МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Исследование и разработка методики и алгоритма генерации виртуального аппаратного обеспечения по спецификации

Диссертация на соискание степени магистра по направлению 09.04.04 «Программная инженерия»

Научный руководитель: д. ф-м. н., доц.
Кононова Александра Игоревна
Соискатель: магистрант гр. ПИН-22М
Уманский Александр Александрович

Москва, 2022

Проблемная ситуация

При создании прикладного ПО для специализированного аппаратного обеспечения дорого обеспечивать разработчиков самим аппаратным обеспечением.

Причины сложившейся ситуации:

- производство аппаратного обеспечения в условиях санкций и дефицита полупроводников стало дорогим;
- простой программистов, пока происходит производство и доставка аппаратного обеспечения;
- трудоемкость создания собственного виртуального аппаратного обеспечения.

Пример специализированного аппаратного обеспечения

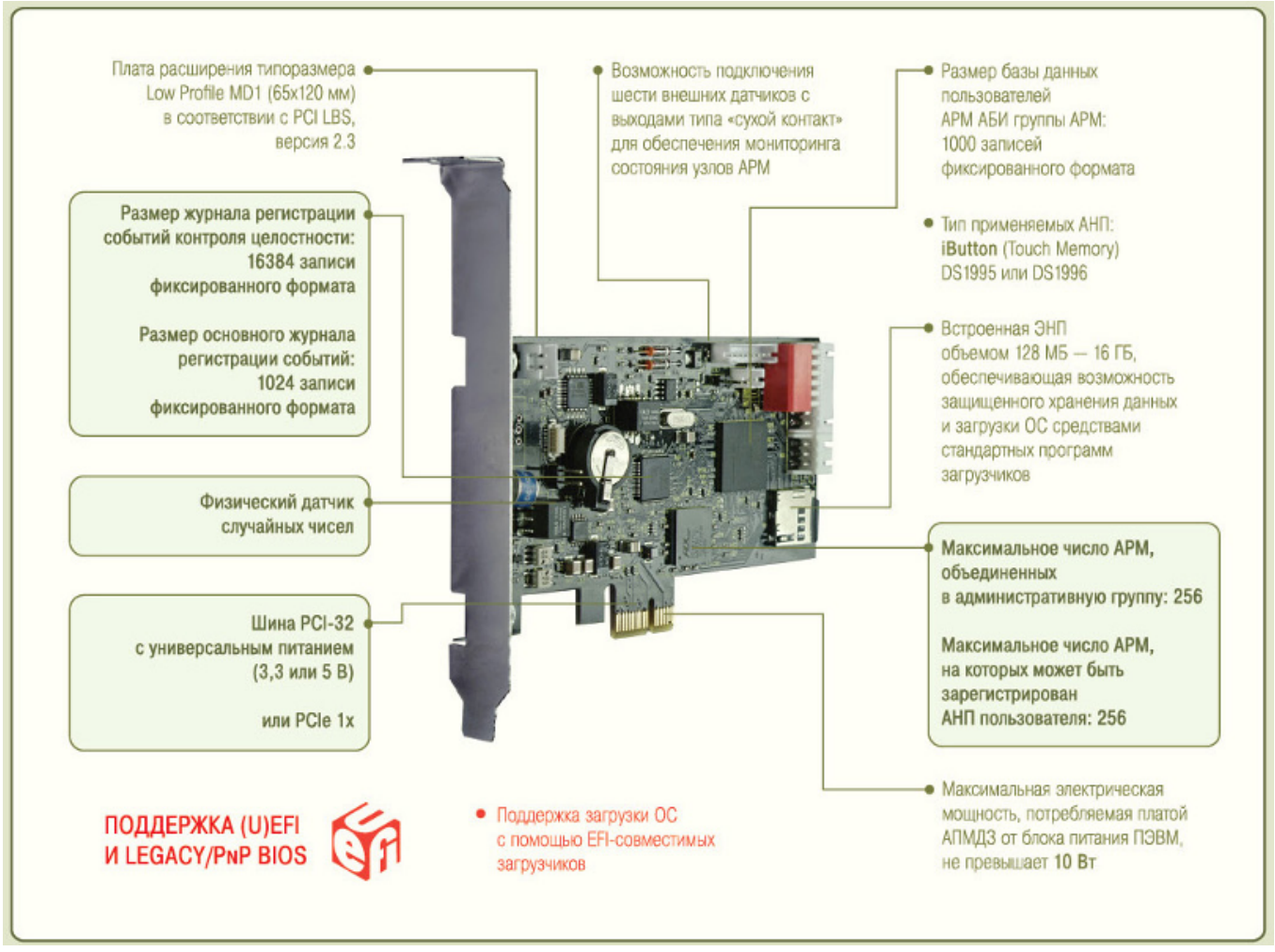


Рис. 1: Аппаратно-программный модуль доверенной загрузки Максим-М1

Цель и задачи диссертации

Цель: снижение трудоемкости создания виртуальных устройств.

Задачи:

- аналитический обзор существующих методов создания виртуального аппаратного обеспечения;
- формализация задачи создания виртуального аппаратного обеспечения;
- создание методики и алгоритма генерации виртуального аппаратного обеспечения на основе его спецификации;
- программная реализация методики и алгоритма в виде генератора виртуального аппаратного обеспечения (языка QPyDev);
- выбор метрик оценки эффективности генератора виртуального аппаратного обеспечения;
- экспериментальное исследование эффективности генератора виртуального аппаратного обеспечения.

