

Implementacja języka zapytań oparta na drzewach rozbioru

(Implementation of a query language
based on abstract syntax trees)

Damian Górski

Praca inżynierska

Promotor: dr Wiktor Zychla

Uniwersytet Wrocławski
Wydział Matematyki i Informatyki
Instytut Informatyki

30 czerwca 2017 r.

Damian Górski

.....

.....

(adres zameldowania)

.....

.....

(adres korespondencyjny)

PESEL:

e-mail:

Wydział Matematyki i Informatyki

stacjonarne studia I stopnia

kierunek: informatyka

nr albumu: 273212

Oświadczenie o autorskim wykonaniu pracy dyplomowej

Niniejszym oświadczam, że złożoną do oceny pracę zatytułowaną *Implementacja języka zapytań oparta na drzewach rozbioru* wykonałem/am samodzielnie pod kierunkiem promotora, dr Wiktora Zychli. Oświadczam, że powyższe dane są zgodne ze stanem faktycznym i znane mi są przepisy ustawy z dn. 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (tekst jednolity: Dz. U. z 2006 r. nr 90, poz. 637, z późniejszymi zmianami) oraz że treść pracy dyplomowej przedstawionej do obrony, zawarta na przekazanym nośniku elektronicznym, jest identyczna z jej wersją drukowaną.

Wrocław, 30 czerwca 2017 r.

(czytelny podpis)

Streszczenie

W czasie projektowania pewnego systemu informatycznego, architekt zazwyczaj musi zmierzyć się z wyborem bazy danych, której chce użyć w danej aplikacji. Problem pojawia się w momencie, gdy pewna baza danych oferuje to, czego szuka, ale istnieje potrzeba wybierania z niej informacji w wygodniejszy dla programistów sposób. Na platformie .NET pozwala na to Language INtegrated Query (LINQ), który tłumaczy zapytanie w swoim języku na drzewo rozbioru składniowego, po którym można przejść implementując pewien zbiór klas odwiedzających to drzewo (visitorów), w celu stworzenia zapytania w docelowej bazie danych. Tematem niniejszej pracy jest implementacja klas, które pozwolą na stworzenie dostawcy LINQ dla bazy PostgreSQL.

While developing a computer system, we frequently have to cope with the task of choosing the database we want to use in our application. The problem is, some databases offer what we need, but we also need a more comfortable way to obtain information from it. The .NET framework allows us to achieve that with the Language INtegrated Query (LINQ) technology, which translates a query in its language into an abstract syntax partition tree, that we can traverse by implementing a set of visitors in order to create a query to our target database. The topic of this thesis is the implementation of such visitors, that will allow to build a LINQ provider for the PostgreSQL database.

Spis treści

1. Preliminaria	7
1.1. Słowo o IEnumerable<T> i IQueryable<T>	7
1.2. Language INtegrated Query	8
1.3. Drzewa wyrażeń IQueryable	9
1.4. re-linq i obiekty QueryModel	11
2. Proces budowy zapytania	13
2.1. Implementacja QueryModelVisitorBase	13
2.1.1. Metoda VisitQueryModel	14
2.1.2. Metoda VisitSelectClause	14
2.1.3. Metoda VisitMainFromClause	14
2.1.4. Metoda VisitWhereClause	14
2.1.5. Metoda VisitOrderByClause	14
2.1.6. Metoda VisitJoinClause	14
2.1.7. Metoda VisitAdditionalFromClause	15
2.1.8. Metoda VisitGroupJoinClause	15
2.1.9. Metoda VisitResultOperator	15
2.2. Implementacja RelinqExpressionVisitor	16
2.2.1. Metoda VisitQuerySourceReference	17
2.2.2. Metoda VisitSubQuery	18
2.2.3. Metoda VisitBinary	18
2.2.4. Metoda VisitConditional	18
2.2.5. Metoda VisitConstant	19

2.2.6. Metoda <code>VisitMember</code>	19
2.2.7. Metoda <code>VisitMethodCall</code>	19
2.2.8. Metoda <code>VisitNew</code>	19
2.2.9. Metoda <code>VisitUnary</code>	19
2.3. Czynności wykonywane po budowie zapytania	19
3. Testy jakości i wydajności	21
3.1. Dostępne funkcjonalności	21
3.2. Wydajność a inne rozwiązania	23
4. Podsumowanie	25
Bibliografia	27
Dodatki	29
A Instrukcja dodania biblioteki do własnego projektu	29
B Instrukcja użycia biblioteki w celu wykonania zapytania	31

Rozdział 1.

Preliminaria

W celu zrozumienia mechanizmu budowy zapytania SQL-owego, trzeba najpierw zrozumieć sposób działania języka LINQ, który jest punktem wejścia, oraz struktury drzewa rozbioru składniowego, będącego przedmiotem translacji LINQ-to-SQL. Autor zakłada, że czytelnikowi znane są podstawowe pojęcia związane z programowaniem obiektowym, takie jak metoda, kolekcja, dziedziczenie, typ generyczny. W niniejszym rozdziale poruszone zostaną następujące tematy:

- Sposób przetrzymywania kolekcji wyliczalnych w .NET-cie.
- Opis i motywacja powstania języka zapytań LINQ.
- Struktura drzewa wyrażeń `IQueryable`, i dlaczego takie drzewa są trudne do odwiedzania w celu zrealizowania zadania LINQ-to-SQL.
- Biblioteka `re-linq` uproszczająca powyższe drzewa, obiekty `QueryModel`.

1.1. Słowo o `IEnumerable<T>` i `IQueryable<T>`

Na platformie .NET wszystkie kolekcje, które możemy wyliczyć (a takie nas interesują, bo pracujemy z relacyjną bazą danych), implementują interfejs `IEnumerable<T>`, gdzie `T` jest typem obiektu, który jest przetrzymywany w kolekcji. Ten interfejs definiuje metodę `GetEnumerator()`, który zwraca obiekt typu `IEnumerator<T>`, który ma właściwość `Current` oraz metodę `MoveNext()`, pozwalając na przejście po uporządkowanym ciągu obiektów typu `T` oraz określenie obecnej pozycji. Korzystając z tych dwóch informacji, jesteśmy w stanie rozszerzyć `IEnumerable<T>` o metody takie jak wyznaczenie długości, filtrowanie kolekcji, łączenie dwóch kolekcji ze sobą, mapowanie funkcji na wszystkie obiekty znajdujące się w kolekcji. Dokładna lista metod rozszerzających `IEnumerable<T>` jest dostępna w oficjalnej dokumentacji MSDN.

