

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Школа естественных наук
Кафедра информатики, математического и компьютерного моделирования

Кевролетин Василий Владимирович

Реализация замыканий для языка программирования Pascal

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

по основной образовательной программе подготовки специалистов по
специальности 010501.65 – прикладная математика и информатика

Студент ОЗО _____
(подпись)

Руководитель ВКР – ст. преп.
(должность)

(подпись) А.С. Кленин
(и.о.ф.)

«_____» _____ 2012г.

Защищена в ГАК с оценкой _____

Секретарь ГАК

(подпись) _____
(и.о.фамилия)

«_____» _____ 2012 г.

«Допустить к защите»

Заведующий кафедрой – д.ф.-м.н., проф.
(ученое звание, должность)

(подпись) А. Ю. Чеботарев
(и.о.ф.)

«_____» _____ 2012 г.

г. Владивосток

2013

Содержание

Аннотация	4
1. Введение	5
1.1. Глоссарий	5
1.2. Описание предметной области	5
1.2.1. Компилятор	5
1.2.2. Free Pascal Compiler (FPC)	6
1.2.3. Delphi	7
1.2.4. Замыкания	7
1.2.5. Описание совместной деятельности	8
1.3. Неформальная постановка задачи	8
1.3.1. Анонимные подпрограммы	8
1.3.2. Вложенные функции	9
1.3.3. Продление жизни локальных переменных	9
1.3.4. Захват по ссылке	10
1.3.5. Захват по значению	11
1.3.6. Упрощенный синтаксис	11
1.4. Обзор существующих методов решения	12
1.4.1. Аналогичные решения	12
1.4.2. Описание предшествующих работ	13
1.4.3. Вывод	13
1.5. План работ	13
2. Требования к окружению	14
2.1. Требования к аппаратному обеспечению	14
2.2. Требования к программному обеспечению	15
2.3. Требования к пользователям	15
3. Архитектура системы	15
3.1. Архитектура компилятора	16
3.1.1. Начальная стадия	17
3.1.2. Синтаксическое дерево	18
3.1.3. Таблицы символов	20

3.1.4. Трансформации синтаксического дерева	20
3.1.5. Заключительная стадия	22
4. Функциональные требования	23
5. Требования к интерфейсу	25
6. Проект	25
6.1. Средства реализации	25
6.2. Структуры данных	26
6.3. Модули и алгоритмы	29
6.3.1. Реализация замыканий с использованием СОМ-интерфейсов	30
6.3.2. Сохранение захваченных переменных	32
6.4. Стандарт кодирования	32
7. Реализация и тестирование	33
Заключение	34
Список литературы	36

Аннотация

Цель данной работы - реализовать поддержку замыканий в компиляторе Free Pascal Compiler. Рассмотрены подходы к решению проблемы и осуществлена пробная реализация.

1. Введение

1.1. Глоссарий

Анонимная функция(англ. anonymous function) – функция, не имеющая идентификатора; доступна для вызова либо в момент создания, либо, позднее, через ссылку на функцию, хранящуюся в переменной.

Анонимный метод(англ. anonymous method) – реализация замыканий в языке программирования Delphi[5].

Замыкание – функция или ссылка на функцию вместе с используемым ею окружением; замыкание сохраняет окружение и позволяет функции обращаться к нему даже если она вызвана за пределами лексического контекста где была создана.

Захваченная переменная – переменная, используемая в теле замыкания, объявленная во внешнем для замыкания лексическом контексте.

Интерфейс с подсчётом ссылок – набор функций, используемый компилятором для автоматического управления памятью объектов. Класс, реализующий такой интерфейс, становятся управляемым типом данных.

Свободная переменная – переменная, используемая в теле функции, но не являющейся параметром или локальной переменной этой функции. Так же встречается название “нелокальная переменная”.

Управляемый тип данных(англ. managed type) – тип данных, для которого компилятор использует специальные техники управления динамической памятью, такие как подсчёт ссылок[6].

Функциональное программирование – парадигма программирования, рассматривающая вычисление как применение математических функций, отрицающая понятие состояния и изменяемых данных.

1.2. Описание предметной области

1.2.1. Компилятор

TODO:введение про компиляторы в целом

Как правило, компилятор выполняет только часть работы по созданию исполняемого файла. Широко распространённой является схема [1]:

1. Препроцессор.
2. Компилятор.
3. Ассемблер.
4. Компоновщик.

1.2.2. Free Pascal Compiler (FPC)

FPC – компилятор языка программирования Pascal с открытым исходным кодом, поддерживающий несколько диалектов Pascal и генерирующий код для большого числа процессорных архитектур и операционных систем [11]. Это открытый проект, разрабатываемый постоянной командой добровольцев.

FPC объединяет в себе препроцессор, компилятор, ассемблер и компоновщик¹. Кроме того синтаксический анализатор FPC используется интегрированной средой разработки Lazarus [14].

Выдающаяся особенность FPC - поддержка нескольких диалектов Pascal и большого числа целевых процессорных архитектур. Исходный код FPC написан со стремлением минимизировать количество повторяющегося программного кода, работающего в случае разных комбинаций диалекта языка и результирующей платформы. Поэтому для каждой целевой платформы в компиляторе реализован отдельный генератор кода (все остальные части остаются неизменными). В режимах совместимости с различными диалектами Pascal лексический, синтаксический и семантический анализаторы работают немного по-разному. Благодаря этому компилятор может иметь различную реализацию одной концепции языка в разных режимах совместимости.

FPC находится в состоянии активной разработки. Разработчики постоянно улучшают компилятор, добавляя новые возможности, оптимизации, поддержку новых платформ и исправляя ошибки[11]. Одной из новых возможностей, которую разработчики и пользователи FPC хотят увидеть в своём компиляторе, является поддержка замыканий.

¹Для некоторых целевых платформ используются внешние ассемблер или компоновщик.

1.2.3. Delphi

TODO: введение про делфи Еще одна важная особенность FPC – совместимость с языком программирования Delphi. Delphi развивается, со временем в языке появляются новые концепции. Разработчики FPC добавляют в свой компилятор нововведения Delphi для поддержания совместимости.

1.2.4. Замыкания

В современных языках программирования замыкание это практическая реализация идеи лямбда-исчисления о том, что функция может использовать в своём теле свободные переменные (не являющиеся параметрами этой функции). В лямбда-исчислении переменные неизменяемые, поэтому для вычисления значения функции, использующей свободные переменные, достаточно подставить значения свободных переменных в тело функции[19].

В императивных языках программирования переменные изменяемые. Поэтому результат выполнения функции зависит не только от значений параметров функции, но и от значения свободных переменных, используемых в её теле. В качестве свободных переменных могут выступать глобальные переменные и локальные переменные других функций. Глобальные переменные доступны в течении всего времени выполнения программы. Однако срок жизни локальных переменных ограничен временем работы функции, в которой они объявлены. Особенность замыканий состоит в том, они не только могут получать доступ к любым доступным в текущем лексическом пространстве переменным, но, к тому же, могут обращаться к ним, даже если будут вызваны в другом лексическом пространстве, где использованные переменные уже недоступны.

