



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,  
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ

Praca dyplomowa inżynierska

*Automatyczne odkrywanie procesów biznesowych przy użyciu  
programowania genetycznego*

*Automated Business Process Discovery using Genetic Programming*

Autor:

*Piotr Seemann*

Kierunek studiów:

*Informatyka*

Opiekun pracy:

*dr inż. Krzysztof Kluza*

Kraków, 2021

*Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.): „Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystycznego wykonania albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie.”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.): „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej «sądem koleżeńskim».”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.*

*Serdecznie dziękuję ...*



## Spis treści

<b>1. Wprowadzenie</b>	7
1.1. Zarys tematyki pracy	7
1.2. Cele pracy	7
1.3. Zawartość pracy	8
<b>2. Wstęp teoretyczny</b>	9
2.1. Procesy biznesowe	9
2.1.1. Procesy biznesowe	9
2.1.2. Zarządzanie procesami biznesowymi	11
2.2. Eksploracja procesów	12
2.2.1. Modelowanie procesów biznesowych	12
2.2.2. Eksploracja procesów	14
2.2.3. Dzienniki zdarzeń	15
2.2.4. Automatyczne odkrywanie procesów biznesowych	16
2.3. Ewolucja gramatyczna	17
2.3.1. Algorytmy ewolucyjne	17
2.3.2. Szczegółowe omówienie operatorów i działania algorytmów ewolucyjnych	18
2.3.3. Ewolucja gramatyczna	20
2.3.4. BNF	20
2.3.5. Tworzenie gramatyki pod kątem ewolucji	21
2.3.6. Omówienia działania algorytmu ewolucji genetycznej	22
2.4. Metryki	23
2.4.1. Metryki a funkcja dopasowania	23
2.4.2. Dodatkowa metryka - złożoność	24
2.4.3. Metryki - szczegóły	24
2.4.4. Obliczanie metryk	26
<b>3. Projekt i implementacja</b>	29
3.1. Wykorzystane technologie	29

3.1.1. Python 3.8.1 .....	29
3.1.2. PonyGE2 .....	29
3.2. Tworzenie gramatyki procesu biznesowego .....	29
3.3. Projekt systemu .....	32
3.3.1. Podział na moduły .....	32
3.3.2. Model .....	33
3.4. Implementacja .....	35
3.4.1. Ogólny schemat blokowy .....	35
3.4.2. Parsowanie gramatyki .....	35
3.4.3. Obliczanie metryk .....	37
3.4.4. Obliczanie dopasowania dla pojedynczego wariantu .....	38
3.4.5. Wyszukiwanie w modelu ścieżek o określonej długości .....	40
3.4.6. Obliczanie dopasowania .....	42
3.4.7. Znajdowanie najlepiej dopasowanych aktywności w modelu .....	43
3.4.8. Pozostałe wnioski dotyczące implementacji .....	45
3.5. Wybór parametrów algorytmu .....	46
<b>4. Dyskusja rezultatów .....</b>	<b>49</b>
4.1. Przykładowe wyniki .....	49
4.1.1. Wynik dla przykładu ze wstępu .....	49
4.1.2. Inne przykłady działania .....	51
4.2. Wyniki w zależności od przyjętych wag poszczególnych metryk .....	59
4.2.1. Złożoność .....	59
4.3. Wnioski .....	59
<b>5. Podsumowanie .....</b>	<b>61</b>

# 1. Wprowadzenie

## 1.1. Zarys tematyki pracy

Zdefiniowanie kroków potrzebnych do osiągnięcia danego efektu jest konieczne do zrozumienia podejmowanych działań i wprowadzenia ewentualnych udoskonaleń. Z czasem biznes zdał sobie z tego sprawę i kierując się zasadą: „Jeżeli nie jesteś w stanie opisać czegoś jako proces, nie masz pojęcia, co robisz”, firmy zaczęły podejmować próby uporządkowania i zamknięcia swoich działań w ramy, co doprowadziło do wzrostu popularności procesów biznesowych.

Identyfikacja i opis procesów biznesowy sprawia, że wszystkie operacje w firmie stają się przejrzyste i łatwiejsze do zrozumienia. Analiza procesów biznesowych może pozwolić na zwiększenie produktywności oraz redukcję kosztów. Procesy biznesowe mogą pozwolić na przewidywanie przyszłych zdarzeń na podstawie danych, znajdowanie wąskich gardeł, a także zmniejszają zależność firm od poszczególnych ludzi.

W związku z możliwością gromadzenia coraz większej ilości danych, a także chęcią ich wykorzystania oraz rosnącą popularnością analizy danych (*eng. data science*), biznes zdał sobie sprawę z możliwości wykorzystania technologii informatycznych w kontekście procesów biznesowych. Zapoczątkowało to powstanie na pograniczu zarządzania procesami biznesowymi i metod informatycznych używanych do analizy danych, wśród wielu innych, dziedziny zwanej eksploracją procesów (*eng. process mining*).

## 1.2. Cele pracy

Celem pracy jest projekt i implementacja metody odkrywania procesów biznesowych przy użyciu programowania genetycznego, a dokładniej ewolucji gramatycznej. W ramach pracy zaimplementowano program realizujący to zadanie oraz zbadano jak wybór metryk, metod ewolucji, gramatyki, a także parametrów programu wpływa na jakość rozwiązania. Działanie zweryfikowano poprzez użycie stworzonego algorytmu do okrycia modeli procesów biznesowych dla dzienników zdarzeń różnej wielkości. Przykłady czego zamieszczono i omówiono w pracy. Ponadto w pracy została zbadana hipoteza, czy kontrola złożoności modelu na etapie ewolucji ma korzystny wpływ na działanie algorytmu i ostateczne rozwiązanie.

### 1.3. Zawartość pracy

Praca została podzielona na cztery części. We wstępie teoretycznym zostały przybliżone zagadnienia potrzebne do zrozumienia pracy, takie jak procesy biznesowe, eksploracja procesów oraz ewolucja gramatyczna. Omówiono też wybór i działanie metryk dla modeli procesów biznesowych. W kolejnej części została przedstawiona gramatyka stworzona na potrzeby odkrywania procesów oraz projekt i implementacja algorytmu do wyszukiwania procesów genetycznych. Następnie zaprezentowane zostały wyniki działania algorytmu dla przykładowych dzienników zdarzeń. Sprawdzono, jak na czas znajdowania rozwiązania oraz jego jakość wpływają przyjęte parametry algorytmu w szczególności wybór metryk, oraz wagi, z jakimi każda metryka powinna być brana pod uwagę. Zweryfikowana została hipoteza dotycząca złożoności modelu. Na koniec przedstawiono podsumowanie całości pracy.



## 2. Wstęp teoretyczny

### 2.1. Procesy biznesowe

#### 2.1.1. Procesy biznesowe

W każdym dużym przedsiębiorstwie każdego dnia wykonywana jest ogromna ilość czynności koniecznych do funkcjonowania tej organizacji. Ludzie oraz systemy realizują rozmaite działania związane z różnymi, często niemającymi wiele wspólnego zadaniami jak, chociażby procesowanie płatności, składanie zamówień, wytwarzanie produktów czy ich transport. Przykłady te można mnożyć w zależności od sektora, w jakim obraca się dana firma. Im jest ona większa, tym trudniej jest osobom nią zarządzającym zrozumieć i opisać poszczególne czynności. W pewnym momencie, kiedy ilość różnych zadań rośnie do setek czy tysięcy, staje się to niemożliwe i potrzebny jest sposób na zebranie wiedzy o pojedynczych operacjach i zamknięcie ich w uporządkowaną strukturę. Stąd narodził się pomysł na wykorzystanie procesów biznesowych.