Rozszerzeniem `IEnumerable<T>` jest interfejs `IQueryable<T>`, który de facto implementuje `IEnumerable<T>`. Zasadniczą różnicą między tymi dwoma interfejsami jest to, że w momencie wywołania ciągu metod rozszerzających `IEnumerable<T>`, każda z tych metod jest wywoływana jedna po drugiej, co może obciążyć moc obliczeniową procesora. Natomiast kolekcja `IQueryable<T>` jest świadoma, że nie musi wykonywać tych metod od razu, tylko przetrzymuje je w postaci drzewa wyrażeń (temat wyrażeń rozwiniemy później), które dopiero przy wywołaniu metody wyliczającej elementy z kolekcji zostaje wykonane w całości w efektywny sposób. Takie rozwiązanie jest idealne dla kolekcji, które łączą się z zewnętrzną bazą danych, aby istniała możliwość wybrania danych za pomocą jednego dużego zapytania SQL-owego.

1.2. Language INtegrated Query

Programiści na codzień pracują z danymi w różnych formach – zapisanych w plikach XML i JSON, przetrzymywanych w bazie danych, czy też po prostu z kolekcjami obiektów. Nie jest sztuką zauważyć, że trudnością dla programisty będzie odnalezienie się w projekcie, który korzysta z wielu źródeł danych, ponieważ wybranie danych z każdego z nich wymaga znajomości metod używania tych źródeł. To dało do myślenia architektom z Microsoftu, którzy „postanowili uogólnić problem [wyboru danych] i dodać możliwość wykonywania zapytań w sposób kompatybilny ze wszystkimi źródłami danych, nie tylko relacyjnymi i XML-owymi. Rozwiązanie to nazwali **Language INtegrated Query**” [1], i zostało bardzo ciepło przyjęte przez programistów .NET. Zapytanie LINQ jest automatycznie tłumaczone do docelowego języka zapytań, którego programista C# lub VB nie musi znać – a więc jest w stanie wybierać dane z niemal każdego źródła z użyciem tej samej składni.

Poniżej zostało przedstawione przykładowe zapytanie LINQ, które wybiera imiona i nazwiska osób z kolekcji pracowników, którzy zarabiają więcej niż 3000 złotych, posortowane alfabetycznie po nazwiskach:

```
var linqQuery =  
    from e in context.Employees  
    where e.Salary > 3000.0  
    orderby e.LastName  
    select new  
    {  
        FirstName = e.FirstName,  
        LastName = e.LastName  
    };
```

Takie zapytanie można również zapisać za pomocą metod z użyciem wyrażeń lambda (powyższe zapytanie jest tłumaczone przez kompilator do poniższego):


```
var linqQuery2 = context.Employees
    .Where(e => e.Salary > 3000.0)
    .OrderBy(e => e.LastName)
    .Select(e => new
    {
        FirstName = e.FirstName,
        LastName = e.LastName
    });
```

W czasie wykonywania zapytania LINQ, tak naprawdę wykonywane są metody na kolekcjach `IEnumerable<T>`, o których była mowa w poprzedniej sekcji, która traktowała o tym interfejsie. Obydwa powyższe zapytania zwracają kolekcję `IEnumerable<T>` (w przypadku danych wybieranych z zewnętrznego źródła – `IQueryable<T>`), gdzie `T` jest typem anonimowym zawierającym dwie właściwości `FirstName` i `LastName`. Tą kolekcję można w łatwy sposób przerzutować na dowolną „właściwą” kolekcję, używając odpowiedniej metody (na przykład `.ToList()` albo `.ToArray()`). Przykłady bardziej skomplikowanych zapytań można znaleźć w folderze `Thesis.Relinq.Tests` w plikach z rozszerzeniem `.cs` zawierających klasy testujące system, który stanowi załącznik do tej pracy.

1.3. Drzewa wyrażeń IQueryable

Zapytanie LINQ operuje na obiekcie, który implementuje interfejs `IQueryable`. Poniższy fragment kodu pochodzi z kodu źródłowego platformy .NET i pokazuje sposób, w jaki `IQueryable` implementuje `IEnumerable`:

```
public interface IQueryable : IEnumerable
{
    Type ElementType { get; }
    Expression Expression { get; }
    IQueryProvider Provider { get; }
}
```

Pierwsza właściwość zawiera oczywiście typ obiektów, których kolekcja jest wynikiem zapytania. Trzecia właściwość to instancja klasy, który implementuje interfejs `IQueryProvider`. Dostarczenie takiej implementacji jest zadaniem programisty, i o tym traktuje następna część rozdziału. Natomiast przedmiotem tej sekcji jest właściwość druga, o tajemniczym typie `Expression`.

Prawdziwym „zapytaniem”, ukrytym pod interfejsem `IQueryable`, jest obiekt `Expression`, który reprezentuje wejściowe zapytanie LINQ jako drzewo operatorów i metod, które zostały w tym zapytaniu użyte [2]. Po głębszej analizie kodu źródłowego platformy .NET okazuje się, że `IQueryable` jest tak naprawdę mechanizmem wykorzystującym metody typowe dla kolekcji do budowania drzewa rozbioru

składniowego w postaci obiektu `Expression`, który (wraz z `ElementType`) jest wykorzystywany przez `Provider` do wykonania zapytania.

Może się wydawać, że mamy wszystko – przecież wystarczy zaimplementować `IQueryProvider` w taki sposób, by tłumaczył drzewa `Expression` na zapytanie do języka, który nas interesuje. Okazuje się, że te drzewa mogą być problematycznym modelem do odwiedzania. Idąc śladem Fabiana Schmieda [3], weźmy na warsztat pewne zapytanie i zobaczymy, w jaki sposób obiekt `Expression` jest budowany:

```
var linqQuery3 =
    from c in QueryFactory.CreateLinqQuery<Customer>()
    from o in c.Orders
    where o.OrderNumber == 1
    select new { c, o };
```

Na początku, takie zapytanie jest tłumaczone na równoważny ciąg wywołań metod (równie dobrze programista mógł napisać w kodzie to, co jest poniżej):

```
QueryFactory.CreateLinqQuery<Customer>()
    .SelectMany(c => c.Orders, (c, o) => new {c, o})
    .Where(trans => trans.o.OrderNumber == 1)
    .Select(trans => new {trans.c, trans.o})
```

