В. В. Кулямин
Институт системного программирования РАН

ЦЕЛИ, МЕТОДЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ ФОРМАЛИЗАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОГРАММАМ

ПЛАН

- Введение
  - Сложность программных систем
  - Ошибки в ПО и их последствия
- Формальные методы
  - Что это такое
  - Какие формализмы используются
  - Формальные методы на практике
- Формализация требований
  - Отличия от «классических» формальных методов?
  - Примеры
  - Ограничения формализации требований
- Заключение

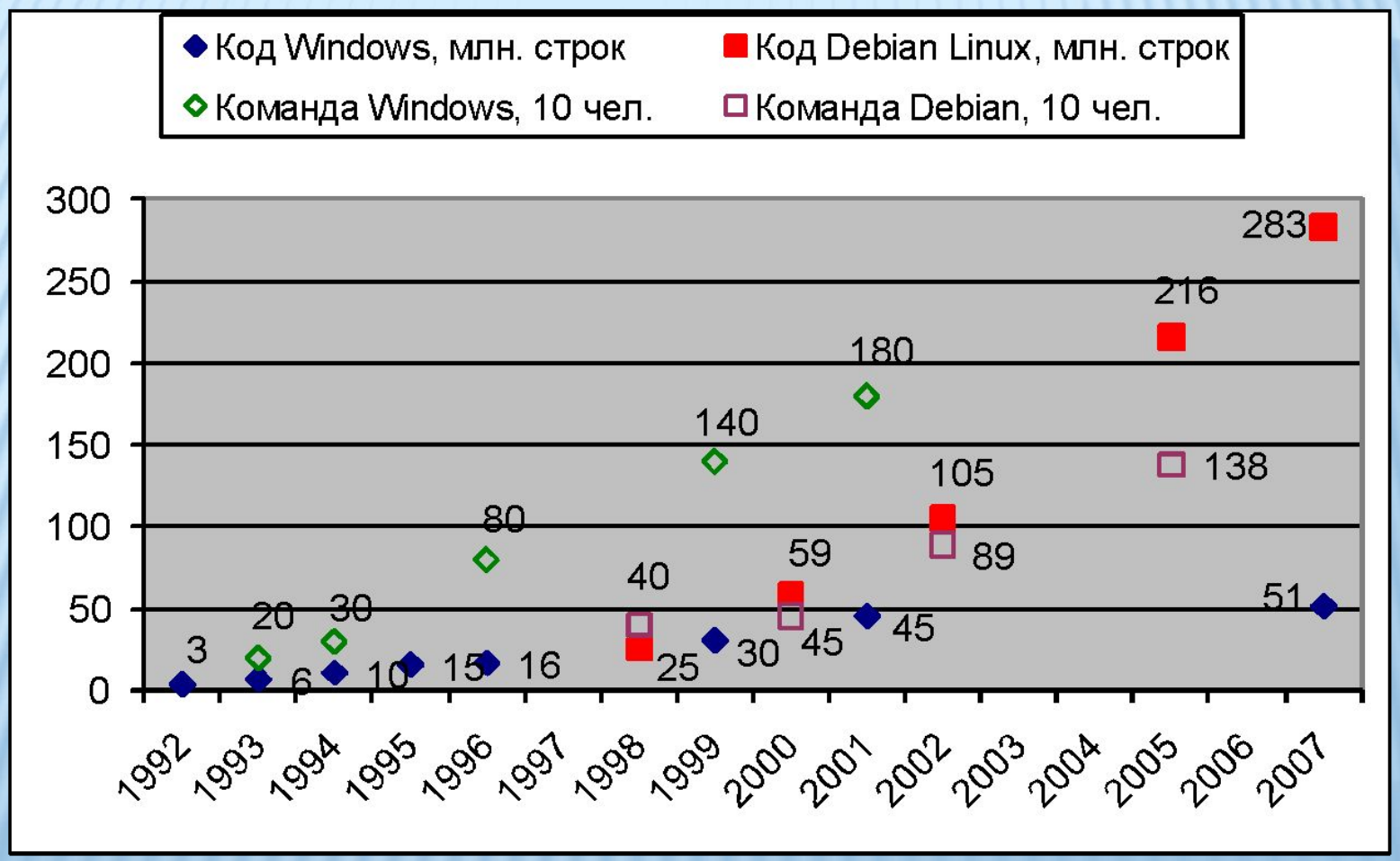
SOFTWARE CRISIS

- Конференция NATO 1968

Software сложнее hardware

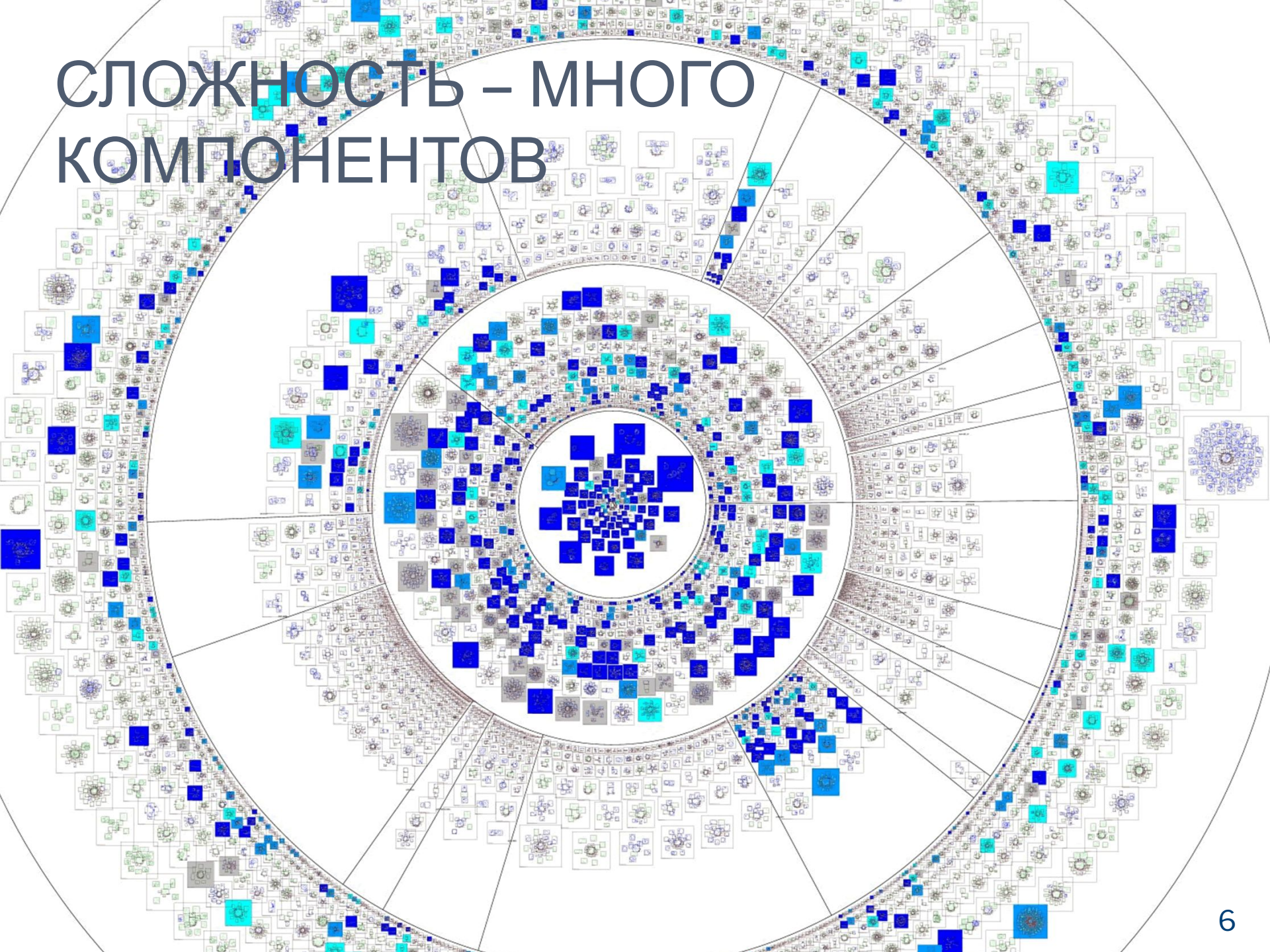
- Программная инженерия

СЛОЖНОСТЬ – БОЛЬШИЕ РАЗМЕРЫ

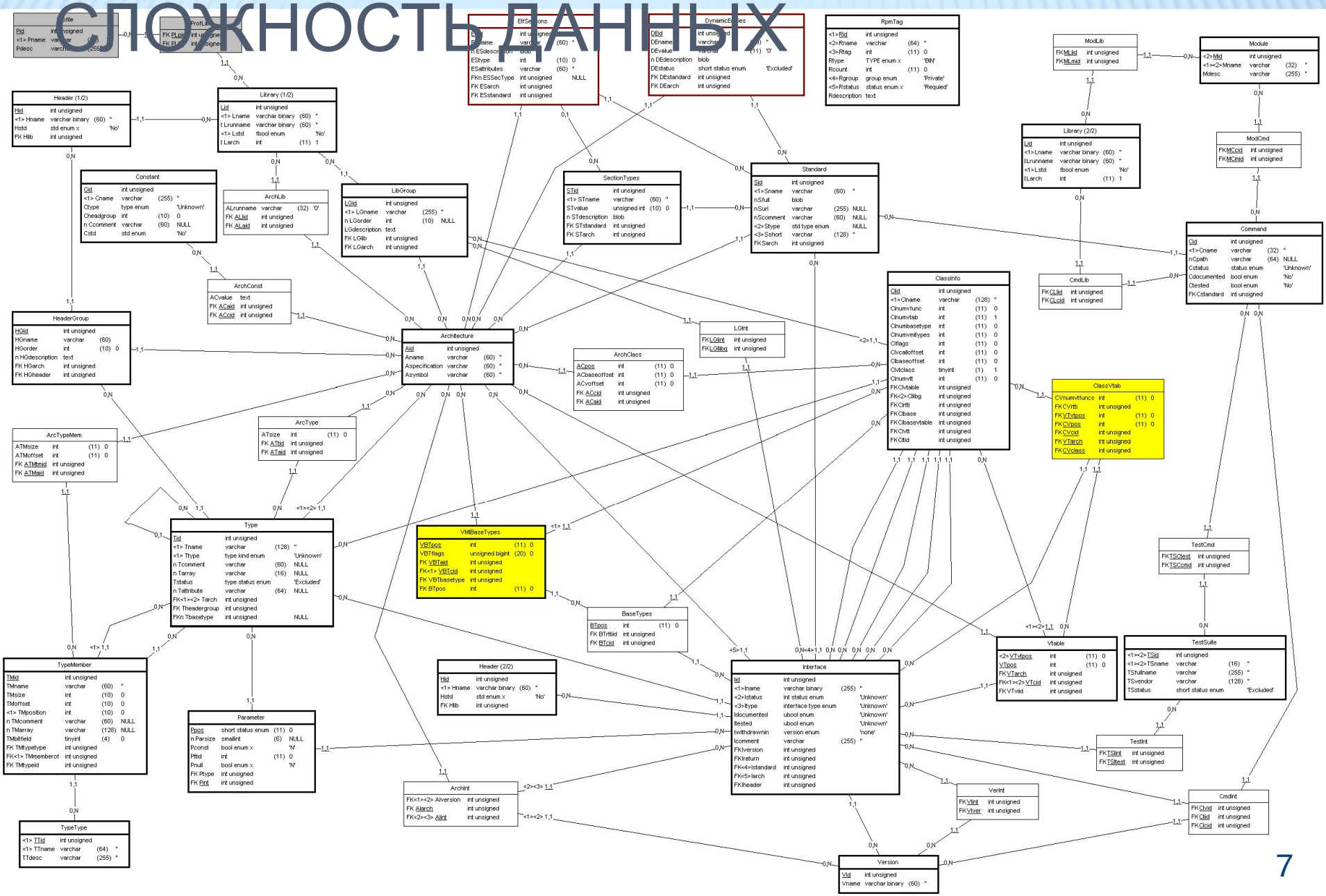


СЛОЖНОСТЬ ИНТЕРФЕЙСА

СЛОЖНОСТЬ – МНОГО КОМПОНЕНТОВ

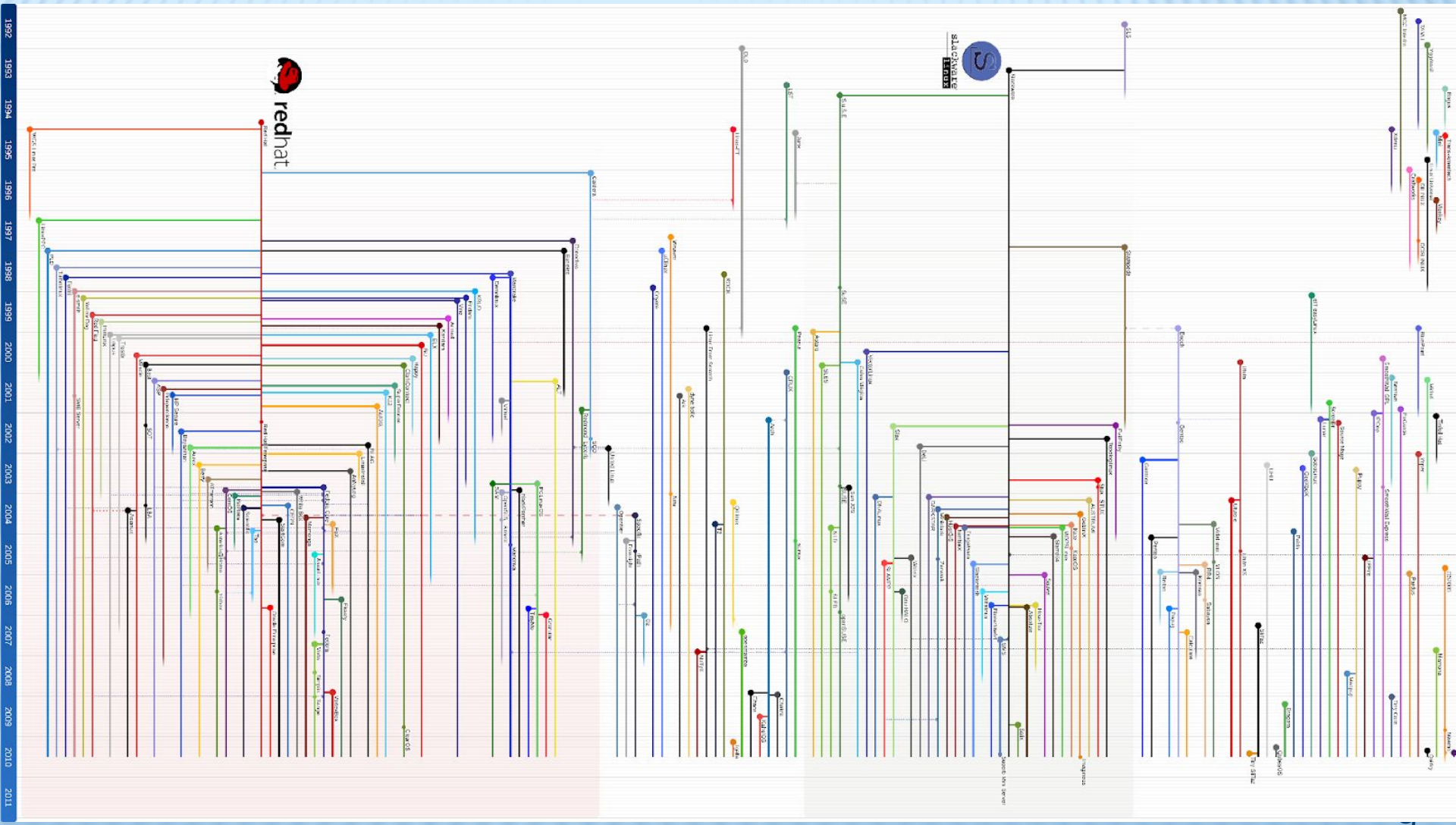


СЛОЖНОСТЬ ДАННЫХ

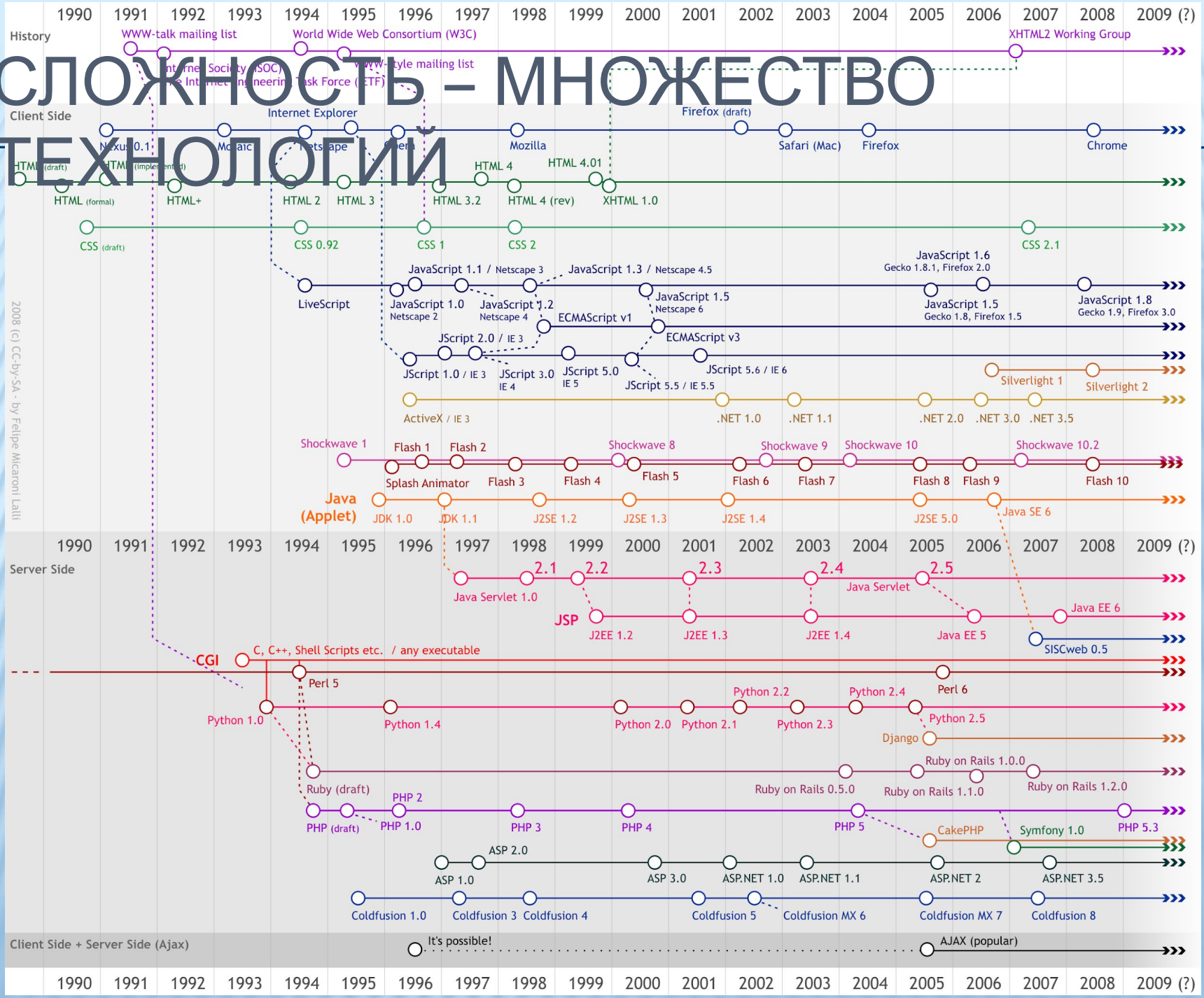


СЛОЖНОСТЬ ПОВЕДЕНИЯ

СЛОЖНОСТЬ – МНОГО ВАРИАНТОВ

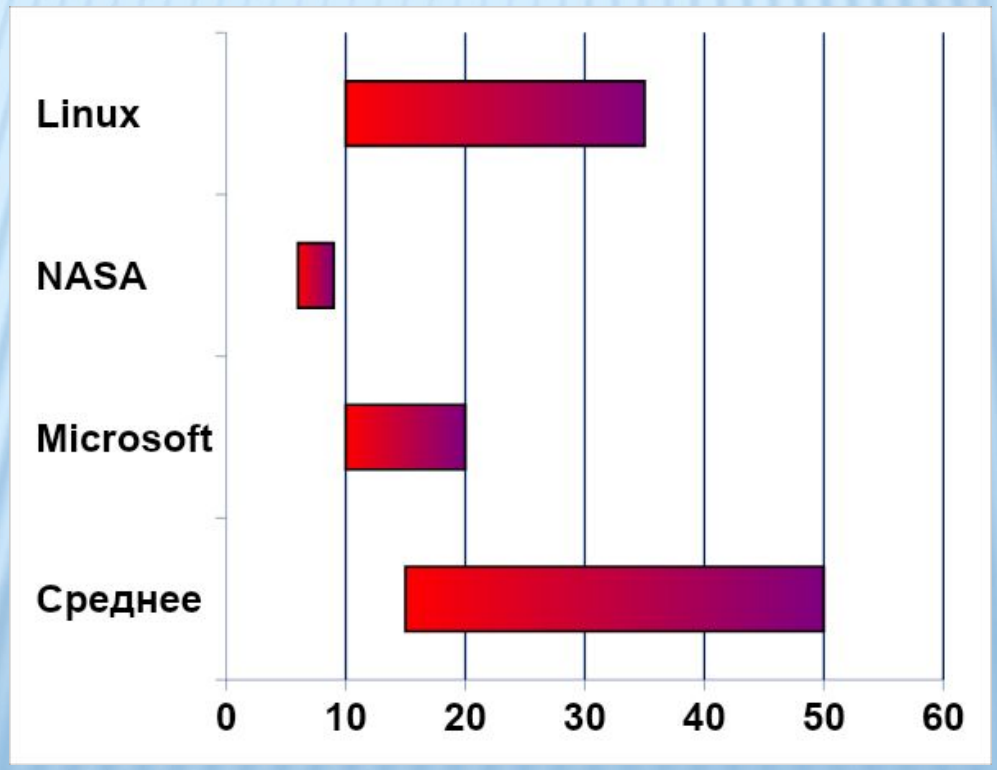


СЛОЖНОСТЬ – МНОЖЕСТВО ТЕХНОЛОГИЙ



СТАТИСТИКА ОШИБОК

- Основная причина – сложность
- Среднее количество ошибок на 1000 строк кода



РИСКИ, СВЯЗАННЫЕ С ОШИБКАМИ

- Космические аппараты
  - Mariner I (1962)
  - Фобос-1 (1988)
  - Ariane 5 (1996)
  - Mars Climate Orbiter (1999)
- Инфраструктура
  - AT&T long distance network crash (1990)
  - Northeast Blackout (2003)
  - OpenSSL rnd in Debian (2006-8)
  - Heathrow Airport Terminal 5 baggage system (2008)
- Автомобили
  - Toyota Prius (2005, 2010)
- Медицинское оборудование
  - Therac-25 (1985-7)
  - Medtronic Maximo (2008)
- Авионика и военное оборудование
  - Lockheed F-117 (1982)
  - MIM-104 Patriot (1991)
  - Chinook ZD576 (1994)
  - USS Yorktown (1997)
  - F-22 Raptor (2007)

Потери индустрии США в 2001 году – 60 G$

ЧТО ДЕЛАТЬ?

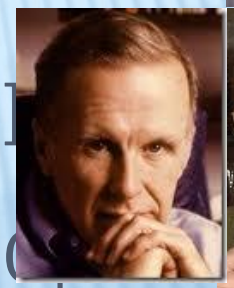
- Не делать ошибок
  - Невозможно из-за сложности
- Предотвращение ошибок
  - Тщательный анализ требований и возможных решений
  - Изоляция компонентов
  - Повышение уровня абстракции языков
  - Устранение error-prone конструкций
  - Стандартизация и документирование языков, протоколов и библиотек
- Выявление ошибок
  - Верификация и валидация
- Исправление ошибок

ВОЗМОЖНОЕ РЕШЕНИЕ

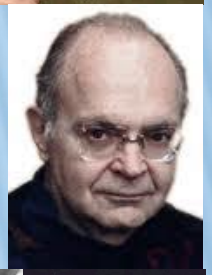
- Программные системы – одни из самых сложных искусственных систем
- Нужны методы построения программного обеспечения с заданными свойствами
