✔ высокоуровневая спецификация может находить низкоуровневые проблемы
- ✔ может найти практически ненаходимое ручным тестированием
- ✔ находит то, о чём не подозревали, *хороший* метод
- ✔ сложность тестирования растёт медленнее сложности SUT
- ✘ надо уметь выбирать подходящие свойства
- ✘ reimplementation trap
- ✘ формализация требований, нужен опыт и mindsetting
  - ✔ инварианты, модели, метаморфное тестирование, автоматы

Хорошо применённый property-based testing

- ✔ одна спецификация находит ошибки в разных местах
- ✔ высокоуровневая спецификация может находить низкоуровневые проблемы
- ✔ может найти практически ненаходимое ручным тестированием
- ✔ находит то, о чём не подозревали, *хороший* метод
- ✔ сложность тестирования растёт медленнее сложности SUT
- ✘ надо уметь выбирать подходящие свойства
- ✘ reimplementation trap
- ✘ формализация требований, нужен опыт и mindsetting
  - ✔ инварианты, модели, метаморфное тестирование, автоматы
- ✘ написание генераторов, корректность, полнота, распределения

Хорошо применённый property-based testing

- ✔ одна спецификация находит ошибки в разных местах
- ✔ высокоуровневая спецификация может находить низкоуровневые проблемы
- ✔ может найти практически ненаходимое ручным тестированием
- ✔ находит то, о чём не подозревали, *хороший* метод
- ✔ сложность тестирования растёт медленнее сложности SUT
- ✘ надо уметь выбирать подходящие свойства
- ✘ reimplementation trap
- ✘ формализация требований, нужен опыт и mindsetting
  - ✔ инварианты, модели, метаморфное тестирование, автоматы
- ✘ написание генераторов, корректность, полнота, распределения
  - ✔ деривация

Деривация?

```
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Деривация?

```
arbitraryNat : Gen Nat
```

```
sortedNatList : Gen (List Nat)
```

```
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Деривация?

```
arbitraryNat : Gen Nat
arbitraryNat = deriveGen
```

```
sortedNatList : Gen (List Nat)
```

```
insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Деривация?

```
arbitraryNat : Gen Nat
arbitraryNat = deriveGen

arbitraryNatList : Gen (List Nat)


sortedNatList : Gen (List Nat)



insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Деривация?

```
arbitraryNat : Gen Nat
arbitraryNat = deriveGen

arbitraryNatList : Gen (List Nat)


sortedNatList : Gen (List Nat)
sortedNatList =
  foldr (\x, res ⇒ x :: map (+x) res) [] <$> arbitraryNatList

insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  ← forAll arbitraryNat
  xs ← forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Деривация?

```
arbitraryNat : Gen Nat
arbitraryNat = deriveGen

arbitraryNatList : Gen (List Nat)
arbitraryNatList = deriveGen

sortedNatList : Gen (List Nat)
sortedNatList =
  foldr (\x, res ⇒ x :: map (+x) res) [] <$> arbitraryNatList

insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  ← forAll arbitraryNat
  xs ← forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Намерения выражены по-разному

```
arbitraryNat : Gen Nat
arbitraryNat = deriveGen                    -- намерения выражены типом

arbitraryNatList : Gen (List Nat)
arbitraryNatList = deriveGen                -- намерения выражены типом

sortedNatList : Gen (List Nat)
sortedNatList =                 -- намерения выражены исполняемым кодом
  foldr (\x, res => x :: map (+x) res) [] <$> arbitraryNatList

insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Деривация понимает типы

```
arbitraryNat : Gen Nat
arbitraryNat = deriveGen                    -- намерения выражены типом

arbitraryNatList : Gen (List Nat)
arbitraryNatList = deriveGen                -- намерения выражены типом

sortedNatList : Gen (List Nat)
sortedNatList =                 -- намерения выражены исполняемым кодом
  foldr (\x, res => x :: map (+x) res) [] <$> arbitraryNatList

insertOk : Property
insertOk = property $ do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll sortedNatList
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Type-driven development

Type-driven development

- тратим усилия, чтобы выразить *намерения* через типы

Type-driven development

- тратим усилия, чтобы выразить *намерения* через типы
- получаем при должном старании
  - меньше некорректных реализаций
  - проще логика обработки
  - меньше ненужных проверок или кода обработки
  - помощь от компилятора и тулинга
  - ...

Type-driven development

- тратим усилия, чтобы выразить *намерения* через типы
- получаем при должном старании
  - меньше некорректных реализаций
  - проще логика обработки
  - меньше ненужных проверок или кода обработки
  - помощь от компилятора и тулинга
  - ...
- возможности зависят от выразительности системы типов

Type-driven property-based testing

- тратим усилия, чтобы выразить *намерения* через типы
- получаем при должном старании
  - меньше некорректных реализаций
  - проще логика обработки
  - меньше ненужных проверок или кода обработки
  - помощь от компилятора и тулинга
  - ...
  - мощные хорошие тесты
- возможности зависят от выразительности системы типов

Например, меньше некорректных реализаций

```
typedef time_t Time;
```

Например, меньше некорректных реализаций

```
typedef time_t Time;
```

```
void f(Time t, Time f, int a) {
  Time x = t + f;
  Time y = t * a;
  // ...используем `x` и `y`...
}
```

Например, меньше некорректных реализаций

```
typedef time_t Time;
```

```
void f(Time t, Time f, int a) {
  Time x = t + f;
  Time y = t * f;
  // ...используем `x` и `y`...
}
```

Например, меньше некорректных реализаций

```
struct Time {
  time_t sec;
  Time(time_t s) { sec = s; }
  Time operator+(const Time &t) {
    return Time(sec + t.sec);
  }
  Time operator*(const int n) {
    return Time(sec * n);
  }
};

void f(Time t, Time f, int a) {
  Time x = t + f;
  Time y = t * f;
  // ...используем `x` и `y`...
}
```

Например, меньше некорректных реализаций

```
struct Time {
```

```
x.cpp: In function ‘void f(Time, Time, int)’:
x.cpp:16:14: error: no match for ‘operator*’
                    (operand types are ‘Time’ and ‘Time’)
   16 |   Time y = t * f;
      |            ~ ^ ~
      |            |   |
      |            |   Time
      |            Time
```

```
void f(Time t, Time f, int a) {
  Time x = t + f;
  Time y = t * f; // Boom!
  // ...используем `x` и `y`...
}
```

Например, меньше некорректных реализаций

```
struct Time {
```

```
x.cpp: In function ‘void f(Time, Time, int)’:
x.cpp:16:14: error: no match for ‘operator*’
                    (operand types are ‘Time’ and ‘Time’)
   16 |   Time y = t * f;
      |            ~ ^ ~
      |            |   |
      |            |   Time
      |            Time
```

```
void f(Time t, Time f, int a) {
  Time x = t + f;
  Time y = t * f; // Boom!
  // ... используем `x` и `y` ...
}
```

Не подумайте, что я считаю систему типов C++ *хорошей*. Но пример показательный

Например, проще логика обработки

```
def maximum(vs: List[Int]): Int =
  vs match
    case Nil ⇒ ???
    case head::rest ⇒ ???
```

Например, проще логика обработки

```
def maximum(vs: List[Int]): Int =
  vs match
    case Nil ⇒ ???
    case head::rest ⇒ rest.fold(head)(_ max _)
```

Например, проще логика обработки

```
def maximum(vs: List[Int]): Int =
  vs match
    case Nil ⇒ -1
    case head::rest ⇒ rest.fold(head)(_ max _)
```

Например, проще логика обработки

```
def maximum(vs: List[Int]): Int =
  vs match
    case Nil ⇒ -1
    case head::rest ⇒ rest.fold(head)(_ max _)


// но результат `-1` может быть и для непустого списка
```

Например, проще логика обработки

```scala
def maximum(vs: List[Int]): Int =
  vs match
    case Nil ⇒ Int.MinValue
    case head::rest ⇒ rest.fold(head)(_ max _)
```

Например, проще логика обработки

```
def maximum(vs: List[Int]): Int =
  vs match
    case Nil ⇒ Int.MinValue
    case head::rest ⇒ rest.fold(head)(_ max _)


// всё равно не можем отличить две ситуации по результату
```

Например, проще логика обработки

```
def maximum(vs: List[Int]): Int =
  vs match
    case Nil ⇒ throw new IndexOutOfBoundsException()
    case head::rest ⇒ rest.fold(head)(_ max _)
```

Например, проще логика обработки

```
def maximum(vs: List[Int]): Int =
  vs match
    case Nil ⇒ throw new IndexOutOfBoundsException()
    case head::rest ⇒ rest.fold(head)(_ max _)


// если в языке есть исключения и с ними удобно работать
```

Например, проще логика обработки

```
def maximum(vs: List[Int]): (Boolean, Int) =
  vs match
    case Nil ⇒ (false, 0)
    case head::rest ⇒ (true, rest.fold(head)(_ max _))
```

Например, проще логика обработки

```
def maximum(vs: List[Int]): (Boolean, Int) =
  vs match
    case Nil ⇒ (false, 0)
    case head::rest ⇒ (true, rest.fold(head)(_ max _))


// всё равно возвращается число, которым можно пользоваться,
// даже если оно не имеет смысла
```

Например, проще логика обработки

```
enum Option[+A]:                    // из стандартной библиотеки
  case None
  case Some(a: A)


def maximum(vs: List[Int]): (Boolean, Int) =
  vs match
    case Nil ⇒ (false, 0)
    case head::rest ⇒ (true, rest.fold(head)(_ max _))
```

Например, проще логика обработки

```
enum Option[+A]:                    // из стандартной библиотеки
  case None
  case Some(a: A)


def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))
```

Например, проще логика обработки

```
enum Option[+A]:                    // из стандартной библиотеки
  case None
  case Some(a: A)


def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))


// спорно? ;-)
```

Например, проще логика обработки

```
enum Option[+A]:                    // из стандартной библиотеки
  case None
  case Some(a: A)


def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))


// спорно? ;-)
// я утверждаю, что тут хорошо выражены намерения
```

Например, проще логика обработки

```
enum Option[+A]:                    // из стандартной библиотеки
  case None
  case Some(a: A)


def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))


// спорно? ;-)
// я утверждаю, что тут хорошо выражены намерения
// компилятор не даст забыть обработать особый случай
```

Например, проще логика обработки

```
enum Option[+A]:                    // из стандартной библиотеки
  case None
  case Some(a: A)


def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))


// спорно? ;-)
// я утверждаю, что тут хорошо выражены намерения
// компилятор не даст забыть обработать особый случай
// но можно и лучше
```

Например, меньше ненужных проверок

Например, меньше ненужных проверок

```scala
def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))

final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))

final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(vs: List[Int]): Option[Stat] =
  ???
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))

final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(vs: List[Int]): Option[Stat] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case _::_ ⇒
      ???
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))

final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(vs: List[Int]): Option[Stat] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case _::_ ⇒
      maximum(vs) match
        case None ⇒ ???
        case Some(ma) ⇒
          ???
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))

final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(vs: List[Int]): Option[Stat] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case _::_ ⇒
      maximum(vs) match
        case None ⇒ ??? // но мы уже знаем, что сюда не попадём
        case Some(ma) ⇒
          ???
```