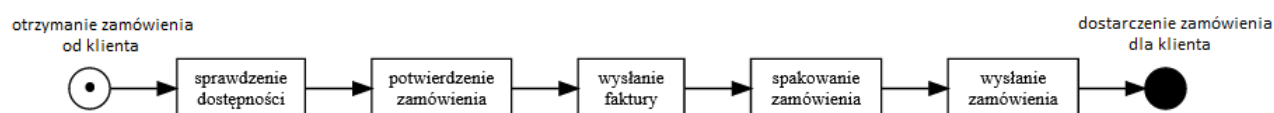
Procesy biznesowe opisują zbiór aktywności, które podejmuje grupa podmiotów w celu osiągnięcia celu biznesowego. W literaturze brakuje jednej ogólnie przyjętej definicji procesu biznesowego. W latach 90. XX wieku proponenci BPR, czyli Przeprojektowania procesów biznesowych (*eng. Business process re-engineering*) starali się sprecyzować pojęcie procesu biznesowego. W książce „Process Innovation: Reengineering Work through Information Technology” [1] określono termin ten jako „Ustrukturyzowany, mierzalny zbiór działań, których celem jest wytworzenie określonego produktu dla określonego klienta lub rynku”. Autor położył nacisk na zbiór kroków prowadzących do celu, raczej niż na końcowy efekt. W dalszej części autor pisze „Proces jest zatem określonym uporządkowaniem czynności roboczych w czasie i przestrzeni, z początkiem i końcem oraz jasno określonymi wejściami i wyjściami: strukturą działania.”. Inni pionierzy BPR Michael Hammer i James Champy zaproponowali podejście „Proces biznesowy to zbiór działań, który pobiera jeden lub więcej rodzajów danych wejściowych i tworzy wynik, który ma wartość dla klienta” [2]. Autorzy dają większą dowolność, co do definicji procesu, nie wspominając o konieczności jego logicznej organizacji czy mierzalności. Z kolei Jacobson zupełnie pomija konieczność zamknięcia procesu w jakiejkolwiek ramy: „Zestaw czynności wewnętrznych wykonywanych w celu obsługi klienta” [3]. Nacisk na konieczność odniesienia procesów do wymiernych środków firmy widzimy w definicji: „Procesy biznesowe są aktywną częścią biznesu. Opisują funkcje

firmy i obejmują zasoby, które są używane, przekształcane lub wytwarzane. Proces biznesowy to abstrakcja, która pokazuje współpracę między zasobami i transformację zasobów w biznesie. Podkreśla, w jaki sposób wykonywana jest praca, zamiast opisywać produkty lub usługi wynikające z tego procesu.” [4]. Szczególnie ważny jest tutaj fragment o transformacji zasobów, gdyż każe on rozumieć poszczególne aktywności w procesie jako powiązane ze sobą i kończące się namacalnymi rezultatami. Definicja „Proces biznesowy to seria kroków mających na celu wytworzenie produktu lub usługi. W wyniku niektórych procesów produkt lub usługa jest odbierana przez zewnętrznego klienta organizacji. Nazywamy je podstawowymi procesami. Inne procesy wytwarzają produkty, które są niewidoczne dla klienta zewnętrznego, ale są niezbędne do efektywnego zarządzania firmą. Nazywamy je procesami wsparcia” [5] wprowadza rozgraniczenie na podtypy procesów. Ważnym jest jednak, że nie jest koniecznością, aby rezultaty procesu były widoczne na zewnątrz organizacji. Warto też zaznaczyć, że procesy biznesowe nie dotyczą jednej osoby czy nawet działu, a raczej udział w nich bierze wiele ludzi, maszyn czy systemów z różnych działów połączonych celem dostarczenia wspólnej wartości biznesowej.

Powyższe definicje skupiają się na delikatnie odmiennych aspektach procesów biznesowych, nie zawsze szczegółowo wspominając o innych. Starając się usystematyzować powyższe sformułowania, chcąc zbudować bazę do dalszej analizy tematu, można przyjąć, że procesy biznesowe charakteryzują:

- Określony cel, którym jest wytworzenie wartości dla klienta zewnętrznego lub pośrednio firmy - klienta wewnętrznego. Jednak warto jeszcze raz zaznaczyć, że proces biznesowy skupia się na sposobie osiągnięcia celu, a nie opisie celu samego w sobie.
- Dyskretny, jasno zdefiniowany i identyfikowalny zbiór aktywności.
- Jasno określony początek - wejście i koniec - wyjście.
- Zależność przyczynowo-skutkowa pomiędzy kolejnymi procesami.

Żeby lepiej zilustrować, czym jest proces biznesowy, poniżej znajduje się prosty przykład często spotykanego procesu. Oczywiście, prawdziwy proces będzie składał się z o wiele większej liczby aktywności.



**Rys. 2.1.** Przykład prostego procesu

Zauważmy, że mamy jasno zdefiniowany wejście - otrzymanie zamówienia od klienta oraz wyjście, kiedy dostarczamy oczekiwaną wartość dla klienta, a całość składa się z serii tworzących logiczną całość aktywności. Aktywności są konkretnie zdefiniowane. Standardem jest definiowanie aktywności w formie równoważników zdań.

### 2.1.2. Zarządzanie procesami biznesowymi

Zdefiniowanie proces biznesowego otwiera wiele możliwości analizy działań przedsiębiorstwa i wskutek tego wprowadzanie usprawnień. Dziedziną, która się tym zajmuje, jest zarządzanie procesami biznesowymi (eng. *Business process modeling*) zwane w skrócie BPM. Sercem jest proces, a samo BPM jest dyscypliną używającą różnych metod, technik i sposobów w celu projektowania, wprowadzania w życie, zarządzania i analizy procesów biznesowych [6].

Celem stosowania metod zarządzania procesami biznesowym jest udoskonalanie procesów w danej organizacji biznesowej. Udoskonalanie może być rozumiane w różnoraki sposób w zależności od kierunku rozwoju firmy. Może to być na przykład redukcja czasu, kosztów, czy dostarczanie lepszego produktu końcowego. Ważne jest, aby było to podejście całościowe i odnosiło się do całego zbioru aktywności w ramach danego procesu. Usprawnianie pojedynczej aktywności to nie BPM. Patrząc na przykład powyżej, jeśli wprowadzilibyśmy usprawnienia w ramach wysyłania faktury, robiąc to elektronicznie zamiast tradycyjną pocztą, mimo że taka zmiana przyniosłaby poprawę wydajności, nie mielibyśmy do czynienia z zarządzaniem procesami biznesowymi. O BPM moglibyśmy mówić, gdybyśmy znaleźli sposób, żeby przeprojektować cały proces tak, żeby wysyłanie faktury nie było potrzebne lub odwrotnie, jeśli dodalibyśmy nowe aktywności, która usprawniłaby proces jako całość czy nawet zmieli kolejności zadań w procesie, gdyż zmiany w ramach poszczególnych, jednostkowych aktywności nie są konieczne, żeby ulepszyć proces jako całość [7].

Zarządzanie procesami biznesowymi jest zbiorem praktyk, działań mających na celu udoskonalanie procesów. Trzeba więc rozumieć BPM jako pojęcie abstrakcyjne, jednak szczególnie w dzisiejszym świecie, zarządzanie procesów biznesowych nie może się obyć bez wsparcia ze strony oprogramowania czy technik znanych z różnych dziedzin informatyki [8]. Na lepsze zrozumienie czym zajmuje się zarządzanie procesami biznesowymi oraz w jaki sposób możemy zastosować informatykę, a w szczególności eksplorację procesów w tej dziedzinie, może pozwolić definicja cyklu życia procesu biznesowego.