Kompilator tłumaczy powyższe wywołania metod na wywołania statycznych metod `IQueryable`, oraz opakuje wyrażenia lambda w obiekty `Expression.Lambda`, które są ich abstrakcyjną reprezentacją:

```
Queryable.Select(
    IQueryable.Where(
        IQueryable.SelectMany(
            QueryFactory.CreateLinqQuery<Customer>(),
            Expression.Lambda(Expression.MakeMemberAccess(...)),
            Expression.Lambda(Expression.New(...))),
        Expression.Lambda(Expression.MakeBinary(...))),
    Expression.Lambda(Expression.New (...)))
```

Z tej reprezentacji korzystają obiekty `IQueryable`, które budują poszukiwany obiekt `Expression`, który wreszcie jest abstrakcyjną reprezentacją zapytania, które jest przekazywane do dostawcy LINQ w celu budowy zapytania:

```
MethodCallExpression("Select",
    MethodCallExpression("Where",
        MethodCallExpression("SelectMany",
            ConstantExpression(IQueryable<Customer>),
            UnaryExpression(...), UnaryExpression(...)),
        UnaryExpression(...)),
    UnaryExpression(...))
```

W tym miejscu warto zauważyć, że `Expression` jest oczywiście tylko klasą abstrakcyjną dla klas określających konkretne wyrażenia, które po niej dziedziczą, takie jak `MethodCallExpression`, `UnaryExpression`, czy `BinaryExpression`.

Problemem z drzewami `Expression` jest fakt, że kolejność wykonywanych metod nie jest z góry określona – **jakakolwiek** metoda może nastąpić po **jakiegokolwiek** metodzie, przez co drzewa bardzo szybko stają się skomplikowane. Ponadto, jedna metoda może służyć w kilku kontekstach, np. `SelectMany` może służyć zarówno za część odpowiadającą za budowę podzapytania, jak również wybór dodatkowego źródła danych (następna tabela dla części `FROM` zapytania SQL-owego). Ponadto, dostawca LINQ musi przejść po wszystkich wyrażeniach lambda nawet na samą górę drzewa, aby znaleźć odpowiedni kontekst, o który chodziło użytkownikowi w zapytaniu. Stąd wniosek nasuwa się jeden – budowa dostawcy LINQ, który ma większe możliwości niż podstawowe operacje na pojedynczej tabeli, jest trudnym zadaniem, jeśli chciałoby się to zrobić na drzewach `Expression`.

Kończąc powyższe rozważania, Schmied zauważył że logika przetwarzania drzew `Expression` jest w każdym dostawcy LINQ niepotrzebnie duplikowana. W tym miejscu zadał pytanie: *„Czy inteligentniejszym rozwiązaniem nie byłaby **jednokrotna** implementacja logiki przetwarzania drzew w sposób generyczny, z której mogą korzystać wszyscy dostawcy LINQ?”* To pytanie było motywacją do powstania biblioteki `re-linq`. Autor pracy dyplomowej skorzystał z tej biblioteki, i o sposobie jej działania oraz użycia poświęcona została cała następna sekcja.

1.4. re-linq i obiekty `QueryModel`

W sekcji traktującej o drzewach wyrażen `IQueryable` pokazano, że ze względu na skomplikowaną strukturę tych drzew, budowa zapytania docelowego na podstawie tych drzew jest trudna. W związku z tym, alternatywnym rozwiązaniem jest wspomniana już biblioteka `re-linq`, która tłumaczy drzewa wyrażen `IQueryable` na drzewa rozbioru składniowego o wiele przystępniejsze do przeglądania, a dokładniej na obiekty `QueryModel`, które o wiele bardziej przypominają oryginalne zapytanie LINQ. Te obiekty mają cztery właściwości:

- `SelectClause` – klauzula `SelectClause` określająca element, który jest wybierany w części `select` z końcowej części zapytania LINQ).
- `MainFromClause` – klauzula `MainFromClause` określająca główne źródło, z którego wybierane są informacje w zapytaniu (najbardziej zewnętrzny `from`).
- `BodyClauses` – zbiór wyrażen implementujących `IBodyClause`, które definiują jakie dane są wybierane w zapytaniu i w jakiej kolejności (słowa kluczowe `where`, `orderby`, `join`, wewnętrzne `from-y`, które są przetrzymywane w klauzulach `AdditionalFrom`).

- **ResultOperators** – zbiór wyrażeń dziedziczących po **ResultOperatorBase**, które wykonują logikę na zbiorze wynikowym (na przykład metody agregujące **Count()**, **Average()**, **Distinct()** i im podobne, operacje na zbiorach **Union()**, **Distinct()** i im podobne).

Biblioteka re-linq, poza przekształceniem obiektów **Expression** na **QueryModel**, pozwala również na znaczne uproszczenie implementacji **IQueryProvider**, udostępniając klasę abstrakcyjną **QueryableBase**, po której dziedziczy klasa budująca zapytanie docelowe. Klasa ta musi posiadać metodę **CreateQueryProvider**, która zwraca obiekt typu **IQueryProvider** wykorzystywany przez **IQueryable**. Takim obiektem może być oferany przez re-linq **DefaultQueryProvider**, który jest budowany z trzech argumentów: typu docelowego implementującego **IQueryable**, obiektu **QueryParser** dokonującego translacji drzewa **Expression** do obiektu **QueryModel** (istnieje możliwość napisania własnego tłumacza, ale autor pracy korzysta z domyślnego, który został dostarczony razem z biblioteką), oraz własnej implementacji interfejsu **IQueryExecutor** (patrz: **Thesis.Relinq/PsqlQueryable.cs**). Taka implementacja powinna posiadać trzy metody:

- **IEnumerable<T> ExecuteCollection<T>(QueryModel queryModel),**
- **T ExecuteScalar<T>(QueryModel queryModel),**
- **T ExecuteSingle<T>(QueryModel queryModel, bool defaultWhenEmpty).**

Wybór wywoływanej przez **IQueryExecutor** metody zależy od oczekiwanego wyniku zapytania (cała kolekcja, skalar, pojedynczy element z kolekcji). W rezultacie, pisząc zapytanie LINQ, dostajemy obiekt w pełni implementujący **IQueryable**, na którym wywołanie metody wyciągającej wynik z bazy danych zwróci wynik jednej z powyższych trzech metod. Teraz jedyne, co nas dzieli od oczekiwanego rezultatu, jest ich implementacja, która przechodząc przez drzewo **QueryModel** buduje zapytanie, wykonuje je korzystając z zewnętrznej biblioteki łączącej się z bazą danych PostgreSQL, konwertuje wynik zapytania do oczekiwanego typu i go zwraca.

