

# Kwalifikacja i implementacja systemów kompilacji z użyciem efektów algebraicznych

(Categorization and implementation of Build Systems using algebraic effects)

Jakub Mendyk

Praca licencjacka

**Promotor:** dr Filip Sieczkowski

Uniwersytet Wrocławski  
Wydział Matematyki i Informatyki  
Instytut Informatyki

4 września 2020

Jakub Mendyk

.....

.....

(adres zameldowania)

.....

.....

(adres korespondencyjny)

PESEL: .....

e-mail: .....

Wydział Matematyki i Informatyki

stacjonarne studia I stopnia

kierunek: Indywidualne Studia Matematyczno-Informatyczne

nr albumu: 301111

### **Oświadczenie o autorskim wykonaniu pracy dyplomowej**

Niniejszym oświadczam, że złożoną do oceny pracę zatytułowaną *Kwalifikacja i implementacja systemów kompilacji z użyciem efektów algebraicznych* wykonałem/am samodzielnie pod kierunkiem promotora, dr. Filipa Sieczkowskiego. 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, 4 września 2020

(czytelny podpis)

Streszczenie

...



...



# Spis treści

<b>1. Wprowadzenie</b>	<b>7</b>
1.1. Problemy z efektami ubocznymi . . . . .	7
1.2. Radzenie sobie z efektami ubocznymi . . . . .	7
1.3. Systemy kompilacji . . . . .	8
1.4. O tej pracy . . . . .	8
<b>2. O efektach algebraicznych teoretycznie</b>	<b>11</b>
2.1. Notacja . . . . .	11
2.2. Równania, efekt porażki i modyfikowalny stan . . . . .	12
2.3. Poszukiwanie sukcesu . . . . .	14
2.4. Dalsza lektura . . . . .	14
<b>3. O systemach kompilacji (i ich klasyfikacji)</b>	<b>17</b>
<b>4. Efekty algebraiczne i uchwyt w praktyce</b>	<b>19</b>
4.1. Języki programowania z efektami algebraicznymi . . . . .	19
4.2. Helium . . . . .	20
4.3. Przykłady implementacji uchwytów . . . . .	21
4.3.1. Błąd . . . . .	21
4.3.2. Niedeterminizm . . . . .	22
4.3.3. Modyfikowalny stan . . . . .	24
4.3.4. Efekt rekursji . . . . .	26
4.3.5. Wiele efektów na raz – porażka i niedeterminizm . . . . .	27
<b>5. Systemy kompilacji z użyciem efektów algebraicznych i uchwytów</b>	<b>29</b>

<b>6. Podsumowanie i wnioski</b>	<b>31</b>
----------------------------------	-----------

<b>Bibliografia</b>	<b>33</b>
---------------------	-----------

# Rozdział 1.

## Wprowadzenie

### 1.1. Problemy z efektami ubocznymi

Programy komputerowe, dzięki możliwości interakcji z zewnętrznymi zasobami takimi jak nośniki pamięci, sieci komputerowe czy użytkownicy oprogramowania mogą robić istotnie więcej niż tylko zadane wcześniej obliczenia. W ten sposób przebieg programu i jego wynik staje się jednak zależny od tegoż świata zewnętrznego, a sam program nie jest tylko serią czystych obliczeń ale także towarzyszącymi im efektów ubocznych.

Efekty uboczne powodują jednak, że rozumowanie i wnioskowanie o sposobie oraz prawidłowości działania programów staje się znacznie trudniejsze, a w konsekwencji ogranicza ich modularność i prowadzi do częstszych pomyłek ze strony autorów. Chcąc tego uniknąć, dąży się do wydzielania w programie jak największej części, która składa się z czystych obliczeń. Jednak to, czy jakiś moduł oprogramowania wykonuje obliczenia z efektami ubocznymi nie koniecznie jest jasne i często musimy zaufać autorowi, że w istocie tak jest.

### 1.2. Radzenie sobie z efektami ubocznymi

Jednym z rozwiązań tego problemu, jest zawarcie informacji o posiadaniu efektów ubocznych w systemie typów. Możemy skorzystać wtedy z inferencji i weryfikacji typów do automatycznej identyfikacji modułów zawierających efekty uboczne – dzięki temu programista może łatwo wyczytać z sygnatury funkcji, które z nich występują w czasie jej działania. Znany przykład umieszczenia efektów w typach jest wykorzystanie monad w języku programowania Haskell. Niestety, jednoczesne użytkowanie dwóch niezależnych zasobów reprezentowanych przez różne monady nie jest łatwe i wymaga dodatkowych struktur, takich jak transformery monad, które niosą ze sobą dodatkowe wyzwania – problem modularności został jedynie przesunięty w inny obszar.

Nowym, konkurencyjnym podejściem do ujarzmnienia efektów ubocznych przez wykorzystanie systemu typów są efekty algebraiczne z uchwytami. Powierzchnie, zdają się być podobne do konstrukcji obsługi wyjątków w językach programowania lub wywołań systemowych w systemach operacyjnych. Dzięki rozdziałowi między definicjami operacji związanych z efektami ubocznymi, a ich semantyką oraz interesującemu zastosowaniu kontynuacji, dają łatwość myślenia i wnioskowania o programach ich używających. Ponadto, w przeciwieństwie do monad, można je bezproblemowo składać.