Rys. 2.2. Cykl życia procesu biznesowego

Cykl życia procesu biznesowego (*eng. Business process lifecycle*) przedstawiono na rys. 2.3 [9]. Jest to zbiór kroków niezbędnych do skutecznego zarządzania procesami biznesowymi. W celu dostosowania do zmieniającej się rzeczywistości poszczególne kroki powinny być co pewien czas powtarzane.

Konieczność powtarzania elementów cyklu życia procesu biznesowego sygnalizuje przewagę komputerów i algorytmów nad wykonywaniem tych operacji przez człowieka. Metody informatyczne są stosowane, na każdym z wymienionych etapów. W szczególności dane zebrane w wyniku monitorowania procesów dają nam możliwość zastosowania metod z zakresu eksploracji procesów (sekcja 2.2). Praca skupia się w głównej mierze na odkrywaniu procesów, czyli znajdowaniu istniejących już procesów na podstawie realnych danych. Należy zaznaczyć, że identyfikacja polega na ogólnym rozpoznaniu i nazwaniu zachodzących procesów, podczas gdy odkrywanie jest bardziej szczegółowe, a w jego wyniku otrzymujemy dokładny model.

## 2.2. Eksploracja procesów

### 2.2.1. Modelowanie procesów biznesowych

Na rys. 2.1 przedstawiono przykład uproszczonego procesu biznesowego. Łatwo sobie wyobrazić, że proces ten w rzeczywistości może być znacznie bardziej skomplikowany. Część aktywności może być wykonywana równolegle, niektóre zdarzenia w ogóle nie zaistnieją lub będą występować kilkakrotnie w ramach jednego procesu.

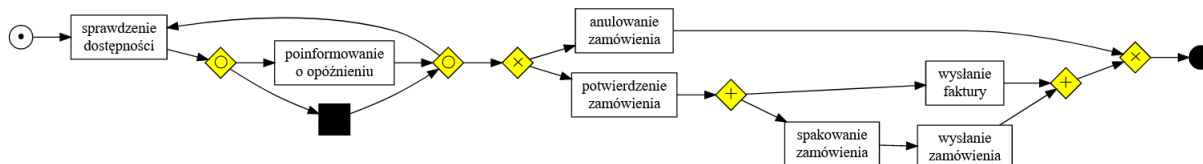
W sytuacji, w której zamówiony przez klienta towar będzie niedostępny, logiczne wydaje się poinformowanie go o opóźnieniu oraz danie mu możliwości anulowania zamówienia lub jego kontynuacja i ponowne sprawdzenie dostępności. Ponadto, czynności takie jak wysłanie faktury oraz spakowanie i wysłanie zamówienia mogą być wykonane w dowolnej kolejności czy nawet jednocześnie przez dwie różne osoby. Proces staje się bardziej skomplikowany i konieczna do stworzenia jego modelu jest bardziej złożona notacja niż użyta do przedstawienia prostego procesu. Istnieje wiele notacji do modelowania procesów biznesowych, wśród nich można wymienić schematy blokowe, diagramy aktywności UML, łańcuchy procesu sterowanego zdarzeniami (*eng. Event-driven Process Chains*), sieci Petriego [10]. Obecnie najpopularniejszą notacją używaną do opisu procesów biznesowych jest Business Process Model and Notation, w skrócie BPMN [11]. Daje ona możliwość opisania w jednoznaczny sposób skomplikowanych procesów czy stworzenia diagramów współdziałania procesów, jednocześnie pozostając łatwą do zrozumienia.

Na grafice poniżej przedstawiono notację opartą o elementy BPMN, używaną w dalszej części pracy. Składają się na nią zdarzenia początkowe i końcowe, połączenia, bramki logiczne oraz aktywności. Czarnym kwadratem oznaczono sytuację, w której żadna aktywność nie jest wykonywana, możliwe tylko w bramce LUB.



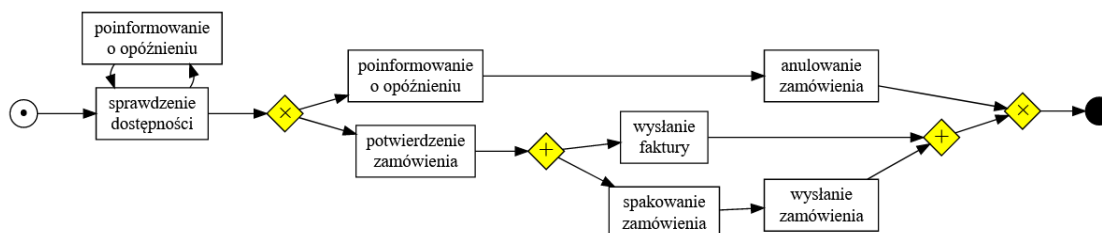
Rys. 2.3. Elementy BPMN

Korzystając z tej notacji, można przedstawić opisany wcześniej proces. Na rys. 2.4 widać model po modyfikacjach.



Rys. 2.4. Rozbudowany model procesu - przykład 1

Możliwe jest teraz poinformowanie klienta o opóźnieniu, a następnie anulowanie zamówienia lub powtórne sprawdzenie dostępności. Model ten jednak nie jest wystarczająco precyzyjny i pozwala na potwierdzenie zamówienia po informacji o jego opóźnieniu, a bez uprzedniego ponownego sprawdzenia dostępności. Można zaproponować inny model (rys. 2.5), który rozwiązuje powyższe problemy, jednak aktywność - poinformowanie o opóźnieniu - występuje w nim dwukrotnie, co jest niepożądane i pogarsza jego czytelność.



Rys. 2.5. Rozbudowany model procesu - przykład 2

Co więcej, w pewnych przypadkach klient może mieć możliwość rezygnacji z zamówienia bez ówczesnego informowania go o opóźnieniu, a z czego nie zdawano sobie sprawy, wtedy konieczne może być stworzenie zupełnie innego modelu. Aby radzić sobie z tymi problemami, powstał szereg zestawów wytycznych, którymi warto się kierować, modelując procesy biznesowe. Wśród takich zasad można wymienić: zminimalizuj liczbę elementów w modelu, zminimalizuj liczbę ścieżek w modelu, używaj jednego zdarzenia początkowego i jednego końcowego, unikaj bramek LUB - OR, zdekomponuj model zawierający więcej niż 50 elementów [12].

Modelowanie procesów biznesowych jest próbą stworzenia uproszczonej wersji rzeczywistości na podstawie przewidywań i założeń. Modele dają abstrakcję, użyteczne przybliżenie rzeczywistości, jednak należy pamiętać, że „Wszystkie modele są błędne” i rzeczywisty proces najprawdopodobniej będzie różnił się od nawet najlepszego modelu.

### 2.2.2. Eksploracja procesów

W dzisiejszych czasach standardem jest, że organizacje biznesowe korzystają z systemów informatycznych, takich jak, chociażby systemy ERP czy CRM, wspierających ich działalność. Systemy te rejestrują dane o procesach, które wspierają. Dane te mogą być później analizowane i wykorzystane do wprowadzenia usprawnień w działaniu firmy.

Tradycyjne metody są wolne, kosztowne i narażone na błędy ludzkie, a konieczność ich ciągłego powtarzania, połączona z wszechobecnym w biznesie trendem automatyzacji sprawiają, że eksploracja procesów zyskuje na znaczeniu [13]. Ważna jest możliwość szybkiej adaptacji do zmian, a automatyzacja odkrywania procesów biznesowych pozwala na wykonywanie powtarzalnych zadań, eliminując przy tym błędy, co idealnie wpisuje się w ten trend.