- **Формальные методы**
  - Формализация требований

    Наиболее детальный и строгий их анализ
  - Формализация проектных решений
  - Формальный анализ и верификация свойств ПО

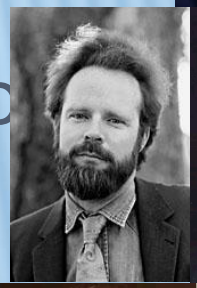
ИСТОКИ ФОРМАЛЬНЫХ МЕТОДОВ

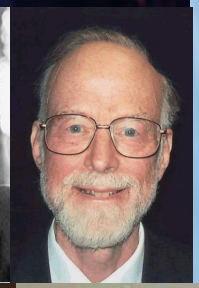


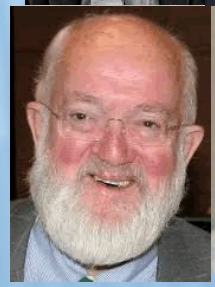
- Формальные языки [N. Chomsky 1956]
  - BNF и описание языков FORTRAN, ALGOL60 [J. Backus 1957, P. Naur 196
  - Атрибутные грамматики [D. Knuth, 1968]
  - Описание PL/I [IBM Vienna, 1968]



- Формальная верификация программ [R. Floyd 1967, C. A. R. Hoare 1969]
- Формальная разработка компиляторо
  - Венский метод (VDM) [D. Bjørner, C. Jones, 1972]
  - Европейский компилятор Ada [1984]

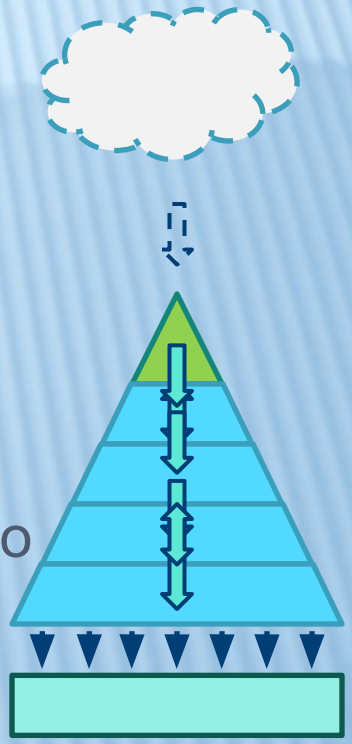






«КЛАССИЧЕСКИЙ» ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ

- Формализуем постановку задачи (требования к ПО)
- Строим проектные решения (возможно, в несколько шагов)
  - Доказанно корректными трансформациями (корректность по построению, correctness by construction)
  - Строим решение независимо и доказываем, что оно соответствует требованиям или решению предыдущего шага (уточнение, refinement)
- Преобразуем полученное решение в код



СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕМАНТИКИ

- Денотационная семантика

  Программы – функции, задаваемые явно
  - На основе множеств и отношений
  - На основе λ-исчисления и его расширений
- Аксиоматическая семантика

  Программы – объекты, удовлетворяющие аксиомам
  - Функции или отношения, задаваемые пред- и постусловиями
  - Алгебраические системы аксиом
  - Аксиомы временных логик
- Операционная семантика

  Программы – описания действий (простой) виртуальной машины

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ФОРМАЛИЗМЫ

- Логико-алгебраические
  - Различные логики
    Предикаты, теории типов, временные, модальные, ...
  - Различные алгебраические структуры
- Исполнимые
  - Различные автоматы
    FSM, LTS, расширенные, взаимодействующие, иерархические, временные, сети Петри, Statecharts, ...
- Гибридные
  - LTS ~ Алгебры процессов
  - Модели стандартных термов
  - Abstract State Machines
  - Программные контракты с состоянием

ПРИМЕР I – МАШИННЫЕ ЦЕЛЫЕ ЧИСЛА

Как реализовать целые числа в компьютере?

- Образец – обычные целые числа Z
- Конечное множество – 32 бита для хранения

Что точно нужно?