Например, меньше ненужных проверок

```scala
def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))

final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(vs: List[Int]): Option[Stat] =
  maximum(vs) match
    case None ⇒ None
    case Some(ma) ⇒
      ???
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))

final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(vs: List[Int]): Option[Stat] =
  maximum(vs) match
    case None ⇒ None
    case Some(ma) ⇒
      minimum(vs) match
        case None ⇒ ???
        case Some(mi) ⇒
          ???
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))

final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(vs: List[Int]): Option[Stat] =
  maximum(vs) match
    case None ⇒ None
    case Some(ma) ⇒
      minimum(vs) match
        case None ⇒ ??? // шо, опять?!
        case Some(mi) ⇒
          ???
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))

final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(vs: List[Int]): Option[Stat] =
  for ma ← maximum(vs)
      mi ← minimum(vs)
      su ← sum(vs)
  yield Stat(mi, ma, su / vs.length.toDouble)
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: List[Int]): Option[Int] =
  vs match
    case Nil ⇒ None
    case head::rest ⇒ Some(rest.fold(head)(_ max _))

final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(vs: List[Int]): Option[Stat] =
  for ma ← maximum(vs) // тут проверка :-)
      mi ← minimum(vs) // тут проверка :-|
      su ← sum(vs)     // тут проверка :-(
  yield Stat(mi, ma, su / vs.length.toDouble)
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: NonEmptyList[Int]): Int =
  ???
```

```
final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(vs: List[Int]): Option[Stat] =
  for ma ← maximum(vs) // тут проверка :-)
      mi ← minimum(vs) // тут проверка :-|
      su ← sum(vs)     // тут проверка :-(
  yield Stat(mi, ma, su / vs.length.toDouble)
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: NonEmptyList[Int]): Int =
  ???
```

```
final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(vs: List[Int]): Option[Stat] =
  vs.toNel match
    case None ⇒ None
    case Some(ne) ⇒
      val ma = maximum(ne)
      val mi = minimum(ne)
      val su = sum(ne)
      Some(Stat(mi, ma, su / ne.length.toDouble))
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: NonEmptyList[Int]): Int =
  vs.reduceLeft(_ max _)
```

```
final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(vs: List[Int]): Option[Stat] =
  vs.toNel match
    case None ⇒ None
    case Some(ne) ⇒
      val ma = maximum(ne)
      val mi = minimum(ne)
      val su = sum(ne)
      Some(Stat(mi, ma, su / ne.length.toDouble))
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: NonEmptyList[Int]): Int =
  vs.reduceLeft(_ max _)
```

```
final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(vs: List[Int]): Option[Stat] =
  vs.toNel.map: ne ⇒
    val ma = maximum(ne)
    val mi = minimum(ne)
    val su = sum(ne)
    Stat(mi, ma, su / ne.length.toDouble)
```

Например, меньше ненужных проверок

```scala
def maximum(vs: NonEmptyList[Int]): Int =
  vs.reduceLeft(_ max _)
```

```scala
final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(ne: NonEmptyList[Int]): Stat =
  val ma = maximum(ne)
  val mi = minimum(ne)
  val su = sum(ne)
  Stat(mi, ma, su / ne.length.toDouble)
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: NonEmptyList[Int]): Int =
  vs.reduceLeft(_ max _)



final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(ne: NonEmptyList[Int]): Stat =
  val ma = maximum(ne)
  val mi = minimum(ne)
  val su = sum(ne)
  Stat(mi, ma, su / ne.length.toDouble)

// Важно: тип `NonEmptyList` объявлен так, чтобы было невозможно
// создать его значение пустым
```

Например, меньше ненужных проверок

```
def maximum(vs: NonEmptyList[Int]): Int =
  vs.reduceLeft(_ max _)



final case class Stat(min: Int, max: Int, av: Double)

def stat(ne: NonEmptyList[Int]): Stat =
  val ma = maximum(ne)
  val mi = minimum(ne)
  val su = sum(ne)
  Stat(mi, ma, su / ne.length.toDouble)

// Важно: тип `NonEmptyList` объявлен так, чтобы было невозможно
// создать его значение пустым
```

https://lexi-lambda.github.io/blog/2019/11/05/parse-don-t-validate/

Ещё о намерениях и проверках

```
int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = 0; i < 5; ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);
```

```
int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = 0; i < 5; ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);
```

```
int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < 5; ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[6]);
```

```
int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < 5; ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[6]);
```

```
a.c: In function ‘main’:
a.c:50:16: warning: ‘start’ accessing 24 bytes in a region of size 2
   50 |   for (int i = start(a); i < 5; ++i) {
      |                ^~~~~~~
```

```
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < 5; ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);
```

```
int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < 5; ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);

int f(int n, int a[n]) {


  // ...



}

int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < 5; ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);
int f(int n, int a[n]) {


  // ...



}
int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < f(5, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);
int f(int n, int a[n]) {


  // ...



}
int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < f(6, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);
int f(int n, int a[n]) {
```

```
  //
```

```
a.c: In function ‘main’:
a.c:50:30: warning: ‘f’ accessing 24 bytes in a region of size 20
   50 |   for (int i = start(a); i < f(6, a); ++i) {
      |                              ^~~~~~
```

```
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < f(6, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);
int f(int n, int a[n]) {


  // ...



}
int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < f(5, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);
int f(int n, int m, int a[n]) {


  // ...



}
int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < f(5, i, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);

int f(int n, int m, int a[n]) {
  //...
  if (m ≥ n) return a[n];
  //...



}

int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < f(5, i, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);

int f(int n, int m, int a[n]) {
  //...
  if (m ≥ n) return a[n]; // ← !!!
  //...



}

int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < f(5, i, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);

int f(int n, int m, int a[n]) {
  //...
  if (m ≥ n) return a[n]; // ← !!!
  //...
  int res = a[m];
  a[m] = 0;
  return res;
}

int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < f(5, i, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);

int f(int n, int m, int a[n]) {
  int res = a[m];
  // ...
  if (m ≥ n) return a[n]; // ← !!!
  // ...
  a[m] = 0;
  return res;
}

int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < f(5, i, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);

int f(int n, int m, int a[n]) {
  int res = a[m]; // ← !!!
  //...
  if (m ≥ n) return a[n]; // ← !!!
  //...
  a[m] = 0;
  return res;
}

int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < f(5, i, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);

int f(int n, int m, int a[n + m]) {
  int res = a[m]; // ← !!!
  //...
  if (m ≥ n) return a[n]; // ← !!!
  //...
  a[m] = 0;
  return res;
}

int main() {
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  for (int i = start(a); i < f(5, i, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);

int f(int n, int m, int a[n + m]) {
  int res = a[m]; // ← !!!
  //...
  if (m ≥ n) return a[n]; // ← !!!
  //...
  a[m] = 0;
  return res;
}

int main() {                    //     !!!
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5}; //    ↙
  for (int i = start(a); i < f(5, i, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

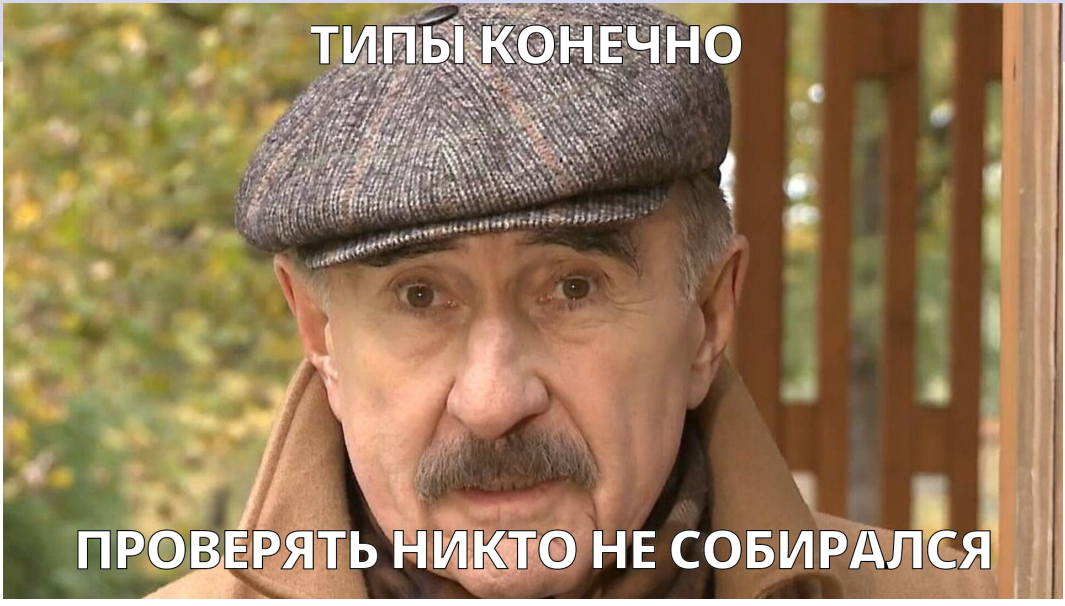
```
int start(int a[5]);

int f(int n, int m, int a[n + m]) {
  int res = a[m]; // ← !!!
  //...
  if (m ≥ n) return a[n]; // ← !!!
  //...
  a[m] = 0;
  return res;
}

int main() {                    //     !!!
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5}; //    ↙
  for (int i = start(a); i < f(5, 6, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);

int f(int n, int m, int a[n + m], int b[start(a)]) {
  int res = a[m]; // ← !!!
  //...
  if (m ≥ n) return a[n]; // ← !!!
  //...
  a[m] = 0;
  return res;
}

int main() {                        //     !!!
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5}; //    ↙
  for (int i = start(a); i < f(5, 6, a, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]);

int f(int n, int m, int a[n + m], int b[start(a)]) {
  int res = a[m]; // ← !!!
  //...
  if (m ≥ n) return a[n]; // ← !!!
  //...
  a[m] = 0;
  return res;
}

int main() {                        //     !!!    !!!
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5}; //    ↙      ↙
  for (int i = start(a); i < f(5, 6, a, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```


ТИПЫ КОНЕЧНО
ПРОВЕРЯТЬ НИКТО НЕ СОБИРАЛСЯ

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]) { /* ... */ }

int f(int n, int m, int a[n + m], int b[start(a)]) {
  int res = a[m]; // ← !!!
  //...
  if (m ≥ n) return a[n]; // ← !!!
  //...
  a[m] = 0;
  return res;
}

int main() {                        //     !!!    !!!
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5}; //    ↙      ↙
  for (int i = start(a); i < f(5, 6, a, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Ещё о намерениях и проверках

```
int start(int a[5]) { /* ...императивный код... */ }

int f(int n, int m, int a[n + m], int b[start(a)]) {
  int res = a[m]; // ← !!!
  //...
  if (m ≥ n) return a[n]; // ← !!!
  //...
  a[m] = 0;
  return res;
}

int main() {                        //     !!!    !!!
  int a[5] = {1, 2, 3, 4, 5}; //    ↙      ↙
  for (int i = start(a); i < f(5, 6, a, a); ++i) {
    printf("a[%d] = %d\n", i, a[i]);
  }
}
```

Что такое *функциональное* программирование?

Что такое *функциональное* программирование?

- В нём есть функции? ;-)

Что такое *функциональное* программирование?

- В нём есть функции? ;-)
- Что-то связанное с лямбдами?

Что такое *функциональное* программирование?

- В нём есть функции? ;-)
- Что-то связанное с лямбдами? …с *монадами*? 😳

Что такое *функциональное* программирование?

- В нём есть функции? ;-)
- Что-то связанное с лямбдами? …с *монадами*? 🤔
- Что-то заумное?

Что такое *функциональное* программирование?

- В нём есть функции? ;-)
- Что-то связанное с лямбдами? …с *монадами*? 😳
- Что-то заумное?
- Неизменяемые структуры данных?

Что такое *функциональное* программирование?

- В нём есть функции? ;-)
- Что-то связанное с лямбдами? …с *монадами*? 😳
- Что-то заумное?
- Неизменяемые структуры данных?
- Нет побочных эффектов?

Что такое *функциональное* программирование?

- В нём есть функции? ;-)
- Что-то связанное с лямбдами? …с *монадами*? 😳
- Что-то заумное?
- Неизменяемые структуры данных?
- Нет побочных эффектов?
- Функции могут принимать функции и возвращать функции?

Что такое *функциональное* программирование?

- В нём есть функции? ;-)
- Что-то связанное с лямбдами? …с *монадами*? 😳
- Что-то заумное?
- Неизменяемые структуры данных?
- Нет побочных эффектов?
- Функции могут принимать функции и возвращать функции?
- Медленное?

Что такое *функциональное* программирование?