Jest to szeroko pojęta dziedzina, która zawiera różne aplikacje inteligencji obliczeniowej, uczenia maszynowego i eksploracji danych do modelowania i analizy procesów. Jest wartościowym dodatkiem do innych metod eksploracji danych, gdyż zamiast skupiać się na pojedynczym rezultacie i tworzyć dotyczące jego predykcje, celem jest zrozumienie całego procesu i akcji, które prowadzą do końcowego wyniku. Jest to trudniejsze, ale wyjątkowo cenne z punktu widzenia biznesowego, gdyż jakakolwiek zmiana w trakcie procesu może sprawić, że przewidywania będą kompletnie trafione, a zrozumienie całego procesu pozwala na pełniejszy obraz i łatwiejsze dostosowywanie się do zmian.

Ponadto, procesy biznesowe są zazwyczaj domeną analityków i menadżerów, którzy nie zawsze podchodzą do tematu ich analizy w sposób ścisły i mający odniesienie w faktach, często opierając się na własnych przeczuciach czy doświadczeniach, wprowadzając czynnik ludzki, który może być przyczyną błędów. Metoda na stworzenie pomostu między metodami informatycznymi a biznesem i stworzenie możliwości na ścisłe, powtarzalne i sprawdzalne analizowanie procesów jest więc nad wyraz cenna. Eksploracja procesów biznesowych oparta jest bowiem na danych i nie ma w niej dużo miejsca na przypuszczenia i domysły.

Podsumowując, eksploracja procesów są to techniki, narzędzia oraz metody odkrywania, monitorowania i usprawniania rzeczywistych procesów poprzez wiedzę wyodrębnioną z dzienników zdarzeń powszechnie dostępnych w systemach informatycznych [14][15]. Wyróżnia się 3 podkategorie:

- automatyczne odkrywanie procesów
- sprawdzanie zgodności (*eng. conformance checking*)
- udoskonalanie procesu (*eng. performance mining*)

### 2.2.3. Dzienniki zdarzeń

Danymi wejściowymi dla algorytmów z dziedziny eksploracji procesów są dzienniki zdarzeń, zwane często logami.

nr przypadku	aktywność	data	osoba wykonująca	zakładany czas wykonania
1	zgłoszenie problemu - a	2021.02.03 20:29:38	tester	6.5 dnia
1	programowanie (development) - b	2021.02.04 12:31:25	programista 1	6.5 dnia
2	zgłoszenie problemu - a	2021.02.05 19:13:32	klient	5.5 dnia
2	analiza - c	2021.02.06 02:43:09	analityk	5.5 dnia
2	programowanie (development) - b	2021.02.07 01:37:13	programista 2	5.5 dnia
2	testowanie - d	2021.02.08 12:43:45	tester	5.5 dnia
3	zgłoszenie problemu - a	2021.02.09 15:39:42	tester	4.5 dnia
3	development - b	2021.02.10 15:36:21	programista 1	4.5 dnia
1	analiza - c	2021.02.11 12:31:43	analityk	6.5 dnia
1	programowanie (development) - b	2021.02.12 00:01:54	programista 2	6.5 dnia
1	testowanie - d	2021.02.13 21:35:39	tester	6.5 dnia
4	zgłoszenie problemu - a	2021.02.14 09:23:59	tester	3.5 dnia
5	zgłoszenie problemu - a	2021.02.15 16:37:13	analityk	2.5 dnia
3	analiza - c	2021.02.16 02:29:56	analityk	4.5 dnia
3	programowanie (development) - b	2021.02.17 09:48:51	programista 1	4.5 dnia
3	testowanie - d	2021.02.18 20:50:28	tester	4.5 dnia
4	analiza - c	2021.02.19 15:48:37	analityk	3.5 dnia
4	programowanie (development) - b	2021.02.20 21:29:16	programista 1	3.5 dnia
4	sprawdzenie kodu (review) - e	2021.02.21 04:22:30	programista 2	3.5 dnia
5	uznanie problemu za rozwiązany - f	2021.02.22 06:28:29	programista 2	2.5 dnia
5	testowanie - d	2021.02.23 08:36:07	tester	2.5 dnia
4	testowanie - d	2021.02.24 21:17:54	tester	3.5 dnia

Rys. 2.6. Przykład dziennika zdarzeń

Przyjmuje się, że aby mówić o dzienniku zdarzeń powinien on zawierać 3 informacje: numer przypadku, czyli unikalny identyfikator zbioru aktywności, nazwę poszczególnych aktywności oraz datę jej wykonania - ważną tylko w kontekście kolejności wykonywania pojedynczych aktywności. Ponadto może on zawiera inne zbędne w kontekście odkrywania procesów biznesowych dodatkowa informacja, takie jak: podmiot wykonującym daną aktywność, miejsce, koszt czy aktualny postęp wykonania. Oczywiście te pozostałe dane mogą być wykorzystywane w kolejnych etapach analizy i usprawniania procesu.

Mając do dyspozycji te 3 informacje - poszczególne przypadki, aktywności na nie się składające oraz ich kolejność, zliczamy, jak często poszczególne aktywności występują w danej kolejności. Każdy taki przypadek zwany jest wariantem procesu. Oprócz tego musimy wiedzieć, jak często dany wariant wystąpił.

nr wariantu	ilość wystąpień	kolejność aktywności
1	2	a,b,c,b,d
2	1	a,c,b,d
3	1	a,c,b,e,d
4	1	a,f,d

Rys. 2.7. Przykład wariantów procesu

Dla poprawy czytelności aktywności często reprezentowane są jako symbole, np. kolejne litery alfabety, zamiast pełnej nazwy.

#### 2.2.4. Automatyczne odkrywanie procesów biznesowych

Automatyczne odkrywanie procesów biznesowych jest podgrupą i obejmuje techniki przekształcania danych w procesy. Ważne, że proces już istnieje, a my tylko go odkrywamy. Wejściem jest dziennik zdarzeń, a wyjściem jest mapa lub model procesu.

Procesy zaprojektowane nie zawsze są realizowane w praktyce. Ważne jest, żeby proces był oparty na analizie prawdziwych danych, a nie spekulacjach i założeniach. Pozwala na znajdowanie procesu takim, jaki jest, a nie takim, jakim chciano by, żeby był.



Rys. 2.8. Proces rzeczywisty i pierwotnie zakładany

Celem automatycznego odkrywania procesów biznesowych jest zaprojektowanie funkcji - algorytmu, która przekształci dane z dziennika zdarzeń w model procesu [16]. Istnieje wiele algorytmów do odkrywania procesów biznesowych. Wśród najpopularniejszych można wymienić:

- Alpha algorithm [17]
- The ILP Miner [18]
- Heuristic Miner [19]
- Multi-phase Miner [20]
- Inductive Miner [21]



Istnieją 4 powszechnie używane kryteria do określania jakości otrzymanego modelu. Są to:

- odwzorowanie (*eng. fitness*) - zgodność modelu z dziennikiem zdarzeń
- prostota (*eng. simplicity*) - złożoność i łatwość zrozumienia modelu.
- precyzja (*eng. precision*) - brak zachowań niezwiązanych z logiem, a możliwych w modelu
- generalizacja (*eng. generalization*) - odzwierciedlenie w modelu prawdopodobnych aktywności, mimo że nie znajdują się one w logu.

