



Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Informatyki

Projekt dyplomowy

*Implementacja narzędzi lex i yacc z wykorzystaniem  
metaprogramowania*

*Implementation of lexical analyzer (lex) and parser generator  
(yacc) tools using metaprogramming techniques*

|                   |                                  |
|-------------------|----------------------------------|
| Autorzy:          | Bartosz Buczek, Bartłomiej Kozak |
| Kierunek studiów: | Informatyka                      |
| Opiekun pracy:    | dr inż. Tomasz Służalec          |

Kraków, 2025



# Spis treści

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Cel prac i wizja projektu</b>  | <b>5</b>  |
| 1.1      | Charakterystyka problemu . . . . .  | 5         |
| 1.2      | Motywacja projektu . . . . .  | 5         |
| 1.3      | Przegląd istniejących rozwiązań . . . . .   | 6         |
| 1.3.1    | Lex, Yacc . . . . .   | 6         |
| 1.3.2    | PLY, SLY . . . . .  | 7         |
| 1.3.3    | ANTLR . . . . .   | 8         |
| 1.3.4    | Scala parser combinators . . . . .  | 9         |
| 1.3.5    | ScalaBison . . . . .  | 9         |
| 1.3.6    | parboiled2 . . . . .  | 9         |
| 1.3.7    | FastParse . . . . .   | 10        |
| 1.3.8    | Podsumowanie . . . . .  | 10        |
| <b>2</b> | <b>Metaprogramowanie w Scali 3</b>  | <b>12</b> |
| 2.1      | Wprowadzenie . . . . .  | 12        |
| 2.1.1    | Quotes i Splices . . . . .  | 12        |
| 2.1.2    | Bezpieczeństwo międzyetapowe . . . . .  | 12        |
| 2.2      | Mechanizmy metaprogramowania w Scali 3 . . . . .  | 13        |
| 2.2.1    | Definicje inline . . . . .  | 13        |
| 2.2.2    | Makra oparte na wyrażeniach . . . . .   | 13        |
| 2.2.3    | Dopasowanie wzorców kodu . . . . .  | 13        |
| 2.2.4    | Refleksja TASTy . . . . .   | 13        |
| <b>3</b> | <b>Implementacja</b>  | <b>14</b> |
| 3.1      | Praktyczna implementacja analizatora leksykalnego z wykorzystaniem makr w Scali 3 . . . . . | 14        |
| 3.1.1    | Wprowadzenie do studium przypadku . . . . .   | 14        |
| 3.1.2    | Architektura systemu leksera . . . . .  | 14        |
| 3.1.3    | Analiza drzewa składni abstrakcyjnej . . . . .  | 15        |
| 3.1.4    | Transformacja i adaptacja referencji . . . . .  | 15        |
| 3.1.5    | Ekstrakcja i kompilacja wzorców . . . . .   | 16        |
| 3.1.6    | Analiza wzorców: klasa CompileNameAndPattern . . . . .                                      | 16        |
| 3.1.7    | Generacja klasy anonimowej . . . . .  | 17        |
| 3.1.8    | Walidacja i obsługa błędów . . . . .  | 19        |
|          | <b>Spis rysunków</b>  | <b>22</b> |
|          | <b>Spis tabel</b>   | <b>23</b> |

|                 |    |
|-----------------|----|
| Spis algorytmów | 24 |
| Spis listingów  | 25 |

# Rozdział 1

## Cel prac i wizja projektu

### 1.1. Charakterystyka problemu

Leksery i parsery są kluczowymi elementami w procesie tworzenia interpreterów i kompilatorów języków programowania. Pozwalają one przekształcić kod źródłowy napisany przez programistę na reprezentację wewnętrzną, wykorzystywaną później przez dalsze etapy przetwarzania kodu.

Analiza leksykalna wykonywana przez lekser polega na rozdzieleniu kodu źródłowego na jednostki logiczne, zwane leksemami. Parser natomiast wykonuje analizę składniową w celu ustalenia struktury gramatycznej tekstu i jej zgodności z gramatyką języka.

Celem pracy inżynierskiej jest stworzenie narzędzia *ALPACA* (Another Lexer Parser And Compiler Alpaca) w języku Scala, które implementuje funkcjonalności powszechnie stosowane w budowie lekserów i parserów.

### 1.2. Motywacja projektu

Projekt ma na celu stworzenie nowoczesnego narzędzia do generowania lekserów i parserów w języku Scala, łączącego zalety istniejących rozwiązań z nowoczesnym podejściem technologicznym. Jego główne cele to:

1. Stworzenie intuicyjnego API.
2. Opracowanie obszernej dokumentacji.
3. Rozbudowana diagnostyka błędów.
4. Poprawa wydajności względem rozwiązań w języku Python.
5. Integracja z popularnymi środowiskami programistycznymi (IDE).

Proponowane rozwiązanie łączy nowoczesne podejście technologiczne z praktycznym zastosowaniem w edukacji i programowaniu. Może on służyć jako narzędzie dydaktyczne, ułatwiając naukę teorii kompilacji, w pracach badawczych, a także jako kompleksowe narzędzie do tworzenia praktycznych rozwiązań.

## 1.3. Przegląd istniejących rozwiązań

Dostępne na rynku rozwiązania umożliwiają tworzenie analizatorów, jednak charakteryzują się ograniczeniami związanymi z wydajnością, wysokim progiem wejścia i diagnostyką błędów.

### 1.3.1. Lex, Yacc

*Lex*[1] i *Yacc*[2] to klasyczne, dobrze ugruntowane narzędzia, które odegrały kluczową rolę w tworzeniu setek współczesnych języków programowania. Definicja leksera i parsera w tych systemach odbywa się poprzez specjalnie zaprojektowaną składnię konfiguracyjną. Mimo pewnych zalet, jego złożoność i wysoki próg wejścia mogą stanowić wyzwanie.