### 1.3. Systemy kompilacji

Przykładem programów, których głównym zadaniem jest interakcja z zewnętrznymi zasobami są systemy kompilacji, w których użytkownik opisuje proces wytwarzania wyniku jako zbiór wzajemnie-zależnych zadań wraz z informacją jak mają być one wykonywane w oparciu o wyniki innych zadań, zaś system jest odpowiedzialny za ich poprawne uporządkowanie i wykonanie. Ponadto, od systemu kompilacji oczekujemy, że będzie śledził zmiany w danych wejściowych i – gdy poproszony o aktualizację wyników – obliczał ponownie jedynie zadania, których wartości ulegną zmianie. Przykładami takich systemów są Make oraz – co może wydawać się zaskakujące – programy biurowe służące do edycji arkuszy kalkulacyjnych (np. popularny Excel).

W publikacjach pod tytułem „Build systems à la carte” [7, 8], autorzy przedstawiają sposób klasyfikacji systemów kompilacji w oparciu o to jak determinują one kolejność w jakiej zadania zostaną obliczone oraz jak wyznaczają, które z zadań wymagają ponownego obliczenia. Uzyskana klasyfikacja prowadzi autorów do skonstruowania platformy umożliwiającej definiowanie systemów kompilacji o oczekiwanych właściwościach. Platforma ta okazuje się być łatwa w implementacji w języku Haskell, a klasy typów *Applicative* oraz *Monad* odpowiadać mocy języka opisywania zależności między zadaniami do obliczenia.

### 1.4. O tej pracy

Celem tej pracy jest zapoznanie czytelnika, który miał dotychczas kontakt z językiem Haskell oraz podstawami języków funkcyjny, z nowatorskim rozwiązaniem jakim są efekty algebraiczne oraz zademonstrowanie – idąc śladami Mokhov’a i innych [8] – implementacji systemów kompilacji z wykorzystaniem efektów algebraicznych i uchwytów w języku programowania Helium. Jak się okazuje, wykorzystanie tych narzędzi daje schludną implementację ale także prowadzi do problemów w implementacji systemów o pewnym sposobie determinowania zależności między zadaniami.



W rozdziale drugim wprowadzony zostaje prosty model obliczeń wykorzystujący efekty algebraiczne i uchwyt. Zostaje przedstawionych kilka przykładów reprezentacji standardowych efektów ubocznych w opisanym modelu.

Rozdział czwarty rozpoczyna się zapoznaniem z istniejącymi językami oraz bibliotekami umożliwiającymi programowanie z efektami i uchwytami. Następnie omówiony jest język Helium oraz przykładowe problemy wraz z programami je rozwiązującymi, z użyciem efektów i uchwytów. Zademonstrowana jest ponadto łatwość wykorzystywania wielu efektów jednocześnie – w bardziej przystępnej formie niż w przypadku monad w Haskellu.



## Rozdział 2.

# O efektach algebraicznych teoretycznie

Wprowadzimy notację służącą opisowi prostych obliczeń, która pomoże nam – bez zanurzania się głęboko w ich rodowód matematyczny – zrozumieć jak prostym, a jednocześnie fascynującym tworem są efekty algebraiczne i uchwyt. Następnie przyjrzymy się, jak możemy zapisać popularne przykłady efektów ubocznych używając naszej notacji. Na koniec, czytelnikowi zostaną polecone zasoby do dalszej lektury, które rozszerzają opis z tego rozdziału.

### 2.1. Notacja

Będziemy rozważać obliczenia nad wartościami następujących trzech typów:

- boolowskim  $B$  – z wartościami  $T$  i  $F$  oraz standardowymi spójnikami logicznymi,
- liczb całkowitych  $\mathbb{Z}$  – wraz z ich relacją równości oraz podstawowymi działaniami arytmetycznymi,
- typem jednostkowym  $U$  – zamieszkałym przez pojedynczą wartość  $u$ ,
- oraz pary tychże typów.

Nasz model składać się będzie z wyrażeń:

- **return**  $v$  – gdzie  $v$  jest wyrażeniem boolowskim lub arytmetycznym,
- **if**  $v_1 = v_2$  **then**  $e_t$  **else**  $e_f$  – wyrażenie warunkowe, gdzie  $v_1 = v_2$  jest pytaniem o równość wartości dwóch wyrażeń arytmetycznych,

- abstrakcyjnych operacji oznaczanych  $\{op_i\}_{i \in I}$  – powodujących wystąpienie efektów ubocznych – których działanie nie jest nam znane, zaś ich sygnatury to  $op_i : A \rightarrow (B \rightarrow C) \rightarrow D$ , gdzie  $A, B, C$  oraz  $D$  to pewne typy w naszym modelu. Wyrażenie  $op_i(n, \kappa)$  opisuje operację z argumentami  $n$  oraz dalszą częścią obliczenia  $\kappa$  parametryzowaną wynikiem operacji, które *może* (nie musi) zostać wykonane po jej wystąpieniu,
- uchwytów, czyli wyrażeń postaci **handle**  $e$  **with**  $\{ op_i \ n \ \kappa \Rightarrow h_i \}_{i \in I}$ , gdzie  $e$  to inne wyrażenie; uchwyt definiuje działanie (dotychczas abstrakcyjnych) efektów ubocznych.

Przykładowymi obliczeniami w naszej notacji są więc:

$$\begin{aligned} & \text{return } 0, \quad \text{return } 2 + 2, \quad op_1(2, \lambda x. \text{return } x + 1) \\ & \text{handle } op_1(2, \lambda x. \text{return } x + 1) \text{ with } \{ op_1 \ n \ \kappa \Rightarrow \kappa \ (2 \cdot n) \} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Dla czytelności, pisząc w uchwycie zbiór który nie przebiega wszystkich operacji, przyjmujemy że uchwyt nie definiuje działania operacji; równoważnie, zbiór wzbogacamy o element:  $op_i \ n \ \kappa \Rightarrow op_i(n, \kappa)$ .