Sposobem budowy zapytania na podstawie obiektu **QueryModel** jest implementacja wzorca projektowego **Odwiedzający (Visitor)**, którego zadaniem jest przejście przez wnętrze tego obiektu. Biblioteka re-linq oczywiście udostępnia bazowe klasy abstrakcyjne, które wystarczy przeciążyć w celu wykonania tego zadania, i o tym poświęcony został następny rozdział niniejszej pracy. Przy okazji warto jeszcze wspomnieć, że biblioteka re-linq jest na tyle potężnym narzędziem, że na jej użycie zdecydowali się nawet autorzy **NHibernate** oraz **Entity Framework 7**, które są najpopularniejszymi bibliotekami ORM w .NET.

Rozdział 2.

Proces budowy zapytania

Znając sposób działania dostawców LINQ oraz budowę drzewa `QueryModel`, wystarczy opracować metodę przechodzenia przez te drzewa w celu budowy zapytania do bazy PostgreSQL. Punktem wejściowym dla projektu, który jest załącznikiem do niniejszej pracy, jest artykuł [4], opisujący przykładową implementację dostawcy LINQ dla NHibernate.

2.1. Implementacja `QueryModelVisitorBase`

Korzystając z dotychczasowej wiedzy, następnym krokiem do wykonania jest implementacja metod odwiedzających nowe drzewo rozbioru składniowego. Również w tym przypadku biblioteka `re-linq` asystuje programiście w tym zadaniu, udostępniając klasę `QueryModelVisitorBase`, która implementuje zbiór metod odwiedzających obiekt `QueryModel`. Stawianym przed programistą zadaniem jest napisanie klasy dziedziczącej po `QueryModelVisitorBase`, która wykona dodatkową logikę na argumentach implementowanych metod, oraz wywoła bazową logikę z użyciem słowa kluczowego `base` w celu akceptowania odwiedzanych elementów.

Argumentami każdej z metod, które będą nadpisywane, są różne klauzule – skondensowane do postaci wygodnych obiektów – które występują w zapytaniu LINQ. Ich właściwościami są znane już obiekty `Expression`, jednak są one na tyle proste, że można łatwo się zająć ich odwiedzeniem, i o tym będzie traktować następna sekcja tego rozdziału. Na chwilę obecną założmy, że posiadamy generyczną metodę, która odwiedza każdy możliwy podtyp `Expression`, i na jego podstawie buduje fragment zapytania SQL-owego. Taki fragment jest przekazywany do instancji klasy `QueryPartsAggregator`, służącej do łączenia takich fragmentów w pełne zapytanie SQL. Dokładna implementacja klasy, która jest tematem niniejszego podrozdziału, znajduje się w pliku `PsqlGeneratingQueryModelVisitor.cs`. Autor pracy zachęca czytelnika do zapoznawania się z nim w trakcie czytania następnych podsekcji.

2.1.1. Metoda VisitQueryModel

Punkt wejściowy dla całego procesu odwiedzania całego zapytania. Dla zadanego `QueryModel`, wywołuje metody `VisitSelectClause`, `VisitMainFromClause` oraz zbiór metod odwiedzających po kolei każdy z elementów właściwości `BodyClauses` i `ResultOperators`.

2.1.2. Metoda VisitSelectClause

Odwiedza klauzulę `SelectClause`, która definiuje właściwości obiektu, który zostanie zbudowany w wyniku zapytania (buduje część `SELECT` zapytania SQL-owego).

2.1.3. Metoda VisitMainFromClause

Odwiedza klauzulę `MainFromClause`, która definiuje źródło, na podstawie którego obiekt zostanie zbudowany w wyniku zapytania (dodaje pierwszą tabelę do części `FROM` w zapytaniu SQL-owym).

2.1.4. Metoda VisitWhereClause

W przypadku, gdy kolekcja `BodyClauses` zawiera klauzulę `WhereClause` (inaczej – zapytanie LINQ zawiera metodę `Where`), dodaje warunek, który wybrane dane muszą spełniać (dodaje element do części `WHERE` zapytania SQL-owego).

2.1.5. Metoda VisitOrderByClause

W przypadku, gdy kolekcja `BodyClauses` zawiera klauzulę `OrderByClause` (zapytanie LINQ zawiera metodę `OrderBy` lub `OrderByDescending`), dodaje porządek, według którego dane zostaną posortowane (dodaje element do części `ORDER BY` zapytania SQL-owego).

2.1.6. Metoda VisitJoinClause

W przypadku, gdy kolekcja `BodyClauses` zawiera klauzulę `JoinClause` (zapytanie LINQ zawiera metodę `Join`), dodaje złączenie wewnętrzne (ang. *inner join*) do poprzedniego dodanego źródła danych w zapytaniu (dokłada `INNER JOIN [table]` do odpowiedniej części `FROM` zapytania SQL-owego, a dokładniej do tabeli, która jest łączona).

2.1.7. Metoda VisitAdditionalFromClause

W przypadku, gdy kolekcja `BodyClauses` zawiera klauzulę `FromClause` (zapytanie LINQ zawiera więcej niż jedną część `from`, która została zakumulowana razem z poprzednimi do większego obiektu metodą `SelectMany`), dodaje następne źródło, na podstawie którego obiekt zostanie zbudowany w wyniku zapytania (dodaje następną tabelę do części `FROM` zapytania SQL-owego po przecinku, co w rezultacie tworzy iloczyn kartezjański dwóch tabel, ang. *cross join*).

2.1.8. Metoda VisitGroupJoinClause

W przypadku, gdy kolekcja `BodyClauses` zawiera klauzulę `GroupJoinClause` (zapytanie LINQ zawiera metodę `GroupJoin`), dodaje lewostronne złączenie zewnętrzne (ang. *left join*) do poprzedniego dodanego źródła danych w zapytaniu (dokładnie `LEFT JOIN [table]` do odpowiedniej części `FROM` zapytania SQL-owego, a dokładniej do tabeli, która jest łączona).

2.1.9. Metoda VisitResultOperator

W odróżnieniu od wszystkich powyższych klauzul, które implementują `IBodyClause`, `re-linq` niestety nie udostępnia wygodnego modelu odwiedzania dla obiektów `ResultOperatorBase`, w związku z tym ta metoda jest wywoływana dla każdego obiektu zawartego we właściwości `QueryModel.ResultOperators`.