Если замыкание ссылается на локальную переменную объемлющей функции, то такая переменная называется «захваченной» (англ. Captured)[5][20]. Существует 2 способа захвата переменных: по значению и по ссылке. В случае захвата по значению замыкание в момент своего создания запоминает значение захваченных переменных. Захват по значению – аналог подстановки значений свободных переменных в лямбда-исчислении. В случае захвата по ссылке, в момент своего создания замыкание запоминает ссылку

на захваченную переменную. Сложность реализации захвата переменных по ссылке состоит в том, что на одну переменную могут одновременно ссылаться несколько замыканий и несколько выполняющихся функций.

1.2.5. Описание совместной деятельности

Компилятор распространяется под лицензией GNU GPL. Разрабатывается постоянной командой добровольцев и принимает доработки от сторонних разработчиков. Исходный код написан на языке Freepascal. Разработка ведётся с использованием системы контроля версий SVN, системы контроля изменений Mantis. Команда общается при помощи списков рассылки электронных писем.

1.3. Неформальная постановка задачи

Добавить в компилятор Freepascal поддержку замыканий. В режиме совместимости с Delphi реализация должна вести себя так же, как и анонимные методы Delphi. Дополнительно рассмотреть возможность создания альтернативной улучшенной реализации, не ограниченной требованием совместимости с Delphi. При этом компилятор должен сохранить обратную совместимость, проходить существующие тесты.

1.3.1. Анонимные подпрограммы

В некоторых языках программирования, анонимные функции - единственный способ создать замыкание. Тем не менее эти понятия не тождественны. Анонимная функция - это функция не имеющая идентификатора. Существуют языки программирования, поддерживающие анонимные функции, но не поддерживающие замыкания. Компилятор FPC должен поддерживать объявление анонимных функций в теле других подпрограмм:

```
function Factory: TProc;  
begin  
    Result := procedure begin  
                    Writeln('executed');  
                end;  
end;
```


1.3.2. Вложенные функции

Вложенная функция может обращаться к переменным объемлющих функций. Некоторые языки программирования позволяют создавать замыкания при помощи вложенных анонимных функций. На данный момент FPC и Delphi поддерживают вложенные именованные функции, но не позволяют создавать с ними замыкания. Без поддержки замыканий ссылка на вложенную функцию не сохраняет окружение. Это значит, что вложенную подпрограмму нельзя вызывать по сохранённой ссылке после того, как работа объемлющей подпрограммы завершилась. Для обратной совместимости семантика вложенных подпрограмм должна остаться неизменной. Вложенные процедуры не должны создавать замыкания. В дальнейшем возможно создание нового синтаксиса для создания замыканий с использованием вложенных именованных функций.

Ниже приведён пример вложенной функции, использующей переменную объемлющей функции. Использование ссылки на вложенную функцию после окончания работы объемлющей подпрограммы, в которой была создана эта ссылка, является ошибкой.

```
procedure outer;  
var i: Integer;  
  
    procedure inner; begin  
        i := 10;  
    end;  
  
begin  
    ...  
end;
```

1.3.3. Продление жизни локальных переменных

Замыкание в момент создания сохраняет используемое окружение. Типичной является ситуация, когда замыкание использует локальные переменные объемлющей функции. Без поддержки замыканий время жизни локальных переменных ограничено временем выполнения функции, где она объявлена. Время жизни переменной, захваченной из замыкания заканчивается только когда не осталось использующих её замыканий.

Ниже приведён пример анонимной функции, использующей переменную объемлющей функции. Без замыканий переменная `data` стала бы недоступной после завершения работы функции `Factory`. Замыкание продлевает жизнь захваченной переменной `data`, и может обращаться к ней даже после окончания работы функции `Factory`. В момент второго вызова процедуры `Factory` переменная `data`, захваченная первым замыканием, покинула зону видимости. Теперь она доступна только ссылающемуся на неё замыканию. Следующий вызов `Factory` создаст другое замыкание, ссылающееся на другую переменную `data`. Каждое из созданных замыканий хранит ссылку на свой собственный экземпляр захваченной переменной. Вызов `f1()` напечатает значение 10, а вызов `f2()` напечатает 20.

```
function Factory(data: Integer): TProc;
begin
    Result := procedure
        begin
            Writeln( data );
        end;
end;

var f1: TProc;
begin
    f1 := Factory(10);
    f2 := Factory(20);
    f1();           { 10 }
    f2();           { 20 }
end.
```

1.3.4. Захват по ссылке

В языке программирования Delphi замыкания захватывают переменные по ссылке. Необходимо реализовать такой же подход. Для захвата по ссылке типична ситуация, когда захваченную замыканием переменную меняют из другого замыкания, или из обычной подпрограммы. Приведённый ниже код демонстрирует, как сразу два созданных замыкания используют одну и ту же переменную. Кроме того, захваченная переменная используется в теле функции, где она объявлена.

```
type TProcInt: reference to procedure(n: Integer);
      TProc: reference to procedure;
var data: Integer;
```

```

    pset : TProcInt;
    pget : TProc;
begin
    pset := procedure(n: Integer) begin
        data := n;
    end;
    pget := procedure begin
        Writeln(data);
    end;
    data := 0;
    pget();           { 0 }
    pset(10);
    pget();           { 10 }
end.

```

1.3.5. Захват по значению

Рассмотреть возможность реализации захвата по значению. Пример ниже демонстрирует возможный синтаксис, позволяющий явно указывать, как захватывать переменные: по ссылке или по значению. За описанием сигнатуры функции следует описание захваченных переменных. После ключевого слова `closure` в круглых скобках через запятую указываются имена захваченных по значению переменных. Остальные переменных, используемые в теле функции захватываются по ссылке.

```

var i: Integer;
    f: TProc;
begin
    i := 0;
    f := procedure
        closure(i)
        begin
            Writeln(i);
        end;
    i := 10;
    f();           { 0 }
end.

```

1.3.6. Упрощенный синтаксис

Рассмотреть возможность реализации упрощенного синтаксиса для более короткого объявления анонимных функций. В примере ниже в метод

map передаётся анонимная функция, принимающая один аргумент типа Integer и возвращающая значение аргумента, увеличенное на 1.

```
type TListVisitor = procedure(var x: Integer);
var list: TIntList;
begin
    ...
    list.map(TListVisitor is x := x + 1)
    ...
end.
```

1.4. Обзор существующих методов решения

1.4.1. Аналогичные решения

Ниже приведена таблица, показывающая, какие из популярных языков программирования поддерживают замыкания. Для языков с замыканиями указано как можно создавать замыкания. При помощи анонимных функций или вложенных именованных функций. Так же указано, какой способ захвата используется соответствующим языком.

ЯП	Анонимные функции	Вложенные функции	Захват по значению	Захват по ссылке	Замыкания
Perl	+	+/-		+	+
Python	+	+		+	+
Ruby	+	+		+	+
Scheme	+	+		+	+
Elisp	+	+		+	
Scala	+	+		+	+
Java	?	?	?	?	?
C					
C++	+		+/-	+	+
Delphi	+	+		+	+
Fpc		+			

Таблица 1: Поддержка замыканий и анонимных функций современными ЯП

Сегодня большинство популярных языков программирования поддерживают замыкания. В некоторые из них замыкания были добавлены недав-

но. К примеру, в стандарт `c++` замыкания были добавлены в 2011м году. В Java полная поддержка замыканий станет доступной в версии Java 8, запланированной на середину текущего года.