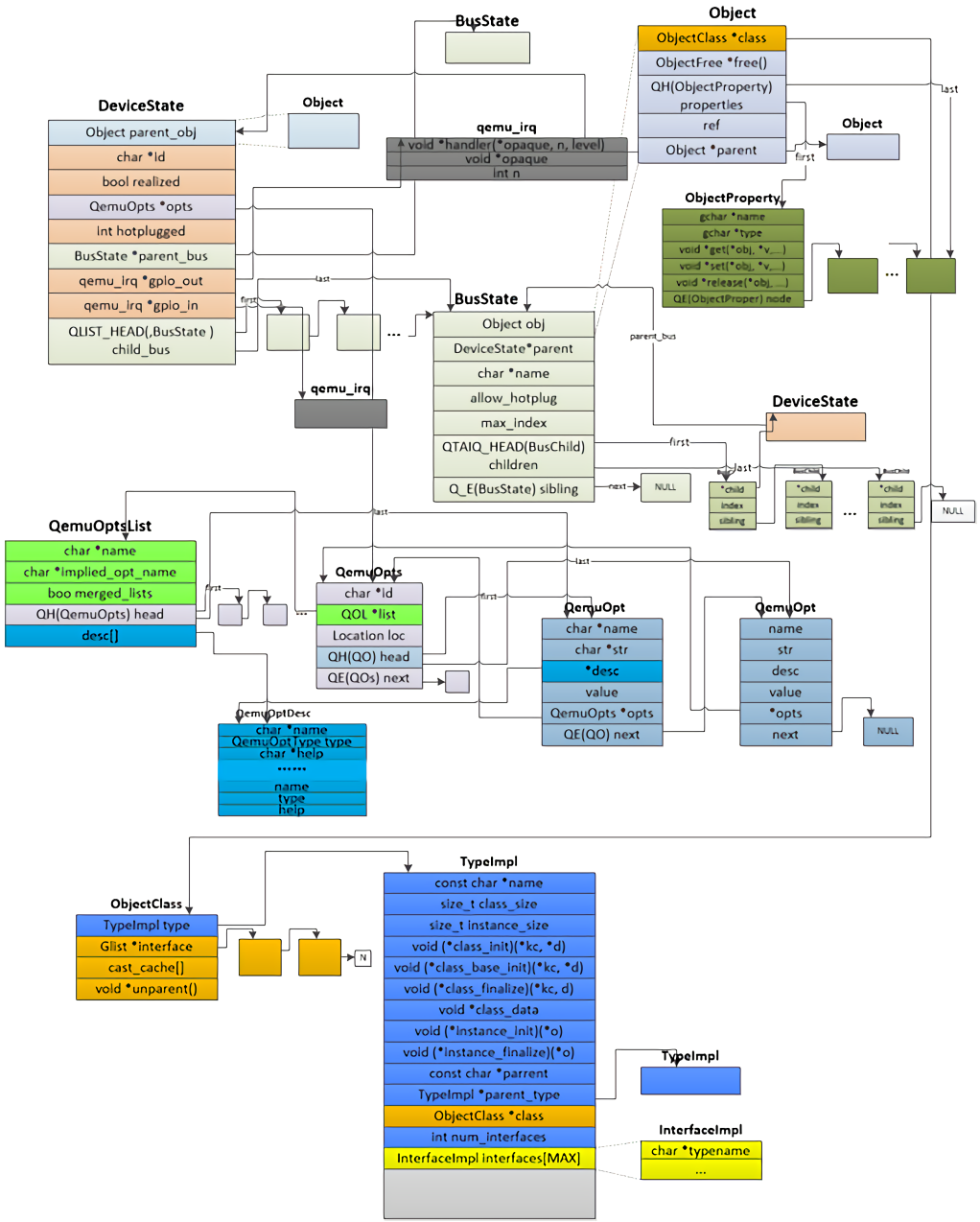
На защиту выносятся

- формализованное представление задачи создания виртуального аппаратного обеспечения;
- алгоритм и методика генерации виртуального аппаратного обеспечения;
- генератор виртуального аппаратного обеспечения (язык QPyDev);
- метрики оценки эффективности генератора виртуального аппаратного обеспечения;
- экспериментальные результаты применения генератора виртуального аппаратного обеспечения.

Анализ существующих методов создания виртуального аппаратного обеспечения (АО)

Метод	Особенности	Недостатки
Создание stub-симулятора	Требует создания интерфейсов-адапторов в прикладном ПО	Приходится создавать интерфейсы-адапторы для каждого разрабатываемого ПО
Использование записи работы АО	Быстрый метод, не требует специальных знаний о внутреннем устройстве АО	• Взаимодействие ПО с аппаратным обеспечением ограничивается заранее записанными сценариями • Количество записей очень быстро разрастается • Зачастую записи снимаются только с корректных сценариев использования
Использование эмулятора QEMU	• Готовая инфраструктура для создания виртуального АО • Постоянная поддержка эмулятора силами сообщества	• Необходимость написания виртуального АО на низкоуровневом языке • Необходимость обучения объектной системе QEMU (QOM)

Объектная модель QEMU (QOM)



Виртуальное аппаратное обеспечение в QEMU является объектом QOM и является потомком `Object`.
`DeviceState` – состояние и свойства конкретного экземпляра виртуального аппаратного обеспечения.