Dostawca LINQ, który jest tematem niniejszej pracy, dzieli operatory wynikowe na pięć kategorii, zależnych od właściwego typu obiektu, który dziedziczy po `ResultOperatorBase` (każdy z nich nazywa się `SomeResultOperator`, dla prostoty każda nazwa została w poniższym spisie skrócona):

- a) `Count`, `Average`, `Min`, `Max`, `Sum`, `Distinct` (operatory agregujące, które jako argument przyjmują zbiór wybranych danych i na ich podstawie zwraca pojedynczą wartość (w przypadku `Distinct` – unikatowe krotki)) – otacza wybraną część `SELECT` zapytania SQL-owego w odpowiadającą danemu operatorowi funkcję.
- b) `Union`, `Intersect`, `Concat`, `Except` (operatory, które jako argumenty przyjmują zbiory danych i zwracają nowy zbiór) – sygnatury odpowiadających w języku C# metod w jednym ze swoich argumentów mają zbiór, na którym ma zostać wykonana dana operacja. Ten zbiór jest oczywiście kolejnym drzewem `Expression`, które zostaje przetłumaczone na `QueryModel`, w związku z tym budowane zostaje podzapytanie, a zapytanie końcowe jest wynikiem złączenia zapytania głównego i podrzędnego.
- c) `Take`, `Skip` (operatory stronicowania) – dodaje do zapytania odpowiednią część odpowiedzialną za stronicowanie (`LIMIT X/OFFSET X`).

- d) **Any** (operator określający istnienie obiektu, który spełnia pewien warunek) – dolecowo użyty do wybierania obiektu na podstawie stwierdzenia, czy istnieje obiekt w wyniku innego zapytania, który spełnia podany na zewnątrz warunek. Poniższe zapytanie LINQ:

```
QueryFactory.CreateLinqQuery<Customer>()
    .Where(c => QueryFactory.CreateLinqQuery<Order>()
        .Any(o => o.CustomerID == c.CustomerID));
```

zostaje tłumaczone na odpowiadające mu zapytanie w SQL-u:

```
SELECT * FROM customers WHERE EXISTS
    (SELECT * FROM orders WHERE
        (customers.CustomerID = orders.CustomerID));
```

- e) **All** (operator określający spełnienie pewnego warunku przez wszystkie obiekty w kolekcji) – dolecowo użyty do wybierania obiektu na podstawie stwierdzenia, czy wszystkie obiekty w wyniku innego zapytania spełniają podany na zewnątrz warunek. To stwierdzenie jest równoważne stwierdzeniu, że **nie istnieje** obiekt, który **nie spełnia** danego warunku (na zajęciach *Logika dla informatyków* w IIUWr można dowiedzieć się, że $\forall x\phi \Leftrightarrow \neg\exists x\neg\phi$). Korzystając z tego faktu, poniższe zapytanie LINQ:

```
QueryFactory.CreateLinqQuery<Customer>()
    .Where(c => QueryFactory.CreateLinqQuery<Order>()
        .All(o => o.CustomerID != c.CustomerID));
```

zostaje tłumaczone na następujące zapytanie w SQL-u:

```
SELECT * FROM customers WHERE NOT EXISTS
    (SELECT * FROM orders WHERE NOT
        (customers.CustomerID != orders.CustomerID));
```

2.2. Implementacja RelinqExpressionVisitor

Implementacja klasy `QueryModelVisitorBase`, opisana w rozdziale 2.1, zajmuje się odwiedzaniem obiektu `QueryModel` oraz przetwarzaniem wygenerowanych części zapytania SQL-owego do postaci pary napisu przedstawiającego zapytanie oraz słownika z parametrami. W tym rozdziale opisana została implementacja udostępnianej przez re-linq klasy abstrakcyjnej `RelinqExpressionVisitor`, która dziedziczy po .NET-owym `ExpressionVisitor`. Służy ona do generowania kluczowych części zapytania oraz parametrów, które dane zapytanie będzie wykorzystywać.

Argumentami każdej z metod, które będą nadpisywane, są obiekty dziedziczące po `Expression`. Na ich podstawie budowany jest napis w klasie `StringBuilder`, który po zakończeniu odwiedzania wyrażenia zostaje przekazany do omawianej już implementacji `QueryModelVisitorBase`.

2.2.1. Metoda VisitQuerySourceReference

Ta metoda odwiedza źródło danych, z którego wybrane zostaną dane. Rozpatrywane są dwa przypadki:

- a) Źródło jest klauzulą `GroupJoinClause` – aby zrozumieć postać tej klauzuli, rozważmy najpierw następujące zapytanie:

```
from c in QueryFactory.CreateLinqQuery<Customer>()
join o in QueryFactory.CreateLinqQuery<Order>()
on c.CustomerID equals o.CustomerID into orders
select new
{
    Customer = c.CustomerID,
    Orders = orders
};
```

W niniejszym zapytaniu obiekt `orders` jest kolekcją `IEnumerable<Order>` zamówień wykonanych przez odpowiadających im klientów, a zapytanie wynikowe tworzy obiekty anonimowe postaci numeru ID klienta i kolekcji zamówień, które dany klient zamówił. Przetłumaczenie tego zapytania do SQL jest trudne, ze względu na konieczność grupowania kolekcji i zwrócenia jej w postaci obiektu. Rozwiązanie, które wykorzystuje LINQ to SQL – oraz biblioteka autora pracy – jest dosyć sprytne: wykonywane jest złączenie zewnętrzne lewostronne tabeli grupującej z grupowaną, całość zostaje posortowana względem porównywanych kluczy, oraz dodawana jest nowa kolumna, która jest wynikiem zliczenia obiektów w każdej grupie. Powyższe zapytanie LINQ-owe tłumaczone jest na:

```
SELECT
    customers.CustomerID AS CustomerID, [...],
    (SELECT COUNT(*) FROM orders AS temp
     WHERE temp.CustomerID = customers.CustomerID)
    AS Orders.__GROUP_COUNT
FROM customers LEFT OUTER JOIN orders ON
    customers.CustomerID = orders.CustomerID
ORDER BY customers.CustomerID, orders.CustomerID;
```

`GroupJoinClause` posiada właściwość `JoinClause`, z której wybierane są właściwości `[Outer/Inner]KeySelector`, na podstawie których doklejany zostaje powyższy kawałek zapytania umożliwiający grupowanie danych z poziomu LINQ.