1.4.2. Описание предшествующих работ

Студенты нашей кафедры успешно развивали компилятор Fpc в рамках своих курсовых и дипломных работ:

1. Дипломная работа «Расширение компилятора Free Pascal для поддержки обобщённого программирования». Автор Нелепа А.А. Руководитель Кленин А. С. 2007г.[9]
2. Курсовая работа «Анализ потоков управления для языка программирования Pascal» Автор Баль Н.В. Руководитель Кленин А.С. 2008г.[2]
3. Курсовая работа «Доработка компилятора Free Pascal: case of string» Автор Денисенко М.В. Руководитель Кленин А.С. 2009г.[4]
4. Курсовая работа «Оператор `for-in` для компилятора Free Pascal» Автор Лукащук М.А. Руководитель Кленин А.С. 2010г.[8]

1.4.3. Вывод

Ценность замыканий подтверждена их популярностью и востребованностью. Сегодня замыкания поддерживают большинство языков программирования, а программисты активно используют их на практике. Поэтому для поддержания компилятора FPC в актуальном состоянии необходимо реализовать в нём поддержку замыканий.

1.5. План работ

1. Согласовать работу с разработчиками FPC.
2. Изучить архитектуру и исходных код компилятора.
3. Изучить реализацию замыканий в похожих языках программирования.

4. Спроектировать реализацию.
5. Поэтапно осуществить реализацию:
 - (a) добавить возможность объявлять анонимные функции. Запретить захват переменных;
 - (b) добавить возможность захвата переменных функции, объявляющей замыкание;
 - (c) добавить возможность захвата любых локальных переменных, доступных в текущем лексическом контексте².

2. Требования к окружению

FPC может компилировать свой собственный исходный код. Поэтому список целевых платформ совпадает со списком платформ, на которых работает FPC.

2.1. Требования к аппаратному обеспечению

Для работы требуется компьютер, пригодный для набора исходного кода программы. Т.е. кроме работающих процессора, оперативной и постоянной памяти требуются клавиатура и монитор.

Поддерживаемые архитектуры процессоров^[13]:

- I386
- PowerPC
- Sparc
- AMD64 (x86-64)
- PowerPC64
- ARM
- m68k

²За исключением случаев, описанных в разделе "Функциональные требования".

2.2. Требования к программному обеспечению

Компилятор FPC версии 2.6 и выше

Операционная система На сайте FPC указано 53 разных поддерживаемых комбинаций архитектуры процессора и операционной системы[13]. Здесь приведём только популярные операционные системы, поддерживаемые компилятором для архитектуры процессора I386:

- Win32 for i386
- Linux for i386
- Target Darwin (Mac OS X) for i386 (2.1.x and later)
- FreeBSD/ELF for i386
- Android for i386

2.3. Требования к пользователям

Программисты, владеющие языком программирования Free Pascal или Delphi.

3. Архитектура системы

Установленный проект fpc содержит следующие каталоги:

Compiler содержит исходные коды компилятора и некоторых вспомогательных программ. Компилятор – программа с интерфейсом командной строки. На вход принимает список текстовых или объектных файлов. Результат его работы – файлы с ассемблерным кодом, описанием модулей, отладочной информацией, информацией для межмодульной оптимизации и исполняемый файл. Стоит так же отметить вспомогательную программу `ruidump`, переводящую файл описания модуля в текстовый наглядный формат. Изменения, сделанные в рамках данной работы затронули эту утилиту.

Ide содержит исходные коды среды разработки с интерфейсом командной строки.

Installer содержит скрипты для установки программы в систему.

Packages содержит исходные коды стандартной библиотеки, не обязательной для работы скомпилированной программы.

Rtl содержит исходные коды библиотеки времени исполнения, необходимой для работы любой скомпилированной программы. К примеру, менеджер динамической памяти и подпрограммы управления памятью управляемых объектов реализованы здесь.

Tests содержит набор тестов. В ходе выполнения данной работы были созданы новые тесты.

Utils содержит вспомогательные утилиты, не используемые компилятором, предназначенные пользователям.

Несмотря на то, что для конечного пользователя компилятор - это монолитная программа, преобразующая файлы из одного представления в другое, в рамках данной работы необходимо рассмотреть внутреннюю архитектуру самого компилятора. Это необходимо для обоснования принятых решений, последствия которых испытают конечные пользователи. К таким решениям относятся, к примеру, размер указателя на замыкание, либо правила управления памятью, выделенной под замыкания.

3.1. Архитектура компилятора

Весь программный код можно условно разделить на начальную стадию(англ. front-end) и заключительную стадию(англ. back-end)[1].

Начальная стадия считывает входные данные, проверяет их на корректность, строит вспомогательные структуры данных, необходимые для генерации кода и передаёт управление заключительной стадии, которая генерирует код.

Смысл разделения на начальную и заключительную стадию в том, чтобы отделить детали анализа языков высокого уровня от деталей, отно-

сящихся к целевой архитектуре. Такой подход позволяет уменьшить сложности одновременной поддержки нескольких диалектов Pascal и большого числа целевых архитектур.

3.1.1. Начальная стадия

После запуска FPC обрабатывает параметры и проводит предварительную обработку исходного кода входной программы. Далее он целиком считывает определение и тело одной подпрограммы, проводит необходимые проверки и генерирует для неё код высокоуровневого ассемблера. Затем считывает следующую подпрограмму и так далее до конца файла.

Обработка одной подпрограммы на начальной стадии включает в себя:

1. Лексический анализ.
2. Синтаксический анализ.
3. Семантический анализ.
4. Машинно-независимую оптимизацию.

Операции, производимые любым компилятором можно реализовывать в виде отдельных проходов по синтаксическому дереву или потоку лексем. К примеру, можно полностью считать лексемы входного файла и получить поток лексем. Затем запустить синтаксический анализ и получить синтаксическое дерево, соответствующее содержимому файла. Затем семантический анализ, который не производит никаких модификаций и лишь проверяет синтаксическое дерево на корректность. И лишь потом производить преобразования синтаксического дерева.

Описанная выше схема уменьшает сложность исходного кода компилятора. Программу в которой отдельные компоненты совершают чётко определённые действия легко документировать и понимать. К сожалению многократный обход структур данных, расположенных в памяти непоследовательно, вносит накладные расходы[7], поэтому зачастую несколько отдельных проходов объединяют в один. В компиляторе FPC стадии лексического, синтаксического и семантического анализа реализованы в виде одного прохода.

Кроме того, стадия семантического анализа, кроме вывода типов и проверки синтаксического дерева на корректность, производит вспомогательные модификации синтаксического дерева. FPC на этапе семантического анализа добавляет преобразования типов, заменяет операции с управляемыми данными на вызовы функций из библиотеки времени выполнения и преобразует некоторые специфичные конструкции (к примеру для загрузки адреса процедуры используется специальный узел синтаксического дерева, отличный от того, который создает парсер).

3.1.2. Синтаксическое дерево

Синтаксическое дерево - иерархическая структура данных представляющая синтаксическую структуру исходной программы[1]. После синтаксического анализа каждый внутренний узел дерева представляет собой оператор, дочерние узлы представляют собой операнды этого оператора. Для представления синтаксического дерева и операций над ним FPC использует приём объектно-ориентированной декомпозиции. В [3] такой подход описан под названием "compisite"(англ. составной).

Все узлы синтаксического дерева унаследованы от одного абстрактного класса `tnode`. `tnode` объявляет общий интерфейс для объектов синтаксического дерева. Унаследованные от `tnode` классы, реализуя этот интерфейс, определяют специфичное поведение. Отметим методы, реализующие обходы синтаксического дерева:

- `pass_1` – выделение регистров;
- `pass_typecheck` – семантический анализ;
- `pass_generate_code` – генерация кода.