Ponieważ *Lex* i *Yacc* zostały zaprojektowane do współpracy z językiem C, ich integracja z nowoczesnymi językami programowania bywa utrudniona. Rozszerzanie tych narzędzi o dodatkowe, specyficzne funkcjonalności jest skomplikowane, co ogranicza ich elastyczność. Brak wsparcia dla współczesnych środowisk programistycznych (IDE) dodatkowo obniża komfort użytkowania w porównaniu z nowoczesnymi alternatywami.

```

1 {
2  /*%%*/
3  value_expr($3);
4  $1->nd_value = $3;
5  $$ = $1;
6  /*%
7  $$ = dispatch2(massign, $1, $3);
8  %*/
9  }
10 | var_lhs tOP_ASGN command_call
11 {
12  value_expr($3);
13  $$ = new_op_assign($1, $2, $3);
14  }
15 | primary_value '[' opt_call_args rbracket tOP_ASGN command_call
16 {
17  /*%%*/
18  NODE *args;
19
20  value_expr($6);
21  if (!$3) $3 = NEW_ZARRAY();
22  args = arg_concat($3, $6);
23  if ($5 == tOROP) {
24    $5 = 0;
25  }
26  else if ($5 == tANDOP) {
27    $5 = 1;
28  }
29  $$ = NEW_OP_ASGN1($1, $5, args);
30  fixpos($$, $1);
31  /*%
32  $$ = dispatch2(aref_field, $1, escape_Qundef($3));
33  $$ = dispatch3(opassign, $$, $5, $6);
34  %*/
35  }

```

Listing 1.1: Fragment definicji parsera Ruby w technologii Yacc

### 1.3.2. PLY, SLY

*PLY*[3] i jego nowszy odpowiednik *SLY*[4] to biblioteki inspirowane narzędziami Lex i Yacc. Oferują elastyczne podejście do budowy parserów, umożliwiając samodzielną implementację obsługi leksemów, budowę drzewa AST, czy dodatkowe funkcjonalności takie jak obliczanie numeru linii w lekserze.

Głównym ograniczeniem PLY i SLY jest implementacja w języku Python. Ze względu na interpretowany charakter oraz dynamiczne typowanie, parsery te charakteryzują się niską wydajnością, a brak statycznego typowania utrudnia wykrywanie błędów na etapie kompilacji. Przy implementacji parserów z użyciem biblioteki SLY w środowisku PyCharm obserwuje się wiele ostrzeżeń dotyczących potencjalnych naruszeń reguł, co często wymaga zastosowania mechanizmów supresji, aby uniknąć fałszywie pozytywnych wyników analizy statycznej kodu. Ponadto należy zaznaczyć, iż autor projektu informuje o braku dalszego rozwoju tych narzędzi[5].

Przykład 1.2 ilustruje kilka nieintuicyjnych, automatycznych mechanizmów obecnych w bibliotece *SLY*.

- Operator `@()` jest zdefiniowany, aby automatycznie analizować tekst przy pomocy wyrażeń regularnych. Literały muszą być zawarte w cudzysłowie, a „zmienna” odpowiada za matchowany „typ”.
- Nazwa metody oznacza „typ” zwracany przez daną produkcję, czyli dla definicji **IF** należy najpierw odszukać wszystkie metody, które mają nazwę **condition**, gdyż są to możliwe produkcje.
- W krotce (sic!) **precedence** definiujemy pierwszeństwo operatorów, jednakże dodanie **% prec** pozwala nadpisać priorytet dla konkretnej reguły składniowej.
- Argument **p** pozwala na dostęp do kontekstu produkcji (np. numeru linii), ale także do zmiennych w patternu match w adnotacji. Jeśli zdefiniowany jest więcej niż jeden, to dodajemy numer do accesora, np. **expr1** jest odwołaniem się do drugiego wyrażenie **expr**. Jednocześnie, można to zrobić także poprzez odwołanie się do konkretnego indeksu obiektu **p**.

```

1 class MatrixParser(Parser):
2     tokens = MatrixScanner.tokens
3
4     precedence = (
5         ('nonassoc', 'IFX'),
6         ('nonassoc', 'ELSE'),
7         ('nonassoc', 'EQUAL'),
8     )
9
10    @_('{" instructions }"')
11    def block(self, p: YaccProduction):
12        raise NotImplementedError
13
14    @_('instruction')
15    def block(self, p: YaccProduction):
16        raise NotImplementedError
17
18    @_('IF "(" condition ")" block %prec IFX')
19    def instruction(self, p: YaccProduction):

```

```

20     raise NotImplementedError
21
22 @_('IF "(" condition ")" block ELSE block')
23 def instruction(self, p: YaccProduction):
24     raise NotImplementedError
25
26 @_('expr EQUAL expr')
27 def condition(self, p: YaccProduction):
28     args = [p.expr0, p.expr1]
29     raise NotImplementedError

```

Listing 1.2: Fragment definicji parsera w Pythonie, wykorzystujący bibliotekę *SLY*

Komunikaty błędów w bibliotece *SLY* są bardzo ograniczone, co obrazuje przykład 1.3, który po uruchomieniu informuje użytkownika błędem z fragmentu kodu `??`. Okazuje się, że problemem był brak atrybutu `ignore_comment` w definicji `Lexer`.

```

1 tokens = Scanner().tokenize("a = 1 + 2")
2 for tok in tokens:
3     print(tok)

```

Listing 1.3: Fragment nie działającego kodu w Pythonie, wykorzystujący bibliotekę *SLY*

```

1 File "main.py", line 2, in <module>
2     for tok in tokens:
3         ^^^^^^
4 File "Python\site-packages\sly\lex.py", line 374, in tokenize
5     _set_state(type(self))
6     ~~~~~^~~~~~
7 File "Python\site-packages\sly\lex.py", line 367, in _set_state
8     _master_re = cls._master_re
9                 ^^^^^^^^^^^^^^^
10 AttributeError: type object 'Scanner' has no attribute '_master_re'

```

Listing 1.4: Przykładowy komunikat błędu w bibliotece *SLY*

### 1.3.3. ANTLR

*ANTLR*[6] to kolejne rozwiązanie inspirowane narzędziami *Lex* i *Yacc*, oferujące zaawansowane mechanizmy analizy składniowej. Jego twórcy opracowali dedykowany język DSL, znany jako Grammar v4, który umożliwia definiowanie składni analizowanego języka. Na podstawie tej definicji *ANTLR* generuje parser w wybranym przez użytkownika języku programowania, takim jak Python, Java, C++ lub JavaScript.