- В нём есть функции? ;-)
- Что-то связанное с лямбдами? …с *монадами*? 😳
- Что-то заумное?
- Неизменяемые структуры данных?
- Нет побочных эффектов?
- Функции могут принимать функции и возвращать функции?
- Медленное?
- Требует много памяти?

Что такое *функциональное* программирование?

- В нём есть функции? ;-)
- Что-то связанное с лямбдами? …с *монадами*? 😳
- Что-то заумное?
- Неизменяемые структуры данных?
- Нет побочных эффектов?
- Функции могут принимать функции и возвращать функции?
- Медленное?
- Требует много памяти?
- Требует garbage collector?

Что такое *функциональное* программирование?

- В нём есть функции? ;-)
- Что-то связанное с лямбдами? …с *монадами*? 😳
- Что-то заумное?
- Неизменяемые структуры данных?
- Нет побочных эффектов?
- Функции могут принимать функции и возвращать функции?
- Медленное?
- Требует много памяти?
- Требует garbage collector?
- Нет классов, наследования?

Что такое *функциональное* программирование?

- В нём есть функции? ;-)
- Что-то связанное с лямбдами? …с *монадами*? 😳
- Что-то заумное?
- Неизменяемые структуры данных?
- Нет побочных эффектов?
- Функции могут принимать функции и возвращать функции?
- Медленное?
- Требует много памяти?
- Требует garbage collector?
- Нет классов, наследования?
- Примитивные данные?

Единственное общее

- Функции могут принимать функции и возвращать функции!

Единственное общее

- Функции высших порядков

Все ли функции одинаково полезны?

Языки с функциями высших порядков бывают...

Языки с функциями высших порядков бывают...

- нетипизированные

Языки с функциями высших порядков бывают...

- нетипизированные
- динамически типизированные

Языки с функциями высших порядков бывают...

- нетипизированные
- динамически типизированные
- слабо типизированные

Языки с функциями высших порядков бывают...

- нетипизированные
- динамически типизированные
- слабо типизированные
- объектно-ориентированные

Языки с функциями высших порядков бывают...

- нетипизированные
- динамически типизированные
- слабо типизированные
- объектно-ориентированные
- с побочными эффектами

Языки с функциями высших порядков бывают...

- нетипизированные
- динамически типизированные
- слабо типизированные
- объектно-ориентированные
- с побочными эффектами
- даже неисполнимые
- ...

Языки с функциями высших порядков бывают...

- нетипизированные
- динамически типизированные
- слабо типизированные
- объектно-ориентированные
- с побочными эффектами
- даже неисполнимые
- ...

- хорошо, что не все они такие ;-)

Языки с функциями высших порядков бывают...

- нетипизированные
- динамически типизированные
- слабо типизированные
- объектно-ориентированные
- с побочными эффектами
- даже неисполнимые
- ...

- хорошо, что не все они такие ;-)
- нам сейчас важны только

Языки с функциями высших порядков бывают...

- нетипизированные
- динамически типизированные
- слабо типизированные
- объектно-ориентированные
- с побочными эффектами
- даже неисполнимые
- ...

- хорошо, что не все они такие ;-)
- нам сейчас важны только
  - выразительность системы типов

Языки с функциями высших порядков бывают...

- нетипизированные
- динамически типизированные
- слабо типизированные
- объектно-ориентированные
- с побочными эффектами
- даже неисполнимые
- ...

- хорошо, что не все они такие ;-)
- нам сейчас важны только
  - выразительность системы типов
  - безопасность, анализируемость

Языки с функциями высших порядков бывают...

- нетипизированные
- динамически типизированные
- слабо типизированные
- объектно-ориентированные
- с побочными эффектами
- даже неисполнимые
- ...

- хорошо, что не все они такие ;-)
- нам сейчас важны только
  - выразительность системы типов
  - безопасность, анализируемость
  - как следствие
    - статическая и сильная типизация

Языки с функциями высших порядков бывают...

- нетипизированные
- динамически типизированные
- слабо типизированные
- объектно-ориентированные
- с побочными эффектами
- даже неисполнимые
- ...

- хорошо, что не все они такие ;-)
- нам сейчас важны только
  - выразительность системы типов
  - безопасность, анализируемость
  - как следствие
    - статическая и сильная типизация
    - *чистота*[a], *ссылочная прозрачность*[b]

---

[a] pure functional programming

[b] referential transparency

Ссылочная прозрачность

```
someVal : Nat
someVal = 5
```

Ссылочная прозрачность

```
someVal : Nat
someVal = 5

someFun : Nat → Nat
someFun x = product [1..someVal] + x
```

Ссылочная прозрачность

```
someVal : Nat
someVal = 5

someFun : Nat -> Nat
someFun x = product [1..someVal] + x

anotherFun : Nat -> Nat -> IO ()
anotherFun x y = do
  let n = someFun x
  let m = someFun y
  let xs = List.replicate (n + n) m
  printLn xs
```

Ссылочная прозрачность[1]

```
someVal : Nat
someVal = 5

someFun : Nat -> Nat
someFun x = product [1..someVal] + x

anotherFun : Nat -> Nat -> IO ()
anotherFun x y = do
  let n = someFun x
  let m = someFun y
  let xs = List.replicate (n + n) m
  printLn xs
```

[1] *Любое* вхождение *любой* переменной можно заменить на её значение без влияния на результат

Ссылочная прозрачность[1]

```
someVal : Nat
someVal = 5

someFun : Nat → Nat
someFun x = product [1..someVal] + x

anotherFun : Nat → Nat → IO ()
anotherFun x y = do
  let n = someFun x
  let m = someFun y
  printLn $ List.replicate (n + n) m
```

[1] *Любое* вхождение *любой* переменной можно заменить на её значение без влияния на результат

Ссылочная прозрачность[1]

```
someVal : Nat
someVal = 5

someFun : Nat → Nat
someFun x = product [1..5] + x

anotherFun : Nat → Nat → IO ()
anotherFun x y = do
  let n = someFun x
  let m = someFun y
  printLn $ List.replicate (n + n) m
```

[1] *Любое* вхождение *любой* переменной можно заменить на её значение без влияния на результат

Ссылочная прозрачность[1]

```
someVal : Nat
someVal = 5

someFun : Nat → Nat
someFun x = product [1..someVal] + x

anotherFun : Nat → Nat → IO ()
anotherFun x y = do
  let n = someFun x
  let m = someFun y
  printLn $ List.replicate (n + n) m
```

[1] *Любое* вхождение *любой* переменной можно заменить на её значение без влияния на результат

Ссылочная прозрачность[1]

```
someVal : Nat
someVal = 5

someFun : Nat -> Nat
someFun x = product [1..someVal] + x

anotherFun : Nat -> Nat -> IO ()
anotherFun x y = do
  --let n = someFun x
  let m = someFun y
  printLn $ List.replicate (someFun x + someFun x) m
```

[1] *Любое* вхождение *любой* переменной можно заменить на её значение без влияния на результат

Ссылочная прозрачность[1]

```
someVal : Nat
someVal = 5

someFun : Nat → Nat
someFun x = product [1..someVal] + x

anotherFun : Nat → Nat → IO ()
anotherFun x y = do
  --let n = someFun x
  let m = someFun y
  printLn $ List.replicate (someFun x + someFun x) m
  -- три вызова `someFun` Вместо двух! O_O
```

[1] *Любое* вхождение *любой* переменной можно заменить на её значение без влияния на результат

Ссылочная прозрачность[1]

```
someVal : Nat
someVal = 5

someFun : Nat -> Nat
someFun x = product [1..someVal] + x

anotherFun : Nat -> Nat -> IO ()
anotherFun x y = do
  --let n = someFun x
  let m = someFun y
  printLn $ List.replicate (someFun x + someFun x) m
```

[1] *Любое* вхождение *любой* переменной можно заменить на её значение без влияния на результат

Ссылочная прозрачность[1]

```
someVal : Nat
someVal = 5

someFun : Nat → Nat
someFun x = product [1..someVal] + x

anotherFun : Nat → Nat → IO ()
anotherFun x y = do
  --let n = someFun x
  let m = product [1..5] + y
  printLn $
    List.replicate ((product [1..someVal] + x) + someFun x) m
```

[1] *Любое* вхождение *любой* переменной можно заменить на её значение без влияния на результат

Ссылочная прозрачность[1]

```
someVal : Nat
someVal = 5

someFun : Nat → Nat
someFun x = product [1..someVal] + x

anotherFun : Nat → Nat → IO ()
anotherFun x y = do
  --let n = someFun x
  let m = product [1..5] + y
  printLn $
    List.replicate ((product [1..5] + x) + (product [1..5] + x)) m
```

[1] *Любое* вхождение *любой* переменной можно заменить на её значение без влияния на результат

Ссылочная прозрачность[1]

```
someVal : Nat
someVal = 5

someFun : Nat → Nat
someFun x = product [1..someVal] + x

anotherFun : Nat → Nat → IO ()
anotherFun x y = do
  let cse0 = product [1..5]
  let cse1 = cse0 + x
  printLn $ List.replicate (cse1 + cse1) (cse0 + y)
```

[1] *Любое* вхождение *любой* переменной можно заменить на её значение без влияния на результат

Проверки и безопасность

```
index : List a -> (idx : Nat) -> a
```

Проверки и безопасность

```
index : List a -> (idx : Nat) -> Maybe a
```

Проверки и безопасность

```
index : List a -> ((idx : Nat) -> Maybe a)
```

Проверки и безопасность

```
index : List a -> (idx : Nat) -> Maybe a
```

Проверки и безопасность

```
index : List a -> (idx : Fin ?len) -> a
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin ?len) -> a
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) → (idx : Fin (length xs)) → a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5
```

```
Error: While processing right hand side of y. Can't find an implementation
       for So (integerLessThanNat 5 (length [1, 2, 3, 4, 5])).

Main:264:27—264:28
 260 | index : (xs : List a) → (idx : Fin (length xs)) → a
 261 |
 262 | third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
 263 | fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5
                                   ^
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5

findFrom : (xs : List Int) -> Int -> (idx : Fin (length xs)) -> Bool
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5

findFrom : (xs : List Int) -> Int -> (idx : Fin (length xs)) -> Bool
findFrom xs elem idx =
  if index xs idx == elem
    then True
    else ?go_forward
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5

findFrom : (xs : List Int) -> Int -> (idx : Fin (length xs)) -> Bool
findFrom xs elem idx =
  if index xs idx == elem
    then True
    else findFrom xs elem (FS idx)
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
```

```
Error: While processing right hand side of findFrom.
       Can't solve constraint between: S (length xs) and length xs.

Main:352:28--352:34
 348 |           Int -> (idx : Fin (length xs)) -> Bool
 349 | findFrom xs elem idx =
 350 |   if index xs idx == elem
 351 |     then True
 352 |     else findFrom xs elem (FS idx)
                                 ^^^^^^
```

Bool

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5

findFrom : (xs : List Int) -> Int -> (idx : Fin (length xs)) -> Bool
findFrom xs elem idx =
  if index xs idx == elem
    then True
    else findFrom xs elem (FS idx)
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5

findFrom : (xs : List Int) -> Int -> (idx : Fin (length xs)) -> Bool
findFrom xs elem idx =
  if index xs idx == elem
    then True
    else let idx' = FS idx in
         ?with_next_idx
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a
```

```
    xs : List Int
    idx : Fin (length xs)
    elem : Int
    idx' : Fin (S (length xs))
  ------------------------------
  have_next_idx : Bool
```

```
Bool
findFrom xs elem idx =
  if index xs idx == elem
    then True
    else let idx' = FS idx in
         ?with_next_idx
```

Проверки и безопасность

```
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5

findFrom : (xs : List Int) -> Int -> (idx : Fin (length xs)) -> Bool
findFrom xs elem idx =
  if index xs idx == elem
    then True
    else let idx' = FS idx in
         ?with_next_idx
```

Проверки и безопасность