На рис. 1 приведён пример того, как использование наследования позволяет отделить общие для нескольких синтаксических конструкций детали от специфичных деталей отдельной конструкции. Так, `tunarynode` служит базовым классом для всех операций, содержащих 1 операнд. Унаследованный от него класс `tloadvmtaddrnode` реализует методы `pass_1` и `pass_typecheck`, которые реализованы без использования информации о целевой архитектуре. Метод генерации кода `pass_generate_code` реализован

в классе

`tcgloadvmtaddrnode`.

Таким образом, для каждой архитектуры процессора можно создать отдельный класс, унаследованный от `tloadvmtaddrnode` и реализовать генерацию кода, учитывая особенности конкретного процессора. Такой подход к модификации поведения объекта, переопределяя методы родительского класса, описан в [3] под названием "template" (англ. шаблон). Этот подход широко используется в FPC для отделений специфичных деталей генерации кода для узлов синтаксического дерева от остальной логики.

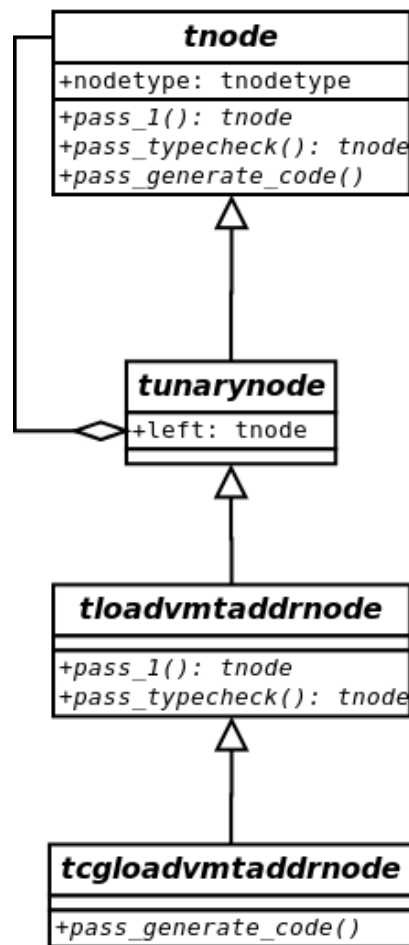


Рис. 1: Диаграмма наследования для класса `tcgloadvmtaddrnode`

3.1.3. Таблицы символов

Таблица символов это структура данных, которая используется компилятором для хранения информации о именованных объектах программы. Такая информация последовательно накапливается во время разбора синтаксических конструкций. Далее она используется на этапе семантического анализа для проверки соответствия типов и при генерации кода для размещения данных в памяти.

Записи в таблице символов содержат символьные строки, типы, области видимости, местоположение в памяти и прочую связанную с именованными объектами информацию. FPC использует таблицы символов для хранения информации о модулях, константах и переменных, подпрограммах, структуре составных типов данных.

Таблицы символов и синтаксическое дерево тесно связаны: синтаксическое дерево описывает действия с данными. Записи таблицы символов описывают структуру этих данных.

3.1.4. Трансформации синтаксического дерева

Во время компиляции FPC неоднократно трансформирует полученное на этапе синтаксического анализа синтаксическое дерево. Это необходимо для:

- Упрощения логики отдельных узлов синтаксического дерева. К примеру, узлы преобразования типов упрощают логику узлов загрузки значения переменных, арифметических операций и др. выражений.
- Проведения машинно-независимой оптимизации. К примеру удаление недостижимого кода.
- Реализации новых концепций языка через старые. К примеру, реализация `case of string`^[4] или доступ к локальным переменным объемлющей функции в случае компиляции в байт-код.

Возможность реализации новых концепций языка через старые можно использовать и для реализации замыканий. Заметим, что замыкание отличается от обычной подпрограммы наличием сохранённого состояния сво-

бодных переменных. Преобразование замыкания в процедуру, не содержащую свободных переменных называется преобразованием замыканий[10].

Преобразование замыканий давно используется в языках программирования, основанных на лямбда-исчислении. Прямая реализация модели подстановки лямбда-исчисления приводит к многократному вычислению одних и тех же выражений. Преобразованием замыканий позволяет избежать бесполезных вычислений и улучшения производительности таких программ [21]. Функция со свободными переменными заменяется функцией с дополнительными параметром - окружением. Свободные переменные в теле исходной функции заменяются ссылками на окружение. Неизменяемость переменных в лямбда-исчислении позволяет реализовать сохранение переменных в окружение разными способами:

Общее окружение Замыкания, имеющие общие свободные переменные, используют общее окружение. Во время выполнения программы по мере активации функций из вновь созданных окружений необходимо составлять связный список. Преимущество такого подхода - быстрое создание окружения и экономия памяти. Недостатком является увеличение времени доступа к переменным, т.к. время доступа к элементам окружения пропорционально уровню вложенности функции.

Плоское окружение Для каждого замыкания создаётся отдельная структура данных, содержащая значения всех необходимых переменных. Плюс такого подхода - быстрый доступ к переменным окружения. Минус - долгое создание замыкания и дополнительный расход памяти.

Описанный подход преобразования замыканий применим к императивным языкам программирования. Статически типизированный язык программирования Scala использует преобразования замыканий[15][17]. Scala использует статическую типизацию и допускает изменение переменных. Этот язык очень похожим на Free Pascal. Главное отличие - полностью автоматическое управление динамической памяти компилятором, решающее проблему управления памятью созданных окружений.

3.1.5. Заключительная стадия

В FPC нет промежуточного представления кода, который начальная стадия передавала бы в заключительную стадию. Вместо генерации промежуточного представления начальная стадия во время обхода синтаксического дерева последовательно вызывают методы высокоуровневого генератора кода. Такой подход очень похож на использование промежуточного представления, но избавляет от необходимости генерировать промежуточные структуры данных.