Obliczanie wartości wyrażenia przebiega następująco:

- $\llbracket \text{return } v \rrbracket = v$  – wartością **return** jest wartość wyrażenia arytmetycznego,
- $\llbracket (\lambda x. e) \ y \rrbracket = \llbracket e \ [x/\llbracket y \rrbracket] \rrbracket$  – aplikacja argumentu do funkcji,
- $\llbracket \text{if } v_1 = v_2 \text{ then } e_t \text{ else } e_f \rrbracket = \begin{cases} \llbracket e_t \rrbracket & \text{gdy } \llbracket v_1 \rrbracket = \llbracket v_2 \rrbracket \\ \llbracket e_f \rrbracket & \text{wpp} \end{cases}$
- $\llbracket \text{handle return } v \text{ with } H \rrbracket = \llbracket \text{return } v \rrbracket$  – uchwyt nie wpływa na wartość obliczenia, które nie zawiera efektów ubocznych,
- $\llbracket \text{handle } op_i(a, f) \text{ with } H \rrbracket = \llbracket \text{handle } h_i[n/\llbracket a \rrbracket, \kappa/f] \text{ with } H \rrbracket$ , gdzie  $H = \{ op_i \ n \ \kappa \Rightarrow h_i \}$ , a  $h_i$  nie ma wystąpień  $op_i$ .

Zobaczmy jak zatem wygląda obliczenie ostatniego z powyższych przykładów:

$$\begin{aligned} & \llbracket \text{handle } op_1(2, \lambda x. \text{return } x + 1) \text{ with } \{ op_1 \ n \ \kappa \Rightarrow \kappa \ (2 \cdot n) \} \rrbracket = \\ & \llbracket \text{handle } (\lambda x. \text{return } x + 1)(2 \cdot 2) \text{ with } \{ op_1 \ n \ \kappa \Rightarrow \kappa \ (2 \cdot n) \} \rrbracket = \\ & \llbracket \text{handle return } 4 + 1 \text{ with } \{ op_1 \ n \ \kappa \Rightarrow \kappa \ (2 \cdot n) \} \rrbracket = \\ & \llbracket \text{return } 4 + 1 \rrbracket = 5 \end{aligned} \quad (2.2)$$

## 2.2. Równania, efekt porażki i modyfikowalny stan

Do tego momentu, nie przyjmowaliśmy żadnych założeń na temat operacji powodujących efekty uboczne. Uchwyty mogły w związku z tym działać w sposób całkowicie dowolny. Ograniczymy się w tej dowolności i nałożymy warunki na uchwyt

wybranych operacji. Przykładowo, ustalmy że dla operacji  $op_r$ , uchwytty muszą być takie aby następujący warunek był spełniony:

$$\forall n \forall e. \llbracket \mathbf{handle} \ op_r(n, \lambda x. e) \ \mathbf{with} \ H \rrbracket = n \quad (2.3)$$

Zauważmy, że istnieje tylko jeden naturalny uchwyt spełniający tej warunek, jest nim  $H = \{ op_r \ n \ \kappa \Rightarrow n \}$ . Co więcej, jego działanie łudząco przypomina konstrukcję wyjątków w popularnych językach programowania:

```
try {
  raise 5;
  // ...
} catch (int n) {
  return n;
}
```

Podobieństwo to jest w pełni zamierzone. Okazuje się że nasz język z jedną operacją oraz równaniem ma już moc wystarczającą do opisu konstrukcji, która w większości popularnych języków nie może zaistnieć z woli programisty, a zamiast tego musi być dostarczona przez twórcę języka.

Rozważmy kolejny przykład. Dla poprawienia czytelności, zrezygnujemy z oznaczeń  $op_i$  na operacje powodujące efekty, zamiast tego nadamy im znaczące nazwy: *get* oraz *put*. Spróbujemy wyrazić działanie tych dwóch operacji by otrzymać modyfikowalną komórkę pamięci. Ustalmy też bardziej naturalne sygnatury operacji –  $get : U \rightarrow (\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}) \rightarrow \mathbb{Z}$ ,  $put : \mathbb{Z} \rightarrow (U \rightarrow \mathbb{Z}) \rightarrow \mathbb{Z}$ . Ustalamy równania:

- $\forall e. \llbracket get(u, \lambda \_. get(u, \lambda x. e)) \rrbracket = \llbracket get(u, \lambda x. e) \rrbracket$   
kolejne odczyty z komórki bez jej modyfikowania dają takie same wyniki,
- $\forall e. \llbracket get(u, \lambda n. put(n, \lambda u. e)) \rrbracket = \llbracket e \rrbracket$   
umieszczenie w komórce wartości która już tam się znajduje nie wpływa na wynik obliczenia,
- $\forall n. \forall f. \llbracket put(n, \lambda u. get(u, \lambda x. f \ x)) \rrbracket = \llbracket f \ n \rrbracket$   
obliczenie które odczytuje wartość z komórki daje taki sam wyniki, jak gdyby miało wartość komórki podaną wprost jako argument,
- $\forall n_1. \forall n_2. \forall e. \llbracket put(n_1, \lambda u. put(n_2, \lambda u. e)) \rrbracket = \llbracket put(n_2, \lambda u. e) \rrbracket$   
komórka zachowuje się, jak gdyby pamiętała jedynie najnowszą włożoną do niej wartość.