- Операции +, –, * – алгебраическое кольцо
- $\leq 2^{32}$ элементов
- Действия над 0, 1, 2, -1, -2, … дают нужные результаты

ПРИМЕР I – ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

$$Z/2^{32}Z$$

- Кольцо вычетов по модулю 2^{32}
- $\{[0], [1], [2], \ldots, [2^{32}-3], [2^{32}-2], [2^{32}-1]\}$

  Беззнаковые числа

  – Нет отрицательных чисел

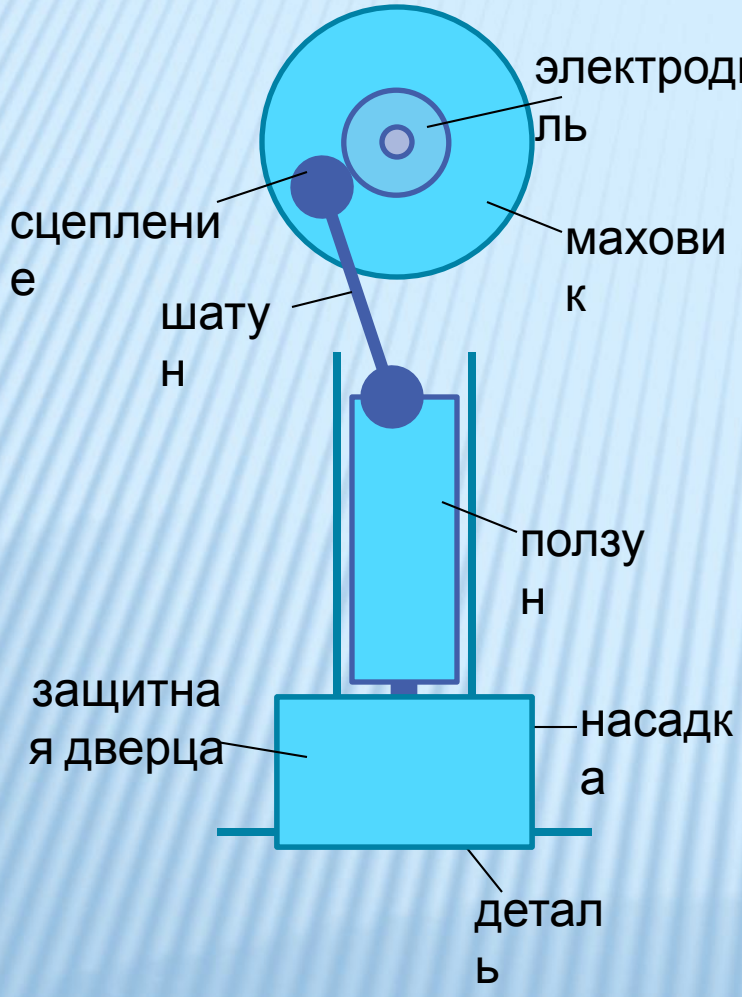
  $[2]*[2^{32}-1] = [2^{32}-2]$
- $\{[-2^{31}], [-2^{31}+1], \ldots, [-2], [-1], [0], [1], [2], [3], \ldots, [2^{31}-1]\}$

  $[2]*[2^{31}-1] = [-2]$
- Представление
  - Двоичная система

    $[17] =$ `00000000000000000000000000010001`
  - Дополнительный код для отрицательных чисел

    $[-17] =$ `11111111111111111111111111101111`

ПРИМЕР II – МЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕСС



Действия рабочего

- Заменить насадку
- Положить деталь
- Убрать деталь

Кнопки

- Запустить двигатель (start motor)
- Остановить двигатель (stop motor)
- Включить сцепление (engage clutch)
- Выключить сцепление (disengage clutch)

Управляемые элементы

- Двигатель
- Сцепление
- Дверца

ПРИМЕР II – ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ

- Дверца должна перекрывать доступ к работающему прессу
  - При включении сцепления с работающим двигателем дверца должна быть закрыта
  - При включении двигателя с включенным сцеплением дверца должна быть закрыта
  - Дверца открывается только если либо двигатель не работает, либо сцепление выключено

ПРИМЕР II – УПРОЩЕНИЕ

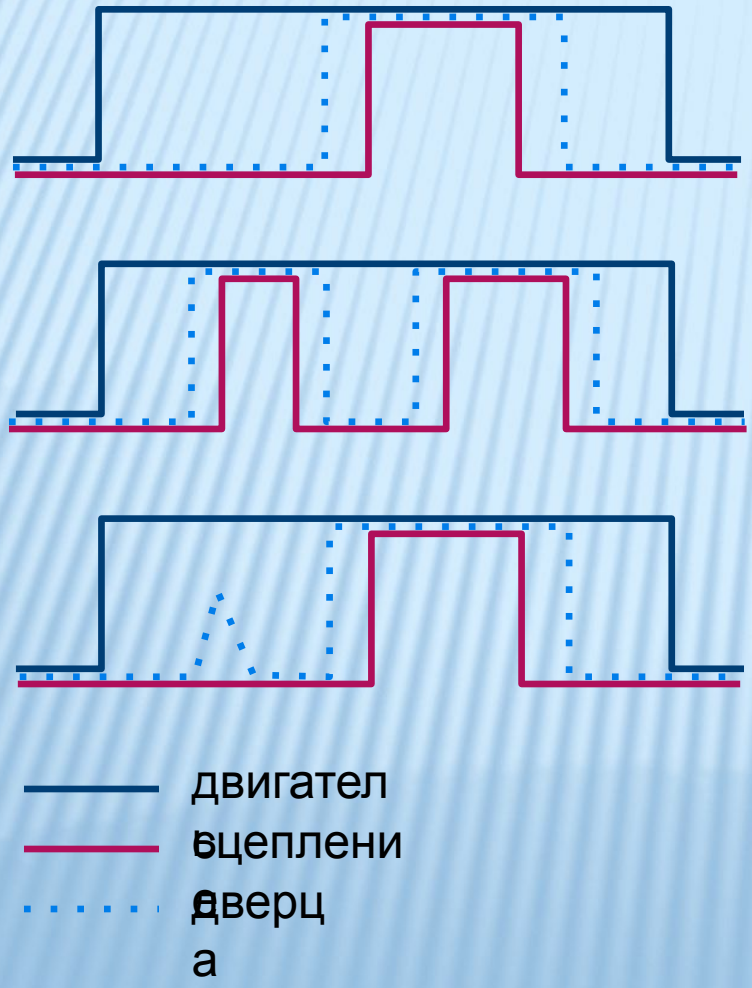
Поскольку выключение двигателя выключает весь пресс (обычно), трудно контролировать включено ли сцепление при выключенном двигателе

Запретим эту ситуацию!

Дополнительные ограничения

- Сцепление можно включать лишь при работающем двигателе
- Нельзя выключить двигатель при включенном сцеплении

ПРИМЕР II – ДОПУСТИМЫЕ СЦЕНАРИИ



Обработка одной детали

Замена детали без выключения двигателя

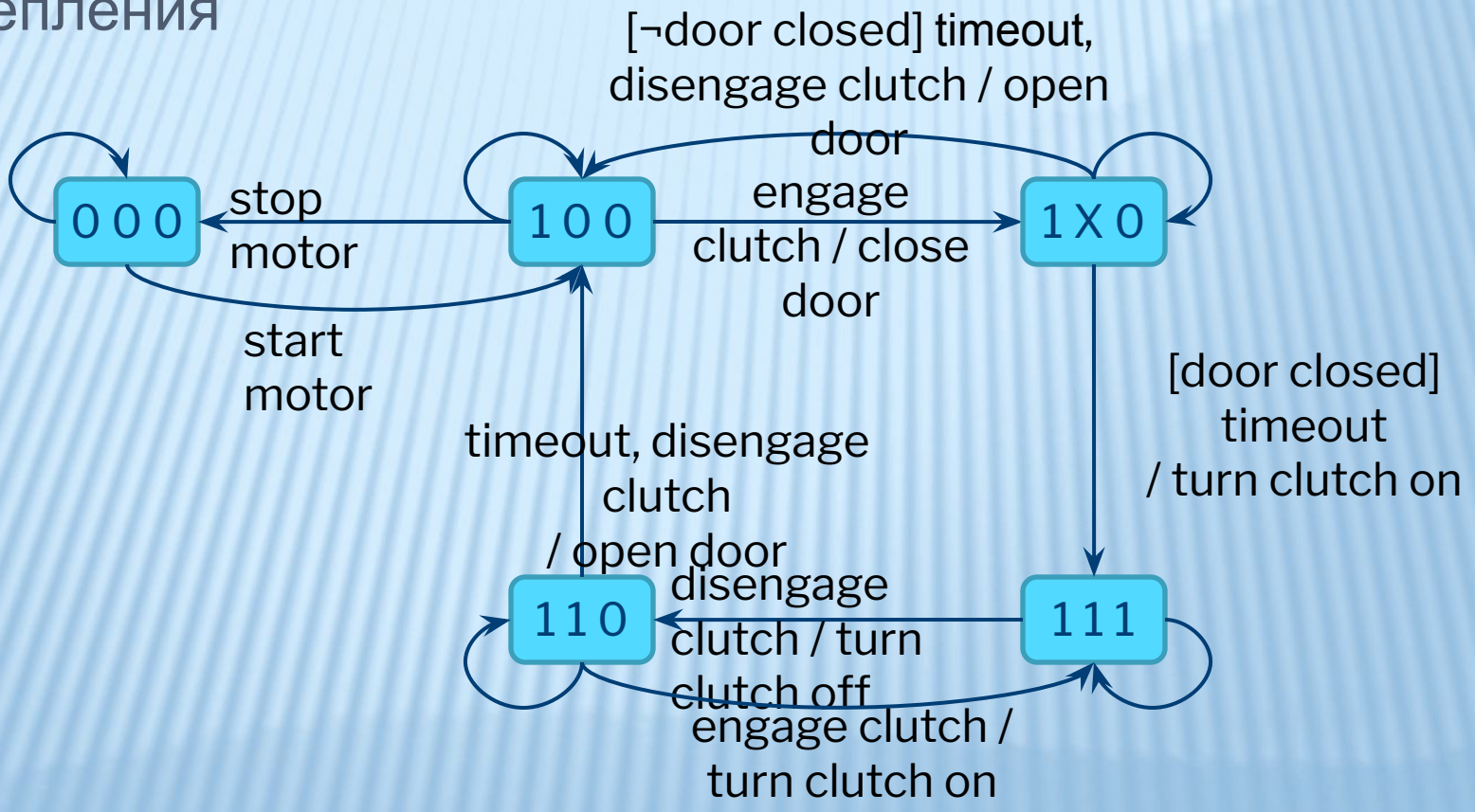
Неудачная попытка закрыть дверцу

ПРИМЕР II - ТРЕБОВАНИЯ

- [clutch engaged] ⇒ [door closed]
- [door closed] ⇒ [motor working]
- ¬[motor working] ∧ [start motor] ⇒ X [motor working]
- ¬[door closed] ∧ [motor working] ∧ [stop motor] ⇒ X ¬[motor working]
- [door closed] ⇒ ¬[stop motor]
- ¬[motor working] ⇒ ¬[engage clutch]
- ¬[door closed] ∧ [motor working] ∧ [engage clutch] ⇒ X [door closing]
- [door closing] ⇒ X ¬[door closing]
- [door closed] ∧ ¬[disengage clutch] ⇒ X [clutch engaged]
- [door closed] ∧ [disengage clutch] ⇒ X ¬[clutch engaged] ∧ X ¬[door closed]

ПРИМЕР II – КОНЕЧНЫЙ АВТОМАТ

Состояние – текущее положение двигателя, дверки и сцепления



ПРИМЕР III – СПИСОК

Абстрактный тип данных List<E> – список объектов типа E

- Операции

  empty : List<E> insert : List<E>×N×E → List<E>

  size : List<E> → N remove : List<E>×N → L<E> get : List<E>×N → E

- Аксиомы
  - empty.size() = 0
  - [0≤i≤X.size()] X.insert(i, e).size() = X.size() + 1
  - [0≤i<X.size()] X.remove(i).size() = X.size() – 1
  - [0≤i≤X.size()] X.insert(i, e).get(i) = e
  - [0<i≤X.size() ∧ 0≤j<i] X.insert(i, e).get(j) = X.get(j)
  - [0≤i<X.size() ∧ i<j≤X.size()] X.insert(i, e).get(j) = X.get(j-1)
  - [0≤i≤X.size()] X.insert(i, e).remove(i) ≡ X
  - [0<i≤X.size() ∧ 0≤j<i] X.insert(i, e).remove(j) ≡ X.remove(j). insert(i-1, e)
  - [0≤i≤X.size() ∧ i<j≤X.size()] X.insert(i, e).remove(j) ≡ X.remove(j-1). insert(i, e)
  - [0≤i≤X.size() ∧ 0≤j≤i] X.insert(i, e_1).insert(j, e_2) ≡ X.insert(j, e_2).insert(i+1, e_1)
  - [0<i<X.size() ∧ 0≤j<i] X.remove(i).remove(j) ≡ X.remove(j). remove(i-1)

ПРИМЕР IV – ПОИСК ЭЛЕМЕНТА В СПИСКЕ

- В этом примере список – из Лисп
  List<E> ≡ nil<E> | cons (E, List<E>)
- Исчисление индуктивных конструкций
  Позволяет задавать типы при помощи индуктивных конструкторов
  - ∀ l : List<E> l = nil<E> + ∃ e : E ∃ m : List<E> l = cons(e, m)
  - ∀ e : E ∀ l : List<E> nil<E> ≠ cons(e, l)
  - ∀ P : List<E> → Bool P(nil<E>) ∧ [∀ e : E ∀ l : List<E> P(l) ⇒ P(cons(e, l))]
    ⇒ ∀ l : List<E> P(l)
- Определения также индуктивны
  contains : List<E>×E → Bool ≡
  contains(nil<E>, e) ≡ false
  | contains(cons(e, l), f) ≡ (e=f) ? true : contains(l, f)

ПРИМЕР IV – СПЕЦИФИКАЦИЯ

Результат поиска элемента, удовлетворяющего $P : E \to Bool$

$$res(l, P) \equiv \{e : E \mid contains(l, e) \wedge P(e)\} + \{\forall x{:}E\ contains(l, x) \Rightarrow \neg P(x)\}$$

Можно извлечь программу из спецификации с помощью соответствия Карри-Ховарда (Curry-Howard)

СООТВЕТСТВИЕ КАРРИ-ХОВАРДА

В конструктивной логике или конструктивных теориях типов

- Доказательство ~ Программа
  - Логическое выражение ~ Тип
  - Конъюнкция ~ Декартово произведение
  - Импликация ~ Функция
  - Разбор случаев (дизъюнкция) ~ if ... then ... else ...
  - Индукция в доказательстве ~ Рекурсия в программе

ПРИМЕР IV – ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПРОГРАММЫ

- Строим доказательство res(l, P) ≡ {e : E | contains(l, e) ∧ P(e)} + {∀ x:E contains(l, x) ⇒ ¬P(x)}
- Тип {x : A | ϕ(x)} + {ψ} имеет два конструктора
  - success получается из элемент a типа A вместе с доказательством ϕ(a)
  - fail получается из доказательства ψ
- Разбор случаев
  - l = null<E>, тогда можно доказать ∀ x:E contains(l, x) ⇒ ¬P(x), т.е. получаем fail
  - l = cons(e, m), тогда можно проверить P(e) или использовать индуктивную гипотезу для m, т.е. получаем P(e) + res(m, P)
- Таким образом, программа поиска такова

```
search(l, P) ≡
  if (l = nil<E>) then fail
  else let l = cons(e, m)
     if(P(e)) then e
          else    search(m, P)
```

ОГРАНИЧЕНИЯ ФОРМАЛЬНЫХ МЕТОДОВ

- Трансформации спецификаций в программы (correctness by construction) работают только для ограниченного набора задач
- При уточнении из n шагов получается n+1 формальная модель, каждая из которых по сложности приближается к итоговой системе
- Даже в простейшем случае нужно сделать модель требований, модель решения и еще саму систему – в 2-3 раза больше работы
- Формальный анализ сложной системы сам сложен ⇒ в нем возможны ошибки!