Koniecznym jest znalezienie balansu między nimi, gdyż często starając się poprawiać model pod kątem jednego kryterium, pogorszy się on pod względem innych. Powstało wiele metryk przedstawiających te kryteria za pomocą wzorów matematycznych [22] [23]. Bardziej szczegółowo wybór metryk omówiono w sekcji 2.4.

Wśród problemów dotyczących istniejące algorytmy można wymienić problem ze znajdowaniem aktywności zachodzących równolegle, brak możliwości pomijania aktywności czy reprezentowania duplikatów, nieradzenie sobie z zakłóceniami w logu, tworzenie zbyt skomplikowanych modeli, czy trudność z odwzorowaniem niektórych zachowań. Modele stworzone mogą nie być spójne strukturalnie [24] [25], przez co rozumie się takie modele, w których istnieje taka aktywność, z której nie możemy osiągnąć zdarzenia końcowego lub nie może być ona w żaden sposób osiągnięta ze zdarzenia początkowego. Metody te zazwyczaj oparte są na grafach bezpośrednich następstw (*eng. directly follows graphs*), przez co problemem może być sytuacja, kiedy log jest niekompletny.

Zastosowanie algorytmów genetycznych do automatycznego odkrywania procesów biznesowych może być odpowiedzią na te problemy. Takie podejście pozwala na wyeliminowanie części problemów często dotyczących innych metod. Najważniejszą jednak przewagą algorytmów genetycznych jest pełna dowolność w kwestii generowania modelu pod kątem metryk zdefiniowanych przez użytkownika. Często znalezienie dobrze dopasowanego do logu modelu może być okupione stworzeniem bardzo skomplikowanego modelu - prostota, pozwalającego na wiele zachowań nieobecnych w logu - precyzja. Algorytm ewolucyjny pozwala na dowolnie dużą możliwość manipulacji parametrami, żeby znaleźć oczekiwany balans między wszystkimi metrykami. Możliwe jest też stworzenie nowych własnych metryk, gdyż są one niezależne od samego algorytmu ewolucyjnego. Algorytmy klasyczne mają problem z uzyskaniem dobrych rezultatów dla wszystkich metryk i nie mają możliwości zmiany parametrów startowych.

## 2.3. Ewolucja gramatyczna

### 2.3.1. Algorytmy ewolucyjne

Algorytmy ewolucyjne [26] są inspirowaną selekcją naturalną metaheurystyką, która używa znanych z ewolucji biologicznej operacji jak selekcja, krzyżowanie czy mutacja do rozwiązywania problemów wyszukiwania i optymalizacji. Są rodziną metod przeszukiwania przestrzeni losowych rozwiązań w celu wyszukania najlepszych z nich.

Algorytmy ewolucyjne znajdują zastosowanie w problemach, dla których nie jest konieczna gwarancja znalezienia najlepszego rozwiązania. Cechami wyróżniającymi algorytmy genetyczne na tle innych algorytmów uczenia maszynowego jest istnienie puli rozwiązań zamiast jednego rozwiązywania, co umożliwia szersze przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań oraz nieograniczoną i łatwą w zaimplementowaniu paralelizację. Algorytmy te są znacznie bardziej nastawione na globalne eksplorowanie nowych rozwiązań, zamiast na jak najszybsze osiągnięcie celu. Z tego względu dobrze nadają się do problemów, gdzie istnieje dużo ekstremów, a przestrzeń poszukiwań jest duża. Jako przeciwieństwo, metody oparte na gradiencie w najprostszej znajdują tylko lokalne ekstrema, nawet po modyfikacjach takich, jak na przykład simulated annealing wciąż nie ma populacji i możliwości tak szerokiego przeszukiwania przestrzeni rozwiązań.

Sposób działania algorytmów genetyczny polega na stworzeniu populacji losowych rozwiązań zwanych genotypami lub chromosomami, które kodowane są za pomocą genów reprezentowany przez bity, liczby lub znaki i zapisywane w strukturze łatwo przetwarzalnej przez komputer. Najczęściej jest to lista jednowymiarowa liczb całkowitych. Fenotyp natomiast jest reprezentacją utożsamianą z docelowym programem lub modelem. Genotyp może być równoznaczny z fenotypem, jednak poza prostym przykładami, zazwyczaj są to oddzielne reprezentacje i geny mapowane są na odpowiadające wartości w fenotypie, zwane allelami. Fenotyp jest postacią, dla której możliwe jest obliczanie funkcji dopasowania (*eng. fitness function*), co pozwala ocenić, jak dobre jest wygenerowane rozwiązanie. Następnie, istniejąca populacja jest modyfikowana poprzez krzyżowanie i mutację. Warto zauważyć, że krzyżowanie przeszukuje przestrzeń rozwiązań globalnie, podczas gdy mutacja odpowiada za lokalne wyszukiwanie. Proces ten jest powtarzany dla każdego elementu populacji do momentu otrzymania satysfakcjonującego rozwiązania. Po zastosowaniu tych operatorów i sklasyfikowaniu rozwiązań, spośród głównie, choć nie tylko najlepszych osobników, utworzona zostaje nowa populacja, dla której cały proces jest powtarzany do momentu znalezienia satysfakcjonującego rozwiązania.

### 2.3.2. Szczegółowe omówienie operatorów i działania algorytmów ewolucyjnych

Tworzenie populacji jest pierwszym krokiem algorytmu ewolucyjnego. Może ono odbywać się kompletnie losowe lub do tworzenia nowych osobników może zostać użyta odpowiednia heurystyka.

Kolejny krok - selekcja - pozwala na zachowanie w populacji części osobników promując najlepszych z nich, co sprawia, że przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań nie jest kompletnie losowe. Można skorzystać z metod takich jak:

- Selekcja proporcjonalna - wybierane są losowo osobniki z puli wszystkich populacji z warunkiem, że rozwiązania z największą wartością metryk mają większą szansę na bycie zachowanymi w populacji.
- Selekcja turniejowa - wybierany jest podzbiór ze zbioru rozwiązań i zachowywane w przyszłej populacji są najlepsze osobniki z tego podzbioru. Rozwiązanie to pozwala na duży wpływ na presję

genetyczną - zwiększając wielkość podzbioru, ograniczamy szansę na wybór z niską wartością metryk. Jest to metoda łatwa w implementacji, która umożliwia łatwe zrównoleglenie.

Żeby uniknąć sytuacji, w której najlepsze rozwiązania zostaną zmodyfikowane, możliwe jest zastosowanie elityzmu, który pozwala na zachowanie w kolejnej generacji części najlepszych osobników w populacji niezależnie od wyniku selekcji.

Następnie stosowane są operatory krzyżowania i mutacji. Krzyżowanie jest zamianą materiału genetycznego, czyli części genotypu pomiędzy dwoma osobnikami w populacji tworząc również dwa zmienne osobniki. Mutacja natomiast zachodzi w obrębie jednego osobnika.



Rys. 2.9. Mutacja i krzyżowanie

Operatory te nie muszą i zazwyczaj nie są stosowane do każdego osobnika w populacji, a to jak często powinny być stosowane, ustalane jest za pomocą odpowiedniego parametru. Zdarza się, że mutacja jest stosowana więcej niż dla danego genu w danym genotypie.

Najczęściej używane operatory krzyżowania to:

- Krzyżowanie punktowe - spośród dwóch genotypów losowo wybierany jest jeden punkt, następnie tworzone są dwa nowe genotypy pierwszy z genów na prawo od punktu w pierwszym genotypie i na lewo w genotypie drugim oraz drugi z dwóch pozostałych.
- Krzyżowanie dwupunktowe - spośród dwóch genotypów losowo wybierane są dwa punkty, następnie część pomiędzy tymi punktami jest zamieniana pomiędzy genotypami.
- Krzyżowanie n-punktowe - uogólnienie powyższych krzyżowań dla  $n$  punktów.
- Krzyżowanie zamiana w drzewie - metoda opiera się na modyfikacjach w fenotypie, który jest reprezentowany jako drzewo, w tej metodzie zamieniane są ze sobą dwa poddrzewa. W tym przypadku tworzone są tylko prawidłowe rozwiązania, jednak jest to metoda wymagająca większej ilości obliczeń.