Zauważmy, że choć nakładamy warunki na zewnętrzne skutki działania operacji *get* oraz *put*, to w żaden sposób nie ograniczyliśmy swobody autora w implementacji uchwytów dla tych operacji.

### 2.3. Poszukiwanie sukcesu

Kolejnym rodzajem efektu ubocznego, który rozważymy w tym rozdziale jest niedeterminizm. Chcielibyśmy wyrażać obliczenia, w których pewne parametry mogą przyjmować wiele wartości, a ich dobór ma zostać dokonany tak by spełnić pewien określony warunek. Przykładowo, mamy trzy zmienne  $x$ ,  $y$  oraz  $z$  i chcemy napisać program sprawdzający czy formuła  $\phi(x, y, z)$  jest spełnialna. W tym celu zdefiniujemy operację  $amb : U \rightarrow (Bool \rightarrow Bool) \rightarrow Bool$  związaną z efektem niedeterminizmu. Napiszmy obliczenie rozwiązujące nasz problem:

$$\begin{aligned} &\mathbf{handle} \text{ } amb(u, \lambda x. amb(u, \lambda y. amb(u, \lambda z. \phi(x, y, z)))) \\ &\mathbf{with} \{ amb \ u \ \kappa \Rightarrow \ \kappa \ (T) \ \mathbf{or} \ \kappa \ (F) \} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Gdy definiowaliśmy efekt wyjątku, obliczenie nie było kontynuowane. W przypadku niedeterminizmu kontynuujemy obliczenie dwukrotnie – podstawiając za niedeterministycznie określoną zmienną wartości raz prawdy, raz fałszu – w czytelny sposób sprawdzamy wszystkie możliwe wartościowania, a w konsekwencji określamy czy formuła jest spełnialna.

Możemy zauważyć, że gdybyśmy chcieli zamiast sprawdzania spełnialności, weryfikować czy formuła jest tautologią, wystarczy zmienić tylko jedno słowo – zastąpić spójnik **or** spójnikiem **and** otrzymując nowy uchwyt:

$$\begin{aligned} &\mathbf{handle} \text{ } amb(u, \lambda x. amb(u, \lambda y. amb(u, \lambda z. \phi(x, y, z)))) \\ &\mathbf{with} \{ amb \ u \ \kappa \Rightarrow \ \kappa \ (T) \ \mathbf{and} \ \kappa \ (F) \} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Przedstawiona konstrukcja efektów, operacji i uchwytów tworzy dualny mechanizm w którym operacje są producentami efektów, a uchwytów ich konsumentami. Zabierając źródłom efektów ubocznych ich konkretne znaczenia semantyczne, lub nakładając na nie jedynie proste warunki wyrażone równaniami, otrzymaliśmy niezwykle silne narzędzie umożliwiające proste, deklaratywne oraz – co najważniejsze, w kontraście do popularnych języków programowania – samodzielne konstruowanie zaawansowanych efektów ubocznych.

### 2.4. Dalsza lektura

Rozdział ten miał na celu w lekki sposób wprowadzić idee, definicje i konstrukcje związane z efektami algebraicznymi i uchwytami które będą fundamentem do zrozumienia ich wykorzystania w praktycznych przykładach oraz implementacji systemów kompilacji w dalszych rozdziałach. Czytelnicy zainteresowani głębszym poznaniem historii oraz rodowodu efektów algebraicznych i uchwytów mogą zapoznać się z następującymi materiałami:

- „An Introduction to Algebraic Effects and Handlers” autorstwa Matija Pret-nara [13],

- notatki oraz seria wykładów Andreja Bauera pt. „What is algebraic about algebraic effects and handlers?” [1] dostępne w formie tekstowej oraz nagrań wideo w serwisie YouTube,
- prace Plotkina i Powera [10, 11] oraz Plotkina i Pretnara [12] – jeśli czytelnik chce poznać jedno z pierwszych wyników prowadzących do efektów algebraicznych oraz wykorzystania uchwytów,
- społeczność skupiona wokół tematu efektów algebraicznych agreguje zasoby z nimi związane w repozytorium [14] w serwisie GitHub.





## Rozdział 3.

# O systemach kompilacji (i ich klasyfikacji)



## Rozdział 4.

# Efekty algebraiczne i uchwyt w praktyce

### 4.1. Języki programowania z efektami algebraicznymi

Zainteresowanie efektami algebraicznymi oraz uchwytami doprowadziło do powstania w ostatnich latach wielu bibliotek dla języków popularnych w środowisku akademickim i pasjonatów języków funkcyjnych – Haskell (extensible-effects<sup>1</sup>, fused-effects<sup>2</sup>, polysemy<sup>3</sup>), Scali (Effekt<sup>4</sup>, atnos-org/eff<sup>5</sup>) i Idris (Effects<sup>6</sup>).

Związana z językiem OCaml jest inicjatywa ocaml-multicore<sup>7</sup>, której celem jest stworzenie implementacji OCaml’a ze wsparciem dla współbieżności oraz współdzielonej pamięci, a cel ten jest realizowany przez wykorzystanie konceptu efektów i uchwytów.