ПЛЮСЫ ФОРМАЛЬНОСТИ

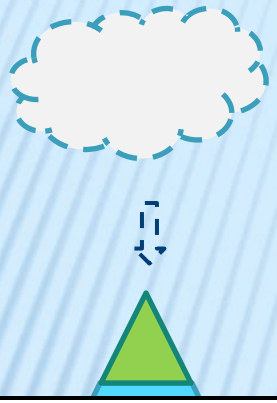
- Требования анализируются систематично и детально
- Возникает глубокое понимание задачи
- Получаемое решение доказуемо корректно (если хватит сил провести доказательство)

Что же делать?

«ЛЕГКИЕ» ФОРМАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

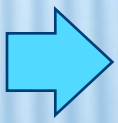
- Формализация требований
  - Сохраняем аккуратность анализа
  - Сохраняем бонус глубокого понимания
- Формальную модель решения не строим
  - Избавляемся от высоких затрат
- Пытаемся извлекать ее автоматически из кода или работы самой системы, чтобы верифицировать саму систему
  - Статический анализ
  - Проверка извлекаемых моделей (model checking)
  - Тестирование на основе моделей
- В итоге тратим в ~1.5 раза больше усилий, но получаем гораздо более качественный результат
  - Это окупается для систем, некорректность которых стоит дорого

ТЕХНИКИ ВЕРИФИКАЦИИ



- Статический анализ + проверка моделей
- Тестирование на основе моделей

```
do {
  nPacketsOld = nPackets;
  ...
  if(request) {
  ...
    nPackets++;
  }
} while (nPackets != nPacketsOld);
```



```
do {
  b = true;
  ...
  if(r) {
  ...
    b = b?false:*;
  }
} while (!b);
```

ПРИМЕР V – ALTERNATING BIT PROTOCOL

- Протокол канального уровня
  - 7-уровневая модель OSI
    - Физический уровень
    - Канальный уровень
    - Сетевой уровень
    - Транспортный уровень
    - Уровень представления
    - Сеансовый уровень
    - Прикладной уровень
- Симплексный – передача в одну сторону
- Должен гарантировать надежную доставку кадра

ПРИМЕР V – ОТПРАВИТЕЛЬ

```
typedef enum { frame_arrival, cksum_err, timeout } event_type;
#include "protocol.h"

void sender() {
  seq_nr next_frame_to_send;          /* номер следующего кадра */
  frame s;                            /* временная переменная – кадр для передачи */
  packet buffer;                      /* буфер для исходящего пакета */
  event_type event;

  next_frame_to_send = 0;             /* инициализация номеров исх. кадров */
  from_network_layer(&buffer);        /* получаем первый пакет */
  while(true) {
    s.info = buffer;                  /* формируем кадр для передачи */
    s.seq = next_frame_to_send;
    to_physical_layer(&s);            /* послать кадр по каналу */
    start_timer(s.seq);               /* таймер для подтверждения */
    wait_for_event(&event);           /* ожидаем события */

    if(event == frame_arrival) {
      from_physical_layer(&s);        /* получить подтверждение */
      if(s.ack == next_frame_to_send) {
        from_network_layer(&buffer);  /* получаем след. пакет */
        inc(next_frame_to_send);      /* меняем четность */
      }
    }
  }
}
```

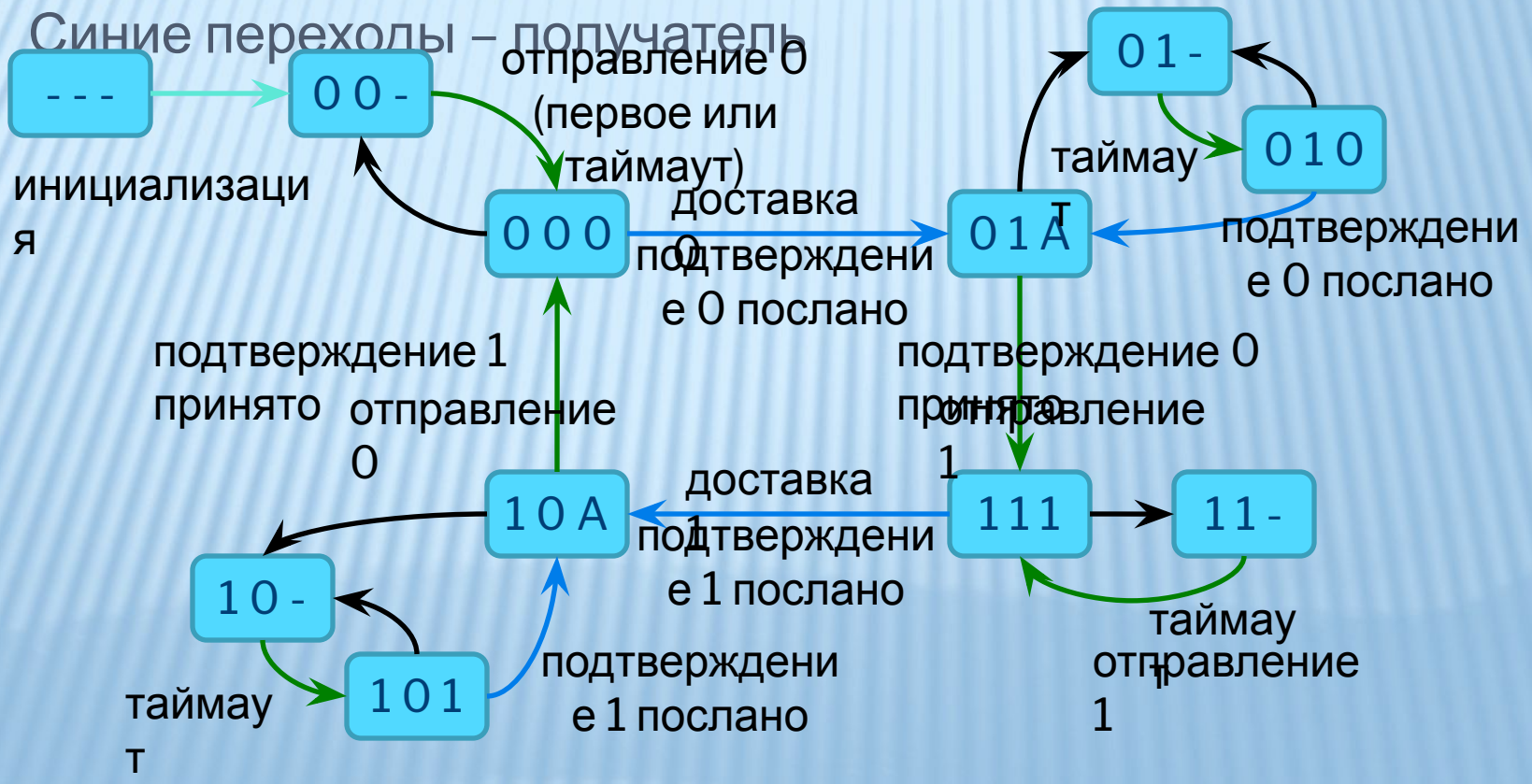
ПРИМЕР V – ПОЛУЧАТЕЛЬ

```
void receiver() {
  seq_nr frame_expected;                  /* номер ожидаемого кадра */
  frame r, s;                             /* получаемый кадр и кадр подтверждения */
  event_type event;

  frame_expected = 0;                     /* инициализация номера ожидаемого кадров */
  while(true)
  {
    wait_for_event(&event);

    if(event == frame_arrival)            /* приходит какой-то кадр */
    {
      from_physical_layer(&r);            /* получаем его с физического уровня */
      if(r.seq == frame_expected)         /* если ожидаем именно его */
      {
        to_network_layer(&r.info);        /* отдаем пакет на сетевой уровень */
        inc(frame_expected);              /* меняем четность */
      }

      s.ack = previous(frame_expected);   /* выставляем четность подтверждения */
      to_physical_layer(&s);              /* отправляем подтверждение */
    }
  }
}
```

ПРИМЕР V – АВТОМАТ

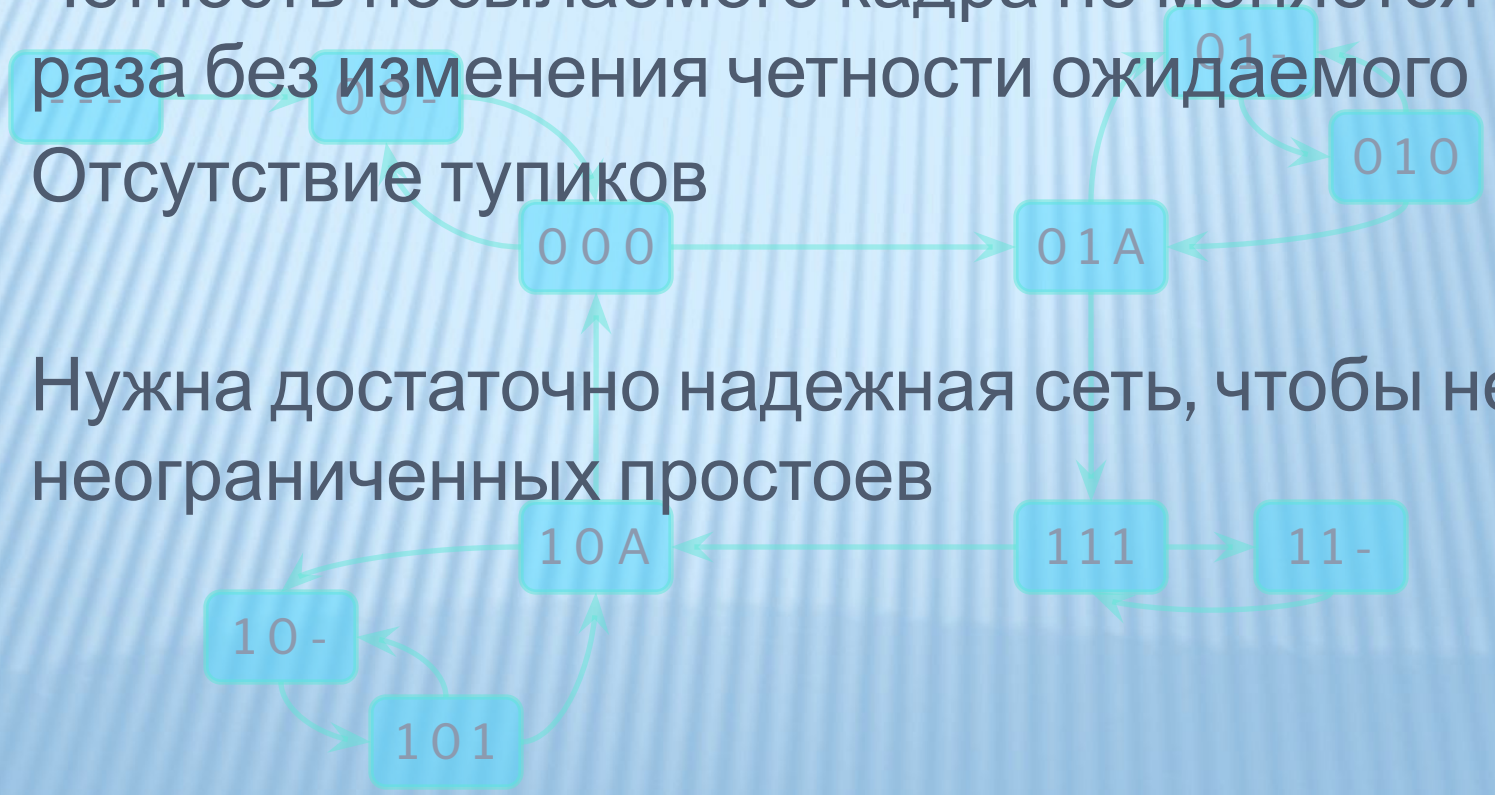
Состояние: номер посылаемого кадра, номер ожидаемого кадра и содержимое канала (номер кадра, подтверждение A или мусор -)

- Зеленые переходы – отправитель
- Черные переходы – потери информации в канале
- Синие переходы – получатель



ПРИМЕР V – СВОЙСТВА И ОГРАНИЧЕНИЯ

- Четные и нечетные посылаемые кадры чередуются
- Четность посылаемого кадра не меняется два раза без изменения четности ожидаемого
- Отсутствие тупиков