`BusState` – состояние и свойства конкретной виртуальной шины.
Для встраивания виртуального аппаратного обеспечения:

- `TypeImpl` – описание инициализации виртуального аппаратного обеспечения;
- `QemuOpt` – опции виртуального аппаратного обеспечения, которые возможно задать с помощью командной строки;
- `MemoryRegionOps` – структура для отображения виртуального аппаратного обеспечения в память.

Формализация задачи создания виртуального аппаратного обеспечения

Время разработки виртуального аппаратного обеспечения

$$T = L + D + C + R \tag{1}$$

где

- T – общее время разработки виртуального аппаратного обеспечения;
- L – время анализа QOM для реализации виртуального аппаратного обеспечения;
- D – описание устройства в терминах QOM;
- C – программирование логики устройства;
- R – тестирование и отладка.

Порог вхождения в QOM для программиста высок, из-за чего $L + D > C + R$. В данном исследовании стоит задача уменьшения L и D.

Формализация задачи создания виртуального аппаратного обеспечения

Пусть задан ориентированный взвешенный граф $G = (V,E)$, где

- $v \in V$ – коммит в системе контроля версий;
- $e = (v_i,v_{i+1}) \in E$ – изменение виртуального аппаратного обеспечения от коммита v_i до коммита v_{i+1};
- вес $f(e)$ ребра $e = (v_i,v_{i+1}) \in E$ – время на формирование коммита v_{i+1}

$$f : E \to \mathbb{R} \tag{2}$$

Общее время, затраченное на формирование цепочки коммитов:

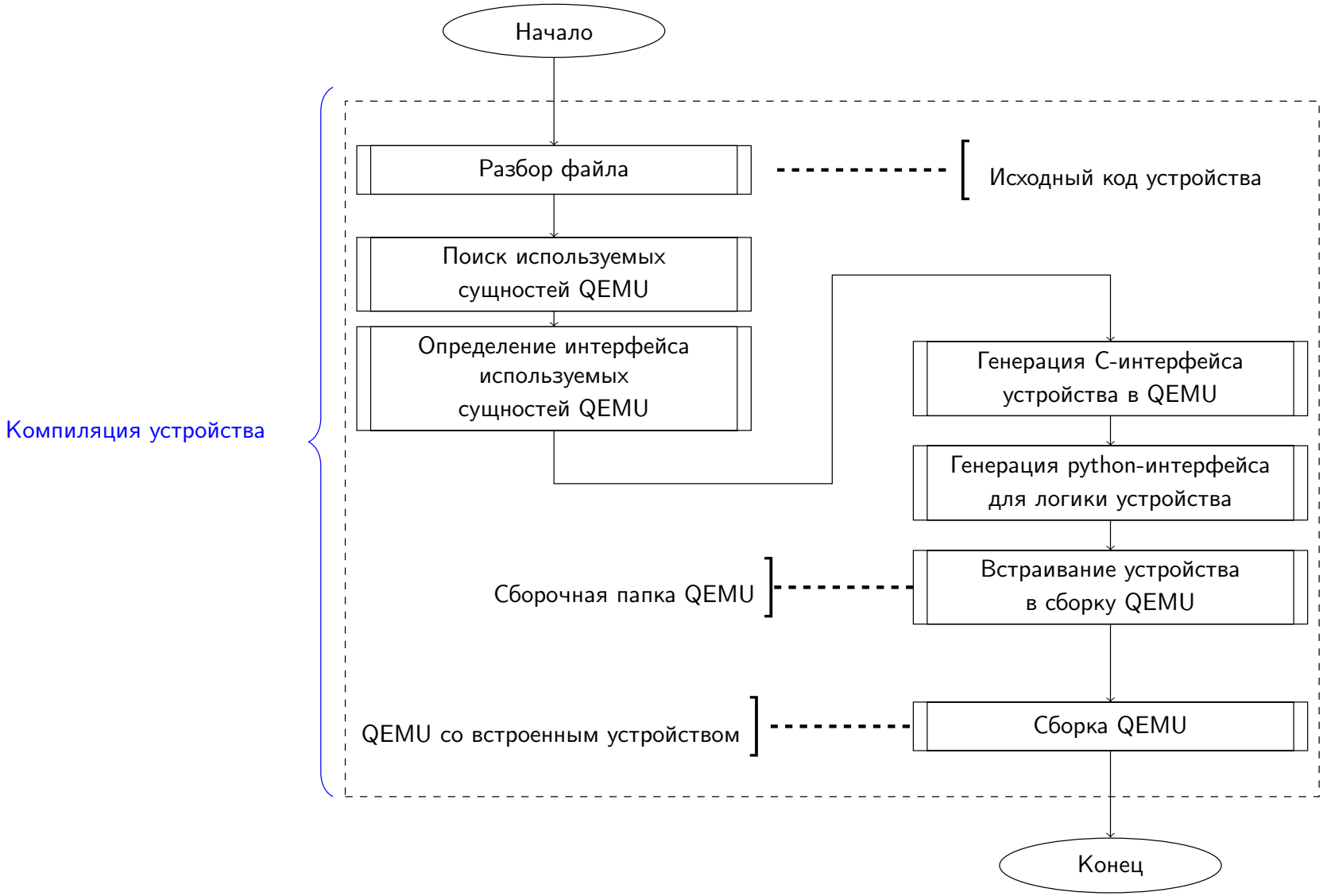
$$T = \sum_{i=1}^{|E|} f(e_i) \tag{3}$$

Методика создания виртуального аппаратного обеспечения

Классическая методика

Разработанная методика

Алгоритм создания виртуального аппаратного обеспечения



Грамматика языка QPyDev

⟨*letter*⟩ ::= ‘a’ ... ‘z’ | ‘A’ ... ‘Z’;

⟨*digit*⟩ ::= ‘0’ ... ‘9’ ;

⟨*symbol*⟩ ::= \x20 ... \x7E ; (* любой печатный символ, согласно кодам ASCII *)

⟨*const value*⟩ ::= <digit> | ‘’ { <symbol> } ‘’;

⟨*identifier*⟩ ::= <letter> [{ <letter> | <digit> | ‘_’ }] ;

⟨*block start*⟩ ::= ‘’;

⟨*block end*⟩ ::= ‘’;

⟨*field*⟩ ::= <identifier> ‘=’ <identifier> | <block> ;