Badania nad efektami i uchwytami przyczyniły się także do powstania kilku eksperymentalnych języków programowania w których efekty i uchwyt są obywatelami pierwszej kategorii. Do języków tych należą:

- Eff<sup>8</sup> – powstający z inicjatywy Andreja Bauera and Matija Pretnara język o ML-podobnej składni,
- Frank<sup>9</sup> [5] – pod przewodnictwem Sama Lindley’a, Conora McBride’a oraz Craiga McLaughlin’a projektowany z tęsknoty do ML’a, a jednocześnie upodobańca do Haskell-owej dyscypliny,

---

<sup>1</sup><https://hackage.haskell.org/package/extensible-effects>

<sup>2</sup><https://hackage.haskell.org/package/fused-effects>

<sup>3</sup><http://hackage.haskell.org/package/polysemy>

<sup>4</sup><https://github.com/b-studios/scala-effekt>

<sup>5</sup><https://github.com/atnos-org/eff>

<sup>6</sup>[https://www.idris-lang.org/docs/current/effects\\_doc/](https://www.idris-lang.org/docs/current/effects_doc/)

<sup>7</sup><https://github.com/ocaml-multicore/ocaml-multicore/wiki>

<sup>8</sup><https://www.eff-lang.org/>

<sup>9</sup><https://github.com/frank-lang/frank>

- Koka<sup>10</sup> – kierowany przez Daana Leijena z Microsoft projekt badawczy; Koka ma składnię inspirowaną JavaScriptem,
- Helium<sup>11</sup> [3] – powstały w Instytucie Informatyki Uniwersytetu Wrocławskiego, z ML-podobnym systemem modułów i lekkimi naleciałościami z Haskellu.

## 4.2. Helium

Używając właśnie języka Helium, zobaczymy jak w praktyce wygląda programowanie z efektami algebraicznymi oraz uchwytami, zaś w następnym rozdziale spróbujemy zaimplementować wyniki uzyskane w „Build systems à la carte” [7, 8]. Po raz pierwszy Helium pojawia się w [3], służąc za narzędzie do eksperymentowania i umożliwienia konstrukcji bardziej skomplikowanych przykładów oraz projektów w celu przetestowania efektów i uchwytów w praktyce.

Rozważmy przykład prostego programu napisanego w Helium, w którym definiujemy pomocniczą funkcję *is\_negative* ustalającą czy liczba jest ujemna oraz *question*, która pyta użytkownika o liczbę i informuje czy liczba ta jest ujemna:

```
let is_negative n = n < 0

let question () =
  printStr "What is your favourite number? ";
  let num = readInt () in
  if is_negative num
  then printStr "This number is negative\n"
  else printStr "This number is nonnegative\n"
```

Sygnatura funkcji *is\_negative* wyznaczona przez system typów Helium, to jak łatwo się domysleć  $Int \rightarrow Bool$ . Gdy jednak zapytamy środowisko uruchomieniowe o typ funkcji *question* otrzymamy interesującą sygnaturę  $Unit \rightarrow [IO] Unit$ . W Helium, informacje o efektach występujących w trakcie obliczania funkcji są umieszczone w sygnaturach funkcji w kwadratowych nawiasach. W przypadku funkcji *question*, jej obliczenie powoduje wystąpienie efektu ubocznego związanego z mechanizmem wejścia/wyjścia.

```
printStr: String → [IO] Unit
readInt: Unit → [IO] Int
```

System inferencji typów wiedząc, że operacje *we/wy* są zadeklarowane z powyższymi sygnaturami wnioskuje, że skoro wystąpienia tychże operacji w kodzie *question* nie są obsługiwane przez uchwyt, to efekt *IO* wyjdzie poza tę funkcję.

<sup>10</sup><https://github.com/koka-lang/koka>

<sup>11</sup><https://bitbucket.org/pl-uwro/helium/src/master/>

Efekty *IO* oraz *RE* (runtime error) są szczególne, gdyż są dla nich zadeklarowane globalne uchwyt w bibliotece standardowej – jeśli efekt nie zostanie obsługowany i dotrze do poziomu środowiska uruchomieniowego, to ono zajmie się jego obsługą. Dla efektu *IO* środowisko skorzysta ze standardowego wejścia/wyjścia, zaś w przypadku wystąpienia efektu *RE*, obliczenie zostanie przerwane ze stosownym komunikatem błędu.

## 4.3. Przykłady implementacji uchwytów

### 4.3.1. Błąd

Zaimplementujemy kilka efektów ubocznych, zaczynając od efektu błędu, wraz z uchwytami dla nich. W Helium, efekt oraz powodujące go operacje definiuje się następująco:

```
signature Error =
| error : Unit ⇒ Unit
```

Stwórzmy funkcję podobną do *question*, z tym że nie będzie ona lubić wartości ujemnych:

```
let no_negatives_question () =
  printStr "What is your favourite number? ";
  let num = readInt () in
    if is_negative num
    then error ()
    else printStr "This number is nonnegative\n";
  printStr "Question finished\n"

let main () =
  handle no_negatives_question () with
  | error () ⇒ printStr "Error occured!\n"
end
```

Zdefiniowaliśmy efekt uboczny *Error* wraz z operacją *error*, która go powoduje. Operacja ta jest parametryzowana wartością typu *Unit* oraz jej (możliwy) wynik to także wartość z *Unit*. Definiujemy też funkcję *main* w której wywołujemy *no\_negatives\_question*, jednakże obliczenie wykonujemy w uchwycie w którym definiujemy co ma się wydarzyć, gdy w czasie obliczenia wystąpi efekt błędu spowodowany operacją *error*. W tym przypadku mówimy, że skutkuje ono wypisaniem wiadomości na standardowe wyjście. Nie wznowiamy obliczenia, stąd wystąpienie błędu skutkuje zakończeniem nadzorowanego obliczenia. Jeśli uruchomimy teraz program i podamy ujemną liczbę, zakończy się on komunikatem zdefiniowanym w uchwycie, a tekst „Question finished” nie zostanie wypisany – zgodnie z oczekiwaniami, obliczenie *no\_negatives\_question* nie zostało kontynuowane po wystąpieniu błędu.