- Нужна достаточно надежная сеть, чтобы не было неограниченных простоев

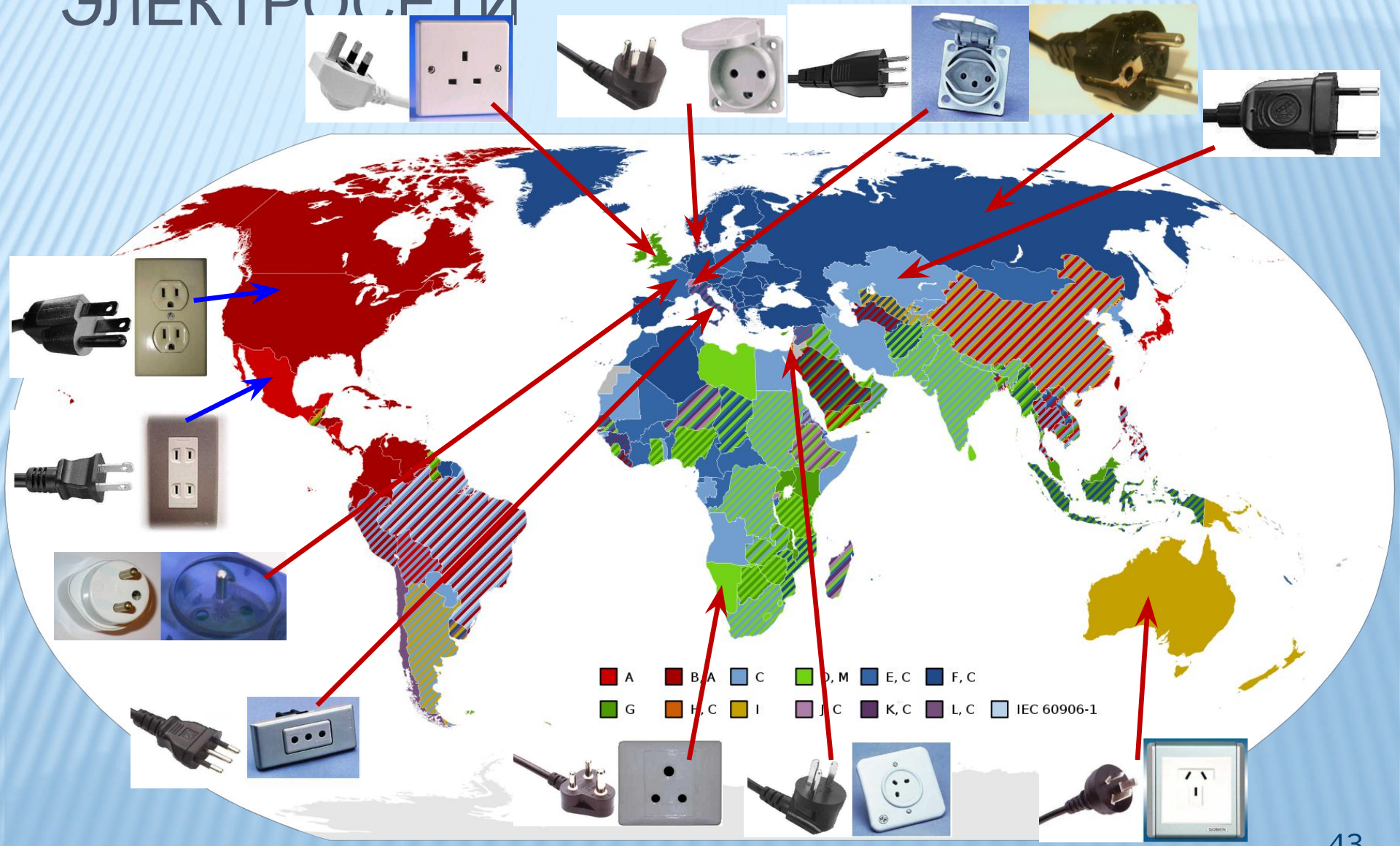
ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ

- Где формализация требований оправдана?
  - Стандарты
  - Устоявшиеся протоколы, интерфейсы и языки
  - ✔ Системное ПО
  - ✔ Широко используемые и достаточно стабильные API (Application Programming Interface)
- Иначе – огромные усилия уходят на выявление неявно подразумеваемых деталей, а потом анализ нужно начинать сначала из-за возникающих изменений

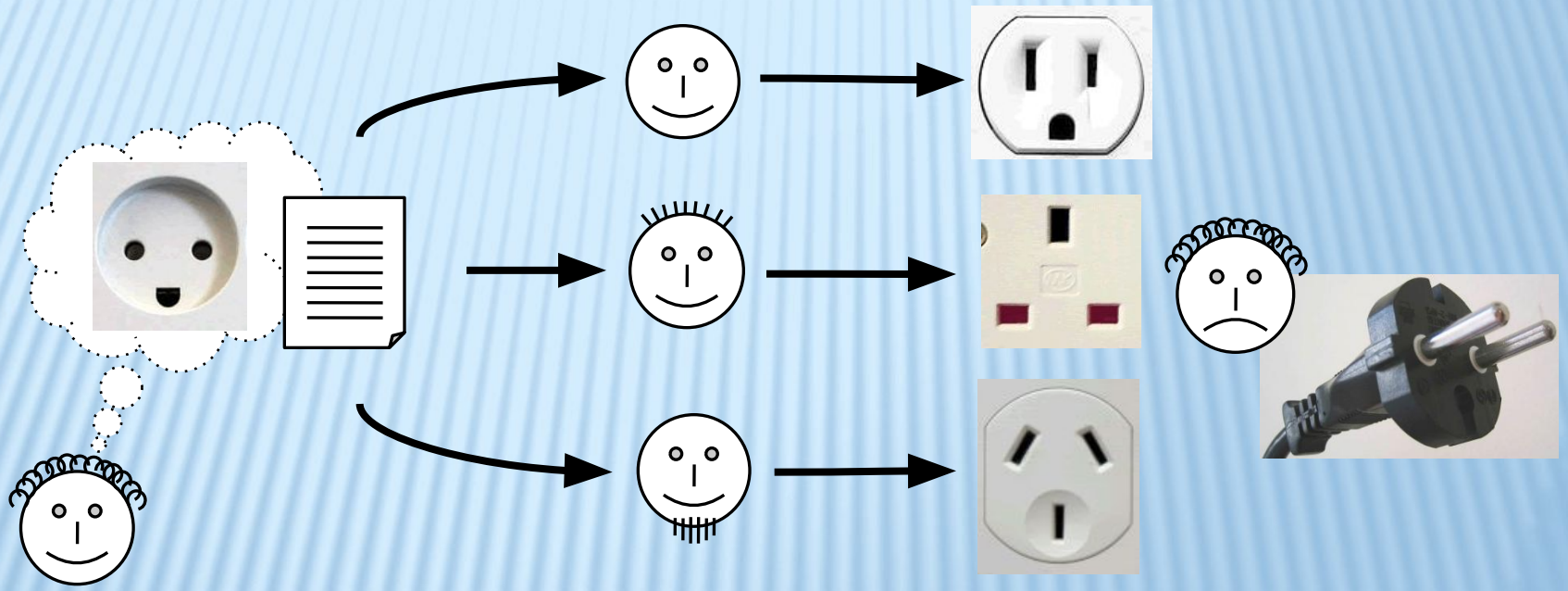
ИНТЕРФЕЙСНЫЕ СТАНДАРТЫ

- Программно-аппаратные интерфейсы
  - x86, MIPS, ARM
- Телекоммуникационные и аппаратные протоколы
  - Ethernet, Wi-Fi, IP, TCP, HTTP, SMTP, SOAP, Radius
- API общих библиотек
  - POSIX, Linux Standard Base, JDK, DOM, MPI, OpenGL
- Форматы файлов
  - XML, HTML, PDF, ODF, MP3, GIF, ZIP
- Языки программирования и моделирования
  - C++, Java, C#, Fortran, Ada, Scheme, Verilog

ИНТЕРФЕЙСНЫЙ СТАНДАРТ – ЭЛЕКТРОСЕТИ



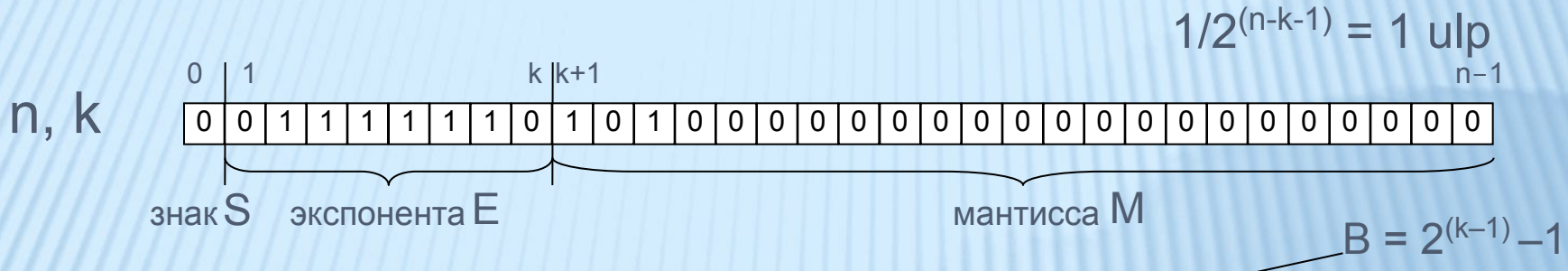
ОДНОЗНАЧНОСТЬ И СОВМЕСТИМОСТЬ



ПРИМЕР VI – ЧИСЛА С ПЛАВАЮЩЕЙ ТОЧКОЙ

- Представляют вещественные числа
  - Бесконечное (даже несчетное) множество представляется конечным
  - Двоичная система счисления точно представляет лишь числа вида $N/2^n$
  - Вводятся ограничения на величину и малость
- Стандарт IEEE 754 [1982, 2008]

ПРИМЕР VI – ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЧИСЕЛ



- Нормализованные: $E > 0 \wedge E < 2^k - 1$ $X = (-1)^S \cdot 2^{(E-B)} \cdot (1 + M/2^{(n-k-1)})$

$$2^{(-1)} \cdot 1.10100_2 = 13/16 = 0.8125$$

- Денормализованные: $E = 0$ $X = (-1)^S \cdot 2^{(-B+1)} \cdot (M/2^{(n-k-1)})$

  0, -0

- Exceptional : $E = 2^k - 1$
  - $M = 0$: $+\infty, -\infty$ $1/0 = +\infty$, $(-1)/0 = -\infty$
  - $M \neq 0$: NaN $0/0 = \text{NaN}$

n = 32, k = 8 – float (single precision)
n = 64, k = 11 – double
n ≤ 79, k = 15 – extended double
n = 128, k = 15 – quadruple

ПРИМЕР VI – НЕКОТОРЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

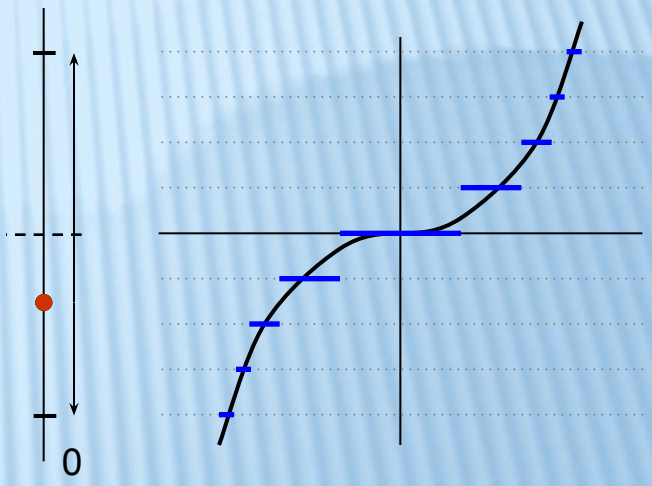
	Общий вид	float	double	ext. double	quadruple
min денорм.	$2^{-B-n+k+2}$	2^{-149}	2^{-1074}	2^{-16446}	2^{-16494}
min норм.	2^{-B+1}	2^{-126}	2^{-1022}	2^{-16382}	2^{-16382}
max	$2^{B-n+k+1}(2^{n-k}-1)$	$2^{104}(2^{24}-1)$	$2^{971}(2^{53}-1)$	$2^{16319}(2^{65}-1)$	$2^{16271}(2^{113}-1)$
max < 1	$1-2^{-n+k}$	$1-2^{-24}$	$1-2^{-53}$	$1-2^{-65}$	$1-2^{-113}$
min > 1	$1+2^{-n+k+1}$	$1+2^{-23}$	$1+2^{-52}$	$1+2^{-64}$	$1+2^{-112}$

ПРИМЕР VI – ОПЕРАЦИИ

- +, –, *, /
- fma(x,y,z)=x*y+z [2008]
- remainder(x,y) = x–y*n : n=round(x/y)
- sqrt
- Преобразования между типами с плавающей точкой (float ↔ double, …)
- Преобразования к целым типам и обратно
- (Рекомендуемые) [2008]
  floor, ceil, abs, ilogb, exp, log, exp10, sin, sinp, …

ПРИМЕР VI – РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

- Корректное округление– 4 режима
  - к $+\infty$
  - к $-\infty$
  - к 0
  - к ближайшему (к четному)
  - (опция, 2008) к ближайшему (от 0)



- Флаги исключений
  - INVALID : некорректные аргументы (результат NaN)
  - DIVISION-BY-ZERO : бесконечный результат (точно $\pm\infty$)
  - OVERFLOW : переполнение (результат $\pm\infty$)
  - UNDERFLOW : слишком малый (или денорм.) результат
  - INEXACT : неточный результат

ПРИМЕР VI – ТРЕБОВАНИЯ К SIN В POSIX

NAME sin, sinf, sinl - sine function

SYNOPSIS #include <math.h> double sin(double *x*); float sinf(float *x*); long double sinl(long double *x*);

DESCRIPTION

These functions shall compute the sine of their argument *x*, measured in radians.

An application wishing to check for error situations should set *errno* to zero and call *feclearexcept*(FE_ALL_EXCEPT) before calling these functions. On return, if *errno* is non-zero or *fetestexcept*(FE_INVALID | FE_DIVBYZERO | FE_OVERFLOW | FE_UNDERFLOW) is non-zero, an error has occurred.

RETURN VALUE

Upon successful completion, these functions shall return the sine of *x*.

If *x* is NaN, a NaN shall be returned.

If *x* is ±0, *x* shall be returned.

If *x* is subnormal, a range error may occur and *x* should be returned.

If *x* is ±Inf, a domain error shall occur, and either a NaN (if supported), or an implementation-defined value shall be returned.

ERRORS

These functions shall fail if:

Domain Error The *x* argument is ±Inf. If the integer expression (math_errhandling & MATH_ERRNO) is non-zero, then *errno* shall be set to [EDOM]. If the integer expression (math_errhandling & MATH_ERREXCEPT) is non-zero, then the invalid floating-point exception shall be raised.