Wspomaganie pracy z *ANTLR* w znacznym stopniu ułatwiają dedykowane wtyczki do środowisk Visual Studio Code oraz IntelliJ IDEA. Oferują one funkcjonalności, takie jak kolorowanie składni, autouzupełnianie kodu, nawigację do definicji leksemów oraz walidację błędów, co znacząco przyspiesza proces tworzenia parserów.

Jedną z kluczowych różnic *ANTLR* w porównaniu do innych narzędzi jest wykorzystanie gramatyki *LL(\*)*, podczas gdy klasyczne rozwiązania, takie jak *Yacc* czy *SLY*, implementują *LALR(1)*. *LL(\*)* jest bardziej intuicyjna i czytelna dla programistów, co ułatwia definiowanie reguł składniowych. Jednakże, jej zastosowanie wiąże się z większym zużyciem pamięci oraz niższą wydajnością w porównaniu do *LALR(1)*.



Dodatkowym wyzwaniem podczas korzystania z *ANTLR* jest konieczność nauki składni DSL Grammar v4 oraz ograniczenie wsparcia dla narzędzi deweloperskich. Pełne wykorzystanie możliwości *ANTLR* wymaga korzystania z jednego z dedykowanych środowisk, co może stanowić istotne ograniczenie dla użytkowników preferujących inne IDE.

### 1.3.4. Scala parser combinators

Biblioteka *Scala parser combinators*[7] była popularnym sposobem na tworzenie parserów, lecz jak wynika z dokumentacji, „Trudno jest jednak zrozumieć ich działanie i jak zacząć. Po skompilowaniu i uruchomieniu kilku pierwszych przykładów, mechanizm działania staje się bardziej zrozumiały, ale do tego czasu może to być zniechęcające, a standardowa dokumentacja nie jest zbyt pomocna”[8].

### 1.3.5. ScalaBison

Z podsumowania artykułu na temat *ScalaBison*[9] wiadomo, że to praktyczny generator parserów dla języka Scala oparty na technologii rekurencyjnego wstępowania i zstępowania, który akceptuje pliki wejściowe w formacie *bison*. Parsery generowane przez *ScalaBison* używają bardziej informacyjnych komunikatów o błędach niż te generowane przez pierwowzór *bison*, a także szybkość parsowania i wykorzystanie miejsca są znacznie lepsze niż *scala-combinators*, ale są nieco wolniejsze niż najszybsze generatory parserów oparte na JVM.

Dodatkowo należy zaznaczyć, iż jest to rozwiązanie już niewspierane i stworzone w celach akademickich. Korzysta z przestarzałej wersji Scali, nie posiada wyczerpującej dokumentacji i liczba funkcjonalności jest bardzo ograniczona w porównaniu do np. technologii *SLY*.

### 1.3.6. parboiled2

*parboiled2*[10] to biblioteka w Scali umożliwiająca lekkie i szybkie parsowanie dowolnego tekstu wejściowego. Implementuje ona oparty na makrach generator parsera dla gramatyk wyrażeń parsujących (PEG), który działa w czasie kompilacji i tłumaczy definicję reguły gramatycznej na odpowiadający jej bytecode JVM. Niestety próg wejścia ze względu na skomplikowany i nieintuicyjny DSL jest wysoki. Zgodnie z przykładem 1.5, raportowanie błędów jest bardzo ograniczone (problem z implementacją wynika jedynie z różnic w liczbie parametrów funkcji).

```

1 [error] /Users/haoyi/Dropbox (Personal)/Workspace/scala-js-book/scalateXApi
   /src/main/scala/scalateX/stages/Parser.scala:60: overloaded
2 method value apply with alternatives:
3 [error] [I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, RR](f: (I, J
   , K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, scalateX.stages.Ast.
   Block.
4 Text, scalateX.stages.Ast.Chain, Int, scalateX.stages.Ast.Block) => RR)(
   implicit j: org.parboiled2.support.ActionOps.SJoin[shapeless.::[I,
5 shapeless.::[J, shapeless.::[K, shapeless.::[L, shapeless.::[M, shapeless.::[N,
   shapeless.::[O, shapeless.::[P, shapeless.::[Q, shapeless.::[R,
6 shapeless.::[S, shapeless.::[T, shapeless.::[U, shapeless.::[V, shapeless.::[W,
   shapeless.::[X, shapeless.::[Y, shapeless.::[Z, shapeless.

```

```

7 HNil]]]]]]]]]]]]]]]]]]],shapeless.HNil,RR], implicit c: org.parboiled2.
  support.FCapture[(I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z,
    scalatex.
8 stages.Ast.Block.Text, scalatex.stages.Ast.Chain, Int, scalatex.stages.Ast.
  Block) => RR])org.parboiled2.Rule[j.In,j.Out] <and>
9 [error] [J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, RR](f: (J, K, L
  , M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, scalatex.stages.Ast.Block.
    Text,
10 scalatex.stages.Ast.Chain, Int, scalatex.stages.Ast.Block) => RR)(implicit
  j: org.parboiled2.support.ActionOps.SJoin[shapeless.:[J,
11 shapeless.:[K,shapeless.:[L,shapeless.:[M,shapeless.:[N,shapeless.:[O,
  shapeless.:[P,shapeless.:[Q,shapeless.:[R,shapeless.:[S,
12 shapeless.:[T,shapeless.:[U,shapeless.:[V,shapeless.:[W,shapeless.:[X,
  shapeless.:[Y,shapeless.:[Z,shapeless.HNil]]]]]]]]]]]]]]]]],shapeless.
  HNil,RR], implicit c: org.parboiled2.support.FCapture[(J, K, L, M, N, O,
    P, Q, R, S,
13 T, U, V, W, X, Y, Z, scalatex.stages.Ast.Block.Text, scalatex.stages.Ast.
  Chain, Int, scalatex.stages.Ast.Block) => RR])org.parboiled2.Rule[j.
14 In,j.Out] <and>

```

Listing 1.5: Niewielki fragment (14 z 133 linii) błędu wygenerowanego przez bibliotekę *parboiled2*, który pochodzi z prezentacji Li Haoyi na temat *FastParse*[11].