⟨*block*⟩ ::= <block start> <field> [{ ‘,’ <field> }] <block end>;

⟨*device definition*⟩ ::= ’#’ <identifier>;

⟨*device class inheritance*⟩ ::= ‘(’ <identifier> ‘:’ <identifier> [{ ‘,’ <identifier> }] ‘)’;

⟨*device class block*⟩ ::= <device class inheritance> <block>;

⟨*bind block*⟩ ::= ‘@bind’ <block>;

⟨*python block*⟩ ::= ‘@py’ <block>;

⟨*program*⟩ ::= <device definition> <device class block> <bind block> <python block>;

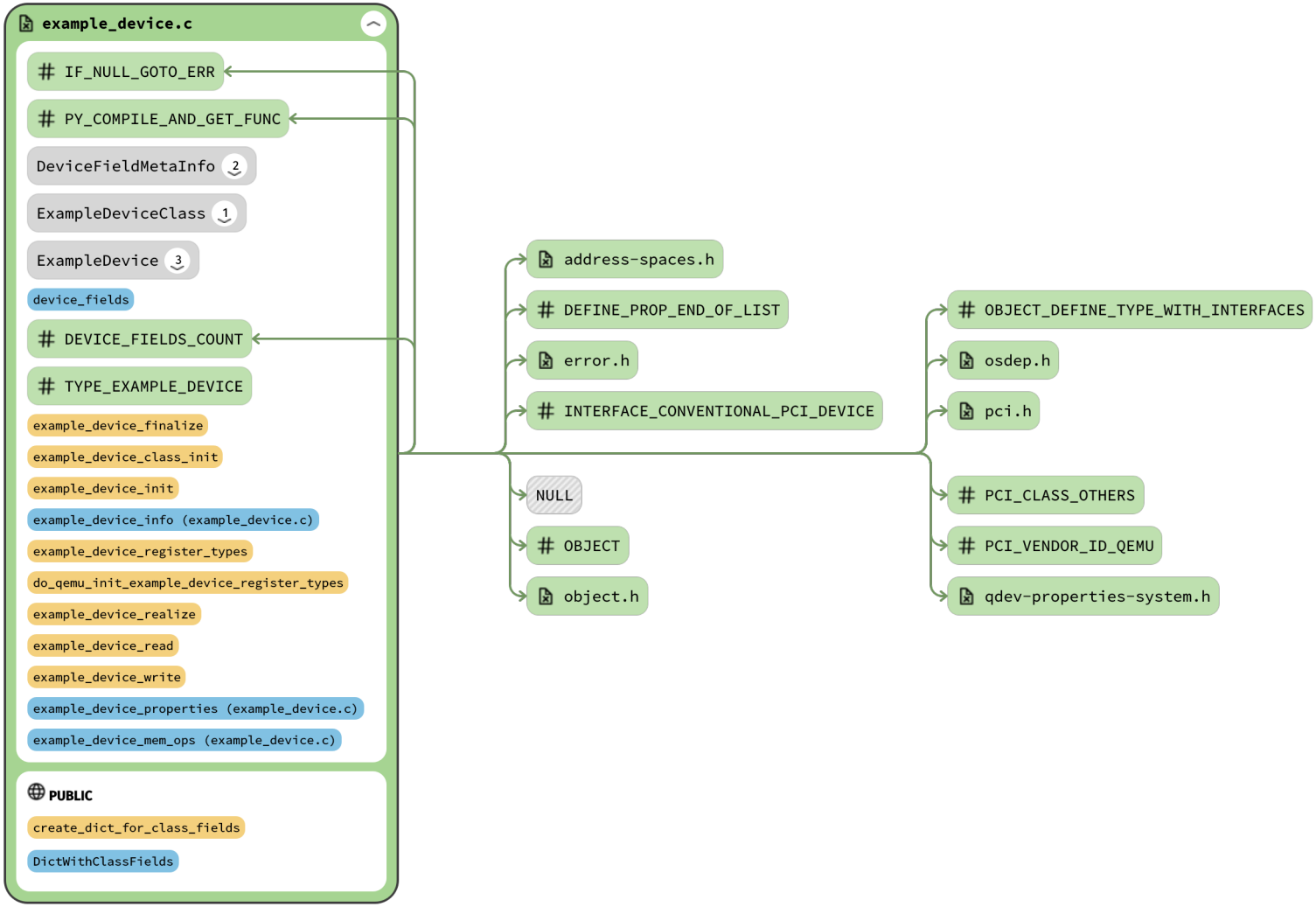
Денотационная семантика языка QPyDev I

Математическое описание	Значение
$[[assignment]](x,y) = \lambda x.y$	Операция присваивания значения y переменной x
$[[terminate]](m) =$ Завершение работы компилятора	Терминирование компилятора с сообщением m
$[[if]](c,e_1,e_2) = \begin{cases} e_1, & \text{Если } c = true \\ e_2, & \text{Если } c \neq true \end{cases}$	Условное исполнение. Если условие c истинно, то выполняется e_1, иначе e_2
$[[throw\ error]](c,e) = if(c, e_g, terminate)$	Создание и бросание исключения при ложном условии c
$[[lookup]](o) = [[throw\ error]](o \in Q, o)$	Поиск объекта o в множестве объектов QEMU Q. В случае, если объект не найден, генерируется исключение
$[[< device\ definition >]](i) = lookup(i)$	Поиск указанного класса устройства в объектах QEMU

Денотационная семантика языка QPyDev II

$[[< device\ class\ inheritance >]](i_1,...,i_n) = lookup(i_1) \wedge ... \wedge lookup(i_n)$	Поиск указанного класса для наследования и интерфейсов в объектах QEMU. Для успешного завершения должны быть найдены все объекты
$[[< field >]](v_1, v_2) = [[throw\ error]](v_1 \in Q \wedge v_2 \in C \cup Q, assignment(v_1, v_2))$	Присваивание полям значений при условии, что v_1 принадлежит множеству объектов QEMU, а v_2 множеству констант или множеству объектов QEMU
$[[< block >]](f_1,...,f_n) = field(f_1) \wedge ... \wedge field(f_n)$	Присваивание связанных с одной сущностью полей
$[[< pythonblock >]](b) = assignment(B,B)$	Инициализация специального поля с Python-логикой

Программная реализация виртуального аппаратного обеспечения с помощью QPyDev