These functions may fail if:

Range Error The value of *x* is subnormal If the integer expression (math_errhandling & MATH_ERRNO) is non-zero, then *errno* shall be set to [ERANGE]. If the integer expression (math_errhandling & MATH_ERREXCEPT) is non-zero, then the underflow floating-point exception shall be raised.

ПРИМЕР VI – POSIX VERSUS IEEE 754

IEEE 1003.1 (POSIX)

63 действительных функций + 22 complex

- Все флаги IEEE 754 (кроме INEXACT) для действительных функций
- Выставление
  Domain error ~
  Range error ~
- Для денормализованного x
  f(x) = x для всех функций f(x)~x
- При переполнении должно возвращаться HUGE_VAL
  (точное значение HUGE_VAL не определено)

glibc : +∞
MSVCRT : max double (1.7976931348623 16e+308)
Solaris libc : max float (3.402823466385289e+38)

чие с режимами округления

n, asin, sinh, expm1…)

Источник несовместимости

Противоречие с режимами округления

ПРИМЕР VI – ДРУГИЕ ПРОТИВОРЕЧИЯ

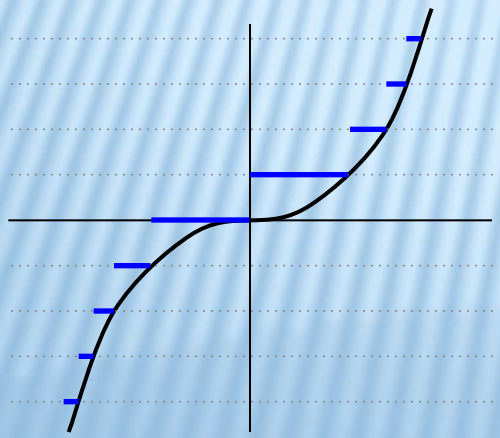
POSIX : HUGE_VAL вместо +∞

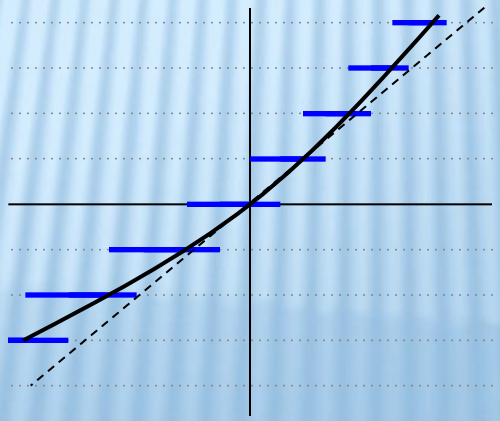
Корректное округление в соответствии с режимом

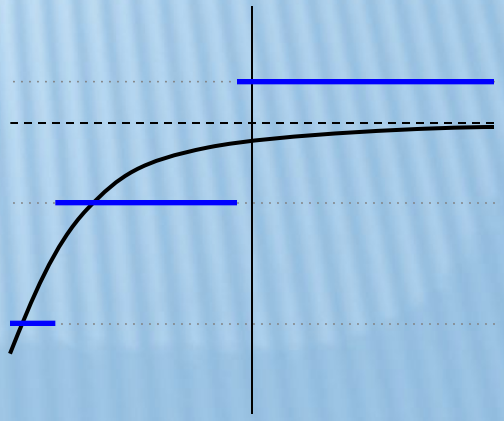
Нечетность, др. симметрии –x, 1/x

POSIX : f(x) = x при денорм. x и f(x)~x в 0

Ограничения значений







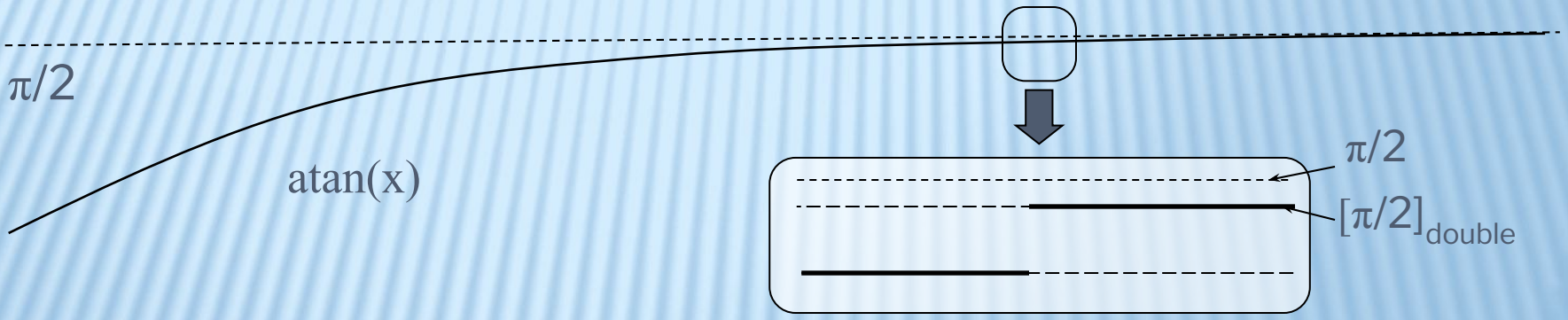
ПРИМЕР VI – КОРРЕКТНОЕ СВОЙСТВО

tan(x), atan(x) – тангенс и арктангенс

- tan(atan(x)) ~ x при x → +∞

Для чисел с плавающей точкой (double)

- $(\tan(\operatorname{atan}(10^{50})) = 1.633123935319537... \cdot 10^{16}$



$[\pi/2]_{double} = 884279719003555/2^{49}$

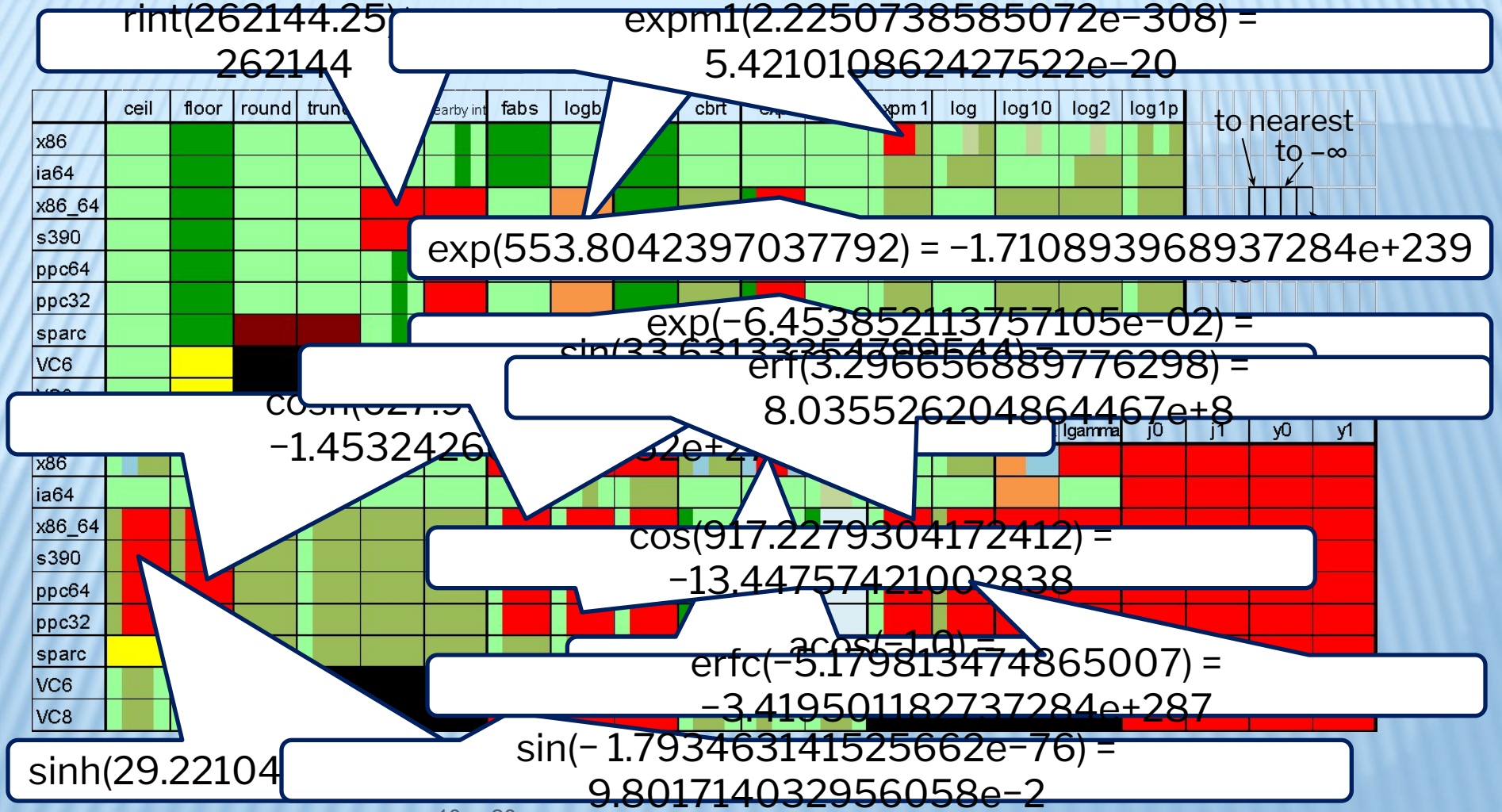
при $x > \tan([\pi/2]_{double})$ $\tan(\operatorname{atan}(x)) = \tan([\pi/2]_{double}) \approx 1/(\pi/2 - [\pi/2]_{double})$

$(\pi/2 - [\pi/2]_{double}) = 6.1232339957367658... \cdot 10^{-17}$

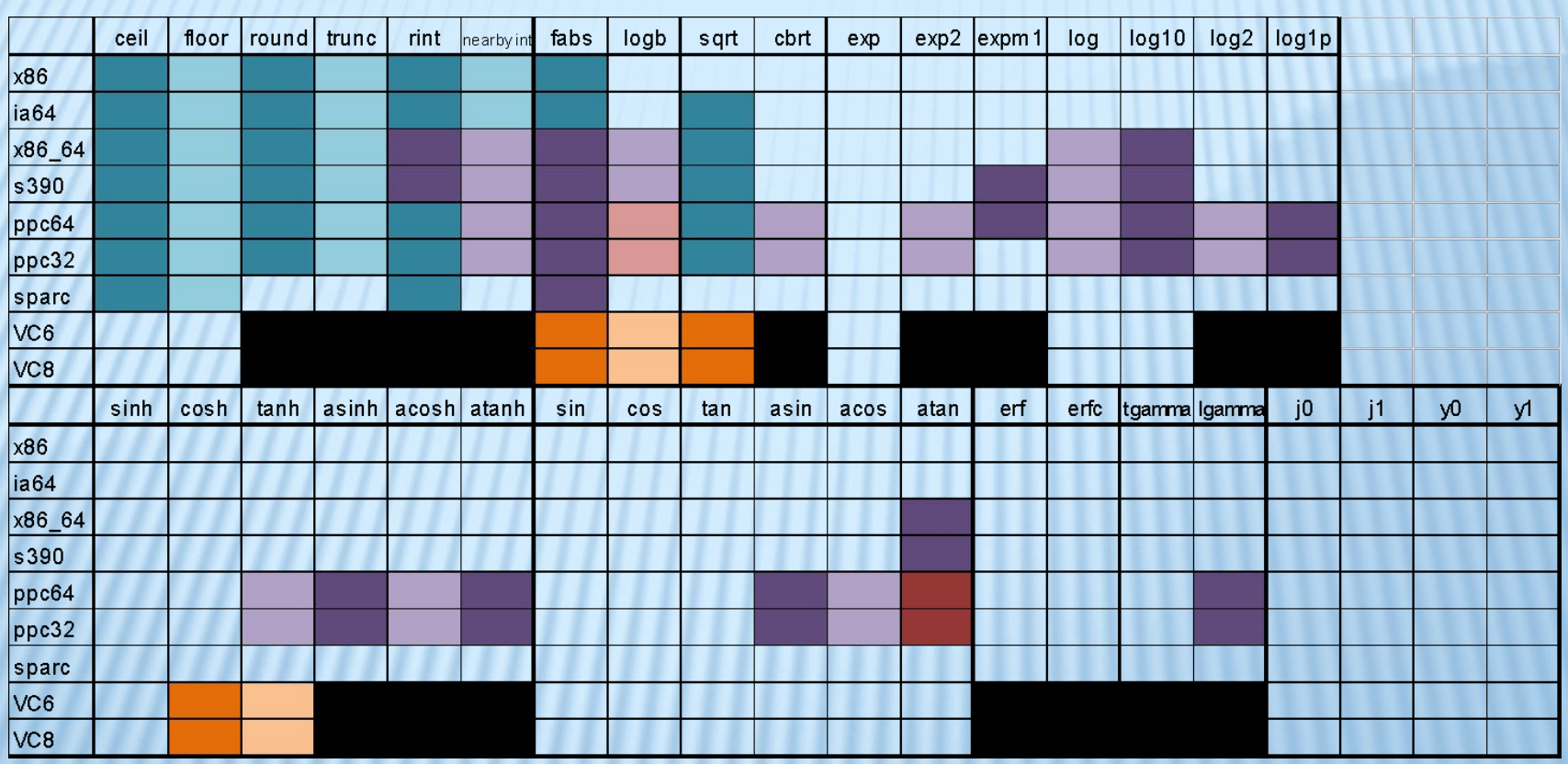
ПРИМЕР VI – ТЕСТИРОВАНИЕ БИБЛИОТЕК

ID	Процессор	Бибилиотека	ОС
x86	i686	glibc 2.5	Linux Fedora
ia64	ia64	glibc 2.4	Linux Debian
x86_64	x86_64	glibc 2.3.4	Linux RHEL
s390	s390	glibc 2.4	Linux Debian
ppc64	ppc64	glibc 2.7	Linux Debian
ppc32	ppc32	glibc 2.3.5	Linux SLES
sparc	UltraSparc III	Solaris libc	Solaris 10
VC8	x86_64	MS Visual C 2005	Windows XP
VC6	i686	MS Visual C 6.0	Windows XP