### 1.3.7. FastParse

*FastParseFastParse*[12] to opracowana przez Li Haoyi, wysokowydajna biblioteka kombinatorów parserów dla Scali, zaprojektowana w celu uproszczenia tworzenia parserów tekstu strukturalnego. Umożliwia ona programistom definiowanie parserów rekurencyjnych, dzięki czemu nadaje się do parsowania języków programowania, formatów danych, takich jak JSON, czy DSL-i. Cechą charakterystyczną *FastParse* jest równowaga między użytecznością a wydajnością. Parsery są konstruowane poprzez łączenie mniejszych parserów za pomocą operatorów, takich jak  $\sim$  dla sekwencjonowania i  $|$  dla alternatyw, przy jednoczesnym zachowaniu czytelności zbliżonej do formalnych definicji gramatyki. Według dokumentacji[12], parsery *Fastparse* zajmują 1/10 kodu w porównaniu do ręcznie napisanego parsera rekurencyjnego. W porównaniu do narzędzi generujących parsery, takich jak *ANTLR* lub *Lex* i *Yacc*, implementacja nie wymaga żadnego specjalnego kroku kompilacji lub generowania kodu. To sprawia, że rozpoczęcie pracy z *Fastparse* jest znacznie łatwiejsze niż w przypadku bardziej tradycyjnych narzędzi do generowania parserów. Przykładowo, parser wyrażeń arytmetycznych może być zwięźle napisany, aby obsługiwać zagnieżdżone nawiasy, pierwszeństwo operatorów i raportowanie błędów w mniej niż 20 liniach kodu[13]. Biblioteka kładzie również nacisk na debugowanie, generując szczegółowe komunikaty o błędach, które wskazują dokładną lokalizację i przyczynę niepowodzeń parsowania, takich jak niedopasowane nawiasy lub nieprawidłowe tokeny.

### 1.3.8. Podsumowanie

| Narzędzie               | <b>Lex&amp;Yacc</b>             | <b>PLY/SLY</b>       | <b>ANTLR</b>       | <b>scala-bison</b>  |
|-------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|
| Język implementacji     | C                               | Python               | Java               | Scala (nad Bisonem) |
| Język użycia            | regex, BNF, akcje w C           | DSL                  | DSL oparty na EBNF | BNF, akcje w Scali  |
| Wydajność               | wysoka                          | niska                | umiarkowana        | wysoka              |
| Łatwość użycia          | średnia                         | umiarkowana          | wysoka             | średnia             |
| Aktywne wsparcie        | brak                            | nie                  | tak                | nie                 |
| Diagnostyka błędów      | słaba                           | średnia              | dobra              | słaba               |
| Dokumentacja            | dobra                           | średnia, nieaktualna | dobra              | słaba               |
| Popularność             | wysoka                          | średnia              | wysoka             | niska               |
| Integracja IDE          | nieoficjalny plugin             | ograniczona          | oficjalny plugin   | brak                |
| Wsparcie do debugowania | brak                            | dobrze               | częściowe          | dobrze              |
| Generowania kodu        | nie                             | nie                  | tak                | nie                 |
| Narzędzie               | <b>Scala parser combinators</b> | <b>parboiled2</b>    | <b>FastParse</b>   | <b>ALPACA</b>       |
| Język implementacji     | Scala                           | Scala                | Scala              | Scala               |
| Język użycia            | DSL w Scali                     | DSL w Scali          | DSL w Scali        | Scala               |
| Wydajność               | wysoka                          | umiarkowana          | wysoka             | TODO                |
| Łatwość użycia          | niska                           | średnia              | średnia            | TODO                |
| Aktywne wsparcie        | nie                             | nie                  | tak                | TODO                |
| Diagnostyka błędów      | dobra                           | niska                | dobra              | TODO                |
| Dokumentacja            | słaba                           | bardzo dobra         | bardzo dobra       | TODO                |
| Popularność             | średnia                         | niska                | rosnąca            | TODO                |
| Integracja IDE          | wsparcie dla Scali              | wsparcie dla Scali   | wsparcie dla Scali | TODO                |
| Wsparcie do debugowania | dobrze                          | dobrze               | dobrze             | TODO                |
| Generowania kodu        | nie                             | nie                  | nie                | TODO                |

Tabela 1.1: Porównanie wybranych narzędzi do generowania lekserów i parserów

# Rozdział 2

## Metaprogramowanie w Scali 3

### 2.1. Wprowadzenie

Scala 3, znana również jako Dotty, wprowadza całkowicie przeprojektowany system metaprogramowania, stanowiący fundamentalną zmianę w stosunku do eksperymentalnych makr dostępnych w Scali 2[14, 15].

Metaprogramowanie w Scali 3 zostało zaprojektowane z naciskiem na bezpieczeństwo typów, przenośność oraz skalowalność, oferując programistom możliwość generowania i analizowania kodu w czasie kompilacji przy zachowaniu pełnej ekspresywności języka[16, 17]. W przeciwieństwie do poprzedniego systemu, który eksponował wewnętrzne mechanizmy kompilatora i był źródłem problemów z kompatybilnością między wersjami[18], nowy system metaprogramowania jest zaprojektowany jako stabilny i przenośny interfejs programistyczny. Podstawą teoretyczną systemu metaprogramowania w Scali 3 jest programowanie wieloetapowe (ang. *multi-stage programming*), paradygmat pozwalający na odróżnienie różnych etapów wykonania programu[19, 18]. W tym modelu kod może być wykonywany w różnych fazach: w czasie kompilacji (ang. *compile-time*) lub w czasie wykonania (ang. *runtime*)[19].

#### 2.1.1. Quotes i Splices

Kluczowymi koncepcjami w systemie metaprogramowania Scali 3 są *quotes* i *splices*[20, 21]. *Quotes*, oznaczane jako `'{ ... }`, służą do opóźnienia wykonania kodu i traktowania go jako danych[22, 23]. *Splices*, oznaczane jako ``${ ... }`, pozwalają na ocenę wyrażenia generującego kod i wstawienie wyniku do otaczającego kontekstu[22, 23, 24].