Jeśli pewnego uchwytu zamierzamy używać wiele razy, możemy przypisać mu identyfikator – w Helium uchwytów są wartościami:

```
let abortOnError =
  handler
  | error () => printStr "Error occured!\n"
end
```

zmodyfikujemy funkcję *main* by korzystać ze zdefiniowanego uchwytu:

```
let main () =
  handle no_negatives_question () with abortOnError
```

Na potrzeby przykładu, możemy rozważyć spokojniejszy uchwyt dla wystąpień *error*, który wypisze ostrzeżenie o wystąpieniu błędu ale będzie kontynuował obliczenie:

```
let warnOnError =
  handler
  | error () => printStr "Error occured, continuing...\n"; resume ()
end
```

Jeśli skorzystamy z tego uchwytu w programie, po wyświetleniu ostrzeżenia obliczenie *no\_negatives\_question* zostanie wznowione i na ekranie zobaczymy komunikat „Question finished”. Specjalna funkcja *resume*, dostępna w uchwycie reprezentuje kontynuację obliczenia, które zostało przerwane wystąpieniem operacji powodującej efekt uboczny.

#### 4.3.2. Niedeterminizm

Powróćmy do problemu, który w rozdziale drugim był inspiracją do rozważania niedeterminizmu – sprawdzanie czy formuła jest spełnialna oraz czy jest tautologią. Przedstawiliśmy wtedy uchwytów dla obu tych problemów w naszej notacji. Implementacja efektu niedeterminizmu, operacji *amb* oraz uchwytów wraz z wykorzystaniem ich wygląda następująco:

```
signature NonDet =
| amb : Unit => Bool

let satHandler =
  handler
  | amb () / r => r True || r False
end

let tautHandler =
  handler
  | amb () / r => r True && r False
end
```

```

let formula1 x y z = (not x) && (y || z)

let main () =
  let ret = handle
    let (x, y, z) = (amb (), amb (), amb ()) in
    formula1 x y z
  with satHandler in
  if ret then printStr "Formula is satisfiable\n"
  else printStr "Formula is not satisfiable\n"

```

Będziemy sprawdzać czy formuła wyrażona za pomocą funkcji *formula1* jest spełnialna. W tym celu w funkcji *main*, wewnątrz uchwytu, niedeterministycznie ustalamy wartości zmiennych *x*, *y*, *z* po czym obliczamy wartość funkcji *formula1*. Wartość obsługiwanego wyrażenia, którą przypisujemy do zmiennej *ret*, jest następnie wykorzystana do wypisania komunikatu. Ponadto – w celu demonstracji możliwości języka – w uchwytach zamiast kontynuować obliczenie używając *resume*, przypisujemy kontynuacji nazwę *r*.

W Helium, uchwytów mogą posiadać przypadki nie tylko dla operacji związanych z jakimś efektem ale także dwa specjalne: *return* oraz *finally*. Pierwszy jest wykonywany, gdy obliczenie pod kontrolą uchwytu kończy się zwracając wynik, przypadek *return* jako argument otrzymuje wynik obliczenia. Zaś *finally* otrzymuje jako argument obliczenie obsługiwane przez uchwyt i jest uruchamiane na początku działania uchwytu. Domyślnie przypadki te są zaimplementowane jako:

```

handler
| return x => x
| finally f => f
end

```

Możemy je jednak sprytnie wykorzystać. Przykładowo, zamiast tylko sprawdzać czy formuła jest spełnialna, możemy sprawdzić przy ilu wartościowaniach jest prawdziwa:

```

let countSatsHandler =
  handler
  | return x => if x then 1 else 0
  | amb () / r => r True + r False
  end

let main () =
  let ret = handle
    let (x, y, z) = (amb (), amb (), amb ()) in
    formula1 x y z
  with countSatsHandler in
  printStr (stringOfInt ret ++ " satisfying interpretations\n")

```

Gdy obliczenie się kończy, zamiast zwracać czy formuła jest spełniona zwracamy 1 albo 0, w zależności czy formuła przy aktualnym wartościowaniu jest speł-

niona. Gdy obsługujemy niedeterministyczny wybór, kontynuujemy obliczenie dla obu możliwych wartości boolowskich po czym dodajemy wyniki. Wykorzystując *finally* możemy włączyć komunikat o liczbie wartościowań do uchwytu:

```
let countAndWriteSatsHandler =
  handler
  | return x => if x then 1 else 0
  | amb () / r => r True + r False
  | finally ret => printStr (stringOfInt ret ++ " satisfying interpretations\n")
end

let main () =
  handle
    let (x, y, z) = (amb (), amb (), amb ()) in
    formula1 x y z
  with countAndWriteSatsHandler
```

Tutaj wykorzystanie *finally* jest lekkim nadużyciem, jak jednak za chwilę zobaczymy, konstrukcja ta jest bardzo przydatna.