Ponadto krzyżowania możemy podzielić na stało-punktowe, czyli takie, w którym wybierany jest ten sam punkt lub punkty w obu osobnikach, przez co nowe genotypy mają tę samą długość jak rodzice i zmiennie-punktowe, gdzie mogą to być różne punkty, co skutkuje dużą zmiennością w rozmiarach utworzonych genotypów.

Natomiast operatory mutacji to:

- Mutacja punktowa - dowolny gen w genotypie zostaje zmieniony na inną losową wartość. Przez co odpowiadająca mu produkcja tworzy nową wartość. Pozostałe produkcje pozostają niezmienione.
- Mutacja zamiana w drzewie - metoda opiera się na modyfikacjach w fenotypie, który jest reprezentowany jako drzewo, w tej metodzie tworzone jest nowe poddrzewo. Analogicznie jak w przypadku krzyżowania tworzone są tylko prawidłowe rozwiązania, jednak konieczna jest większa ilość obliczeń.

Ostatnim krokiem jest zastąpienie osobników w poprzedniej populacji przez nowych powstałych na skutek zastosowania wcześniej wspomnianych operatorów. Istnieją dwa podejścia, sugerujące zastępowanie całej populacji lub tylko kilku osobników [27].

### 2.3.3. Ewolucja gramatyczna

Optymalny model procesu biznesowego może mieć różną długość, dlatego chcąc znaleźć taki model, potrzebujemy metody, która pozwoli na generowanie rozwiązań o zmiennej długości. Tradycyjne algorytmy genetyczne operują na stałej strukturze i mogą być użyte na przykład, żeby dobrać odpowiednie parametry do istniejącego modelu. W wielu problemach jednak chcemy rozwiązanie o nieznanym rozmiarze, dlatego obecnie najpopularniejsza metoda to programowanie genetyczne [28][29], które pozwala na generowanie rozwiązań o różnym rozmiarze, dzięki ewolucji całej struktury fenotyp, najczęściej reprezentowanej jako drzewo. Najczęściej te są gotowymi wykonywalnymi programami, jednak mogą być też równaniami czy modelami.

Oparta na programowaniu genetycznym jest ewolucja genetyczna [30]. Korzysta ona ze standardowych metod ewolucji genetycznej, jednak ewoluuje gramatykę w celu znalezienia programu, który najlepiej rozwiązuje problem. Gramatyka najczęściej zapisana w notacji BNF (sekcja 2.3.4). Dzięki zastosowaniu rekursywnych produkcji możliwe jest tworzenie rozwiązań o różnej długości.

### 2.3.4. BNF

Gramatyka jest zbiorem zasad opisujących budowę języka. Opisuje syntaktykę języka, czyli sposób łączenia poszczególnych symboli, nie mówiąc nic o znaczeniu poszczególnych słów języka. Odnosi się to także do języków formalnych np. języków programowania. Do opisu takich języków służą gramatyki formalne. Na gramatykę formalną składa się z uporządkowana czwórka  $G = (T, N, P, S)$ , gdzie

- T - skończony zbiór symboli terminalnych, czyli stałych, symboli, które nie mogą być zastąpione innym ani podzielone na mniejsze

- N - skończony zbiór symboli nieterminalnych, czyli zmiennych, symboli, które są modyfikowane przy tworzeniu języka
- P - skończony zbiór produkcji, czyli zasad, przekształceń postaci  $(NUT)^*N(NUT)^* \rightarrow (NUT)^*$ , czyli przynajmniej jednego symbolu nieterminalnego w dowolny zbiór symboli terminalnych i nieterminalnych.
- S - symbol startowy, gdzie  $S \in N$

W informatyce szczególnie szeroko stosowane są gramatyki bezkontekstowe. Pozwalają one na pokazanie, w jaki sposób rekurencyjnie tworzony jest język, co jest potrzebne, żeby zrozumieć znaczenie programu. Zaletą jest też ich stosunkowo łatwe parsowanie. Gramatyka bezkontekstowa jest to gramatyka, w której wszystkie produkcje mają postać:

$$A \rightarrow \alpha,$$

gdzie A jest to pojedynczy symbol nieterminalny, a  $\alpha$  to dowolny zbiór symboli terminalnych i nieterminalnych.

Notacja Backusa-Naura (*eng. Backus-Naur Form*) [31][32][33] jest najpopularniejszą notacją używaną do kodowania gramatyk bezkontekstowych. Symbole, które składają się na BNF to:

- ::= - produkcja
- | - lub
- <> - symbole nieterminalne

Używając tych symboli, możemy opisywać składnię języka w następujący sposób:

$$\langle \text{Nieterminalny1} \rangle ::= \langle \text{Nieterminalny2} \rangle \text{Terminany1} \mid \langle \text{Nieterminalny3} \rangle \mid \text{Terminany1}$$

Oczywiście możliwe jest też definiowanie rekurencyjnie, co pozwala na tworzenie skomplikowanego języka za pomocą prostych zasad:

$$\langle \text{Nieterminalny1} \rangle ::= \langle \text{Nieterminalny2} \rangle \mid \langle \text{Nieterminalny2} \rangle \langle \text{Nieterminalny1} \rangle$$

### 2.3.5. Tworzenie gramatyki pod kątem ewolucji

Dla każdego problemu można stworzyć nieskończoną ilość poprawnych gramatyk, jednak nie wszystkie z nich będą odpowiednie do zastosowania w algorytmie ewolucji gramatycznej. Chcąc stworzyć gramatykę, która umożliwi najwydajniejsze rozwiązanie problemu można przyjąć kilka wytycznych [34]:

- Każda rekursywna produkcja powinna mieć co najmniej tyle samo produkcji nierekursywnych, inaczej biorąc pod uwagę, że genotyp jest mapowany na fenotyp metodą pseudolosową, prawdopodobieństwo otrzymania rozwiązania, które musi się składać tylko symboli terminalnych, będzie zbyt niskie.

- Tworząc gramatykę pod kątem wykorzystania jej w procesie ewolucji, ważne jest, żeby ilość produkcji jak najlepiej odzwierciedlała, jak często chcemy uzyskać dane rozwiązanie.
- Stosując mutacje oraz krzyżowanie punktowe lub n-punktowe, które jak wiadomo, podmienia geny w genotypie, może dojść do sytuacji, w której dany gen po podmianie zostanie zmapowany na produkcje o innej ilości symboli nieterminalnych, przez co kolejne geny, będą mapowania niezgodnie z pierwotnym sensem, gdyż ilość genów w genomie pozostaje stała. Żeby temu zapobiec, należy ograniczyć ilość symboli nieterminalnych do minimum, a każdy symbol nieterminalny powinien mieć produkcje tworzące tyle samo symboli nieterminalnych oraz możliwie tyle samo produkcji, dzięki czemu po zmapowaniu symbole nadal będą odpowiadały pierwotnym.
- Stworzona gramatyka powinna umożliwić na tworzenie jak najmniejszej ilości rozwiązań, które nie należą do języka, co prawda nie uniemożliwi to działania algorytmu, gdyż można odrzucić te rozwiązania na etapie parsowania, ale warto oszczędzić niepotrzebnych obliczeń i rozwiązań ten problem już na etapie tworzenia gramatyki.