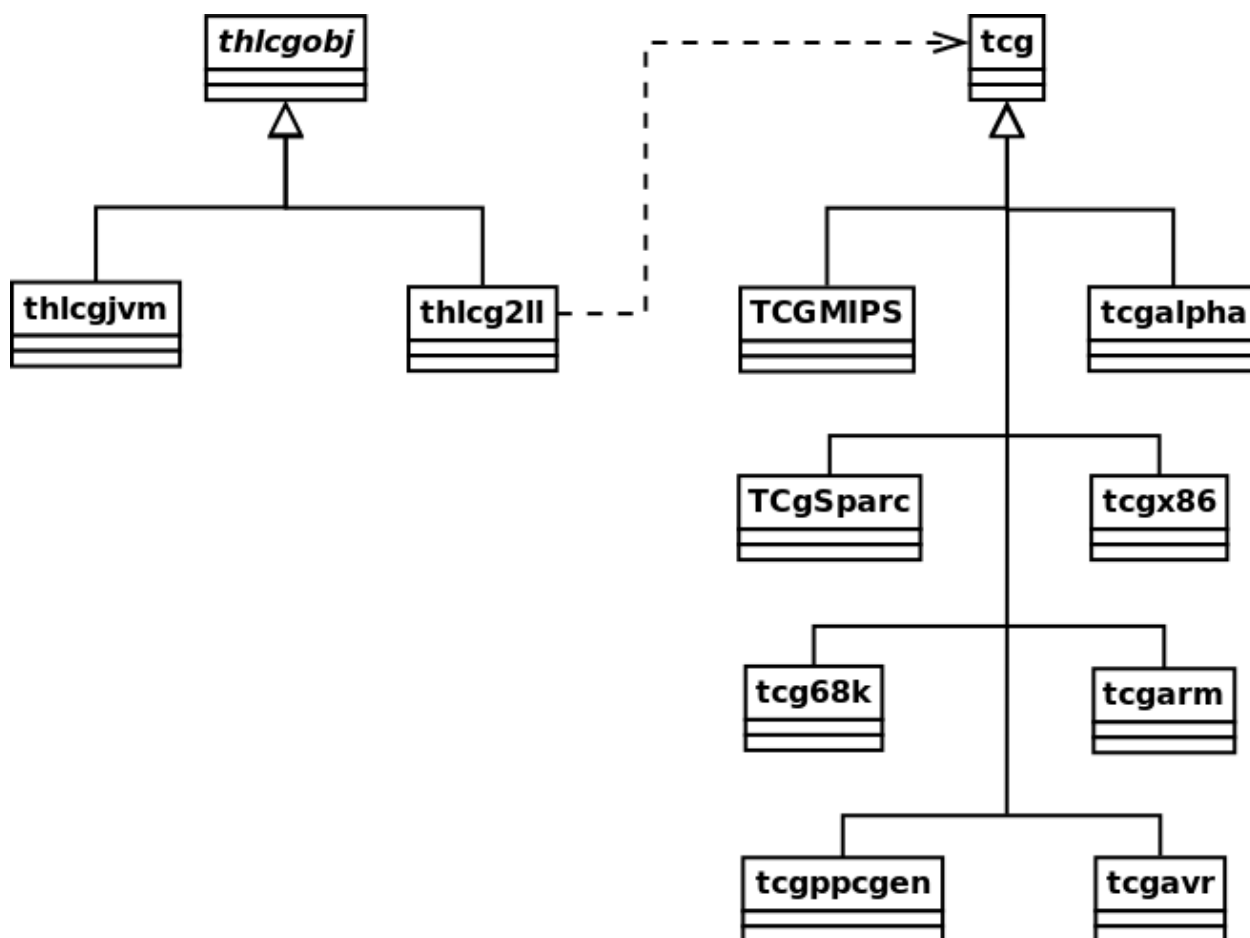


Рис. 2: Диаграмма классов генератора кода

4. Функциональные требования

Компилятор должен:

1. Позволять объявлять анонимные подпрограммы внутри тела других подпрограмм. Синтаксис объявления анонимной подпрограммы такой же как и для обычной подпрограммы с двумя исключениями:
 - после ключевых слов `procedure` и `function` нет идентификатора, а сразу идет опциональный список формальных аргументов;
 - после списка формальных аргументов (если он опущен, то после ключевых слов `procedure` или `function`) не ставится точка с запятой.

Пример 1:

```
procedure begin
  Writeln('inside ');
end;
```

Пример 2:

```
procedure begin
  Writeln('inside ');
end;
```

2. Позволять анонимным функциям возвращать значения, используя ключевое слово `Result`:

Пример:

```
function(num: Integer): Integer begin
  Result := num + 10;
end;
```

3. Запрещать анонимным процедурам использовать переменную `Result` объемлющей функции:

Пример:

```
function Calculate: Integer;
begin
  ...
  procedure begin
```

```

        Result := 10; // Error, result can't be captured
    end;
end;

```

4. Позволять анонимным процедурам использовать переменные, объявленные в объемлющей функции:

Пример:

```

procedure Calculate: Integer;
var num: Integer;
begin
    ...
    procedure begin
        num := 10;
    end;
end;

```

5. Позволять анонимным процедурам использовать переменные, объявленные в объемлющей функции, при уровне вложенности больше 1:

Пример:

```

procedure Outer;
var num: Integer;
    procedure Calculate;
    begin
        ...
        procedure begin
            num := 10;
        end;
    end;
begin
    ...

```

6. Продлевать время жизни захваченных переменных. Время жизни захваченной переменной определяется не временем работы функции, где она объявлена, а временем жизни всех ссылающихся на неё замыканий.
7. Осуществлять захват переменных по ссылке. Замыкания, созданные в одном лексическом контексте должны иметь доступ к одним и тем же переменным.

8. Корректно осуществлять проверку типов в момент присваивания значений переменным-указателям на замыкание.
9. Корректно осуществлять проверку типов во время вызова замыкания.

5. Требования к интерфейсу

Компилятор имеет интерфейс командной строки, который описан в руководстве пользователя FPC[16]. Интерфейс остаётся неизменным.

6. Проект

6.1. Средства реализации

Проект использует язык программирования Free Pascal. Редактирование исходных кодов компилятора возможно с использованием любого текстового редактора. Тем не менее для работы с проектом большого размера предпочтительно использование редактора с поддержкой навигации по коду. Возможность быстрого перехода к объявлению и описанию идентификаторов упрощает поиск нужной информации и ускоряет процесс разработки. Было рассмотрено несколько кандидатов:

Free Pascal's text mode IDE Преимущества: находится в репозитории с компилятором. Недостатки: отсутствует графический интерфейс, отсутствует быстрый переход к определению переменных.

Emacs Преимущества: мощный текстовый редактор, поддерживающий большое количество расширений. Недостатки: переход к определению переменных не работает с исходными кодами FreePascal.

Lazarus Преимущества: удобный графический пользовательский интерфейс. Корректный быстрый переход к определению символов. Настраиваемые горячие клавиши. В репозитории компилятора есть файл проекта для Lazarus.

MSEide Преимущества: быстрый. Недостатки: неудобный пользовательский интерфейс.

В итоге принято решение использовать среду разработки Lazarus, так как она лучше всего подходит для работы с большим программным проектом на языке программирования Free Pascal. Lazarus корректно разбирает исходный код и предоставляет пользователю возможность удобной и быстрой навигации по коду.

6.2. Структуры данных

Ключевые структуры данных: определения типов, таблицы символов и синтаксическое дерево. Программа на языке программирования Free Pascal имеют рекурсивную структуру, поэтому упомянутые структуры данных имеют сложные циклические зависимости. Пример такой зависимости: узел синтаксического дерева, представляющий обращение к переменной содержит имя переменной. По имени переменной доступен её тип. Типом переменной может быть класс, который содержит метод. Реализация метода может содержать обращение к переменной.

Таблицы символов отдельно хранят определения типов и символьные имена. Существуют различные таблицы символов: таблица символов модуля, локальная таблица символов, таблица символов с параметрами процедуры и др. Все таблицы символов унаследованы от общего базового класса `TSymTable`, определяющего общий интерфейс для работы с ними. Любая таблица символов отдельно хранит определения типов и литеральные имена, что отражено на рис. 3. Таким образом, таблицы символов содержит доступные в текущем лексическом контексте именованные объекты и соответствующие им типы.