```
strengthen : Fin (S n) -> Maybe (Fin n)
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5

findFrom : (xs : List Int) -> Int -> (idx : Fin (length xs)) -> Bool
findFrom xs elem idx =
  if index xs idx == elem
    then True
    else let idx' = FS idx in
         ?with_next_idx
```

Проверки и безопасность

```
strengthen : Fin (S n) -> Maybe (Fin n)
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5

findFrom : (xs : List Int) -> Int -> (idx : Fin (length xs)) -> Bool
findFrom xs elem idx =
  if index xs idx == elem
    then True
    else case strengthen (FS idx) of
      Nothing   => False
      Just idx' => ?with_next_idx
```

Проверки и безопасность

```
strengthen : Fin (S n) -> Maybe (Fin n)
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a
```

```
    xs : List Int
    idx : Fin (length xs)
    elem : Int
    idx' : Fin (length xs)
 ------------------------------
  have_next_idx : Bool
```

```
Bool
findFrom xs elem idx =
  if index xs idx == elem
    then True
    else case strengthen (FS idx) of
      Nothing   => False
      Just idx' => ?with_next_idx
```

Проверки и безопасность

```
strengthen : Fin (S n) -> Maybe (Fin n)
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5

findFrom : (xs : List Int) -> Int -> (idx : Fin (length xs)) -> Bool
findFrom xs elem idx =
  if index xs idx == elem
    then True
    else case strengthen (FS idx) of
      Nothing   => False
      Just idx' => ?with_next_idx
```

Проверки и безопасность

```
strengthen : Fin (S n) -> Maybe (Fin n)
index : (xs : List a) -> (idx : Fin (length xs)) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5

findFrom : (xs : List Int) -> Int -> (idx : Fin (length xs)) -> Bool
findFrom xs elem idx =
  if index xs idx == elem
    then True
    else case strengthen (FS idx) of
      Nothing   => False
      Just idx' => findFrom xs elem idx'
```

Проверки и безопасность

```
strengthen : Fin (S n) -> Maybe (Fin n)
index : Vect n a -> (idx : Fin n) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5

findFrom : {n : _} -> Vect n Int -> Int -> (idx : Fin n) -> Bool
findFrom xs elem idx =
  if index xs idx == elem
    then True
    else case strengthen (FS idx) of
      Nothing   => False
      Just idx' => findFrom xs elem idx'
```

Проверки и безопасность

```
strengthen : Fin (S n) -> Maybe (Fin n)
index : Vect n a -> (idx : Fin n) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5

findFrom : {n : _} -> Vect n Int -> Int -> (idx : Fin n) -> Bool
findFrom xs elem idx =
  if index xs idx == elem                    —
    then True                                —  ↖
    else case strengthen (FS idx) of         —  ←  WTF???
      Nothing   => False                     —  ↙
      Just idx' => findFrom xs elem idx'     —
```

Проверки и безопасность

```
strengthen : Fin (S n) -> Maybe (Fin n)
index : Vect n a -> (idx : Fin n) -> a

third = index [1, 2, 3, 4, 5] 3
failing "Can't find an implementation"
  fifth = index [1, 2, 3, 4, 5] 5

findFrom : Vect n Int -> Int -> (idx : Fin n) -> Bool
findFrom xs      elem FZ     = any (== elem) xs
findFrom (_::xs) elem (FS i) = findFrom xs elem i
```

Больше намерений

```
data Vect : (length : Nat) -> Type -> Type where
  Nil  : Vect 0 a
  (::) : a -> Vect n a -> Vect (1 + n) a
```

Больше намерений

```
data Vect : (length : Nat) -> Type -> Type where
  Nil  : Vect 0 a
  (::) : a -> Vect n a -> Vect (1 + n) a

data BalancedTree : (depth : Nat) -> Type -> Type where
```

Больше намерений

```
data Vect : (length : Nat) -> Type -> Type where
  Nil  : Vect 0 a
  (::) : a -> Vect n a -> Vect (1 + n) a
```

```
data BalancedTree : (depth : Nat) -> Type -> Type where
  Leaf : a -> BalancedTree 1 a
```

Больше намерений

```
data Vect : (length : Nat) -> Type -> Type where
  Nil  : Vect 0 a
  (::) : a -> Vect n a -> Vect (1 + n) a
```

```
data BalancedTree : (depth : Nat) -> Type -> Type where
  Leaf : a -> BalancedTree 1 a
  Node : (left, right : BalancedTree n a) -> BalancedTree (1 + n) a
```

Больше намерений

```
data Vect : (length : Nat) -> Type -> Type where
  Nil  : Vect 0 a
  (::) : a -> Vect n a -> Vect (1 + n) a
```

```
data BalancedTree : (depth : Nat) -> Type -> Type where
  Leaf : a -> BalancedTree 1 a
  Node : (left, right : BalancedTree n a) -> BalancedTree (1 + n) a
```

```
data IntsTree : (minD, maxD : Nat) -> (sum : Int) -> Type where
```

Больше намерений

```
data Vect : (length : Nat) -> Type -> Type where
  Nil  : Vect 0 a
  (::) : a -> Vect n a -> Vect (1 + n) a
```

```
data BalancedTree : (depth : Nat) -> Type -> Type where
  Leaf : a -> BalancedTree 1 a
  Node : (left, right : BalancedTree n a) -> BalancedTree (1 + n) a
```

```
data IntsTree : (minD, maxD : Nat) -> (sum : Int) -> Type where
  Leaf : (n : Int) -> IntsTree 1 1 n
```

Больше намерений

```
data Vect : (length : Nat) -> Type -> Type where
  Nil  : Vect 0 a
  (::) : a -> Vect n a -> Vect (1 + n) a
```

```
data BalancedTree : (depth : Nat) -> Type -> Type where
  Leaf : a -> BalancedTree 1 a
  Node : (left, right : BalancedTree n a) -> BalancedTree (1 + n) a
```

```
data IntsTree : (minD, maxD : Nat) -> (sum : Int) -> Type where
  Leaf : (n : Int) -> IntsTree 1 1 n
  Node : (left  : IntsTree ldmi ldma ls) ->
         (right : IntsTree rdmi rdma rs) ->
```

Больше намерений

```
data Vect : (length : Nat) -> Type -> Type where
  Nil  : Vect 0 a
  (::) : a -> Vect n a -> Vect (1 + n) a
```

```
data BalancedTree : (depth : Nat) -> Type -> Type where
  Leaf : a -> BalancedTree 1 a
  Node : (left, right : BalancedTree n a) -> BalancedTree (1 + n) a
```

```
data IntsTree : (minD, maxD : Nat) -> (sum : Int) -> Type where
  Leaf : (n : Int) -> IntsTree 1 1 n
  Node : (left  : IntsTree ldmi ldma ls) ->
         (right : IntsTree rdmi rdma rs) ->
         IntsTree (ldmi `min` rdmi) (ldma `max` rdma) (n + m)
```

Рассуждать про списки?

Рассуждать про списки?

```
data Has : List a → a → Type where
```

Рассуждать про списки?

```
data Has : List a → a → Type where
  Here  : x::xs `Has` x
```

Рассуждать про списки?

```
data Has : List a → a → Type where
  Here  : x::xs `Has` x
  There : xs `Has` e → x::xs `Has` e
```

Рассуждать про списки?

```
data Has : List a → a → Type where
  Here  : x::xs `Has` x
  There : xs `Has` e → x::xs `Has` e

data ListWith5 : Type where
  With5 : (xs : List Nat) → xs `Has` 5 ⇒ ListWith5
```

Рассуждать про списки?

```
data Has : List a → a → Type where
  Here  : x::xs `Has` x
  There : xs `Has` e → x::xs `Has` e

data ListWith5 : Type where
  With5 : (xs : List Nat) → xs `Has` 5 ⇒ ListWith5

good = With5 [1, 2, 3, 4, 5]
```

Рассуждать про списки?

```
data Has : List a → a → Type where
  Here  : x::xs `Has` x
  There : xs `Has` e → x::xs `Has` e

data ListWith5 : Type where
  With5 : (xs : List Nat) → xs `Has` 5 ⇒ ListWith5

good = With5 [1, 2, 3, 4, 5]

failing "Can't find an implementation for Has [1, 2, 3, 4, 6] 5"
  bad = With5 [1, 2, 3, 4, 6]
```

Рассуждать про списки?

```
data LT : Nat → Nat → Type where
  LTZero : 0 `LT` 1 + n
  LTSucc : n `LT` m → 1 + n `LT` 1 + m

data Has : List a → a → Type where
  Here  : x::xs `Has` x
  There : xs `Has` e → x::xs `Has` e

data ListWith5 : Type where
  With5 : (xs : List Nat) → xs `Has` 5 ⇒ ListWith5

good = With5 [1, 2, 3, 4, 5]

failing "Can't find an implementation for Has [1, 2, 3, 4, 6] 5"
  bad = With5 [1, 2, 3, 4, 6]
```

Рассуждать про списки?

```
data LT : Nat → Nat → Type where
  LTZero : 0 `LT` 1 + n
  LTSucc : n `LT` m → 1 + n `LT` 1 + m

data HasLT : List Nat → Nat → Type where
  Here  : x `LT` e → x::xs `HasLT` e
  There : xs `HasLT` e → x::xs `HasLT` e

data ListWithLT5 : Type where
  WithLT5 : (xs : List Nat) → xs `HasLT` 5 ⇒ ListWithLT5

good = WithLT5 [1, 2, 3, 4, 5]

failing "Can't find an implementation for HasLT [6, 7, 8, 9] 5"
  bad = WithLT5 [6, 7, 8, 9]
```

Списки

```
data NList : Type where
  Nil  : NList
  (::) : Nat → NList → NList
```

Списки

```
data NList : Type where
  Nil  : NList
  (::) : Nat → NList → NList

actuallySorted : NList
actuallySorted = 1 :: 2 :: 5 :: 9 :: Nil
```

Списки

```
data NList : Type where
  Nil  : NList
  (::) : Nat → NList → NList

actuallySorted : NList
actuallySorted = 1 :: 2 :: 5 :: 9 :: Nil

unsorted : NList
unsorted = 1 :: 5 :: 2 :: 9 :: 1 :: Nil
```

Списки сортированные?

```
data NList : Type where
  Nil  : NList
  (::) : Nat → NList → NList
```

Списки сортированные?

```
data SortNList : Type where
  Nil  : SortNList
  (::) : Nat → SortNList → SortNList
```

Списки сортированные?

```
data SortNList : Type where
  Nil  : SortNList
  (::) : Nat → SortNList → SortNList
         -- число должно быть меньше головы субсписка (если есть)
```

Списки сортированные?

```
data SortNList : Type where
  Nil  : SortNList
  (::) : (x : Nat) → (xs : SortNList) → SortNList
         -- число должно быть меньше головы субсписка (если есть)
```

Списки сортированные?

```
data SortNList : Type where
  Nil  : SortNList
  (::) : (x : Nat) → (xs : SortNList) → SortNList
         -- `x` должна быть меньше головы `xs` (если есть)
```

Списки сортированные!

```
data SortNList : Type where
  Nil  : SortNList
  (::) : (x : Nat) → (xs : SortNList) → SortNList
         -- `x` должна быть меньше головы `xs` (если есть)

data LTHead : Nat → SortNList → Type where
  E  : LTHead n []
  NE : n `LT` x → LTHead n (x::xs)
```

Списки сортированные!

```
data SortNList : Type where
  Nil  : SortNList
  (::) : (x : Nat) → (xs : SortNList) → LTHead x xs ⇒ SortNList
         -- `x` должна быть меньше головы `xs` (если есть)

data LTHead : Nat → SortNList → Type where
  E  : LTHead n []
  NE : n `LT` x → LTHead n $ (x::xs) @{prf}
```

Списки сортированные!

```
data SortNList : Type where
  Nil  : SortNList
  (::) : (x : Nat) → (xs : SortNList) → LTHead x xs ⇒ SortNList

data LTHead : Nat → SortNList → Type where
  E  : LTHead n []
  NE : n `LT` x → LTHead n $ (x::xs) @{prf}
```

Списки сортированные!