### 2.3.6. Omówienia działania algorytmu ewolucji genetycznej

Mechanizmem, który wyróżnia ewolucji genetyczną na tle innych algorytmów ewolucyjnych, jest mapowanie genotypu zapisywanego jako jednowymiarowa tablica liczb całkowitych na fenotyp - język, zgodnie z zasadami stworzonej gramatyki. Przykładem może być genotyp:

[6, 71, 92, 59, 52, 95, 23, 45, 12, 2]

i gramatyka w notacji BNF:

```
<e> ::= <var>=<math><var>
<math> ::= <math><math> | <var><op>
<op> ::= + | -
<var> ::= a | b | c | d,
```

której symbolem startowym jest <e>. Wybór kolejnych produkcji odbywa się według zasady:

*produckja = gen\_jako\_liczba\_cakowita % ilosc\_dostepnych\_produkcji*

Używając wyprowadzenia lewostronnego:

- Aktualne wyrażenie: <e>;
- Aktualny symbol nieterminalny: <e>;
- Ilość możliwych produkcji: 1;
- Wartość genu: 6;
- $6 \bmod 1 = 0$ , więc <e> zostaje zastąpiony przez <var>=<math><var>

- Aktualne wyrażenie:  $\langle \text{var} \rangle = \langle \text{math} \rangle \langle \text{var} \rangle$ ;  
Aktualny symbol nieterminalny:  $\langle \text{var} \rangle$ ;  
Ilość możliwych produkcji: 4;  
Wartość genu: 71;  
 $71 \bmod 4 = 3$ , więc  $\langle \text{var} \rangle$  zostaje zastąpiony przez  $d$
- Aktualne wyrażenie:  $d = \langle \text{math} \rangle \langle \text{var} \rangle$ ;  
Aktualny symbol nieterminalny:  $\langle \text{math} \rangle$ ;  
Ilość możliwych produkcji: 2;  
Wartość genu: 92;  
 $92 \bmod 2 = 0$ , więc  $\langle \text{math} \rangle$  zostaje zastąpiony  $\langle \text{math} \rangle \langle \text{math} \rangle$
- Aktualne wyrażenie:  $d = \langle \text{math} \rangle \langle \text{math} \rangle \langle \text{var} \rangle$ ;  
Aktualny symbol nieterminalny:  $\langle \text{math} \rangle$ ;  
Ilość możliwych produkcji: 2;  
Wartość genu: 59;  
 $59 \bmod 2 = 1$ , więc  $\langle \text{math} \rangle$  zostaje zastąpiony  $\langle \text{var} \rangle \langle \text{op} \rangle$

Kontynuując analogicznie, po zastąpieniu wszystkich symboli nieterminalnych, ostatecznie otrzymany fenotyp to:

$$d = a - b + c$$

Używanie tego prostego mechanizmu, w przypadku bardziej skomplikowanej gramatyki, możliwe jest generowanie znacznie bardziej złożonych rozwiązań. W połączeniu z metodami z algorytmów ewolucyjnych możliwe jest teoretycznie ewoluowanie programów w dowolnym języku programowania, a następnie za pomocą odpowiedniej funkcji dopasowania znalezienie takiego, który rozwiąże dany problem. W kolejnej sekcji omówiono jak dobrać metryki, aby użyć tego mechanizmu do odkrywania procesów biznesowych.

## 2.4. Metryki

### 2.4.1. Metryki a funkcja dopasowania

Funkcja dopasowania jest obliczana w każdej iteracji, dla każdego osobnika w populacji, dlatego powinna być możliwie najmniej kosztowna obliczeniowo. Nie warto więc nadmiernie jej komplikować, gdyż nawet jeśli taka wersja lepiej określi, jak dobre jest dane rozwiązanie, to jej obliczenie, może stać się wąskim gardłem całego algorytmu, co poprzez zwiększenie czasu potrzebnego na znalezienie rozwiązania pogorszy jego działanie.

Dobierając funkcje dopasowania, ważne jest, że była ona regularna, gdyż duża ilość lokalnych ekstremów może spowolnić ewolucję, a nawet całkowicie uniemożliwić znalezienie globalnie najlepszego

rozwiązania. Nie może więc ona jedynie bezwzględnie mierzyć, jak dobre jest rozwiązanie. Dobry przykładem jest tutaj problem układanie planów (*eng.* timetabling problem), gdzie większość otrzymanych rozwiązań będzie nieprawidłowa, a fitness będzie wynosił zero, nawet jeśli mała zmiana może sprawić, że znalezione zostanie właściwe rozwiązanie, dlatego konieczne jest, jak najlepsze uchwycenie jak blisko algorytm jest prawidłowego rozwiązania [35] [36].

Ostatecznie funkcja dopasowania w naszym algorytmie jest średnią ważoną metryk wymienionych w sekcji 2.2.4, jednak oprócz tego dodano kolejną metrykę złożoność, która ma poprawiać funkcje dopasowania zgodnie z powyższymi zasadami. Użytkownik może określić, z jakimi wagami wziąć pod uwagę poszczególne metryki.

### 2.4.2. Dodatkowa metryka - złożoność

Dodatkowa metryka zawiera informacje nie dotyczące bezpośrednio jakości odkrytego modelu. Istnieją jednak teoretyczne przesłanki, że powinna wpłynąć pozytywnie na działanie algorytmu. W odróżnieniu od innych metryk celem jej używania jest poprawa wydajności algorytmu ewolucji i próba zminimalizowania czasu potrzebnego na znalezienie rozwiązania.

Zamysłem jest promowanie rozwiązywania prostych problemów w prosty sposób i unikanie lokalnych ekstremów - w tym wypadku sytuacji, w której populacja zostanie zdominowana przez zbyt skomplikowane osobniki na wczesnym etapie ewolucji, zamiast tego ewolucja jest bardziej nakierowana na znajdowanie coraz lepszego rozwiązania wraz ze wzrostem stopnia skomplikowania modelu. Analogię można odnaleźć w naturze, w pewnym momencie na Ziemi dinozaury były najlepiej przystosowanymi do życia na tej planecie organizmami - lokalne maksimum i blokowały powstawanie mniej skomplikowanych form życia, jednak jak pokazuje historia, po wyginięciu dinozaurów, te były w stanie stać się jeszcze lepiej przystosowanymi istotami.

Większa złożoność każdego modelu przekłada się także na dłuższe obliczanie metryk dla niego, przez co znalezienie ostatecznego rozwiązania zajmuje więcej czasu.

Kolejną zaletą jest to, że złożoność korzysta z istniejących już obliczeń, przez co nie zwiększa w istotny sposób czasu każdej iteracji algorytmu, co dodatkowo pozwala na łatwiejsze porównanie działania algorytmu z i bez tej metryki.