На рис. 3 показаны 2 конкретных класса, унаследованных от абстрактного класса `tdef`. Первый из них, `tobjectdef`, хранит информацию о классе: его родитель, реализованные интерфейсы, список методов, список полей и др. Второй, `tprocdef`, хранит информацию о типе процедуры: список аргументов, тип возвращаемого значения, локальные переменные. Отметим, что `tprocdef` и `tobjectdef` содержат список именованных объектов, каждый из которых, тоже имеет тип. Это отражено на рис. 4, определения типов

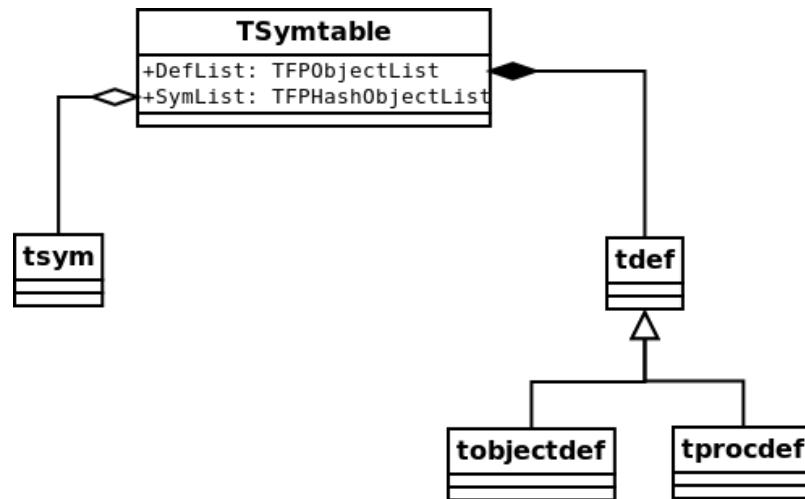


Рис. 3: Диаграмма классов

объекта и процедуры содержат таблицы символов. Причем, они используют разные конкретные реализации.

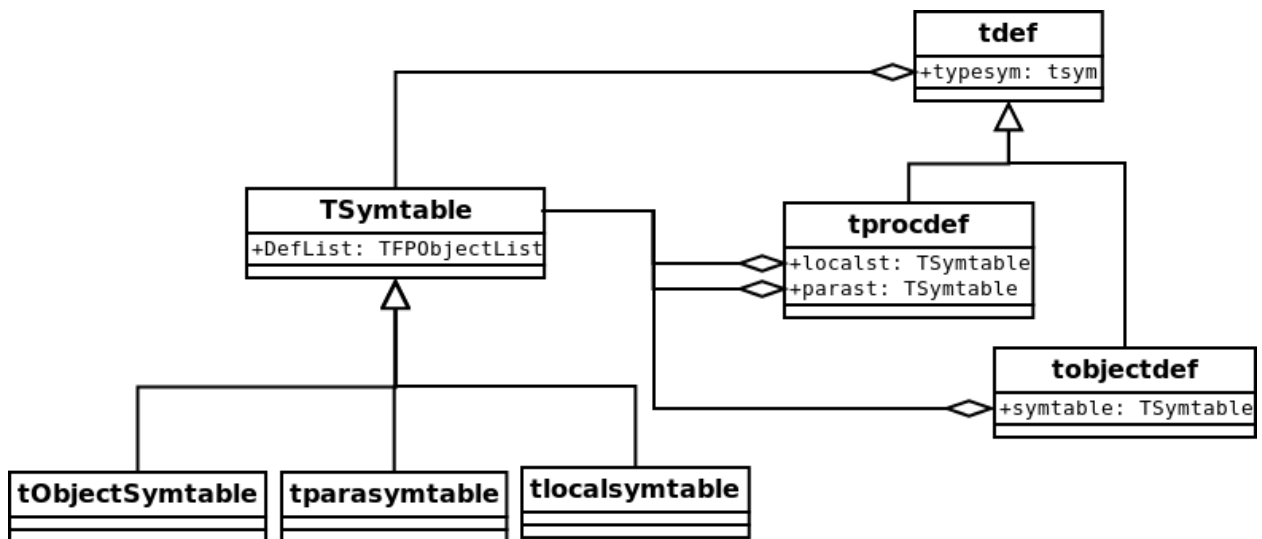


Рис. 4: Диаграмма классов

Литеральные имена, используемые для доступа к типам, называются символами. На рис. 5 изображена диаграмма классов для нескольких символов и их связь с определениями типов. Каждый символ унаследован от общего класса **tsym**. Конкретные реализации рассчитаны для работы с конкретными определениями типов. Из-за того, что Free Pascal поддерживает перегрузку операторов, может существовать несколько подпрограмм с одним именем и разными определениями. Поэтому **tprocsym** хранит список ссылок на определения типов подпрограмм. В это же время **ttypesym** содержит только одну ссылку на определение типа.

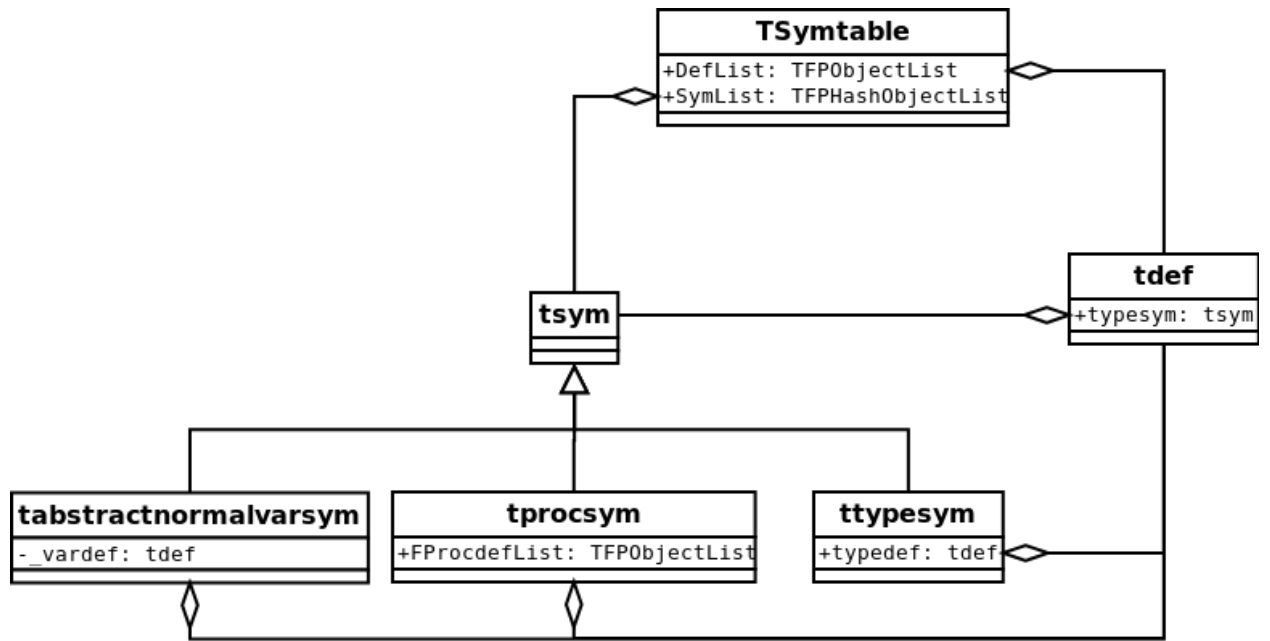


Рис. 5: Диаграмма классов

Теперь рассмотрим связь синтаксического дерева и таблицы символов. Если таблицы символов отражают информацию о именованных данных, то синтаксическое дерево отражает информацию о действиях. Обращение к переменной является примером действия с именованными данными. Синтаксический узел, отражающий обращение к переменной - `tloadnode`. На рис. 6 показано, как `tloadnode` хранит информацию о переменной.