```
data SortNList : Type where
  Nil  : SortNList
  (::) : (x : Nat) → (xs : SortNList) → LTHead x xs ⇒ SortNList

data LTHead : Nat → SortNList → Type where
  E  : LTHead n []
  NE : n `LT` x → LTHead n $ (x::xs) @{prf}

actuallySorted : SortNList
actuallySorted = 1 :: 2 :: 5 :: 9 :: Nil
```

Списки сортированные!

```
data SortNList : Type where
  Nil  : SortNList
  (::) : (x : Nat) → (xs : SortNList) → LTHead x xs ⇒ SortNList

data LTHead : Nat → SortNList → Type where
  E  : LTHead n []
  NE : n `LT` x → LTHead n $ (x::xs) @{prf}

actuallySorted : SortNList
actuallySorted = 1 :: 2 :: 5 :: 9 :: Nil

failing "Can't find an implementation for LTHead"
  unsorted : SortNList
  unsorted = 1 :: 5 :: 2 :: 9 :: 1 :: Nil
```

Списки сортированные!

```
data SortNList : Type where
  Nil  : SortNList
  (::) : (x : Nat) → (xs : SortNList) → LTHead x xs ⇒ SortNList

data LTHead : Nat → SortNList → Type where
  E  : LTHead n []
  NE : n `LT` x → LTHead n $ (x::xs) @{prf}

arbitrarySortNList : Gen SortNList
```

Списки сортированные!

```
data SortNList : Type where
  Nil  : SortNList
  (::) : (x : Nat) → (xs : SortNList) → LTHead x xs ⇒ SortNList

data LTHead : Nat → SortNList → Type where
  E  : LTHead n []
  NE : n `LT` x → LTHead n $ (x::xs) @{prf}

arbitrarySortNList : Fuel → Gen MaybeEmpty SortNList
```

Списки сортированные!

```
data SortNList : Type where
  Nil  : SortNList
  (::) : (x : Nat) → (xs : SortNList) → LTHead x xs ⇒ SortNList

data LTHead : Nat → SortNList → Type where
  E  : LTHead n []
  NE : n `LT` x → LTHead n $ (x::xs) @{prf}

arbitrarySortNList : Fuel → Gen MaybeEmpty SortNList
arbitrarySortNList = deriveGen
```

Списки сортированные!

```
data SortNList : Type where
  Nil  : SortNList
  (::) : (x : Nat) -> (xs : SortNList) -> LTHead x xs => SortNList

data LTHead : Nat -> SortNList -> Type where
  E  : LTHead n []
  NE : n `LT` x -> LTHead n $ (x::xs) @{prf}

arbitrarySortNList : Fuel -> Gen MaybeEmpty SortNList
arbitrarySortNList = deriveGen
__                  ^^^^^^^^^
__                      \
__                       ---- DepTyCheck
```

Соединяем всё вместе

Соединяем всё вместе

```
data SortNList : Type
```

Соединяем всё вместе

```
data SortNList : Type

arbitrarySortNList : Fuel → Gen MaybeEmpty SortNList
arbitrarySortNList = deriveGen
```

Соединяем всё вместе

```
data SortNList : Type

arbitrarySortNList : Fuel -> Gen MaybeEmpty SortNList
arbitrarySortNList = deriveGen

toList : SortNList -> List Nat
```

Соединяем всё вместе

```
data SortNList : Type

arbitrarySortNList : Fuel -> Gen MaybeEmpty SortNList
arbitrarySortNList = deriveGen

toList : SortNList -> List Nat

insertOk : Property
insertOk = property $ \fl => do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll $ toList <$> arbitrarySortNList fl
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Соединяем всё вместе

```
-- Декларативная спецификация модельных входных данных
data SortNList : Type


arbitrarySortNList : Fuel -> Gen MaybeEmpty SortNList
arbitrarySortNList = deriveGen


toList : SortNList -> List Nat


insertOk : Property
insertOk = property $ \fl => do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll $ toList <$> arbitrarySortNList fl
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Соединяем всё вместе

```
-- Декларативная спецификация модельных входных данных
data SortNList : Type

-- Сдеривированный полный генератор
arbitrarySortNList : Fuel -> Gen MaybeEmpty SortNList
arbitrarySortNList = deriveGen


toList : SortNList -> List Nat


insertOk : Property
insertOk = property $ \fl => do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll $ toList <$> arbitrarySortNList fl
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Соединяем всё вместе

```
-- Декларативная спецификация модельных входных данных
data SortNList : Type

-- Сдеривированный полный генератор + хорошие распределения
arbitrarySortNList : Fuel -> Gen MaybeEmpty SortNList
arbitrarySortNList = deriveGen


toList : SortNList -> List Nat


insertOk : Property
insertOk = property $ \fl => do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll $ toList <$> arbitrarySortNList fl
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Соединяем всё вместе

```
-- Декларативная спецификация модельных входных данных
data SortNList : Type

-- Сдеривированный полный генератор + хорошие распределения
arbitrarySortNList : Fuel -> Gen MaybeEmpty SortNList
arbitrarySortNList = deriveGen

-- Преобразователь в целевые входные данные
toList : SortNList -> List Nat


insertOk : Property
insertOk = property $ \fl => do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll $ toList <$> arbitrarySortNList fl
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Соединяем всё вместе

```
-- Декларативная спецификация модельных входных данных
data SortNList : Type

-- Сдеривированный полный генератор + хорошие распределения
arbitrarySortNList : Fuel -> Gen MaybeEmpty SortNList
arbitrarySortNList = deriveGen

-- Преобразователь в целевые входные данные
toList : SortNList -> List Nat

-- Тестируемое свойство
insertOk : Property
insertOk = property $ \fl => do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll $ toList <$> arbitrarySortNList fl
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Соединяем всё вместе

```
-- Декларативная спецификация (не обязательно полная!)
data SortNList : Type

-- Сдеривированный полный генератор + хорошие распределения
arbitrarySortNList : Fuel -> Gen MaybeEmpty SortNList
arbitrarySortNList = deriveGen

-- Преобразователь в целевые входные данные
toList : SortNList -> List Nat

-- Тестируемое свойство
insertOk : Property
insertOk = property $ \fl => do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll $ toList <$> arbitrarySortNList fl
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Соединяем всё вместе

```
-- Декларативная спецификация (не обязательно полная!)
data SortNList : Type

-- Сдеривированный полный генератор + хорошие распределения
arbitrarySortNList : Fuel -> Gen MaybeEmpty SortNList
arbitrarySortNList = deriveGen

-- Преобразователь в целевые входные данные
toList : SortNList -> List Nat

-- Тестируемое свойство (не обязательно полное!)
insertOk : Property
insertOk = property $ \fl => do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll $ toList <$> arbitrarySortNList fl
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

Dependent types-driven property-based testing

```
-- Декларативная спецификация (не обязательно полная!)
data SortNList : Type

-- Сдеривированный полный генератор + хорошие распределения
arbitrarySortNList : Fuel -> Gen MaybeEmpty SortNList
arbitrarySortNList = deriveGen

-- Преобразователь в целевые входные данные
toList : SortNList -> List Nat

-- Тестируемое свойство (не обязательно полное!)
insertOk : Property
insertOk = property $ \fl => do
  x  <- forAll arbitraryNat
  xs <- forAll $ toList <$> arbitrarySortNList fl
  assert $ sorted $ insert x xs
  assert $ x `elem` insert x xs
```

```
-- Декл
data So

-- Сдер                                                    я
arbitra
arbitra

-- Прес
toList

-- Тест
insertO
insertO
  x  <-
  xs <-
  asser
  asser
```

Когда стоит?

Когда стоит?

- Описать проще, чем сгенерировать

Когда стоит?

- Описать проще, чем сгенерировать
- Входные данные со сложным *инвариантом*

Когда стоит?

- Описать проще, чем сгенерировать
- Входные данные со сложным *инвариантом*
- Входных данных безумно много

Когда стоит?

- Описать проще, чем сгенерировать
- Входные данные со сложным *инвариантом*
- Входных данных безумно много
- Очень много (относительно) независимых сочетаний

Ну, например?

- Описать проще, чем сгенерировать
- Входные данные со сложным *инвариантом*
- Входных данных безумно много
- Очень много (относительно) независимых сочетаний

Ну, например?

- Описать проще, чем сгенерировать
- Входные данные со сложным *инвариантом*
- Входных данных безумно много
- Очень много (относительно) независимых сочетаний
- Языки программирования?

Ну, например?

- Описать проще, чем сгенерировать
- Входные данные со сложным *инвариантом*
- Входных данных безумно много
- Очень много (относительно) независимых сочетаний
- Семантически корректные программы на языке программирования?

Как это можно специфицировать

Как это можно специфицировать

```
data Stmts : (functions  : List (Name, FunSig)) →
             (varsBefore : List (Name, Type)) →
             (varsAfter  : List (Name, Type)) → Type where
```

Как это можно специфицировать

```
data Stmts : (functions  : List (Name, FunSig)) ->
             (varsBefore : List (Name, Type)) ->
             (varsAfter  : List (Name, Type)) -> Type where

  (.)  : (ty : Type) -> (n : Name) ->
         Stmts funs vars ((n, ty)::vars)
```

Как это можно специфицировать

```
data Stmts : (functions  : List (Name, FunSig)) →
             (varsBefore : List (Name, Type)) →
             (varsAfter  : List (Name, Type)) → Type where

  (.)  : (ty : Type) → (n : Name) →
         Stmts funs vars ((n, ty)::vars)

  (#=) : (n : Name) → (lk : n `IsIn` vars) ⇒
         (v : Expr funs vars (found lk)) →
         Stmts funs vars vars
```

Как это можно специфицировать

```
data Stmts : (functions  : List (Name, FunSig)) →
             (varsBefore : List (Name, Type)) →
             (varsAfter  : List (Name, Type)) → Type where

  (.)  : (ty : Type) → (n : Name) →
         Stmts funs vars ((n, ty)::vars)

  (#=) : (n : Name) → (lk : n `IsIn` vars) ⇒
         (v : Expr funs vars (found lk)) →
         Stmts funs vars vars

  If   : (cond : Expr funs vars Bool) →
         Stmts funs vars vThen → Stmts funs vars vElse →
         Stmts funs vars vars
```

Как это можно специфицировать

```
data Stmts : (functions  : List (Name, FunSig)) ->
             (varsBefore : List (Name, Type)) ->
             (varsAfter  : List (Name, Type)) -> Type where

  (.)  : (ty : Type) -> (n : Name) ->
         Stmts funs vars ((n, ty)::vars)

  (#=) : (n : Name) -> (lk : n `IsIn` vars) =>
         (v : Expr funs vars (found lk)) ->
         Stmts funs vars vars

  If   : (cond : Expr funs vars Bool) ->
         Stmts funs vars vThen -> Stmts funs vars vElse ->
         Stmts funs vars vars

  (>>) : Stmts funs preV midV  -> Stmts funs midV postV ->
         Stmts funs preV postV
```

Как это можно специфицировать

```
record FunSig where
  constructor (⟹)
  From : List Type
  To   : Type


data Expr : List (Name, FunSig) → List (Name, Type) →
            Type → Type where

  C : (x : ty) → Expr funs vars ty

  V : (n : Name) → (lk : n `IsIn` vars) ⇒
      Expr funs vars (found lk)

  F : (n : Name) → (lk : n `IsIn` funs) ⇒
      All (Expr funs vars) (found lk).From →
      Expr funs vars (found lk).To
```

Заметим ортогональность, относительную независимость

```
record FunSig where
  constructor (⟹)
  From : List Type
  To   : Type


data Expr : List (Name, FunSig) → List (Name, Type) →
            Type → Type where

  C : (x : ty) → Expr funs vars ty

  V : (n : Name) → (lk : n `IsIn` vars) ⇒
      Expr funs vars (found lk)