ПРИМЕР VI – РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВ



ПРИМЕР VI – ОДИНАКОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ



Unsupported

БОНУСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ

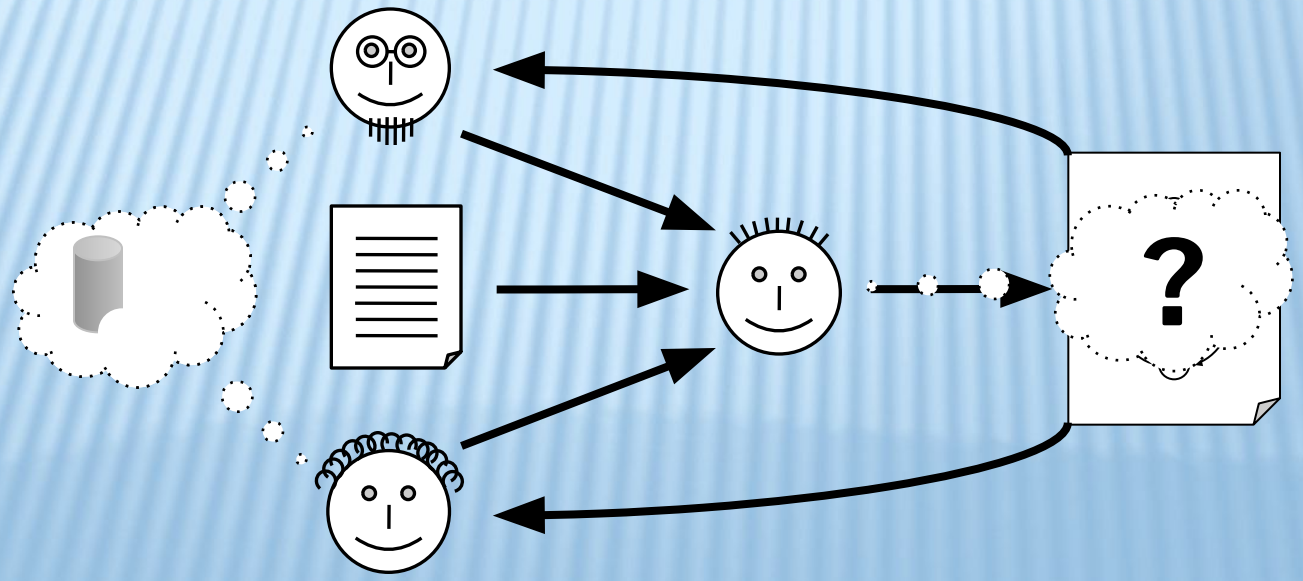
Представление требований в виде математической модели

- Возможности анализа
  - Однозначности
  - Непротиворечивости
  - Полноты
- Возможности проверки (верификации)
  - Правила для статического анализа
  - Критерии корректности для тестов

- Адекватность – **не гарантируется!**

ОБЕСПЕЧЕНИЕ АДЕКВАТНОСТИ

- Как проверить понимание?
- Переформулировка + оценка + правка
- Представить информацию в другой форме
  - Текст таблицы, диаграммы, схемы
  - Таблицы диаграммы, грамматики
  - Диаграммы структурированный текст, таблицы



ПРИМЕР VII – STRTOD(), POSIX

`strtod` – преобразование строки в число с плавающей точкой

- Интерфейс

  ```
  double strtod(const char *nptr, char **endptr)
  ```

- Описание
  - Преобразует начало строки `nptr` в число типа double
  - Декомпозиция исходной строки
    - Начальные пробелы
    - Далее – то, что можно считать числом
    - Нераспознанные символы (начало записывается в `endptr`)
  - Преобразование распознанной части в число
- Результаты
  - При успешной конвертации – число
  - Иначе
    - При переполнении – +HUGE_VAL или -HUGE_VAL, errno := [ERANGE] (shall)
    - При слишком малом результате – errno := [ERANGE] (shall)
    - Иначе 0, errno := [EINVAL] (may)

ПРИМЕР VII – РАЗМЕТКА ТРЕБОВАНИЙ

The expected form of the subject sequence is an optional plus or minus sign, then one of the following:

- A non-empty sequence of decimal digits optionally containing a radix character, then an optional exponent part
- A 0x or 0X, then a non-empty sequence of hexadecimal digits optionally containing a radix character, then an optional binary exponent part
- One of INF or INFINITY, ignoring case
- One of NAN or NAN(*n-char-sequence*$_{opt}$), ignoring case in the NAN part, where:

n-char-sequence:
digit
nondigit
n-char-sequence digit

The subject sequence is defined as the longest initial subsequence of the input string, starting with the first non-white-space character, that is of the expected form. The subject sequence contains no characters if the input string is not of the expected form.

~~a decimal exponent part nor a radix character appears in a decimal floating-point number, or if a binary exponent part does not appear in a hexadecimal floating-point number, an exponent part of the appropriate type with value zero is assumed to follow the last digit in the string. If the subject sequence begins with a minus sign, the sequence shall be interpreted as negated. A character sequence~~ INF or INFINITY shall be interpreted as an infinity, if representable in the return type, ~~else as if it were a floating constant that is too large for the range of the return type. A character sequence~~ NAN or NAN(*n-char-sequence*$_{opt}$) shall be interpreted as a ~~quiet NaN, if supported in the return type, else as if it were a subject sequence part that~~ does not have ~~the expected form; the meaning of the *n*-char sequences is implementation-defined. A pointer to the~~ final string is stored in the object pointed to by ~~*endptr*, provided that *endptr* is not a null pointer.~~

~~If the subject sequence has the hexadecimal form and FLT_RADIX is a power of 2, the value resulting from the conversion is correctly~~ rounded.

[CX] The radix character is defined in the program's locale (category *LC_NUMERIC*). In the POSIX locale, or in a locale where the radix character is not defined, the radix character shall default to a period ('.').

~~In other than the C~~ [CX] ~~or POSIX locales, other implementation-defined subject sequences may be accepted.~~

~~If the subject sequence is empty or does not have the expected form, no conversion shall be performed; the value of *str* is stored in the object pointed to by *endptr*, provided that *endptr* is not a~~ null pointer.

[CX] ~~The *strtod*() function shall not change the setting of *errno* if successful.~~

Since 0 is returned on error and is also a valid return on success, an application wishing to check for error situations should set *errno* to 0, then call *strtod*(), *strtof*(), or *strtold*(), then check *errno*.

ПРИМЕР VII – РАЗБОР СТРОКИ

```
( [whitespace] )*
( '+' | '-' )?
(
    [digit or '.'!]+ (#'e'('+'|'-')?[digit]*)?
  | #'0x'[hdigit or '.'!]+(#'p'('+'|'-')?[digit]*)?
  | #'inf' ( #'inity' )?
  | #'nan' [any]*
)
```

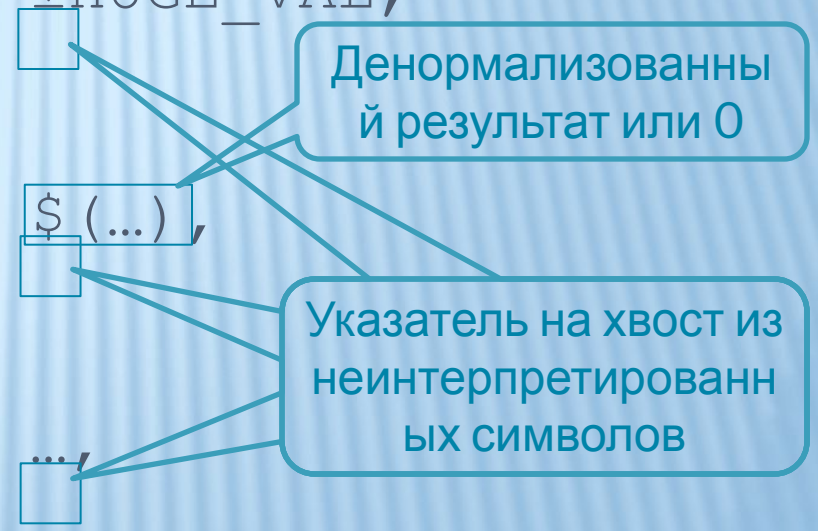
Exponent

Binary exponent

Radix character

ПРИМЕР VII – ВОЗВРАЩАЕМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

- не число → result = 0,
  endptr = &nptr
  errno = EINVAL
- overflow → result = ±HUGE_VAL,
  endptr = …,
  errno = ERANGE
- underflow → result = $(…),
  endptr = …,
  errno = ERANGE
- normal → result = …,
  endptr = …,
  errno не менять



ПРИМЕР VII – СПЕЦИФИКАЦИЯ STRTOD()

```
specification Unifloat* strtod_spec(CString* st, CString** endptr, ErrorCode* errno) {
  pre { REQ("", "endpt should be not NULL", endptr != NULL); return true; }
  post {
    CString* model_endptr; IntT model_err = 0;
    Unifloat* model_res = strtod_model(st, &model_endptr, &model_err);
    round_Unifloat(strtod_spec); round_Unifloat(model_res);
    if (model_err == 1) {
      REQ("strtod.13", "If no conversion is performed, the value of nptr shall be stored"
                       "in the object pointed to by endptr", equals(st, *endptr)); }
    if (*errno == SUT_EINVAL) {
      REQ("strtod.15", "If no conversion could be performed, 0 shall be returned"
          , isZero_Unifloat(strtod_spec)); }
    if (isOverflow_Unifloat(model_res)) {
      REQ("strtod.16", "If the correct value is outside the range of representable values,"
                       "HUGE_VAL shall be returned", isInfinity_Unifloat(strtod_spec)); }
    if (isUnderflow_Unifloat(model_res)) {
      REQ("strtod.17", "If the correct value would cause underflow, the smallest normalized"
                       "positive number shall be returned"
          ,    (compare_Unifloat(abs_Unifloat(strtod_spec), min_Unifloat(type)) != 1)
            && (strtod_spec->sign == 1)); }
    ...
```

ПРИМЕР VII – АНАЛОГ STRTOD() ИЗ QT

```
double QString::toDouble ( bool * ok = 0 ) const
```

Returns the string converted to a double value.
Returns 0.0 if the conversion fails.
If a conversion error occurs, **ok* is set to false; otherwise **ok* is set to true.

Various string formats for floating point numbers can be converted to double values.

This function tries to interpret the string according to the current locale. The current locale is determined from the system at application startup and can be changed by calling QLocale::setDefault(). If the string cannot be interpreted according to the current locale, this function falls back on the "C" locale.

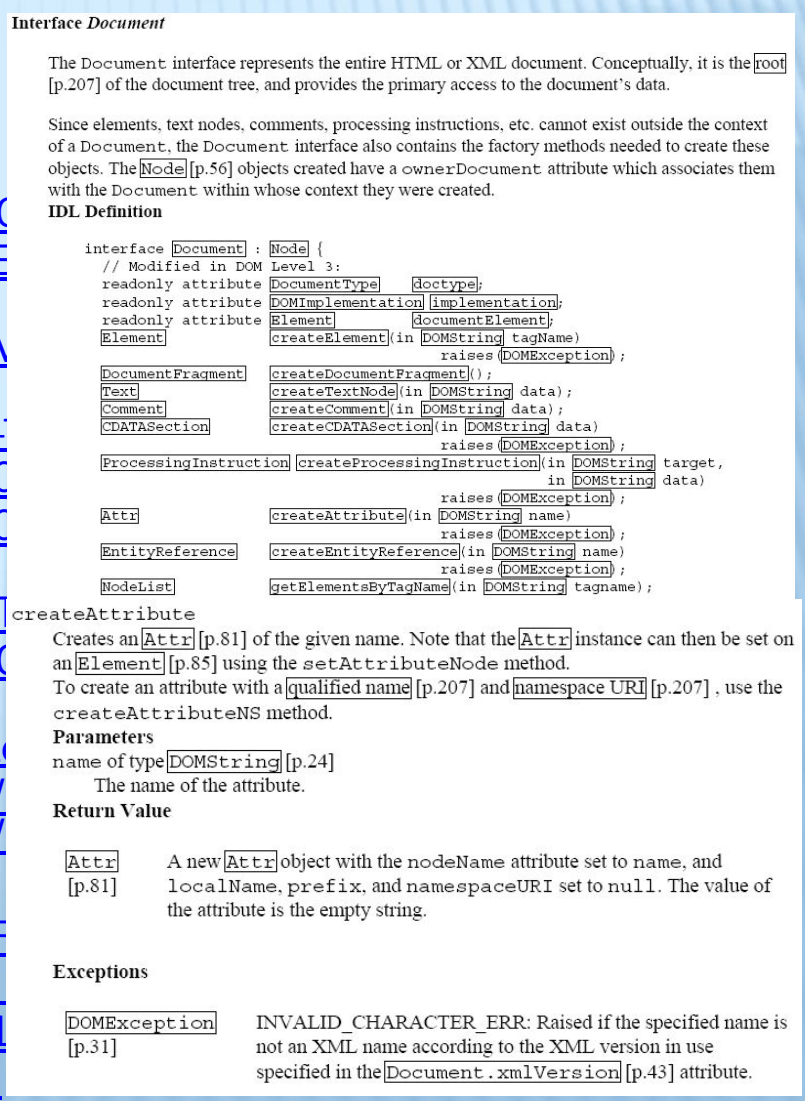
Due to the ambiguity between the decimal point and thousands group separator in various locales, this function does not handle thousands group separators. If you need to convert such numbers, see QLocale::toDouble().

See also number(), QLocale::setDefault(), QLocale::toDouble(), and trimmed().

ПРИМЕР VIII – DOM

http://www.w3.org/DOM/DOMTR

- Основные документы
  - Core http://www.w3.org/TR/2004/REC
  - HTML http://www.w3.org/TR/2003/RE
  - Style (StyleSheets + CSS)http://www.w3.org/TR/2000/REC-DOM
  - Traversal and Range http://www.w3.org/TR/2000/REC-DOM-Level-2-T
  - Load-Save http://www.w3.org/TR/200
  - Validation http://www.w3.org/TR/200
  - Element Traversal http://www.w3.org/TR/2008/REC-ElementT
  - Xpath http://www.w3.org/TR/2004/NO
  - Views and Formatting http://www.w3.org/TR/2004/NOTE-DOM-L
  - Events http://www.w3.org/TR/2009/W http://www.w3.org/TR/2009/W
- Дополнительные части
  - DOM Events http://www.w3.org/TR
  - MathML http://www.w3.org/TR/#tr_
  - SMIL http://www.w3.org/TR/#tr_SMIL
  - SVG http://www.w3.org/TR/#tr_SVG http://www.w3.org/TR/#tr_SVG_Tiny



Interface *Document*

The `Document` interface represents the entire HTML or XML document. Conceptually, it is the root [p.207] of the document tree, and provides the primary access to the document's data.