Formalna semantyka tych konstrukcji została przedstawiona w pracy Stuckiego, Brachthäusera i Odersky'ego[21], gdzie *quotes* i *splices* są traktowane jako prymitywne formy w typowanych drzewach składniowych (ang. *typed abstract syntax trees*). Autorzy dowodzą, że system zachowuje bezpieczeństwo typów oraz higieniczność, zapewniając, że wygenerowany kod nie może przypadkowo powiązać identyfikatorów z niewłaściwymi zmiennymi[21].

#### 2.1.2. Bezpieczeństwo międzyetapowe

Scala 3 gwarantuje bezpieczeństwo międzyetapowe (ang. *cross-stage safety*) poprzez sprawdzanie poziomów etapowania w czasie kompilacji[18, 21]. Zmienne lokalne mogą być

używane tylko na tym samym poziomie etapowania, na którym zostały zdefiniowane, co zapobiega dostępowi do zmiennych, które jeszcze nie istnieją lub już nie są dostępne[18].

System również zapewnia, że typy generyczne używane w wyższym poziomie etapowania niż ich definicja wymagają instancji klasy typu `Type[T]`, która niesie reprezentację typu niepoddaną wymazywaniu (ang. *type erasure*)[18]. To podejście rozwiązuje problem wymazywania typów generycznych w JVM, zachowując informację o typach potrzebną w kolejnych etapach kompilacji.

## 2.2. Mechanizmy metaprogramowania w Scali 3

### 2.2.1. Definicje inline

Najprostszym narzędziem metaprogramowania jest modyfikator `inline`. Gwarantuje on, że wywołanie oznaczonej nim metody lub wartości zostanie w całości **wstawione w miejscu wywołania** (ang. *inlining*) podczas kompilacji. Jest to polecenie dla kompilatora, a nie tylko sugestia, jak w niektórych innych językach.

### 2.2.2. Makra oparte na wyrażeniach

Makra w Scali 3 są zdefiniowane jako metody `inline` zawierające *splice* najwyższego poziomu (ang. *top-level splice*)[25, 26], czyli taki, który nie jest zagnieżdżony w żadnym *Quotes* i jest wykonywany w czasie kompilacji[19, 25].

Typ `Expr[T]` reprezentuje wyrażenie Scali o typie `T` jako typowane drzewo składowe[22, 26]. Makra manipulują wartościami typu `Expr[T]`, transformując je lub generując nowe wyrażenia[26]. Ta reprezentacja gwarantuje bezpieczeństwo typów na poziomie języka metaprogramowania[22].

### 2.2.3. Dopasowanie wzorców kodu

Scala 3 wspiera analizę kodu poprzez dopasowanie wzorców w *quotes* (ang. *quote pattern matching*)[18, 21]. Mechanizm ten pozwala na dekonstrukcję kawałków kodu i ekstrakcję podwyrażeń[21].

Stucki, Brachthäuser i Odersky[21] wprowadzają wzorce wiążące (ang. *bind patterns*) postaci `$x` oraz wzorce HOAS (ang. *Higher-Order Abstract Syntax*) postaci `$f(y)`, które pozwalają na ekstrakcję podwyrażeń potencjalnie zawierających zmienne z zewnętrznego kontekstu[21]. System gwarantuje, że ekstrahowane wyrażenia są zamknięte względem definicji wewnątrz wzorca, zapobiegając wyciekom zakresu[21].

### 2.2.4. Refleksja TASTy

Dla przypadków wymagających głębszej analizy kodu, Scala 3 oferuje API refleksji TASTy[22, 23, 27]. TASTy jest binarnym formatem serializacji typowanych drzew składowych używanym przez kompilator Scali 3[18].

API refleksji dostarcza szczegółowy widok na strukturę kodu, włączając typy, symbole oraz pozycje w kodzie źródłowym[22, 27]. Jest dostępne poprzez obiekt `reflect` zdefiniowany w typie `Quotes`, który jest przekazywany kontekstualnie do makr[22, 27].

# Rozdział 3

## Implementacja

### 3.1. Praktyczna implementacja analizatora leksykalnego z wykorzystaniem makr w Scali 3

#### 3.1.1. Wprowadzenie do studium przypadku

Niniejszy rozdział prezentuje praktyczną implementację systemu analizy leksykalnej (leksera) wykorzystującego zaawansowane mechanizmy metaprogramowania Scali 3. Przedstawiony kod stanowi przykład zastosowania technik opisanych w poprzednich rozdziałach do rozwiązania rzeczywistego problemu inżynierskiego: automatycznej generacji wydajnego analizatora leksykalnego z definicji wysokopoziomowej w formie języka dziedzinowego (DSL).

System `alpaca.lexer` implementuje transformację deklaracyjnych reguł tokenizacji zapisanych jako funkcja częściowa (ang. *partial function*) w kod proceduralny wykonywany w czasie kompilacji. Wykorzystuje przy tym pełne spektrum możliwości refleksji TASTy, włączając generację klas w czasie kompilacji, transformację drzew AST oraz wyspecjalizowane typy refinement.

#### 3.1.2. Architektura systemu leksera

##### Interfejs użytkownika

System oferuje użytkownikowi przejrzysty interfejs DSL oparty na dopasowaniu wzorców:

```
1 type LexerDefinition[Ctx <: AnyGlobalCtx] = PartialFunction[String,  
    Token[?, Ctx, ?]]
```

Listing 3.1: Definicja typu `LexerDefinition`

Definicja `LexerDefinition` reprezentuje reguły leksera jako funkcję częściową mapującą wzorce wyrażeń regularnych (jako ciągi znaków) na definicje tokenów. Wykorzystanie funkcji częściowej pozwala na naturalne wyrażenie reguł leksykalnych w idiomatycznej składni Scali.

Główny punkt wejścia systemu stanowi metoda `lexer`:

```
1 transparent inline def lexer[Ctx <: AnyGlobalCtx & Product](  
2   using Ctx WithDefault DefaultGlobalCtx,
```

```

3 )(
4   inline rules: Ctx => LexerDefinition[Ctx],
5 )(using
6   copy: Copyable[Ctx],
7   betweenStages: BetweenStages[Ctx],
8 ): Tokenization[Ctx] =
9   ${ lexerImpl[Ctx]('{ rules }, '{ summon }, '{ summon }) }

```

Listing 3.2: Punkt wejścia: transparent inline def lexer

Modyfikator **transparent inline** zapewnia, że zwracany typ będzie dokładnie odpowiadał wygenerowanej strukturze, włączając typy refinement dla poszczególnych tokenów. Użycie parametrów kontekstowych (**using**) realizuje wzorec dependency injection na poziomie systemu typów.