  F : (n : Name) → (lk : n `IsIn` funs) ⇒
      All (Expr funs vars) (found lk).From →
      Expr funs vars (found lk).To
```

Семантически корректные программы

```
StdF : List (Name, FunSig)
StdF = [ ("+" , [Int, Int] ⟹ Int)
       , ("<" , [Int, Int] ⟹ Bool)
       , ("++", [Int] ⟹ Int)
       , ("||", [Bool, Bool] ⟹ Bool) ]
```

Семантически корректные программы

```
StdF : List (Name, FunSig)
StdF = [ ("+" , [Int, Int] ⟹ Int)
       , ("<" , [Int, Int] ⟹ Bool)
       , ("++", [Int] ⟹ Int)
       , ("||", [Bool, Bool] ⟹ Bool) ]
```

```
program : Stmts StdF [] ?
program = do
  Int. "x"
  "x" #= C 5
  Int. "y"; Bool. "res"
  "y" #= F "+" [V "x", C 1]
```

Семантически корректные программы

```
StdF : List (Name, FunSig)
StdF = [ ("+" , [Int, Int] ⟹ Int)
       , ("<" , [Int, Int] ⟹ Bool)
       , ("++", [Int] ⟹ Int)
       , ("||", [Bool, Bool] ⟹ Bool) ]
```

```
program : Stmts StdF [] ?
program = do
  Int. "x"
  "x" #= C 5
  Int. "y"; Bool. "res"
  "y" #= F "+" [V "x", C 1]
  If (F "<" [F "++" [V "x"], V "y"])
     (do "y" #= C 0; "res" #= C False)
     (do Int. "z"; "z" #= F "+" [V "x", V "y"]
         Bool. "b"; "b" #= F "<" [V "x", C 5]
         "res" #= F "||" [V "b", F "<" [V "z", C 6]])
```

Семантически некорректные программы

Семантически некорректные программы

```
failing "Mismatch between: Int and Bool"
  bad : Stmts StdF [] ?
  bad = do
    Int. "x"; "x" #= C 5
    Bool. "y"; "y" #= F "+" [V "x", C 1]
```

Семантически некорректные программы

```
failing "Mismatch between: Int and Bool"
  bad : Stmts StdF [] ?
  bad = do
    Int. "x"; "x" #= C 5
    Bool. "y"; "y" #= F "+" [V "x", C 1]

failing "Mismatch between: [] and [Int]"
  bad : Stmts StdF [] ?
  bad = do
    Int. "x"; "x" #= C 5
    Int. "y"; "y" #= F "+" [V "x"]
```

Семантически некорректные программы

```
failing "Mismatch between: Int and Bool"
  bad : Stmts StdF [] ?
  bad = do
    Int. "x"; "x" #= C 5
    Bool. "y"; "y" #= F "+" [V "x", C 1]

failing "Mismatch between: [] and [Int]"
  bad : Stmts StdF [] ?
  bad = do
    Int. "x"; "x" #= C 5
    Int. "y"; "y" #= F "+" [V "x"]

failing "Mismatch between: Bool and Int"
  bad : Stmts StdF [] ?
  bad = do
    Int. "x"; "x" #= C 5
    Int. "y"; "y" #= F "+" [C True, V "x"]
```

Например

Например

- *Одна крупная IT компания с Востока...*

Например

- *Одна крупная IT компания с Востока...*
- Диалект Typescript со статической проверкой типов

Например

- *Одна крупная IT компания с Востока...*
- Диалект Typescript со статической проверкой типов
- Имеет интерпретатор с JIT и компилятор

Например

- *Одна крупная IT компания с Востока...*
- Диалект Typescript со статической проверкой типов
- Имеет интерпретатор с JIT и компилятор
- Свойства

Например

- *Одна крупная IT компания с Востока...*
- Диалект Typescript со статической проверкой типов
- Имеет интерпретатор с JIT и компилятор
- Свойства
  - семантически корректные программы должны компилироваться

Например

- *Одна крупная IT компания с Востока...*
- Диалект Typescript со статической проверкой типов
- Имеет интерпретатор с JIT и компилятор
- Свойства
  - семантически корректные программы должны компилироваться
  - среди них завершающиеся программы должны запускаться без неожиданных падений и зацикливаний

Например

- *Одна крупная IT компания с Востока...*
- Диалект Typescript со статической проверкой типов
- Имеет интерпретатор с JIT и компилятор
- Свойства
  - семантически корректные программы должны компилироваться
  - среди них завершающиеся программы должны запускаться без неожиданных падений и зацикливаний
  - все варианты запуска должны выдавать одинаковый результат

Например

```
data LinProgram : (pre : VarList) → (post : VarList) → (throws : Bool) → Type where
  -- Empty program
  Nil : LinProgram pre pre False
  -- Binding a new variable and initializing it with a value: let x: ty = initializer
  AssignNew : (initializer : Expression post cls ty canBeSubexpr) → -- What to assign to a variable
              LinProgram pre post throws' → -- Continuation
              LinProgram pre ((MkVarDecl ty)::post) (isThrowingExpr initializer || throws')
  -- Assigning to an existitng value: lval = value
  AssignOld : (lval : LValue cls post ty) →
              (value : Expression post cls ty canBeSubexpr) → -- What to assign to a variable
              LinProgram pre post throws'' → -- Continuation
              LinProgram pre post (isThrowingExpr value || isThrowingLValue lval || throws'')
  -- If-then-else construction: if (cond) { then } else { else_branch }
  IfThenElse : (cond : Expression post cls (NonNullable $ Builtin STS_boolean) canBeSubexpr) → -- Expression for if-then-else
               (post' : VarList) →
               LinProgram post post' throws' → -- "then" branch
               (post'' : VarList) →
               LinProgram post post'' throws'' → -- "else" branch
               LinProgram pre post throws''' → -- Continuation
               LinProgram pre post (isThrowingExpr cond || throws' || throws'' || throws''')
  -- While loop: while (cond) { body }
  WhileLoop : (cond : Expression post cls (NonNullable $ Builtin STS_boolean) canBeSubexpr) → -- while-loop termination condition
              NonConstBool _ _ _ False cond ⇒
              Nat → -- Loop fuel
              (post' : VarList) →
              LinProgram post post' throws' → -- Loop body
              LinProgram pre post throws'' →
              LinProgram pre post (isThrowingExpr cond || throws' || throws'')
  -- ...

-- ...
```

Приме́ним

Testing...

Приме́ним

```
Wrong input 0 type 'i32' for inst:
  52.ref  NullCheck  v42, v51 → (v55, v53) bc: 0x0000005d
ASSERTION FAILED: CheckType(GetInputType(inst, 0), ...)
IN /.../inst_checker_gen.h:694: VisitNullCheck
ERRNO: 29 (Illegal seek)
Backtrace [tid=3853514]:
#0 : 0x7f46fc7b393c PrintStack(std::ostream&)
#1 : 0x7f46fc7b37de debug::AssertionFail(...)
#2 : 0x7f46fe3760ad compiler::InstChecker::VisitNullCheck(...)
#3 : 0x7f46fe38dae5 compiler::InstChecker::VisitGraph()
#4 : 0x7f46fe35e63e compiler::InstChecker::Run(...)
#5 : 0x7f46fe33c1b2 compiler::GraphChecker::Check()
...
```

Приме́ним

```
Wrong input 0 type 'i32' for inst:
  52.ref  NullCheck  v42, v51 → (v55, v53) bc: 0x0000005d
ASSERTION FAILED: CheckType(GetInputType(inst, 0), ...)
IN /.../inst_checker_gen.h:694: VisitNullCheck
ERRNO: 29 (Illegal seek)
Backtrace [tid=3853514]:
#0 : 0x7f46fc7b393c PrintStack(std::ostream&)
#1 : 0x7f46fc7b37de debug::AssertionFail(...)
#2 : 0x7f46fe3760ad compiler::InstChecker::VisitNullCheck(...)
#3 : 0x7f46fe38dae5 compiler::InstChecker::VisitGraph()
#4 : 0x7f46fe35e63e compiler::InstChecker::Run(...)
#5 : 0x7f46fe33c1b2 compiler::GraphChecker::Check()
...
```

Shrinking...

Приме́ним

```
function main() {
   for(let x2 of [0]) {
     let x3: boolean = false
     for(let x4 of [0]) {
       let x5: int[][] = [[]]
       let fuel1 = 0
     }
   }
   let fuel0 = 0
}
```

Приме́ним

Testing...

Приме́ним

```
ASSERTION FAILED: block->GetGraph() == GetGraph()
IN /.../optimizer/ir/graph_cloner.h:176: GetClone
Backtrace [tid=2902033]:
#0 : 0x7fe71892b820 PrintStack(std::ostream&)
#1 : 0x7fe71892b6c2 debug::AssertionFail(...)
#2 : 0x7fe71a61ae61 compiler::GraphCloner::GetClone(...)
#3 : 0x7fe71a61162a compiler::GraphCloner::CopyLoop(...)
#4 : 0x7fe71a611839 compiler::GraphCloner::CopyLoop(...)
#5 : 0x7fe71a611173 compiler::GraphCloner::CloneAnalyses(...)
#6 : 0x7fe71a610d1f compiler::GraphCloner::CloneGraph()
#7 : 0x7fe71a5b377c compiler::GraphChecker::GraphChecker(...)
...
```

Приме́ним

```
ASSERTION FAILED: block->GetGraph() == GetGraph()
IN /.../optimizer/ir/graph_cloner.h:176: GetClone
Backtrace [tid=2902033]:
#0 : 0x7fe71892b820 PrintStack(std::ostream&)
#1 : 0x7fe71892b6c2 debug::AssertionFail(...)
#2 : 0x7fe71a61ae61 compiler::GraphCloner::GetClone(...)
#3 : 0x7fe71a61162a compiler::GraphCloner::CopyLoop(...)
#4 : 0x7fe71a611839 compiler::GraphCloner::CopyLoop(...)
#5 : 0x7fe71a611173 compiler::GraphCloner::CloneAnalyses(...)
#6 : 0x7fe71a610d1f compiler::GraphCloner::CloneGraph()
#7 : 0x7fe71a5b377c compiler::GraphChecker::GraphChecker(...)
...
```

Shrinking...

Приме́ним

```
class C0 {
  x0: boolean

  f() : string {
    return ""
  }
}
```

```
function main() : void {
  let x2: C0 = {x0: true}
  let fuel0 = 1
  while(fuel0 > 0) {
    do {
      fuel0--
      do {
        fuel0--
        let s = x2.f()
      } while(true && (fuel0 > 0))
    } while(true && (fuel0 > 0))
  }
}
```

Приме́ним

- ...и так далее

Приме́ним

- ...и так далее
- Было найдено 9 подобных ошибок
  - В JIT-, AOT-оптимизаторе, тайпчекере, кодогенераторе

Приме́ним

- ...и так далее
- Было найдено 9 подобных ошибок
  - В JIT-, AOT-оптимизаторе, тайпчекере, кодогенераторе
- Ещё 8 во время написания спецификации

Приме́ним

- ...и так далее
- Было найдено 9 подобных ошибок
  - В JIT-, AOT-оптимизаторе, тайпчекере, кодогенераторе
- Ещё 8 во время написания спецификации
- Специфицировано подмножество
  - Завершающиеся программы
  - Циклы, ветвления, присваивания, исключения
  - Классы без методов, числа, массивы

Приме́ним

- ...и так далее
- Было найдено 9 подобных ошибок
  - В JIT-, AOT-оптимизаторе, тайпчекере, кодогенераторе
- Ещё 8 во время написания спецификации
- Специфицировано подмножество
  - Завершающиеся программы
  - Циклы, ветвления, присваивания, исключения
  - Классы без методов, числа, массивы

credit: Алексей Волков

Например

Например

- Целевая система — драйвер FAT32

Например

- Целевая система — драйвер FAT32
- Семантически корректный образ ФС

Например

- Целевая система — драйвер FAT32
- Семантически корректный образ ФС
- Свойства

Например

- Целевая система — драйвер FAT32
- Семантически корректный образ ФС
- Свойства
  - Любой семантически корректный образ успешно монтируется

Например

- Целевая система — драйвер FAT32
- Семантически корректный образ ФС
- Свойства
  - Любой семантически корректный образ успешно монтируется
  - На примонтированном образе успешно выполняется `ls`

Например

- Целевая система — драйвер FAT32
- Семантически корректный образ ФС
- Свойства
  - Любой семантически корректный образ успешно монтируется
  - На примонтированном образе успешно выполняется `ls`
  - ...и другие допустимые системные вызовы

Например