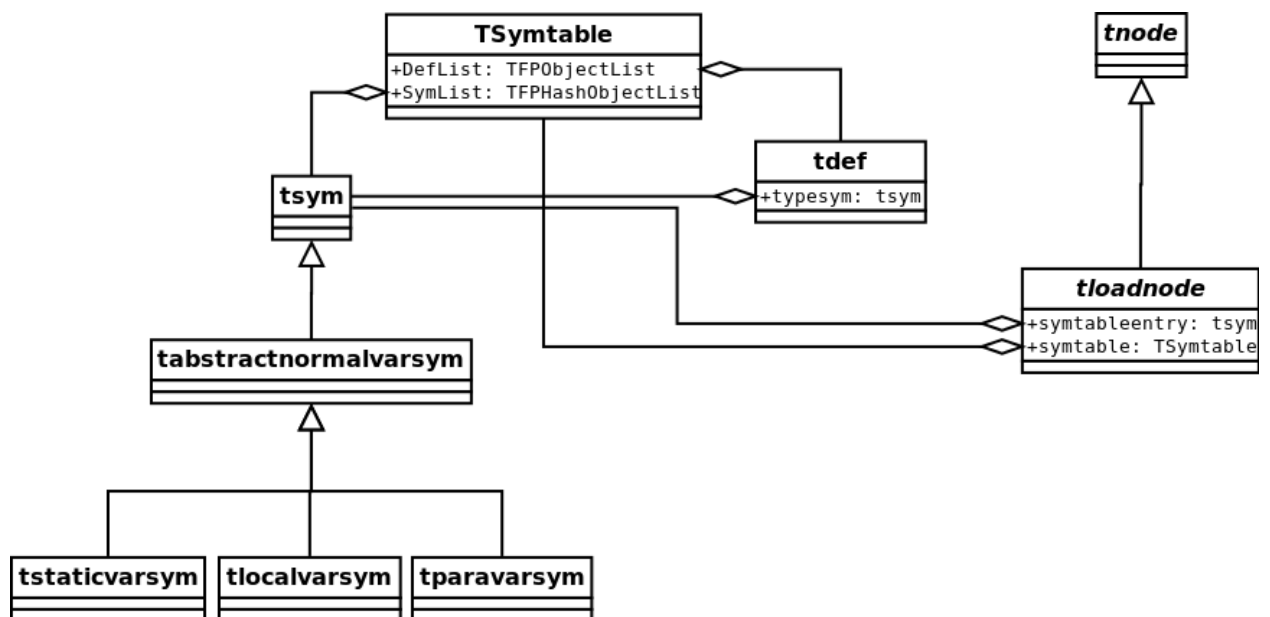


Рис. 6: Диаграмма классов

Кроме ссылок из узлов синтаксического дерева на именованные объек-

ты теоретически возможна обратная ситуация. Подпрограммы имеют реализацию, которую компилятор обрабатывает в виде синтаксического дерева. К счастью определение типа подпрограммы не содержит ссылок на тело подпрограммы. Связь реализации и информации о типе подпрограммы показана на рис. 7

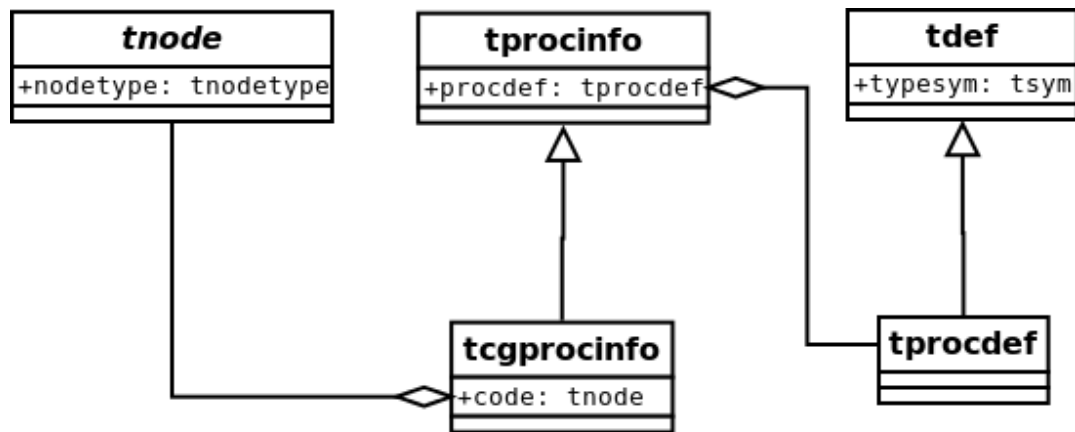


Рис. 7: Диаграмма классов

6.3. Модули и алгоритмы

Самая большая сложность реализации замыканий заключается в управлении памятью. Захваченные переменные не могут располагаться на стеке т.к. срок жизни переменных на стеке ограничен временем работы объемлющей процедуры. Захваченные переменные необходимо располагать в куче. Память, однажды выделенную под захваченные переменные позднее необходимо освободить. С определением момента, когда можно освободить память замыкание есть несколько сложностей. Во-первых захват переменных по ссылке делает возможной ситуацию, когда несколько замыканий ссылаются на одни и те же переменные. Поэтому общие данные можно освободить только когда все замыкания, ссылающиеся на них становятся недоступными для вызова. Во-вторых, замыкания могут быть определены в списке фактических аргументов другой функции. В случае ручного управления памятью пользователям языка программирования необходимо будет устанавливать договорённости о том вызывающая или вызываемая сторона освобождает память. Это сделает использование замыканий источником сложностей и ошибок.

Чтобы избежать ошибок, замыкание необходимо сделать управляемым типом данных, т.е. типом данных с автоматическим управлением динамической памятью. К счастью, FPC уже содержит сборщик мусора, использующий счётчик ссылок, который следит за объектами управляемых типов данных. Управляемыми типами являются большинство реализаций строк, динамические массивы, СОМ-интерфейсы, Dispatch-интерфейсы, Variant и составные типы данных, содержащие или унаследованные от управляемых типов данных.

Вместо того, чтобы реализовывать поддержку нового управляемого типа данных, для реализации замыканий можно воспользоваться существующими СОМ-интерфейсами. Такой подход существенно снижает сложность реализации, т.к. поддержка нового управляемого типа данных требует внесения изменений в компилятор и библиотеку времени исполнения. Проход, использующий трансформацию новых синтаксических конструкций в существующие помогает уменьшить размер генератора кода. Это упрощает поддержку нескольких целевых платформ, что особенно актуально для FPC. Реализация замыканий с использованием СОМ-интерфейсов не потребует изменений в генераторе кода и библиотеке времени исполнения.

6.3.1. Интерфейсы с подсчётом ссылок

Рассмотрим реализацию замыканий с использованием СОМ-интерфейсов на примере:

```
var p: reference to procedure;  
begin  
  i := procedure begin  
    Writeln('inside');  
  end;  
  i();  
end.
```

Объявление переменной Ключевая идея данного подхода в том, чтобы использовать СОМ-интерфейс в качестве переменной-указателя на замыкание. Такой интерфейс содержит единственный метод Apply, имеющий сигнатуру, указанную в объявлении переменной после ключевых слов

"reference to". Назовём его интерфейс указателя на замыкания.

```
var p: reference to procedure;
```

Анонимная функция Для хранения захваченных переменных во время выполнения создаётся специальный объект-хранилище. Время создания хранилища и доступ к захваченным переменным обсуждается ниже. Пока что будем считать, что каждая анонимная подпрограмма во время выполнения имеет связанный с ней объект-хранилище, через который осуществляется доступ к локальным переменным. Анонимная подпрограмма становится методом объекта-хранилища. Создаётся интерфейс, содержащий единственную функцию Apply, имеющую такую же сигнатуру, как и анонимная функция. Объект-хранилище реализует данный интерфейс, реализацией единственного метода Apply становится только что разобранный анонимный метод.