Since elements, text nodes, comments, processing instructions, etc. cannot exist outside the context of a `Document`, the `Document` interface also contains the factory methods needed to create these objects. The `Node` [p.56] objects created have a `ownerDocument` attribute which associates them with the `Document` within whose context they were created.

IDL Definition

```
interface Document : Node {
  // Modified in DOM Level 3:
  readonly attribute DocumentType     doctype;
  readonly attribute DOMImplementation implementation;
  readonly attribute Element          documentElement;
  Element             createElement(in DOMString tagName)
                                    raises(DOMException);
  DocumentFragment    createDocumentFragment();
  Text                createTextNode(in DOMString data);
  Comment             createComment(in DOMString data);
  CDATASection        createCDATASection(in DOMString data)
                                    raises(DOMException);
  ProcessingInstruction createProcessingInstruction(in DOMString target,
                                                     in DOMString data)
                                    raises(DOMException);
  Attr                createAttribute(in DOMString name)
                                    raises(DOMException);
  EntityReference     createEntityReference(in DOMString name)
                                    raises(DOMException);
  NodeList            getElementsByTagName(in DOMString tagname);
```

`createAttribute`

Creates an `Attr` [p.81] of the given name. Note that the `Attr` instance can then be set on an `Element` [p.85] using the `setAttributeNode` method.
To create an attribute with a qualified name [p.207] and namespace URI [p.207], use the `createAttributeNS` method.

Parameters

`name` of type `DOMString` [p.24]
The name of the attribute.

Return Value

`Attr` [p.81] — A new `Attr` object with the `nodeName` attribute set to `name`, and `localName`, `prefix`, and `namespaceURI` set to `null`. The value of the attribute is the empty string.

Exceptions

`DOMException` [p.31] — INVALID_CHARACTER_ERR: Raised if the specified name is not an XML name according to the XML version in use specified in the `Document.xmlVersion` [p.43] attribute.

ПРИМЕР VIII – ОСНОВНЫЕ ЧАСТИ DOM

Модуль	Типы	Константы	Методы	Атрибуты	R/W Атрибуты
Core	34	64	89	75	10
HTML	56		36	293	255
Events	15	29	35	45	
Views	25	13	32	67	21
Style Sheets	5		4	12	2
CSS	22	37	22	158	132
Traversal	4	16	13	9	1
Range	3	8	19	7	
Load-Save	15	15	14	27	15
Validation	5	14	22	13	1
XPath	6	15	7	9	
Всего	**190**	**211**	**283**	**715**	**437**

ПРИМЕР VIII – РАЗМЕТКА ТРЕБОВАНИЙ

Общее, N1 N2

`Node insertBefore (Node newChild, Node refChild)`

Inserts the node `newChild` before the existing child node `refChild`. If `refChild` is null, insert `newChild` at the end of the list of children. If `newChild` is a `DocumentFragment` [p.40] object, all of its children are inserted, in the same order, before `refChild`. If the `newChild` is already in the tree, it is first removed.

N4 N3

Note: Inserting a node before itself is implementation dependent.

Parameters: `newChild` of type `Node` – The node to insert.

`refChild` of type `Node` – The reference node, i.e., the node before which the new node must be inserted.

N5

E1 E2 E3 E4 E5 E6

Return Value: The node being inserted.

Exceptions: `DOMException`

`HIERARCHY_REQUEST_ERR`: Raised if this node is of a type that does not allow children of the type of the `newChild` node, or if the node to insert is one of this node's ancestors or this node itself, or if this node is of type `Document` [p.41] and the DOM application attempts to insert a second `DocumentType` [p.115] or `Element` [p.85] node.

`WRONG_DOCUMENT_ERR`: Raised if `newChild` was created from a different document than the one that created this node.

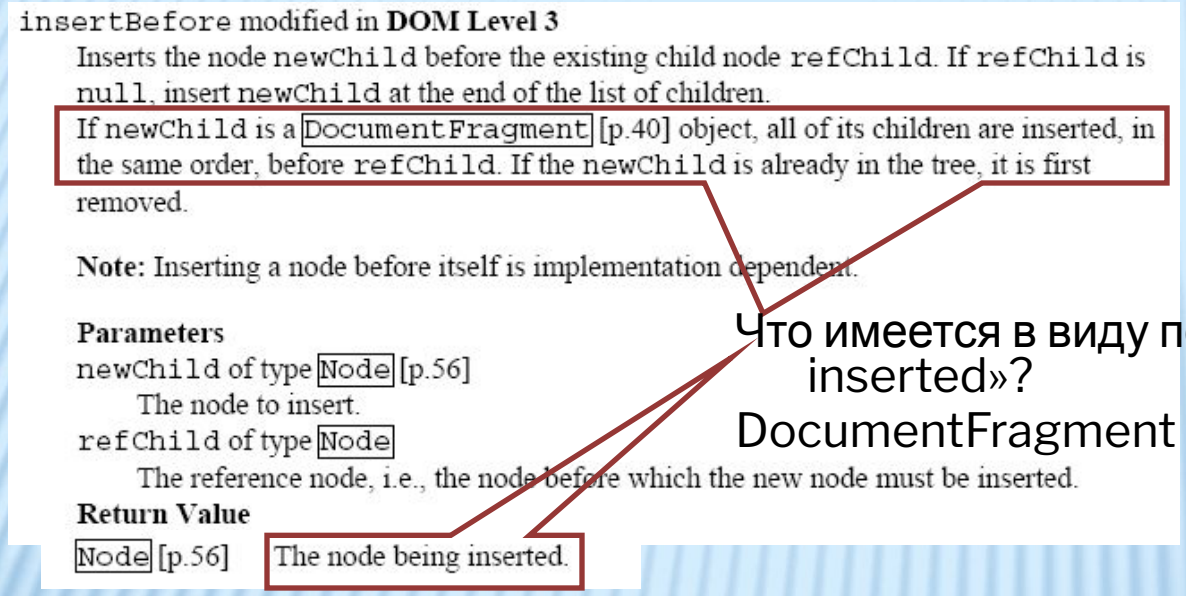
`NO_MODIFICATION_ALLOWED_ERR`: Raised if this node is readonly or if the parent of the node being inserted is readonly.

`NOT_FOUND_ERR`: Raised if `refChild` is not a child of this node.

`NOT_SUPPORTED_ERR`: if this node is of type `Document` [p.41], this exception might be raised if the DOM implementation doesn't support the insertion of a `DocumentType` [p.115] or `Element` [p.85] node.

E7 E9 E10 E11 E8

ПРИМЕР VIII – НЕОДНОЗНАЧНОСТИ



`insertBefore` modified in **DOM Level 3**

Inserts the node `newChild` before the existing child node `refChild`. If `refChild` is `null`, insert `newChild` at the end of the list of children.

If `newChild` is a `DocumentFragment` [p.40] object, all of its children are inserted, in the same order, before `refChild`. If the `newChild` is already in the tree, it is first removed.

Note: Inserting a node before itself is implementation dependent.

Parameters

`newChild` of type `Node` [p.56]

The node to insert.

`refChild` of type `Node`

The reference node, i.e., the node before which the new node must be inserted.

Return Value

`Node` [p.56] The node being inserted.

Что имеется в виду под «the node being inserted»?

DocumentFragment или его элемент?

- Что будет при вставке null?
- При вставке DocumentFragment
  - Что будет результатом?
  - Как изменится список «детей» при некорректном «ребенке» в конце?
  - Можно ли добавить пустой DocumentFragment, если добавлять «детей» нельзя?
- Как определить, поддерживается ли вставка DocumentType и Element?
- Почему нет ограничений на порядок «детей» в Document?

ПР… БР…

			Firefox 3.6.3		Opera 10.53.3374		Chrome 5.0.307.1		Safari 4.0.5 (531.22.7)		Internet Explorer 8.0.60		Internet Explorer 9.0.77	
Interface	Member	Le	Support	Value	Support	Value	Support	Value	Support	Value	Support	Value	Support	Value
Node		1	supported		supported		supported		supported		supported		supported	
Node	nodeName	1	string	HEAD	string	HEAD	string	HEAD	string	HEAD	string	HEAD	string	HEAD
Node	nodeValue	1	object	<null>	object	<null>	object	<null>	object	<null>	object	<null>	object	<null>
Node	nodeType	1	number	1	number	1	number	1	number	1	number	1	number	1
Node	parentNode	1	object	[object HTM	object	[object HTM	object	[object HTM	object	[object HTM	object	[object]	object	[object]
Node	childNodes	1	object	[object Noc	object	[object Noc	object	[object Noc	function	[object Noc	object	[object]	object	[object]
Node	firstChild	1	object	[object Text	object	[object Text	object	[object Text	object	[object Text	object	[object]	object	[object]
Node	lastChild	1	object	[object HTM	object	[object HTM	object	[object HTM	object	[object HTM	object	[object]	object	[object]
Node	previousSibling	1	object	<null>	object	<null>	object	<null>	object	<null>	object	<null>	object	<null>
Node	nextSibling	1	object	[object HTM	object	[object HTM	object	[object HTM	object	[object HTM	object	[object]	object	[object]
Node	attributes	1	object	[object Nar	object	[object Nar	object	[object Nar	object	[object Nar	object	[object]	object	[object]
Node	ownerDocument	1	object	[object HTM	object	[object HTM	object	[object HTM	object	[object HTM	object	[object]	object	[object]
Node	namespaceURI	2	string	http://www	object	<null>	string	http://www	string	http://www	undefined		undefined	
Node	prefix	2	object	<null>	object	<null>	object	<null>	object	<null>	undefined		undefined	
Node	localName	2	string	head	string	HEAD	string	head	string	head	undefined		undefined	
Node	baseURI	3	string	file:///E:/w	string	file://local	string	file:///E:/w	string	file:///E:/w	undefined		undefined	
Node	textContent	3	string	Test - DOM	string	Test - DOM	string	Test - DOM	string	Test - DOM	undefined		undefined	
Node	insertBefore()	1	function	[object HTM	function	[object HTM	function	[object HTM	function	[object HTM	object	[object]	object	[object]
Node	replaceChild()	1	function	[object HTM	function	[object HTM	function	[object HTM	function	[object HTM	object	[object]	object	[object]
Node	removeChild()	1	function	[object HTM	function	[object HTM	function	[object HTM	function	[object HTM	object	[object]	object	[object]
Node	appendChild()	1	function	[object HTM	function	[object HTM	function	[object HTM	function	[object HTM	object	[object]	object	[object]
Node	hasChildNodes(	1	function	TRUE	function	TRUE	function	TRUE	function	TRUE	object	TRUE	object	TRUE
Node	cloneNode()	1	function	[object HTM	function	[object HTM	function	[object HTM	function	[object HTM	object	[object]	object	[object]
Node	normalize()	1	function	-	function	-	function	-	function	-	object	-	object	-
Node	isSupported()	2	function	TRUE	function	TRUE	function	TRUE	function	TRUE	undefined		undefined	
Node	hasAttributes()	2	function	TRUE	function	TRUE	function	TRUE	function	TRUE	undefined		undefined	
Node	compareDocume	3	function	<empty>	function	<empty>	function	<empty>	function	<empty>	undefined		undefined	
Node	isSameNode()	3	function	TRUE	function	TRUE	function	TRUE	function	TRUE	undefined		undefined	
Node	lookupPrefix()	3	function	<null>	function	<null>	function	<null>	function	<null>	undefined		undefined	
Node	isDefaultNames	3	function	TRUE	function	<empty>	function	<empty>	function	<empty>	undefined		undefined	
Node	lookupNamespa	3	function	<null>	function	<empty>	function	<null>	function	<null>	undefined		undefined	
Node	isEqualNode()	3	function	TRUE	undefined		function	TRUE	function	TRUE	undefined		undefined	
Node	getFeature()	3	function	<null>	function	<null>	undefined		undefined		undefined		undefined	
Node	setUserData()	3	function	<null>	undefined		undefined		undefined		undefined		undefined	
Node	getUserData()	3	function	<null>	undefined		undefined		undefined		undefined		undefined	
NodeList		1	supported		supported		supported		supported		supported		supported	
NodeList	length	1	number	2	number	2	number	2	number	2	number	2	number	2
NodeList	item()	1	function	[object Text	function	[object Text	function	[object Text	function	[object Text	string	[object]	string	[object]
NamedNodeMap		1	supported		supported		supported		supported		supported		supported	
NamedNodeM	length	1	number	1	number	1	number	1	number	1	number	108	number	108
NamedNodeM	getNamedItem()	1	function	<null>	function	<null>	function	<null>	function	<null>	object	call failed	object	call failed
NamedNodeM	setNamedItem()	1	function	<null>	function	<null>	function	<null>	function	<null>	object	<null>	object	<null>
NamedNodeM	removeNamedIt	1	function	[object Attr	function	[object Attr	function	[object Attr	function	[object Attr	object	[object]	object	[object]
NamedNodeM	item()	1	function	[object Attr	function	[object Attr	function	[object Attr	function	[object Attr	string	[object]	string	[object]
NamedNodeM	getNamedItemN	2	function	<null>	function	<null>	function	<null>	function	<null>	undefined		undefined	
NamedNodeM	setNamedItemN	2	function	<null>	function	<null>	function	<null>	function	<null>	undefined		undefined	
NamedNodeM	removeNamedIt	2	function	[object Attr	function	call failed	function	[object Attr	function	[object Attr	undefined		undefined	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ I

- «Классические» формальные методы слишком трудоемки для подавляющего большинства сложных задач
- Формализация требований одна уже дает многие их бонусы
  - Позволяет проводить строгий анализ задачи
  - Оставляет затраты приемлемыми
  - При дополнении автоматизированными техниками верификации работает во многих практически значимых ситуациях

ЗАКЛЮЧЕНИЕ II

- Формализация – не панацея
  - Не гарантирует адекватности модели, для этого нужны дополнительные усилия
  - В сложных случаях все-таки очень сложна
- Нужны компонентные методы построения и анализа формальных моделей
  - Есть надежда, что они позволят эффективно работать со сверхсложными моделями

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!