```
data Node : NodeCfg -> NodeArgs -> RootLabel -> Type where
    File : (0 clustNZ : IsSucc clustSize) =>
           (meta : Metadata) ->
           {k : Nat} ->
           SnocVectBits8 k ->
           Node (MkNodeCfg clustSize) (MkNodeArgs (divCeilNZ k clustSize) (divCeilNZ k clustSize) @{Relation.reflexive}) Rootless
    Dir : forall clustSize.
          (0 clustNZ : IsSucc clustSize) =>
          (meta : Metadata) ->
          {k : Nat} ->
          {ars : SnocVectNodeArgs k} ->
          {prs : SnocVectPresence k} ->
          (entries : HSnocVectMaybeNode (MkNodeCfg clustSize) k ars prs) ->
          UniqNames prs ->
          Node (MkNodeCfg clustSize) (
              MkNodeArgs (divCeilNZ (DirentSize * (2 + k)) clustSize)
                         (divCeilNZ (DirentSize * (2 + k)) clustSize + totsum ars)
                         @{lteAddRight (divCeilNZ (DirentSize * (2 + k)) clustSize) {m = totsum ars}}
          ) Rootless
    Root : forall clustSize.
           (0 clustNZ : IsSucc clustSize) =>
           {k : Nat} ->
           {ars : SnocVectNodeArgs k} ->
           {prs : SnocVectPresence k} ->
           (entries : HSnocVectMaybeNode (MkNodeCfg clustSize) k ars prs) ->
           UniqNames prs ->
           Node (MkNodeCfg clustSize) (
               let cur' = divCeilNZ (DirentSize * k) clustSize
               in MkNodeArgs cur' (cur' + totsum ars) @{lteAddRight cur' {m = totsum ars}}
           ) Rootful

— ...
```

Приме́ним

Приме́ним

- Было найдено три реализации FAT32, не соответствующие спецификации

Приме́ним

- Было найдено три реализации FAT32, не соответствующие спецификации
- Какие?

Приме́ним

- Было найдено три реализации FAT32, не соответствующие спецификации
- Какие?

credit: Илья Денисьев

Например

Например

- Целевая система — САПР, поддерживающий SystemVerilog

Например

- Целевая система — САПР, поддерживающий SystemVerilog
- Множество open-source реализаций

Например

- Целевая система — САПР, поддерживающий SystemVerilog
- Множество open-source реализаций
- Семантически корретные определения на SystemVerilog

Например

- Целевая система — САПР, поддерживающий SystemVerilog
- Множество open-source реализаций
- Семантически корретные определения на SystemVerilog
- Свойства

Например

- Целевая система — САПР, поддерживающий SystemVerilog
- Множество open-source реализаций
- Семантически корретные определения на SystemVerilog
- Свойства
  - Любое семантически корректное определения должно успешно приниматься инструментом

Например

- Целевая система — САПР, поддерживающий SystemVerilog
- Множество open-source реализаций
- Семантически корретные определения на SystemVerilog
- Свойства
  - Любое семантически корректное определения должно успешно приниматься инструментом
  - Для инструментов симуляции, любое семантически корректное определение должно успешно симулироваться на заданном ограничении по тактам

Например

- Целевая система — САПР, поддерживающий SystemVerilog
- Множество open-source реализаций
- Семантически корретные определения на SystemVerilog
- Свойства
  - Любое семантически корректное определения должно успешно приниматься инструментом
  - Для инструментов симуляции, любое семантически корректное определение должно успешно симулироваться на заданном ограничении по тактам
- Подмножество
  - Модули, порты, соединения
  - Типы соединений/портов

Например

```
— ...

data FitAny : {ms : ModuleSigsList} → {m : ModuleSig} → {subMs : FinsList ms.length} → {n : _} →
              MultiConnectionsList ms m subMs → (i : Fin n) → FillMode ms m subMs n → MultiConnectionsList ms m subMs → Type where
  NewAny      : (jmc : JustMC (ultraSuperReplace {ms} {m} {subMs} mode i Empty) newMC) →
                FitAny {ms} {m} {subMs} rest i mode $ newMC :: rest
  ExistingAny : (f : Fin $ length rest) →
                (cap : CanAddPort {ms} {m} {subMs} mode $ index rest f) →
                (jmc : JustMC (ultraSuperReplace {ms} {m} {subMs} mode i $ index rest f) newMC) →
                (cc : CanConnect (valueOf $ typeOf $ index rest f) (valueOf $ typeOfPort ms m subMs mode i)) →
                FitAny {ms} {m} {subMs} rest i mode $ replaceAt rest f newMC

data FillAny : {ms : ModuleSigsList} → {m : ModuleSig} → {subMs : FinsList ms.length} →
               (pre : MultiConnectionsList ms m subMs) → {n : _} → (i : Nat) →
               FillMode ms m subMs n → (aft : MultiConnectionsList ms m subMs) → Type where
  FANil  : FillAny pre Z mode pre
  FACons : {jf : JustFin (natToFin' i n) f} → (fit : FitAny {ms} {m} {subMs} {n} mid f mode aft) →
           (rest : FillAny {ms} {m} {subMs} pre {n} i mode mid) →
           FillAny {ms} {m} {subMs} pre {n} (S i) mode aft

data GenMulticonns : (ms : ModuleSigsList) → (m : ModuleSig) → (subMs : FinsList ms.length) →
                     MultiConnectionsList ms m subMs → Type where
  MkG : (ftk : FillAny {ms} {m} {subMs} []     (topSnks' m)          TSK fillTK) →
        (fsk : FillAny {ms} {m} {subMs} fillTK (subSnks' ms m subMs) SSK fillSK) →
        (ftc : FillAny {ms} {m} {subMs} fillSK (topSrcs' m)          TSC fillTC) →
        (fsc : FillAny {ms} {m} {subMs} fillTC (subSrcs' ms m subMs) SSC fillSC) →
        GenMulticonns ms m subMs fillSC

data Modules : ModuleSigsList → Type where
  End : Modules ms
  NewCompositeModule : (m : ModuleSig) → (subMs : FinsList ms.length) → {mcs : _} →
    (0 _ : GenMulticonns ms m subMs mcs) → (cont : Modules $ m::ms) → Modules ms
```

Приме́ним

Testing...

Приме́ним

iverilog

```
ivl: t-dll-api.cc:2501: ivl_nexus_s* ivl_signal_nex(ivl_signal_t, unsigned int)
Assertion `net→type_ == IVL_SIT_REG' failed.
Aborted
```

[1] https://github.com/steveicarus/iverilog

Приме́ним

iverilog

```
ivl: t-dll-api.cc:2501: ivl_nexus_s* ivl_signal_nex(ivl_signal_t, unsigned int)
Assertion `net→type_ == IVL_SIT_REG' failed.
Aborted
```

Shrinking...

[1] https://github.com/steveicarus/iverilog

Приме́ним

```
module a(output uwire o1 [0:1]);
endmodule
```

[2] https://deptycheck.github.io/verilog-model/error/t_dll_api_cc_ivl_nexus_s
[3] https://github.com/steveicarus/iverilog/issues/1213

Приме́ним

Testing...

Приме́ним

iverilog

```
error: Array i1 needs an array index here.
error: Unable to elaborate r-value: i1
```

[1] https://github.com/steveicarus/iverilog

Приме́ним

iverilog

```
error: Array i1 needs an array index here.
error: Unable to elaborate r-value: i1
```

Shrinking...

[1] https://github.com/steveicarus/iverilog

Приме́ним

```
module a(output o1 [0:0], input i1 [0:0]);
  assign o1 = i1;
endmodule: a
```

[2] https://deptycheck.github.io/verilog-model/error/array_needs_an_array_index_here
[3] https://github.com/steveicarus/iverilog/issues/1265

Приме́ним

Testing...

Приме́ним

verilator

```
%Error-UNSUPPORTED: test.sv:7:13:
Unsupported tristate port expression: VARREF '__Vcellinpt__a_inst__a1'
note: In instance 'b'
    7 |   a a_inst(.a1(b1));
      |             ^~
... For error description see https://verilator.org/warn/UNSUPPORTED?v=5.039

%Error: Internal Error: test.sv:7:13:
../V3DfgSynthesize.cpp:442: Mismatched width reached DFG
    7 |   a a_inst(.a1(b1));
      |             ^~
... This fatal error may be caused by the earlier error(s); resolve those first
```

[1] https://github.com/verilator/verilator

Приме́ним

verilator

```
%Error-UNSUPPORTED: test.sv:7:13:
Unsupported tristate port expression: VARREF '__Vcellinpt__a_inst__a1'
note: In instance 'b'
    7 |   a a_inst(.a1(b1));
      |             ^~
... For error description see https://verilator.org/warn/UNSUPPORTED?v=5.039

%Error: Internal Error: test.sv:7:13:
../V3DfgSynthesize.cpp:442: Mismatched width reached DFG
    7 |   a a_inst(.a1(b1));
      |             ^~
... This fatal error may be caused by the earlier error(s); resolve those first
```

Shrinking...

[1] https://github.com/verilator/verilator

Приме́ним