### 4.3.3. Modyfikowalny stan

Rozważmy następujący przypadek dla *return* w uchwycie:

```
handler
(* ... *)
| return x => fn s => x
end
```

Wartość obliczenia, zamiast być jego wynikiem, jest funkcją. Co za tym idzie, w tym uchwycie kontynuacje nie będą funkcjami zwracającymi wartości lecz funkcje. W ten sposób możemy parametryzować dalsze obliczenia nie tylko wartościami zwracanymi przez operacje (zgodnie z ich sygnaturą) ale także wymyślonymi przez nas – autorów uchwytu. Zauważmy jednak, że parametr ten nie jest widoczny w obsługiwanym obliczeniu, a jedynie w uchwycie. Co więcej, skoro wynik obsługiwanego obliczenia jest teraz funkcją, a nie wartością to by użytkownik uchwytu nie zauważył niezgodności typów musimy funkcję tą uruchomić z jakimś parametrem – tutaj właśnie przychodzi naturalny moment na wykorzystanie konstrukcji *finally*.

Definiujemy efekt stanu z operacją jego odczytu oraz modyfikacji:

```
signature State (T: Type) =
| get : Unit => T
| put : T => Unit
```

Efekt jak i operacje są polimorficzne ze względu na typ wartości stanu. Zdefiniujemy teraz standardowy uchwyt dla efektu stanu. Skorzystamy z faktu, że uchwyt



są w Helium wartościami, stąd w szczególności mogą być wynikiem funkcji. Funkcja ta będzie u nas parametryzowana wartością początkową stanu:

```
let evalState init =
  handler
  | return x => fn _ => x
  | put s => fn _ => (resume ()) s
  | get () => fn s => (resume s) s
  | finally f => f init
end
```

Gdy obliczenie się kończy, zamiast wartość, zwracamy funkcję która ignoruje argument, a zwraca właściwy wynik obliczenia. Ten argument będzie bieżącą wartością stanu. W konsekwencji przypadki dla operacji też muszą być funkcjami. Dla *put* nie musimy odczytywać aktualnej wartości stanu, stąd wartość tą ignorujemy. Obliczenie wznowiamy z wartością jednostkową. Jak jednak wiemy, wynikiem będzie nie zwykła wartość lecz funkcja, której u nas dajemy wartość stanu. Stąd podajemy jej nową wartość stanu, którą parametryzowana była operacja *put*. W przypadku *get* postępujemy podobnie – jednak tym razem odczytamy argument funkcji i prześlemy go do kontynuacji. Niezmiennie kontynuacja zwraca funkcję, której prześlemy aktualną wartość stanu. Pozostaje rozstrzygnąć co zrobić w przypadku *finally*. Skoro jednak przerobiliśmy obliczenie ze zwracającego wartość do takiego, które zwraca funkcję oczekującą wartości stanu, to możemy podać mu wartość początkową – określoną przez użytkownika uchwytu.

Jeśli chcemy aby obliczenie zwracało nie tylko wartość wynikową ale także końcowy stan, wystarczy że zmodyfikujemy przypadek dla *return*:

```
let runState init =
  handler
  | return x => fn s => (s, x)
  | get () => fn s => resume s s
  | put s => fn _ => resume () s
  | finally f => f init
end
```

Dzięki zdefiniowanemu efektowi ubocznemu, operacjom oraz uchwytom możemy teraz łatwo wykonywać obliczenia ze stanem:

```
let stateful () =
  let n = 2 * get () in
  let m = 10 + get () in
  put (n + m);
  m - n

let main () =
  let init = 2 in
  let (state, ret) = handle stateful () with runState init in
  printStr "Started with "; printInt init;
```

```

printStr "Finished with "; printInt state;
printStr "Returned "; printInt ret

(*
  Started with 2
  Finished with 16
  Returned 8
*)

```

#### 4.3.4. Efekt rekursji

W niektórych językach ML-podobnych (jak na przykład OCaml czy Helium) chcąc by w ciele definicji funkcji był widoczny jej identyfikator, trzeba zadeklarować ją używając słów kluczowych *let rec*:

```

let rec fib n = if n = 0 then 0 else
                if n = 1 then 1 else
                fib (n-1) + fib (n-2)

```

Co ciekawe, dzięki własnym efektom i operacjom możemy tworzyć funkcje rekurencyjne, które nie używają jawnie rekursji:

```

signature Recurse (A: Type) (B: Type) =
| recurse : A ⇒ B

let fib n = if n = 0 then 0 else
            if n = 1 then 1 else
            recurse (n-1) + recurse (n-2)

let rec withRecurse f init =
  handle 'a in f 'a init
  with
  | recurse n ⇒ resume (withRecurse f n)
end

```

Konstrukcja *handle 'a in* służy doprecyzowaniu który efekt ma być obsługiwany przez uchwyt – jest przydatna w przypadku niejednoznaczności gdy używamy wielu instancji tego samego efektu lub dla ułatwienia rozumienia kodu.

Możemy w ten sposób definiować także funkcje wzajemnie rekurencyjne:

```

let is_even n = if n = 0 then True
                else recurse (n - 1)

let is_odd n = if n = 0 then False
                else recurse (n - 1)

let rec withMutualRec me init other =
  handle 'a in me 'a init with

```

```

| recurse n ⇒ resume (withMutualRec other n me)
end

let even n = withMutualRec is_even n is_odd

let main () =
  let n = 10 in
  printInt n;
  if even n
  then printStr "is even"
  else printStr "is odd"

```

Utrzymujemy informację, która funkcja jest aktualnie wykonywana i gdy prosi o wywołanie rekurencyjne uruchamiamy obliczanie drugiej funkcji po czym wynik przekazujemy do kontynuacji.