## Implementacja makra

Makro przyjmuje wyrażenie reprezentujące reguły leksera jako **Expr[Ctx => LexerDefinition[Ctx]]** oraz instancje kontekstualnych klas pomocniczych. Parametr **using Quotes** dostarcza dostępu do API refleksji TASTy.

### 3.1.3. Analiza drzewa składni abstrakcyjnej

#### Dekonstrukcja funkcji częściowej

Kluczowym krokiem implementacji jest ekstrakcja reguł z definicji funkcji częściowej:

```

1 val Lambda(oldCtx :: Nil, Lambda(_, Match(_, cases: List[CaseDef]))) =
   rules.asTerm.underlying.runtimeChecked

```

Listing 3.3: Dekonstrukcja funkcji częściowej (dopasowanie AST do CaseDef)

Ten fragment kodu wykorzystuje dopasowanie wzorców w *quotes* do dekonstrukcji typowanego AST funkcji częściowej. Struktura **Lambda(\_, Match(\_, cases))** odpowiada wewnętrznej reprezentacji funkcji częściowej, gdzie **Match** zawiera listę przypadków **CaseDef**.

### 3.1.4. Transformacja i adaptacja referencji

#### Klasa replacerefs

Kluczową techniką jest zastąpienie referencji do starego kontekstu nowymi referencjami:

```

1 def replaceWithNewCtx(newCtx: Term) = new
  ReplaceRefs[quotes.type].apply(
2     (find = oldCtx.symbol, replace = newCtx),
3     (find = tree.symbol, replace = Select.unique(newCtx,
4        "lastRawMatched")),
5  )

```

Listing 3.4: Zastąpienie referencji starego kontekstu nowymi (ReplaceRefs)

Transformacja ta realizuje proces znany jako "re-owning" w terminologii kompilatorów — zmianę właściciela (owner) symboli w AST. Jest to konieczne, ponieważ kod oryginalnie odnoszący się do parametru makra musi zostać przepisany, aby odnosił się do parametru metody w wygenerowanej klasie.

Klasa **ReplaceRefs** udostępnia **TreeMap**, który podczas przejścia po AST podmienia referencje do wskazanych symboli na podane terminy. Umożliwia to tzw. re-owning — przeniesienie fragmentów kodu między różnymi właścicielami symboli bez ręcznego przepisywania drzew (por. ??).

### 3.1.5. Ekstrakcja i kompilacja wzorców

#### Funkcja `extractSimple`

Funkcja `extractSimple` implementuje logikę dopasowania różnych typów definicji tokenów:

```

1      def extractSimple(ctxManipulation: Expr[CtxManipulation[Ctx]])
2      : PartialFunction[Expr[ThisToken], List[(Expr[ThisToken],
3      Expr[TokenInfo[?]])]] =
4      case '{ Token.Ignored(using $ctx) } =>
5      compileNameAndPattern[Nothing](tree).map { case '{ $tokenInfo:
6      TokenInfo[name] } =>
7      '{ IgnoredToken[name, Ctx]($tokenInfo, $ctxManipulation) } ->
8      tokenInfo
9      }
10     case '{ type t <: ValidName; Token.apply[t]($value: v)(using $ctx)
11     } =>
12     compileNameAndPattern[t](tree).map { case '{ $tokenInfo:
13     TokenInfo[name] } =>
14     // we need to widen here to avoid weird types
15     TypeRepr.of[v].widen.asType match
16     case '[result] =>
17     val remapping = createLambda[Ctx => result] { case
18     (methSym, (newCtx: Term) :: Nil) =>
19     replaceWithNewCtx(newCtx).transformTerm(value.asTerm)(methSym)
20     }
21     '{ DefinedToken[name, Ctx, result]($tokenInfo,
22     $ctxManipulation, $remapping) } -> tokenInfo
23     }
```

Listing 3.5: Funkcja `extractSimple`: dopasowywanie definicji tokenów

Wykorzystuje ona dopasowanie wzorców w *quotes* z ekstraktorem typów, umożliwiając rozróżnienie różnych wariantów definicji tokenów na poziomie typów. Konstrukcja `type t <: ValidName` w wzorcu wiąże parametr typu do zmiennej wzorca `t`, umożliwiając jego późniejsze wykorzystanie.

### 3.1.6. Analiza wzorców: klasa **CompileNameAndPattern**

Klasa **CompileNameAndPattern** stanowi kluczowy komponent systemu analizy leksykalnej, odpowiedzialny za ekstrakcję i walidację wzorców tokenów podczas ekspansji makra. Jej głównym zadaniem jest transformacja różnorodnych form wzorców wystę-



pujących w definicjach DSL na ujednolicone struktury `TokenInfo`, które następnie są wykorzystywane do generacji finalnego kodu leksera.

Implementacja wykorzystuje rekurencyjne przetwarzanie drzewa AST z zastosowaniem optymalizacji rekurencji ogonowej (`@tailrec`), co zapewnia efektywność działania nawet dla złożonych wzorców z wieloma alternatywami.