```
module a(output logic [1:2] a1);
  assign a1 = 'bz;
endmodule: a

module b (output logic b1);
  a a_inst(.a1(b1));
endmodule: b
```

[2] https://deptycheck.github.io/verilog-model/error/v3dfgsynthesize_cpp_mismatched_width_reached_dfg
[3] https://github.com/verilator/verilator/issues/6323

Приме́ним

- …и так далее

Приме́ним

- ...и так далее
- 6 инструментов

Приме́ним

- ...и так далее
- 6 инструментов
- Всего найдено 64 несоответствия спецификации

Приме́ним

- ...и так далее
- 6 инструментов
- Всего найдено 64 несоответствия спецификации
  - признанные новые баги

Приме́ним

- ...и так далее
- 6 инструментов
- Всего найдено 64 несоответствия спецификации
  - признанные новые баги
  - известные баги

Приме́ним

- ...и так далее
- 6 инструментов
- Всего найдено 64 несоответствия спецификации
  - признанные новые баги
  - известные баги
  - недореализованности

Приме́ним

- ...и так далее
- 6 инструментов
- Всего найдено 64 несоответствия спецификации
  - признанные новые баги
  - известные баги
  - недореализованности
  - плохие сообщения об ошибках

Приме́ним

- ...и так далее
- 6 инструментов
- Всего найдено 64 несоответствия спецификации
  - признанные новые баги
  - известные баги
  - недореализованности
  - плохие сообщения об ошибках
  - недокументированные особенности

Приме́ним

- ...и так далее
- 6 инструментов
- Всего найдено 64 несоответствия спецификации
  - признанные новые баги
  - известные баги
  - недореализованности
  - плохие сообщения об ошибках
  - недокументированные особенности
- https://deptycheck.github.io/verilog-model/

Приме́ним

- ...и так далее
- 6 инструментов
- Всего найдено 64 несоответствия спецификации
  - признанные новые баги
  - известные баги
  - недореализованности
  - плохие сообщения об ошибках
  - недокументированные особенности
- https://deptycheck.github.io/verilog-model/

credit: Леонид Горшенёв

Может возникнуть вопрос

Может возникнуть вопрос

- Зачем зависимые типы?

Может возникнуть вопрос

- Зачем зависимые типы?
- Существуют ли другие формализмы, способные описать то же самое?

Может возникнуть вопрос

- Зачем зависимые типы?
- Существуют ли другие формализмы, способные описать то же самое?
- Конечно!

Может возникнуть вопрос

- Зачем зависимые типы?
- Существуют ли другие формализмы, способные описать то же самое?
- Конечно!
- Но использования типов данных

Может возникнуть вопрос

- Зачем зависимые типы?
- Существуют ли другие формализмы, способные описать то же самое?
- Конечно!
- Но использования типов данных
  - облегчает рассуждение о генерации входных данных

Может возникнуть вопрос

- Зачем зависимые типы?
- Существуют ли другие формализмы, способные описать то же самое?
- Конечно!
- Но использования типов данных
  - облегчает рассуждение о генерации входных данных
    - сводим к задаче генерации значений определённого класса зависимых типов

Может возникнуть вопрос

- Зачем зависимые типы?
- Существуют ли другие формализмы, способные описать то же самое?
- Конечно!
- Но использования типов данных
  - облегчает рассуждение о генерации входных данных
    - сводим к задаче генерации значений определённого класса зависимых типов
  - снимает с нас задачу проверки корректности

Может возникнуть вопрос

- Зачем зависимые типы?
- Существуют ли другие формализмы, способные описать то же самое?
- Конечно!
- Но использования типов данных
  - облегчает рассуждение о генерации входных данных
    - сводим к задаче генерации значений определённого класса зависимых типов
  - снимает с нас задачу проверки корректности
    - не можем создать значение, нарушающее спецификацию, оно не скомпилируется

Может возникнуть вопрос

- Зачем зависимые типы?
- Существуют ли другие формализмы, способные описать то же самое?
- Конечно!
- Но использования типов данных
  - облегчает рассуждение о генерации входных данных
    - сводим к задаче генерации значений определённого класса зависимых типов
  - снимает с нас задачу проверки корректности
    - не можем создать значение, нарушающее спецификацию, оно не скомпилируется
  - облегчает последующую обработку сгенерированных данных

Может возникнуть вопрос

- Зачем зависимые типы?
- Существуют ли другие формализмы, способные описать то же самое?
- Конечно!
- Но использования типов данных
  - облегчает рассуждение о генерации входных данных
    - сводим к задаче генерации значений определённого класса зависимых типов
  - снимает с нас задачу проверки корректности
    - не можем создать значение, нарушающее спецификацию, оно не скомпилируется
  - облегчает последующую обработку сгенерированных данных
    - и сами данные, и ограничения лежат рядом

Может возникнуть вопрос

- Зачем зависимые типы?
- Существуют ли другие формализмы, способные описать то же самое?
- Конечно!
- Но использования типов данных
  - облегчает рассуждение о генерации входных данных
    - сводим к задаче генерации значений определённого класса зависимых типов
  - снимает с нас задачу проверки корректности
    - не можем создать значение, нарушающее спецификацию, оно не скомпилируется
  - облегчает последующую обработку сгенерированных данных
    - и сами данные, и ограничения лежат рядом
    - при обработке данных мы имеем все гарантии из ограничений

Может возникнуть вопрос

- Зачем зависимые типы?
- Существуют ли другие формализмы, способные описать то же самое?
- Конечно!
- Но использования типов данных
  - облегчает рассуждение о генерации входных данных
    - сводим к задаче генерации значений определённого класса зависимых типов
  - снимает с нас задачу проверки корректности
    - не можем создать значение, нарушающее спецификацию, оно не скомпилируется
  - облегчает последующую обработку сгенерированных данных
    - и сами данные, и ограничения лежат рядом
    - при обработке данных мы имеем все гарантии из ограничений
    - не надо обрабатывать несуществующие случаи

Конкуренты?

Конкуренты?

- QuickChick

QuickChick vs. DepTyCheck

QuickChick vs. DepTyCheck

	QuickChick	DepTyCheck

QuickChick vs. DepTyCheck

	QuickChick	DepTyCheck
поддержка генерации	✔	✔

QuickChick vs. DepTyCheck

	QuickChick	DepTyCheck
поддержка генерации	✔	✔
комбинаторы генераторов	✔	✔

QuickChick vs. DepTyCheck

	QuickChick	DepTyCheck
поддержка генерации	✔	✔
комбинаторы генераторов	✔	✔
формализм свойств	✔	✘

QuickChick vs. DepTyCheck

	QuickChick	DepTyCheck
поддержка генерации	✔	✔
комбинаторы генераторов	✔	✔
формализм свойств	✔	✘
полноценный framework PBT	✔	✘

QuickChick vs. DepTyCheck

	QuickChick	DepTyCheck
поддержка генерации	✔	✔
комбинаторы генераторов	✔	✔
формализм свойств	✔	✘
полноценный framework PBT	✔	✘
деривация генераторов	✔	✔

QuickChick vs. DepTyCheck

	QuickChick	DepTyCheck
поддержка генерации	✔	✔
комбинаторы генераторов	✔	✔
формализм свойств	✔	✘
полноценный framework PBT	✔	✘
деривация генераторов	✔	✔
деривация ADT	✔!	✔*

QuickChick vs. DepTyCheck

	QuickChick	DepTyCheck
поддержка генерации	✔	✔
комбинаторы генераторов	✔	✔
формализм свойств	✔	✘
полноценный framework PBT	✔	✘
деривация генераторов	✔	✔
деривация ADT	✔!	✔*
...предикатов над ADT	✔	✔*

QuickChick vs. DepTyCheck

	QuickChick	DepTyCheck
поддержка генерации	✔	✔
комбинаторы генераторов	✔	✔
формализм свойств	✔	✘
полноценный framework PBT	✔	✘
деривация генераторов	✔	✔
деривация ADT	✔!	✔*
...предикатов над ADT	✔	✔*
...над зав.типами	✘	✔*

QuickChick vs. DepTyCheck

	QuickChick	DepTyCheck
поддержка генерации	✔	✔
комбинаторы генераторов	✔	✔
формализм свойств	✔	✘
полноценный framework PBT	✔	✘
деривация генераторов	✔	✔
деривация ADT	✔!	✔*
...предикатов над ADT	✔	✔*
...над зав.типами	✘	✔*
поддержка полим. по типам	✔	✔[1]

QuickChick vs. DepTyCheck

	QuickChick	DepTyCheck
поддержка генерации	✔	✔
комбинаторы генераторов	✔	✔
формализм свойств	✔	✘
полноценный framework PBT	✔	✘
деривация генераторов	✔	✔
деривация ADT	✔!	✔*
...предикатов над ADT	✔	✔*
...над зав.типами	✘	✔*
поддержка полим. по типам	✔	✔[1]

[1] поддержка внутри типов, не полиморфных по типам генераторов

[1] пока без взаимной рекурсии, пока не в master'е, credit: Антон Гусев

QuickChick vs. DepTyCheck

	QuickChick	DepTyCheck
поддержка генерации	✔	✔
комбинаторы генераторов	✔	✔
формализм свойств	✔	✘
полноценный framework PBT	✔	✘
деривация генераторов	✔	✔
деривация ADT	✔!	✔*
...предикатов над ADT	✔	✔*
...над зав.типами	✘	✔*
поддержка полим. по типам	✔	✔[1]
поддержка функций в типах	✘	✔[2]

[1] поддержка внутри типов, не полиморфных по типам генераторов

[1] пока без взаимной рекурсии, пока не в master'е, credit: Антон Гусев

QuickChick vs. DepTyCheck

	QuickChick	DepTyCheck
поддержка генерации	✔	✔
комбинаторы генераторов	✔	✔
формализм свойств	✔	✘
полноценный framework PBT	✔	✘
деривация генераторов	✔	✔
деривация ADT	✔!	✔*
...предикатов над ADT	✔	✔*
...над зав.типами	✘	✔*
поддержка полим. по типам	✔	✔[1]
поддержка функций в типах	✘	✔[2]

[1] поддержка внутри типов, не полиморфных по типам генераторов

[1] пока без взаимной рекурсии, пока не в master'е, credit: Антон Гусев

[2] не во всех позициях

- Property-based testing

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию
  - ✔ экономически оправдан для сложных и ответственных систем

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию
  - ✔ экономически оправдан для сложных и ответственных систем
- Зависимые типы

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию
  - ✔ экономически оправдан для сложных и ответственных систем
- Зависимые типы
  - ✔ прекрасны

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию
  - ✔ экономически оправдан для сложных и ответственных систем
- Зависимые типы
  - ✔ мощны и выразительны

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию
  - ✔ экономически оправдан для сложных и ответственных систем
- Зависимые типы
  - ✔ мощны и выразительны
  - ✘ высокий уровень входа

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию
  - ✔ экономически оправдан для сложных и ответственных систем
- Зависимые типы
  - ✔ мощны и выразительны
  - ✘ высокий уровень входа
  - ✘ нет в мейнстриме (пока?)

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию
  - ✔ экономически оправдан для сложных и ответственных систем
- Зависимые типы
  - ✔ мощны и выразительны
  - ✘ высокий уровень входа
  - ✘ нет в мейнстриме (пока?)
  - ✔ полезны не только в качестве спецификации

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию
  - ✔ экономически оправдан для сложных и ответственных систем
- Зависимые типы
  - ✔ мощны и выразительны
  - ✘ высокий уровень входа
  - ✘ нет в мейнстриме (пока?)
  - ✔ полезны не только в качестве спецификации
- Они вместе, как это ни удивительно, работают

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию
  - ✔ экономически оправдан для сложных и ответственных систем
- Зависимые типы
  - ✔ мощны и выразительны
  - ✘ высокий уровень входа
  - ✘ нет в мейнстриме (пока?)
  - ✔ полезны не только в качестве спецификации
- Они вместе, как это ни удивительно, работают
  - ✔ позволяют тестировать то, что тяжело

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию
  - ✔ экономически оправдан для сложных и ответственных систем
- Зависимые типы
  - ✔ мощны и выразительны
  - ✘ высокий уровень входа
  - ✘ нет в мейнстриме (пока?)
  - ✔ полезны не только в качестве спецификации
- Они вместе, как это ни удивительно, работают
  - ✔ позволяют тестировать то, что тяжело
  - ✘ инструментальная поддержка на зачаточном уровне

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию
  - ✔ экономически оправдан для сложных и ответственных систем
- Зависимые типы
  - ✔ мощны и выразительны
  - ✘ высокий уровень входа
  - ✘ нет в мейнстриме (пока?)
  - ✔ полезны не только в качестве спецификации
- Они вместе, как это ни удивительно, работают
  - ✔ позволяют тестировать то, что тяжело
  - ✘ инструментальная поддержка на зачаточном уровне
  - ✘ методы спецификации ещё не отработаны

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию
  - ✔ экономически оправдан для сложных и ответственных систем
- Зависимые типы
  - ✔ мощны и выразительны
  - ✘ высокий уровень входа
  - ✘ нет в мейнстриме (пока?)
  - ✔ полезны не только в качестве спецификации
- Они вместе, как это ни удивительно, работают
  - ✔ позволяют тестировать то, что тяжело
  - ✘ инструментальная поддержка на зачаточном уровне
  - ✘ методы спецификации ещё не отработаны
  - ✘ есть проблемы со скоростью работы

- Property-based testing
  - ✔ *хороший* метод
  - ✘ требует освоения
  - ✘ требует серьёзного взгляда на требования и формализацию
  - ✔ экономически оправдан для сложных и ответственных систем
- Зависимые типы
  - ✔ мощны и выразительны
  - ✘ высокий уровень входа
  - ✘ нет в мейнстриме (пока?)
  - ✔ полезны не только в качестве спецификации
- Они вместе, как это ни удивительно, работают
  - ✔ позволяют тестировать то, что тяжело
  - ✘ инструментальная поддержка на зачаточном уровне
  - ✘ методы спецификации ещё не отработаны
  - ✘ есть проблемы со скоростью работы
  - ✔ мы только в начале пути

Если стало интересно

DepTyCheck, примеры

Эта презентация

Спасибо!

DepTyCheck, примеры

Эта презентация

Вопросы?