



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

1	Cel prac i wizja projektu	4
1.1	Charakterystyka problemu	4
1.2	Motywacja projektu	4
1.3	Przegląd istniejących rozwiązań	5
1.3.1	Lex, Yacc	5
1.3.2	PLY, SLY	6
1.3.3	ANTLR	7
1.3.4	Scala parser combinators	8
1.3.5	ScalaBison	8
1.3.6	parboiled2	8
1.3.7	FastParse	9
1.3.8	Podsumowanie	9
	Spis rysunków	12
	Spis tabel	13
	Spis algorytmów	14
	Spis listingów	15

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 niedziałającego 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	Lex&Yacc	PLY/SLY	ANTLR	scala-bison
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	Scala parser combinators	parboiled2	FastParse	ALPACA
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

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 (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).

Spis rysunków

Spis tabel

1.1	Porównanie wybranych narzędzi do generowania lekserów i parserów	10
-----	--	----

Spis algorytmów

Spis listingów

1.1	Fragment definicji parsera Ruby w technologii Yacc	5
1.2	Fragment definicji parsera w Pythonie, wykorzystujący bibliotekę <i>SLY</i> . . .	6
1.3	Fragment nie działającego kodu w Pythonie, wykorzystujący bibliotekę <i>SLY</i>	7
1.4	Przykładowy komunikat błędu w bibliotece <i>SLY</i>	7
1.5	Fragment błędu wygenerowanego przez bibliotekę <i>parboiled2</i>	8