Выбор метрик оценки эффективности генератора виртуального аппаратного обеспечения

Основные метрики эффективности разработанного языка:

- время разработки виртуального аппаратного обеспечения (в человеко-часах);
- быстродействие сгенерированного виртуального аппаратного обеспечения.

Экспериментальное устройство выполняет задачу сжатия JPEG-картинки. Данная задача легко поддается измерению, так как:

- легко выбрать сложность входных данных – это размер изображения;
- возможна векторизация этапов алгоритма;
- возможно добавить разные подходы к обработке изображения:
  - вызов подпрограммы;
  - отправка данных по сети;
  - реализация алгоритма устройства.

Оценка эффективности

Таблица 3: Сравнение эффективности разработки и производительности виртуальных устройств, реализующих алгоритм сжатия JPEG-картинки

Метрика	Разработка с нуля		Использование библиотеки	
	C устройство	Python устройство	C устройство	Python устройство
Время разработки в человеко-часах (T)	112	52	35	10
Время сжатия (сек.)	3.9	18.5	1.9	2.8

- $L = 29$
- $D = 7$
- $C = 65$
- $R = 11$

- $L = 5$
- $D = 2$
- $C = 38$
- $R = 7$

- $L = 20$
- $D = 4$
- $C = 8$
- $R = 3$

- $L = 4$
- $D = 1$
- $C = 3$
- $R = 2$

Основные результаты диссертационной работы

- выбор метрик оценки эффективности генератора виртуального аппаратного обеспечения;
- экспериментальное исследование эффективности генератора виртуального аппаратного обеспечения.
- проведен аналитический обзор существующих методов создания виртуального аппаратного обеспечения;
- формализована задача создания виртуального аппаратного обеспечения;
- созданы методика и алгоритм генерации виртуального аппаратного обеспечения на основе его спецификации;
- выполнена программная реализация методики и алгоритма в виде генератора виртуального аппаратного обеспечения (языка QPyDev);
- проведены эксперименты, которые показали сокращение времени разработки виртуального аппаратного обеспечения в 2 раза по сравнению с классическим подходом, тогда как производительность устройства упала всего в 1.5 раза.

Спасибо за внимание!