- b) Źródło nie jest klauzulą `GroupJoinClause` – w tym przypadku odwiedzana jest po prostu tabela w bazie danych. W zależności od tego, czy obecne wywołanie metody zostało wykonane przez metodę `VisitMember` lub nie, do zapytania doklejana jest nazwa tabeli `[tabela]` lub ciąg postaci `[tabela].[kolumna1]`, `[tabela].[kolumna2]`, ..., który definiuje wszystkie kolumny `[tabela]`.

2.2.2. Metoda VisitSubQuery

Wyciąga z `SubQueryExpression` dodatkowy `QueryModel`, buduje na jego podstawie zapytanie i dodaje je do nadrzędnej klasy obsługującej budowę głównego zapytania. Jest to jedyna metoda, która nie generuje napisu w `StringBuilder`, a wykonuje logikę bezpośrednio na obiekcie odwiedzającym `QueryModel`. Takie zapytania są później łączone w całość za pomocą odpowiadających im operatorów wynikowych.

2.2.3. Metoda VisitBinary

Wyrażenia `BinaryExpression`, jak można się domyślić, mają jako właściwości wyrażenia `Left` i `Right` oraz operator łączący je. Odwiedza lewe wyrażenie, dokleja do wyniku napis odpowiadający operatorowi łączącemu, odwiedza prawe wyrażenie.

2.2.4. Metoda VisitConditional

Rozważmy następujące zapytanie LINQ:

```
from e in QueryFactory.CreateLinqQuery<Entity>()
select new
{
    Result = (e.Property < 5
        ? "less than five"
        : e.Property == 5
            ? "five"
            : "more than five")
};
```

W ramach przypomnienia: operator `?` jest operatorem warunkowym, który ewaluje wyrażenie boolowskie i zwraca wartość przed dwukropkiem dla prawdy, po dwukropku dla fałszu. W kontekście budowy zapytania, jest ono przetrzymywane w postaci `ConditionalExpression`, które zawiera właściwości `Test`, `IfTrue`, `IfFalse`. W szczególności, w `IfTrue` i `IfFalse` może być następne wyrażenie warunkowe. Metoda `VisitConditional` przechodzi po drzewie takich wyrażen i tłumaczy je do SQL z użyciem funkcji `CASE`. Dla powyższego zapytania, odpowiadające mu zapytanie SQL wygląda następująco:

```
SELECT
    CASE WHEN entities.Property < 5 THEN 'less than five'
         WHEN entities.Property = 5 THEN 'five'
         ELSE 'more than five'
    END AS "Result"
FROM entities;
```

2.2.5. Metoda VisitConstant

Aby zapobiec atakowi typu SQL injection, należy parametryzować zapytania, które są wykonywane do bazy danych przez dostawcę LINQ. Odwiedzając wartość stałą (jest nią np. napis, liczba, itp.), metoda tworzy nowy parametr w zapytaniu, nadaje mu nazwę i dokleja tę nazwę do zapytania.

2.2.6. Metoda VisitMember

Odiedzana przy wyborze właściwości z modelu tabeli w bazie danych. Dokleja do zapytania (do części `SELECT`) napis `[tabela].[kolumna]`, pozwalając na wybór pojedynczych kolumn w wyniku zapytania.

2.2.7. Metoda VisitMethodCall

Opakowuje metodę C#-ową w odpowiadającą funkcję w zapytaniu SQL-owym. Przekazuje tej funkcji argumenty w sposób określony przez jej sygnaturę, po czym dopisuje dany fragment zapytania do bufora.

2.2.8. Metoda VisitNew

W przypadku, gdy zapytanie LINQ zwraca nowy obiekt anonimowy, ta metoda pozwala na przejście po wszystkich właściwościach nowego obiektu i ich odwiedzenie.

2.2.9. Metoda VisitUnary

Wykorzystywana w negacji wyrażenia boolowskiego lub do przekazania tego wyrażenia jako `MemberExpression`.

2.3. Czynności wykonywane po budowie zapytania

Potrafiąc zbudować dowolne zapytanie SQL-owe na podstawie zapytania LINQ, pozostaje już tylko kwestia wykonania go i zwrócenia wyniku w postaci obiektowej. Zapytanie może wykonać dowolny obiekt `DbConnection` kompatybilny z PostgreSQL (na przykład pochodzący z biblioteki `Npgsql`), a rozszerzony przez bibliotekę `Dapper` o metody `Query` i `Query<T>`, jest w stanie automatycznie przerzutować każdą krotkę wynikową przekonwertować do obiektu generycznego lub o typie `T`.

Korzystając z Dappera, wykonywanie i mapowanie zapytań jest banalnie proste:

```
var result = connection.Query<T>(statement, parameters);
```

W tym miejscu zmienna `result` jest typu `IEnumerable<T>`, gdzie `T` jest typem obiektu, który zwraca oryginalne zapytanie LINQ (jest ono typu `IQueryable<T>`). Dapper wymaga, aby nazwy kolumn w relacjach mapowanych na obiekty były takie same, jak nazwy właściwości w klasie modelowej – stąd, podczas budowy zapytania, każda kolumna została przemianowana na nazwę odpowiadającej właściwości w klasie z użyciem słowa kluczowego `AS`.

Dapper niestety nie radzi sobie z typami anonimowymi ze względu na to, że nie istnieje publiczny konstruktor obiektów tego rodzaju. Obejściem tego problemu jest dostarczona przez autora pracy metoda rozszerzająca `QueryAnonymous<T>`. Dla typów zawierających tylko i wyłącznie właściwości proste (inaczej mówiąc: dla krotek, które zawierają tylko kolumny z bazy danych), wystarczy każdą kolumnę przerzutować do postaci tablicy i za pomocą statycznej metody `Activator.CreateInstance` utworzyć nowy obiekt anonimowy. Metoda ta pozwala również na grupowanie obiektów dla zapytań używających metody `GroupJoin` (patrz: 2.2.1a), która korzysta z dodatkowego pola w celu określenia liczby obiektów grupowanych.

Rozdział 3.

Testy jakości i wydajności

Niniejsza sekcja jest krótkim raportem o możliwościach dostarczanych przez dostawcę LINQ implementowanego w ramach tej pracy dyplomowej oraz jego wydajności czasowej, porównanej z innymi rozwiązaniami dostępnymi na rynku.

3.1. Dostępne funkcjonalności

Autor niniejszej pracy podczas realizowania projektu używał techniki *test-driven development*, tj. przed implementacją pewnej funkcjonalności napisał test, który ją pokrywa. Wszystkie testy są dostępne w katalogu `Thesis.Relinq.Tests`.