#### 4.3.5. Wiele efektów na raz – porażka i niedeterminizm

Na koniec rozdziału, zobaczmy jak łatwo w Helium komponuje się efekty. Definiujemy efekty niedeterminizmu oraz porażki:

```

signature NonDet =
| amb : Unit ⇒ Bool

signature Fail =
| fail : {A: Type}, Unit ⇒ A

```

oraz bardzo proste uchwytty dla tych efektów:

```

let failHandler =
  handler
  | fail () ⇒ False
end

let ambHandler =
  handler
  | amb () / r ⇒ r True || r False
end

```

Definiujemy teraz funkcję sprawdzającą czy otrzymana formuła z trzema zmiennymi wolnymi jest spełnialna:

```

let is_sat (f: Bool → Bool → Bool → Bool) =
  handle
  handle
    let (x, y, z) = (amb (), amb (), amb ()) in
    if f x y z then True else fail ()
  with failHandler
  with ambHandler

```

Jeśli formuła przy ustalonym wartościowaniu nie jest spełniona powoduje efekt porażki. Zwróćmy uwagę w jakiej kolejności są umieszczone uchwyt – niedeterminizmu na zewnątrz, zaś porażki wewnątrz. W ten sposób gdy wystąpi porażka, jej uchwyt zwróci fałsz, w wyniku czego nastąpi powrót do ostatniego punktu niedeterminizmu w którym jest jeszcze wybór. Dzięki temu wartość *is\_sat f* jest równa fałszowi tylko gdy przy każdym wartościowaniu nastąpi porażka. Zobaczmy teraz funkcję sprawdzającą czy otrzymana formuła jest tautologią:

```
let is_taut (f: Bool → Bool → Bool → Bool) =
  handle
    handle
      let (x, y, z) = (amb (), amb (), amb ()) in
      if f x y z then True else fail ()
    with ambHandler
  with failHandler
```

Tutaj uchwyt dla porażki znajduje się na zewnątrz – wystąpienie porażki oznacza, że istnieje wartościowanie przy którym formuła nie jest prawdziwa, a w konsekwencji nie może być tautologią. Możemy teraz napisać zgrabną funkcję, która wypisze nam czy *formula1* jest spełnialna oraz czy jest tautologią:

```
let main () =
  printStr "Formula is ";
  if is_sat formula1
  then printStr "satisfiable and "
  else printStr "not satisfiable and ";
  if is_taut formula1
  then printStr "a tautology\n"
  else printStr "not a tautology\n"

(*
  Formula is satisfiable and not a tautology
*)
```

Z łatwością napisaliśmy program, który korzysta z wielu efektów ubocznych jednocześnie, mimo że żaden z nich (ani uchwyt) nie wie o istnieniu drugiego. Łączenie efektów jest bardzo proste, a kolejność w jakiej umieszczamy uchwytów umożliwia nam łatwe i czytelne definiowanie zachowania programu w przypadku wystąpienie któregośkolwiek z efektów.

Dzięki językowi Helium, przyjrzelśmy się z bliska efektom algebraicznym oraz uchwytom, zobaczyliśmy przykłady implementacji uchwytów oraz rozwiązań prostych problemów. Jesteśmy gotowi do podjęcia próby zaimplementowania systemów kompilacji z użyciem efektów i uchwytów – czego dokonamy w następnym rozdziale.

## Rozdział 5.

# Systemy kompilacji z użyciem efektów algebraicznych i uchwytów



## Rozdział 6.

# Podsumowanie i wnioski

...





# Bibliografia

- [1] A. Bauer. What is algebraic about algebraic effects and handlers?, 2018.
- [2] D. Biernacki, M. Piróg, P. Polesiuk, and F. Sieczkowski. Handle with care: relational interpretation of algebraic effects and handlers. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 2(POPL):1–30, 2017.
- [3] D. Biernacki, M. Piróg, P. Polesiuk, and F. Sieczkowski. Abstracting algebraic effects. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 3(POPL):1–28, 2019.
- [4] D. Biernacki, M. Piróg, P. Polesiuk, and F. Sieczkowski. Binders by day, labels by night: effect instances via lexically scoped handlers. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 4(POPL):1–29, 2019.
- [5] S. Lindley, C. McBride, and C. McLaughlin. Do be do be do. *CoRR*, abs/1611.09259, 2016.
- [6] C. McBride. The frank manual. *Unpublished manual*, 2012.
- [7] A. Mokhov, N. Mitchell, and S. P. Jones. Build systems à la carte: Theory and practice. *Journal of Functional Programming*, 30, 2020.
- [8] A. Mokhov, N. Mitchell, and S. Peyton Jones. Build systems à la carte. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 2(ICFP):1–29, 2018.
- [9] R. P. PIETERS, T. SCHRIJVERS, and E. RIVAS. Generalized monoidal effects and handlers.
- [10] G. Plotkin and J. Power. Semantics for algebraic operations. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 45:332–345, 2001.
- [11] G. Plotkin and J. Power. Computational effects and operations: An overview. 2002.
- [12] G. D. Plotkin and M. Pretnar. Handling algebraic effects. *arXiv preprint arXiv:1312.1399*, 2013.
- [13] M. Pretnar. An introduction to algebraic effects and handlers. invited tutorial paper. *Electronic notes in theoretical computer science*, 319:19–35, 2015.

- [14] J. Yallop and contributors. Effects bibliography. <https://github.com/yallop/effects-bibliography/>, 2016.