Назовём только что описанный интерфейс интерфейсом реализации анонимного метода. Отметим, что интерфейс реализации анонимного метода содержит единственный метод Apply. Вызов этого метода приводит к вызову анонимной функции, в качестве скрытого параметра которой передаётся объект-хранилище, содержащий захваченные переменные.

```
procedure begin
    Writeln('inside');
end;
```

Присваивание Определение анонимной функции является выражением. Оно должно возвращать значение, которое используется для вызова замыкания. Таким значением является интерфейс реализации анонимного метода. Отметим, что интерфейсы реализации и указателя на анонимный метод имеют одинаковую структуру. Оба интерфейса имеют единственный метод, имеющий одну и ту же сигнатуру. Это означает, что типы совместимы и возможно присваивание.

```
i := procedure begin
    Writeln('inside');
end;
```

Вызов Для вызова замыкания необходимо вызвать единственный метод Apply интерфейса указателя на замыкание.

```
i();
```

6.3.2. Сохранение захваченных переменных

Хранилище создаётся для каждой функции, содержащей замыкания. Если необходимо осуществлять доступ к переменным объемлющей функции, то, кроме захваченных переменных текущей функции, оно содержит ссылку на хранилище объемлющей функции.

На примере ниже первое хранилище для локальных переменных будет создано в момент вызова процедуры Outer. Оно будет содержать захваченную переменную a. Второе хранилище будет создано в момент вызова процедуры Inner. Оно будет хранить переменную b и ссылку на хранилище объемлющей функции.

```
procedure Outer;  
var a: Integer;  
    procedure Inner;  
    var p: reference to procedure;  
        b: Integer;  
    begin  
        p := procedure begin  
            Writeln(a + b);  
        end;  
    end;  
begin  
    Inner;  
end;
```

6.4. Стандарт кодирования

Стандарт кодирования описан в документации проекта[\[12\]](#):

- Ключевые слова пишутся маленькими буквами.
- Символы табуляции запрещены.
- Не следует отделять операторы, запятые и скобки пробелами.
- Размер отступов: 2 пробела для каждого уровня отступа.

- Перед блоком `begin ... end` следует делать отступы.
- Подпрограммы разделяют двумя пустыми строчками.
- У идущих подряд условных операторов следует писать `else` и последующее `if` на одной строке.

7. Реализация и тестирование

Предоставленный разработчикам патч содержит 1255 добавленных строк кода, 812 удалённых строк. Так же добавлено 20 тестов общим объёмом 504 строки. Изменения получили положительные отзывы среди разработчиков[22].

Заключение

Таким образом в процессе выполнения дипломной работы мною были углублены знания о компиляторах современных языков программирования, улучшены навыки поддержки и развития больших программных проектов. Я получил опыт участия в международном проекте с открытым исходным кодом и пообщался с опытными разработчиками. Мною были рассмотрены различные общие подходы к реализации замыканий и разработано решение для конкретного компилятора FPC.

Итогом работы стала пробная реализация, позволившая оценить сложность реализации замыканий, положительные и отрицательные черты выбранного подхода. Созданная реализация должна стать прототипом для окончательной понятной, стабильной и задокументированной реализации замыканий для компилятора FPC.

Список литературы

- [1] Альферд В. Ахо, Моника С. Лам, Рави Сети, Джеффри Д. Ульман. Компиляторы. Принципы, технологии и инструментарий. - 2 изд. - Вильямс, 2008. - 1184 с.
- [2] Баль Н.В., Кленин А.С. Курсовая работа «Анализ потоков управления для языка программирования Pascal». - ДВГУ, 2008г.
- [3] Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Д. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования, Спб.:Питер, 2010, 386 с.
- [4] Денисенко М. В., Кленин А. С. Курсовая работа «Доработка компилятора Free Pascal: case of string». - ДВГУ, 2009г.
- [5] Документация Delphi: Anonymous methods http://docwiki.embarcadero.com/RADStudio/XE3/en/Anonymous_Methods_in_Delphi
- [6] Документация Delphi: System.Rtti.IsManaged <http://docwiki.embarcadero.com/Libraries/XE4/en/System.Rtti.IsManaged>
- [7] Крис Касперски, Техника оптимизации программ. Эффективное использование памяти. - БХВ-Петербург, 2003г. - 464с.
- [8] Лукащук М.А., Кленин А.С. Курсовая работа «Оператор for-in для компилятора Free Pascal». - ДВГУ, 2010г.
- [9] Нелепа А.А., Кленин А.С. Дипломная работа «Расширение компилятора Free Pascal для поддержки обобщённого программирования». - ДВГУ, 2007г.
- [10] Andrew W. Appel. Modern Compiler Implementation in Java. - 2nd edition - Cambridge University Press, 2004. - 512с.
- [11] Free Pascal Compiler <http://www.freepascal.org/>
- [12] Free Pascal Documentation. Coding style http://wiki.freepascal.org/Coding_style

- [13] Freepascal Wiki: Platform list http://wiki.freepascal.org/Platform_list
- [14] Lazarus <http://www.lazarus.freepascal.org/>
- [15] Martin Odersky and others. An Overview of the Scala Programming Language. - 2nd edition - Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2001г. - 20с.
- [16] Michaël Van Canneyt, Florian Klämpfl. Free Pascal : User's Guide. 2013 <http://www.freepascal.org/docs-html/user/user.html>
- [17] Miguel Garcia. Code walkthrough of the UnCurry phase (Scala 2.8). Hamburg University of Technology, 2009г. - 5с.
- [18] Keith D. Cooper, Linda Torczon. Engineering a Compiler. - 2nd edition - Morgan Kaufmann Publishers, 2012. - 801с.
- [19] Raul Rojas. A Tutorial Introduction to the Lambda Calculus. - FU Berlin, 1998. - 9с.
- [20] Standard for Programming Language C++ <http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg21/docs/papers/2012/n3485.pdf>
- [21] Yasuhiko M., Greg M., Robert H. Typed Closure Conversion. - Carnegie Mellon University, 1995. - 40с.

Обсуждения в системе контроля изменений fpc:

- [22] freepascal bugtracker. Issue#0024481: Implement closures <http://bugs.freepascal.org/view.php?id=24481>

Обсуждения в списке рассылок разработчиков fpc (fpc-devel):

- [23] Sven's comment - <http://lists.freepascal.org/lists/fpc-devel/2013-March/031595.html>
- [24] Marko's comment - <http://lists.freepascal.org/lists/fpc-devel/2013-March/031657.html>

Автор работы _____ (Ф.И.О.)
(подпись)

Квалификационная работа допущена к защите

Назначен рецензент

(Фамилия, И.О. рецензента, ученая степень, ученое звание)

Зав. кафедрой информатики,
математического и компьютерного
моделирования

А. Ю. Чеботарев

Дата «_____» _____ 2013 г.