Biorąc pod uwagę wszystkie testy, które zostały napisane, zaimplementowanymi funkcjonalnościami są:

- Połączenie się z bazą danych.
- Obsługa podstawowych operatorów binarnych (dodawanie, logiczny OR, itp.).
- Obsługa funkcji agregujących (Sum, Average, Min, Max, Count, Distinct).
- Obsługa funkcji na napisach.
- Budowa zapytania zwracającego kolekcję obiektów modelowych.
- Budowa zapytania zwracającego kolekcję obiektów anonimowych.
- Możliwość dodania jednego lub więcej wyrażenia warunkowego do zapytania.
- Możliwość dodania wyniku rozwinięcia drzewa warunkowego do zapytania (CASE WHEN ... THEN ... END).
- Obsługa zapytań z wyrażeniem EXISTS.
- Możliwość dodania porządkowania wyniku zapytania.
- Możliwość stronicowania wyniku zapytania.

- Możliwość łączenia kilku źródeł danych za pomocą złączeń wewnętrznych (*inner join*), zewnętrznych obustronnych (*cross join*), zewnętrznych jednostronnych (*outer left/right join*).
- Możliwość wykonania C#-owego `GroupJoin` na tabelach w PostgreSQL,
- Obsługa operatorów działających na zbiorach (`UNION`, `UNION ALL`, `INTERSECT`, `EXCEPT`).
- Parametryzacja zapytań w celu zwiększenia bezpieczeństwa.
- Możliwość dowolnego mianowania nazw tabel i kolumn w bazie danych z poziomu klas modelowych.

Funkcjonalnościami, które są ważne, lecz niestety nie zostały zaimplementowane z powodu ich trudności, są:

- Grupowanie z funkcją agregującą z użyciem `GROUP BY` – C#-owa metoda `GroupBy` działa w inny sposób, niż funkcja `GROUP BY` w zapytaniach SQL-owych. W odróżnieniu od SQL-a, grupowanie w C# może przebiegać nie tylko po funkcjach agregujących, takich jak `COUNT()` lub `AVG()`, ale również po właściwościach, czy nawet całych obiektach.
- C#-owe metody `TakeWhile` i `SkipWhile` – ze względu na brak możliwości napisania zapytania SQL-owego odpowiadającego tym metodom bez wykorzystania procedur składowanych (ang. *stored procedures*), implementacja takiej funkcjonalności jest prawdopodobnie niemożliwa; w tymi metodami nie radzi sobie żaden ORM (nawet Entity Framework), który jest znany autorowi pracy.
- Automatyczne wyznaczanie kontekstu z bazy danych – istnieje konieczność ręcznej budowy klas i ich właściwości, które mają odpowiadać tabelom i ich kolumnom w bazie danych, do której pisane jest zapytanie. Z drugiej strony, obecne rozwiązanie polegające na ręcznym pisaniu klas opisujących tabele w bazie danych, zezwala na dostarczanie nietrywialnych metod dla encji, które są wynikiem zapytania.

3.2. Wydajność a inne rozwiązania

Z poprzedniej sekcji wynika, że student informatyki w ciągu czterech miesięcy jest w stanie napisać w ramach pracy dyplomowej dostawcę LINQ z nietrywialnymi funkcjonalnościami. Czas sprawdzić wydajność takiego dostawcy, porównując go z dwoma popularnymi dostawcami LINQ: komercyjnym LinqConnect firmy DevArt, dołączonym do próbnej wersji biblioteki dotConnect for PostgreSQL 7.9 Professional, oraz open-sourcowym LINQ to DB, który jest rozwijany od kilku lat. W celu sprawdzenia wydajności tych trzech dostawców LINQ dla PostgreSQL, użyta została biblioteka do testowania wydajności w .NET o nazwie BenchmarkDotNet.

W ramach sprawiedliwego pomiaru, każda z trzech bibliotek wykonuje identyczne zapytania do tej samej bazy danych, postawionej na tej samej maszynie, z której wykonywany jest kod kliencki (średniej klasy laptop). Każdy z testów jest załącznikiem do niniejszej pracy, i można je znaleźć w plikach (...)Benchmark.cs w katalogu Thesis.Relinq.Benchmarks. Poniższa tabela przedstawia czasy wykonania pojedynczego zapytania w każdym z testów:

Nazwa metody	LinqConnect	linq2db	ThesisRelinq
select_all	0,712 ms	1,249 ms	1,450 ms
select_anonymous_type	0,537 ms	0,540 ms	0,959 ms
select_with_where	0,465 ms	0,313 ms	0,697 ms
select_with_multiconditional_where	0,550 ms	0,487 ms	0,871 ms
select_with_multiple_wheres	0,579 ms	0,496 ms	0,907 ms
select_with_case	0,516 ms	N/A	0,697 ms
select_with_orderings_joined	0,580 ms	0,607 ms	0,992 ms
select_with_orderings_split	0,592 ms	0,606 ms	0,984 ms
select_with_take_while	N/A	N/A	N/A
select_with_cross_join	2,819 ms	2,810 ms	5,159 ms
select_with_inner_join	2,906 ms	2,841 ms	4,829 ms
select_with_group_join	61,257 ms	70,886 ms	136,525 ms
select_with_outer_join	2,938 ms	3,152 ms	5,090 ms
select_with_paging	0,513 ms	0,453 ms	0,878 ms
select_where_any_matches_condition	1,661 ms	1,795 ms	2,638 ms
select_where_all_match_condition	1,306 ms	0,819 ms	1,623 ms
select_with_union	0,799 ms	N/A	1,180 ms
select_with_concat_as_union_all	0,694 ms	N/A	0,983 ms
select_with_intersect	0,897 ms	0,622 ms	1,353 ms
select_with_except	0,892 ms	0,658 ms	1,345 ms

Zakładając, że pierwsze dwie biblioteki działają w optymalnym czasie, można zauważyć, że dostawca LINQ autora pracy działa około dwa razy wolniej od rozwiązań optymalnych. Nie jest to najgorszy wynik, ale w dalszym ciągu może ulec poprawie – dużo czasu poświęcane jest na budowę obiektów będących wynikiem zapytania, korzystając z mechanizmu refleksji w celu dynamicznego ustawiania właściwości nowopowstałych instancji klas oraz metody `Activator.CreateInstance`. Wzorcową alternatywą dla tego rozwiązania może być dynamiczne generowanie kodu za pomocą klasy `ILGenerator`, która w trakcie kompilacji wygenerowałaby i wyemitowała do kompilatora fragment kodu tworzący w efektywny sposób nowe instancje obiektu będącego wynikiem zapytania [5].