### 3.1.7. Generacja klasy anonimowej

Anonimowa klasa implementująca `Tokenization[Ctx]` jest konstruowana programatycznie: (1) tworzymy symbol klasy przez `Symbol.newClass` wraz z listą deklaracji pól i typów; (2) budujemy ciało klasy (`ClassDef`) zawierające `ValDef` dla każdego zdefiniowanego tokena oraz pola `tokens` i `byName`; (3) określamy rodzica przez wywołanie konstruktora `Tokenization[Ctx]` z wymaganymi zależnościami; (4) instancjonujemy klasę i nadajemy jej typ zrefinowany przez kolejne `Refinement` odpowiadające polom-tokenom.

```

1  val cls = Symbol.newClass(
2    Symbol.spliceOwner,
3    Symbol.freshName("$anon"),
4    List(TypeRepr.of[Tokenization[Ctx]]),
5    decls,
6    None,
7  )
8
9  val body = {
10    val tokenVals = definedTokens.collect { case '{ $token:
11      DefinedToken[name, Ctx, value] } =>
12      ValDef(cls.fieldMember(nameToString[name]),
13        Some(token.asTerm.changeOwner(cls.fieldMember(nameToString[name]))))
14    }
15
16    tokenVals ++ Vector(
17      TypeDef(cls.typeMember("Fields")),
18      // ValDef(
19      //   cls.fieldMember("compiled"),
20      //   Some {
21      //     val pattern = Expr {
22      //       .map { case TokenInfo(_, regexGroupName, pattern) =>
23      //         s"(?<$regexGroupName>$pattern)" }
24      //       .mkString("|")
25      //       .tap(Pattern.compile(_)) // compile-time check for regex
26      //       validity
27      //     }
28      //     '{ new Regex($pattern)
29      //   }.asTerm.changeOwner(cls.fieldMember("compiled"))
30      // },
31      // ),
32      ValDef(
33        cls.fieldMember("tokens"),
34        Some {
35          val declaredTokens = definedTokens.map { case '{ $token:
36            DefinedToken[name, Ctx, ?] } =>

```

```

33   This(cls).select(cls.fieldMember(nameToString[name])).asExprOf[ThisToken]
34   }
35
36   Expr.ofList(ignoredTokens ++
37   declaredTokens).asTerm.changeOwner(cls.fieldMember("tokens"))
38   },
39   ValDef(
40     cls.fieldMember("byName"),
41     Some {
42       val all = Expr.ofSeq {
43         tokenVals.map(valDef => Expr.ofTuple((Expr(valDef.name),
44         Ref(valDef.symbol).asExprOf[DefinedToken[?, Ctx, ?]])))
45       }
46       '{ Map($all*) }.asTerm
47     },
48   ),
49 )
50 }
51
52 val tokenizationConstructor =
53   TypeRepr.of[Tokenization[Ctx]].typeSymbol.primaryConstructor
54
55 val parents =
56   New(TypeTree.of[Tokenization[Ctx]])
57   .select(tokenizationConstructor)
58   .appliedToType(TypeRepr.of[Ctx])
59   .appliedToArgs(List(copy.asTerm, betweenStages.asTerm)) :: Nil
60
61 val clsDef = ClassDef(cls, parents, body)
62
63 definedTokens
64   .foldLeft(TypeRepr.of[Tokenization[Ctx]]) {
65     case (tpe, '{ $token: DefinedToken[name, Ctx, value] }) =>
66       Refinement(tpe, nameToString[name], token.asTerm.tpe)
67     case _ => raiseShouldNeverBeCalled()
68   }
69   .asType match
70   case '[refinedTpe] =>
71     val newCls =
72       Typed(New(TypeIdent(cls)).select(cls.primaryConstructor).appliedToNone,
73       TypeTree.of[refinedTpe])
74
75     Block(clsDef :: Nil, newCls).asExprOf[Tokenization[Ctx] & refinedTpe]
76 }

```

Listing 3.6: Generacja i instancjowanie anonimowej klasy `Tokenization[Ctx]` z typem rafinowanym

## Typy refinement

Zwracany typ jest stopniowo rafinowany dla każdego tokena:

```

1  definedTokens
2    .foldLeft(TypeRepr.of[Tokenization[Ctx]]) {

```

```
3   case (tpe, '{ $token: DefinedToken[name, Ctx, value] }) =>
4       Refinement(tpe, nameToString[name], token.asTerm.tpe)
5   case _ => raiseShouldNeverBeCalled()
6 }
```

Listing 3.7: Rafinowanie typu wynikowego o pola tokenów

**Refinement(tpe, name, memberType)** tworzy typ refinement dodający członka o podanej nazwie i typie do bazowego typu. Pozwala to kompilatorowi śledzić, że zwrócony obiekt ma pola odpowiadające poszczególnym tokenom, umożliwiając dostęp do nich z pełnym wsparciem systemu typów.

### 3.1.8. Walidacja i obsługa błędów

#### Walidacja wzorców regularnych

System wykorzystuje pomocniczą klasę **RegexChecker** do walidacji wzorców:

Poniższy mechanizm sprawdza poprawność składni wyrażeń regularnych już w czasie kompilacji i raportuje błędy z dokładną lokalizacją wzorca. Metoda **report.errorAndAbort** jest częścią API kompilatora do raportowania błędów w czasie kompilacji. Przerwanie kompilacji w przypadku niepoprawnych wzorców zapewnia, że błędy konfiguracji są wykrywane możliwie wcześnie.

#### Obsługa nieobsługiwanych konstrukcji

Kod jawnie sygnalizuje nieobsługiwane przypadki: Obsługiwane są wyłącznie jasno zdefiniowane formy wzorców; w przypadku napotkania innej konstrukcji kompilacja jest przerywana z komunikatem zawierającym szczegóły AST, co upraszcza diagnostykę i utrzymuje zasadę fail-fast. Ta strategia jest zgodna z zasadą fail-fast - lepiej jest wyraźnie odrzucić nieobsługiwane konstrukcje niż milcząco generować niepoprawny kod.