Rozdział 4.

Podsumowanie

W ramach niniejszej pracy dyplomowej powstał dostawca LINQ, który jest kompatybilny z bazą danych PostgreSQL i posiada dużą liczbę funkcjonalności. Co więcej, dostawca ten jest łatwo rozszerzalny na inne dialekty SQL-a, ze względu na ich duże podobieństwo – prawdopodobnie funkcjonuje poprawnie dla prostych zapytań w innych bazach danych.

Zadanie to było rozwijające dla autora pracy nie tylko pod względem poznania możliwości i ograniczeń bazy PostgreSQL, ale również pozwoliło lepiej zrozumieć jak LINQ wygląda od wewnątrz w języku C#. Trzeba pamiętać, że technologia LINQ umożliwia nie tylko wykonywanie zapytań do relacyjnych baz danych, ale również innych źródeł danych, a w szczególności baz danych typu NoSQL, i to jest jednym z tematów, z którymi autor pracy ma zamiar zapoznać się w przyszłości.

Bibliografia

- [1] Don Box, Anders Hejlsberg, LINQ: .NET Language-Integrated Query, 2007.
- [2] Matt Warren, LINQ: Building an IQueryable Provider, 2007.
- [3] Fabian Schmied, re-linq - A General Purpose LINQ Foundation, 2009.
- [4] Markus Giegl, re-linq | ishing the Pain: Using re-linq to Implement a Powerful LINQ Provider on the Example of NHibernate, 2010.
- [5] Oren Eini, Creating objects - Perf implications, 2008.
- [6] Microsoft, 101 LINQ Samples, 2012.
- [7] The PostgreSQL Global Development Group, Documentation, 1996-2017.

Dodatek A

Instrukcja dodania biblioteki do własnego projektu

Biblioteka `Thesis.Relinq` została napisana w .NET Standard 1.4, co oznacza, że jest kompatybilna z projektami napisanymi zarówno w .NET Framework, jak również .NET Core. Niniejszy dodatek opisuje instrukcję dodania `Thesis.Relinq` do własnego projektu. O ile klient nie posiada własnej implementacji `DbConnection`, zaleca się użycie obiektów `NpgsqlConnection` pochodzących z biblioteki `Npgsql`.

A1. .NET Framework

Zakładam, że użytkownik korzysta z Visual Studio w wersji angielskiej. Wymagany jest .NET Framework w wersji 4.6 lub wyższej. Kroki do wykonania:

1. Nacisnąć prawym przyciskiem myszy na rozwiązanie (ang. *solution*), które zawiera projekt.
2. Nacisnąć na przycisk **Add > Existing Project...**
3. Nawigować do folderu w projekcie `Thesis.Relinq` i dodać go.
4. Nacisnąć prawym przyciskiem myszy na **References > Add Reference...** w projekcie, który ma używać biblioteki.
5. Wybrać sekcję **Solution**. Zaznaczyć projekt `Thesis.Relinq`. Nacisnąć **OK**.
6. Może okazać się potrzebne dodanie następujących pakietów NuGet (prawy przycisk myszy na projekt, opcja **Manage NuGet Packages...**):
 - `Remotion.Linq` w wersji 2.1.0.0,
 - `Dapper` w wersji 1.50.2,
 - `System.Data.Common` w wersji 4.1.0.0,
 - `System.Reflection.TypeExtensions` w wersji 4.1.0.0.

A2. .NET Core

W przypadku .NET Core, dodanie biblioteki do projektu jest nieco prostsze. W pliku `.csproj`, który zawiera ustawienia projektu, wystarczy dodać zależność do lokalnego projektu na dysku:

```
<ItemGroup>
  <ProjectReference
    Include="path/to/Thesis.Relinq.csproj" />
</ItemGroup>
```

Następnie, w celu zintegrowania biblioteki z projektem, należy z linii poleceń uruchomić komendę `dotnet restore` w katalogu z plikiem konfiguracyjnym projektu klienckiego.

Dodatek B

Instrukcja użycia biblioteki w celu wykonania zapytania

Po dodaniu biblioteki `Thesis.Relinq` do własnego projektu i dodaniu zależności do niej w kodzie klienckim (`using Thesis.Relinq`), dla każdej tabeli w bazie danych, z której użytkownik chce wyciągać dane, należy napisać klasę modelową, która jest udekorowana atrybutami `Table` i `Column` określającymi nazwę tabeli i nazwy jej kolumn w bazie danych. Przykładowa klasa modelowa wygląda następująco:

```
[Table(Name = "people")]
public class Person
{
    [Column(Name = "person_id")]
    public int PersonId { get; set; }

    [Column(Name = "first_name")]
    public string FirstName { get; set; }

    [Column(Name = "last_name")]
    public string LastName { get; set; }
}
```

Po opisaniu każdej z tabel, źródło danych w zapytaniu LINQ jest tworzone za pomocą metody `PsqlQueryFactory.Queryable<T>(DbConnection connection)`, która zwraca obiekty `PsqlQueryable`. Obiekt `DbConnection` powinien być kompatybilny z bazą PostgreSQL oraz zostać wcześniej z taką bazą połączony.

Wszystkie obiekty `PsqlQueryable` można opakować w klasę kontekstową, która pozwoli na o wiele czytelniejsze wykonywanie zapytań. Przykładowa klasa kontekstowa oraz jej wykorzystanie w zapytaniu wygląda następująco:

```
public class NorthwindContext
{
    public PsqlQueryable<Order> Orders { get; }
    public PsqlQueryable<Customer> Customers { get; }
    public PsqlQueryable<Employee> Employees { get; }

    public NorthwindContext(DbConnection connection)
    {
        this.Customers = PsqlQueryFactory
            .Queryable<Customer>(connection);
        this.Employees = PsqlQueryFactory
            .Queryable<Employee>(connection);
        this.Orders = PsqlQueryFactory
            .Queryable<Order>(connection);
    }
}

var connection = new SomePostgresConnection();
var context = new NorthwindContext(connection);

var myQuery =
    from c in Context.Customers
    join o in Context.Orders
    on c.CustomerID equals o.CustomerID
    select new
    {
        Name = c.ContactName,
        Order = o.OrderID
    };
```