# Bibliografia

- [1] M. E. Lesk i E. Schmidt. *Lex: A lexical analyzer generator*. T. 39. Bell Laboratories Murray Hill, NJ, 1975.
- [2] S. C. Johnson i in. *Yacc: Yet another compiler-compiler*. T. 32. Bell Laboratories Murray Hill, NJ, 1975.
- [3] D. Beazley. *PLY (Python Lex-Yacc)*. 2005. URL: <https://www.dabeaz.com/ply/ply.html> (term. wiz. 19.03.2025).
- [4] D. Beazley. *SLY (Sly Lex-Yacc)*. 2016. URL: <https://sly.readthedocs.io/en/latest/sly.html> (term. wiz. 19.03.2025).
- [5] D. Beazley. *SLY Github*. URL: <https://github.com/dabeaz/sly> (term. wiz. 19.03.2025).
- [6] T. Parr, P. Wells, R. Klaren, L. Craymer, J. Coker, S. Stanchfield, J. Mitchell i C. Flack. *What's ANTLR*. 2004.
- [7] A. Moors, F. Piessens i M. Odersky. „Parser combinators in Scala”. W: *CW Reports* (2008).
- [8] *scala-parser-combinators Getting Started*. URL: [https://github.com/scala/scala-parser-combinators/blob/main/docs/Getting\\_Started.md](https://github.com/scala/scala-parser-combinators/blob/main/docs/Getting_Started.md) (term. wiz. 04.04.2025).
- [9] J. Boyland i D. Spiewak. „Tool paper: ScalaBison recursive ascent-descent parser generator”. W: *Electronic Notes in Theoretical Computer Science* 253.7 (2010).
- [10] A. A. Myltsev. „Parboiled2: A macro-based approach for effective generators of parsing expressions grammars in Scala”. W: *arXiv preprint arXiv:1907.03436* (2019).
- [11] L. Haoyi. *sfscala.org: Li Haoyi, FastParse: Fast, Programmable, Modern Parser-Combinators in Scala*. 2015.
- [12] *FastParse Getting Started*. URL: <https://com-lihaoyi.github.io/fastparse/#GettingStarted> (term. wiz. 04.04.2025).
- [13] L. Haoyi. *FastParse. Fast, Modern Parser Combinators*. URL: <https://www.lihaoyi.com/post/slides/FastParse.pdf> (term. wiz. 18.04.2025).
- [14] *Dropped: Scala 2 Macros. Scala 3 Reference*. URL: <https://docs.scala-lang.org/scala3/reference/metaprogramming/migrating/macro-compatibility.html> (term. wiz. 25.10.2025).
- [15] *Metaprogramming. Scala 3 Reference*. URL: <https://docs.scala-lang.org/scala3/reference/metaprogramming.html> (term. wiz. 25.10.2025).
- [16] N. Stucki. *Scalable Metaprogramming in Scala 3. EPFL Infoscience page*. 2024. URL: <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/6dd02f9b-1f9b-4c9c-9748-ddf1634c1630> (term. wiz. 25.10.2025).

- 
- [17] N. Stucki, A. Biboudis, S. Doeraene i M. Odersky. „Semantics-preserving inlining for metaprogramming”. W: *Proceedings of the 11th ACM SIGPLAN International Symposium on Scala*. 2020. DOI: [10.1145/3426426.3428486](https://doi.org/10.1145/3426426.3428486). URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3426426.3428486>.
  - [18] N. Stucki. „Scalable Metaprogramming in Scala 3”. Prac. dokt. Lausanne: EPFL, 2020.
  - [19] *Runtime Multi-Stage Programming. Scala 3 Reference*. URL: <https://docs.scala-lang.org/scala3/reference/metaprogramming/staging.html> (term. wiz. 25.10.2025).
  - [20] N. Stucki, J. Brachthäuser i M. Odersky. „A practical unification of multi-stage programming and macros”. W: *Proceedings of the 9th ACM SIGPLAN International Symposium on Scala*. 2018. DOI: [10.1145/3278122.3278139](https://doi.org/10.1145/3278122.3278139). URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3278122.3278139>.
  - [21] N. Stucki, A. Biboudis i M. Odersky. „Multi-stage programming with generative and analytical macros”. W: *Proceedings of the 12th ACM SIGPLAN International Symposium on Scala*. 2021. DOI: [10.1145/3486609.3487203](https://doi.org/10.1145/3486609.3487203). URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3486609.3487203>.
  - [22] *Reflection. Scala 3 Reference*. URL: <https://docs.scala-lang.org/scala3/reference/metaprogramming/reflection.html> (term. wiz. 25.10.2025).
  - [23] *Reflection - Scala 3 - EPFL (Dotty docs)*. URL: <https://dotty.epfl.ch/docs/reference/metaprogramming/reflection.html> (term. wiz. 25.10.2025).
  - [24] *Quoted Code / Macros in Scala 3*. URL: <https://docs.scala-lang.org/scala3/guides/macros/quotes.html> (term. wiz. 25.10.2025).
  - [25] *Macros. Scala 3 Reference*. URL: <https://docs.scala-lang.org/scala3/reference/metaprogramming/macros.html> (term. wiz. 25.10.2025).
  - [26] *Scala 3 Macros*. URL: <https://docs.scala-lang.org/scala3/guides/macros/macros.html> (term. wiz. 25.10.2025).
  - [27] *Reflection / Macros in Scala 3*. URL: <https://docs.scala-lang.org/scala3/guides/macros/reflection.html> (term. wiz. 25.10.2025).

# Spis rysunków

# Spis tabel

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Porównanie wybranych narzędzi do generowania lekserów i parserów . . . . | 11 |
|-----|--|----|

# Spis algorytmów



# Spis listingów

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Fragment definicji parsera Ruby w technologii Yacc . . . . .  | 6  |
| 1.2 | Fragment definicji parsera w Pythonie, wykorzystujący bibliotekę <i>SLY</i> . . .                     | 7  |
| 1.3 | Fragment nie działającego kodu w Pythonie, wykorzystujący bibliotekę <i>SLY</i>                       | 8  |
| 1.4 | Przykładowy komunikat błędu w bibliotece <i>SLY</i> . . . . .   | 8  |
| 1.5 | Fragment błędu wygenerowanego przez bibliotekę <i>parboiled2</i> . . . . .                            | 9  |
| 3.1 | Definicja typu <i>LexerDefinition</i> . . . . .   | 14 |
| 3.2 | Punkt wejścia: <i>transparent inline def lexer</i> . . . . .  | 14 |
| 3.3 | Dekonstrukcja funkcji częściowej (dopasowanie AST do <i>CaseDef</i> ) . . . . .                       | 15 |
| 3.4 | Zastąpienie referencji starego kontekstu nowymi ( <i>ReplaceRefs</i> ) . . . . .                      | 15 |
| 3.5 | Funkcja <i>extractSimple</i> : dopasowywanie definicji tokenów . . . . .                              | 16 |
| 3.6 | Generacja i instancjowanie anonimowej klasy <i>Tokenization[Ctx]</i> z<br>typem rafinowanym . . . . . | 17 |
| 3.7 | Rafinowanie typu wynikowego o pola tokenów . . . . .  | 18 |