### 2.4.3. Metryki - szczegóły

#### 2.4.3.1. Prostota

Jest to najprostsza z metryk. Celem jest zmniejszenie skomplikowania modelu. Głównym czynnikiem na to wpływającym jest ilość aktywności w modelu. Idealna byłaby sytuacja, w której model ma tyle samo aktywności, ile unikalnych aktywności jest w dzienniku zdarzeń. To nie zawsze jest możliwe, jednak chcąc otrzymać maksymalnie czytelny model, powinniśmy do tego dążyć. Stąd też metryk wybrana skupia się na dwóch czynnikach, czyli ilości duplikatów w modelu i ilości brakujących wartości



w modelu. Oczywiście znaczenie ma wielkość modelu, dlatego wartości tego musimy odnieść do ilości wszystkich zdarzeń w logu i modelu. Metrykę zapożyczono z [37] i ostatecznie wyrażono wzorem:

$$M_{pro} = 1 - \frac{\text{ilosc duplikatow w modelu} + \text{ilosc brakujacych zdarzen w modelu}}{\text{ilosc unikalnych zdarzen w logu} + \text{ilosc zdarzen w modelu}}$$

#### 2.4.3.2. Odwzorowanie

Jest to najbardziej kosztowna obliczeniowo metryka. Pozostałe metryki obliczane są na podstawie informacji uzyskanych podczas jej obliczania. Ważne jest, żeby obliczać dopasowanie częściowo dla każdej aktywności, a nie całego wariantu procesu, co sprawi, że metryka będzie bardziej wrażliwa na zmiany. Możliwe jest zastosowanie prostej zero-jedynkowej metryki do obliczania, która weryfikowałaby czy model całkowicie zgadza się z wariantem logu, jednak co jest szczególnie niekorzystne w przypadku algorytmu genetycznego, nie byłoby sprawdzane, o ile bliżej jesteśmy do celu, dopóki losowo niezaleziony zostałby model idealnie pasujący do wariantu. Metrykę oparto o [38], jednak przy procesie z wieloma aktywnościami, najczęściej części aktywności może zostać dopasowana, co sprawi, że łączny błąd będzie niewielki, dlatego wprowadzono modyfikację i podniesiono otrzymany wynik do potęgi 4, żeby zrobić metrykę bardziej wrażliwą na zmiany. Ostatecznie metrykę wyrażono wzorem:

$$M_o = (1 - \text{blad\_odwzorowania})^4$$

$$\text{blad\_odwzorowania} = \frac{\sum_{\text{ilosc procesow w logu}} \frac{\text{blad odwzorowania logu w modelu}}{\text{minimalna dugosc najlepszej sciezki w modelu} + \text{dugosc sciezki w logu}}}{\text{ilosc zdarzen w logu}}$$

#### 2.4.3.3. Precyzja

Pozwala na unikanie niewystarczającego dopasowania (*eng. underfitting*). Celem jest uniknięcie tworzenia modeli, według których możliwe są praktycznie dowolne zachowania. Możliwe jest osiągnięcie maksymalnej wartości pozostałych metryk, tworząc jednak bramkę LUB - OR zawierającą wszystkie aktywności, jednak oczywiste jest, że nie jest to pożądany model. We wzorze skupiono się na ilości osiągalnych zdarzeń następujących po danej aktywności, możliwych w modelu. Chcemy, żeby poszczególne aktywności mogły poprzedzać tylko te, które rzeczywiście poprzedzają w logu. Metrykę oparto o [39], jednak otrzymany wynik podniesiono do potęgi  $\frac{1}{3}$ , bo oryginalna metryka jest zbyt wrażliwa na zmiany, przez co jest nieproporcjonalna do innych, co zwiększa prawdopodobieństwo utknięcia w lokalnym maksimum, gdzie każda mała zmiana w modelu będzie powodować ogromną zmianę w metryce. Ostatecznie wyrażono ją wzorem:

$$M_{pre} = (1 - \sum_{\text{zdarzenia w modelu}} \frac{\text{ilosc osiagalnych zdarzen w modelu} - \text{ilosc osiagalnych zdarzen w logu}}{\text{ilosc osiagalnych zdarzen w modelu}})^{\frac{1}{3}}$$

#### 2.4.3.4. Generalizacja

Pozwala na unikanie nadmiernego dopasowania (*eng. overfitting*). W pierwszej chwili może wydawać się przeciwieństwem precyzji, jednak chodzi tutaj o uwzględnienie brakujących w dzienniku zdarzeń wariantów, a nie o rozszerzenie modelu o nowe, zupełnie niezwiązane z istniejącymi. Dobrą wizualizacją jej działania jest operacja domknięcia znana z dziedziny przetwarzania obrazów cyfrowych. Generalizację można zmierzyć poprzez obliczenie średniej ważonej liczby przejść w modelu przez dane zdarzenie,

dzięki czemu wciąż uwzględniane są ścieżki, które są często odwiedzane w innych wariantach, mimo że pozwalają na zachowanie niewidoczne w dzienniku zdarzeń, a jednocześnie karane jest istnienie ścieżek, które zupełnie nie pokrywają się z żadnymi wariantami. Wraz ze zwiększaniem ilości wykonań danej aktywności wzrasta pewność, że ścieżki ją uwzględniające faktycznie istnieją i ta informacja staje się mniej cenna, dlatego wzięto pierwiastek z liczby wystąpień danego zdarzenia. Metrykę zapożyczono z [37] i ostatecznie wyrażono wzorem:

$$M_g = 1 - \frac{\sum_{\text{zdarzenia w modelu}} \frac{1}{\sqrt{\text{ilosc wystapien zdarzenia}}}}{\text{ilosc zdarzen w logu}}$$

#### 2.4.3.5. Złożoność

Metryka jest powiązana z odwzorowaniem. Jeśli odwzorowanie rośnie, pozwalamy na tworzenie bardziej skomplikowanego modelu. Złożoność jest wyrażana jako ilość wszystkich możliwych ścieżek w modelu. W przypadku pętli złożoność byłaby nieskończona, dlatego przyjęto, że pętla oznacza maksymalnie dwukrotne wykonanie pętli. Jako że np. dla bramki AND jest to  $n!$ , zauważamy, że złożoność rośnie niewspółmiernie szybciej do odwzorowania, dlatego we wzorze wzięto pierwiastek ze złożoności. Ostatecznie metrykę wyrażono wzorem:

$$M_z = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \text{blad\_odwzorowania} * \sqrt{\text{zlozonosc modelu}}}}$$

#### 2.4.4. Obliczanie metryk

W sekcji 2.2.3 przedstawiono przykład dziennika zdarzeń i warianty procesu uzyskane z niego. Poniżej przedstawiono, jak mógłby wyglądać model tego procesu - na czerwono zaznaczono ilość wykonań danej aktywności - oraz zademonstrowano obliczanie metryk:



Rys. 2.10. Model, dla którego obliczane są metryki

##### 2.4.4.1. Obliczanie prostoty

Model posiada jeden duplikat - **b** oraz jedno brakujące zdarzenie - **f**, więc wartość metryki wynosi:

$$M_{pro} = 1 - \frac{1+1}{6+6} = 0.8333$$

##### 2.4.4.2. Obliczanie odwzorowania

Są trzy możliwości na niezgodność modelu z logiem - brak zdarzenia w modelu, brak zdarzenia w logu lub zdarzenie w logu różne od zdarzenia w modelu, co może być utożsamiane z brakiem zdarzenia

w logu i modelu, dlatego w takim przypadku błąd wynosi 2, a w pozostałych 1. W powyższym przykładzie nieprawidłowe odwzorowanie zachodzi tylko dla jednego wariantu, co można przedstawić na kilka sposobów, jednak nie ma to znaczenia i błąd zawsze wynosi 3:

Ścieżka w modelu	a	b	e	d
Ścieżka w logu	a	f		d

Ścieżka w modelu	a		b	e	d
Ścieżka w logu	a	f			d

**Rys. 2.11.** Nieprawidłowe odwzorowanie

Dla pozostałych wariantów odwzorowanie jest pełne i błąd wynosi 0:

Ścieżka w modelu	a	b	c	e	d
Ścieżka w logu	a	b	c	e	d

**Rys. 2.12.** Prawidłowe odwzorowanie

Podstawiając wszystkie odwzorowania do wzoru:

$$blad\_odwzorowania = \frac{2 * \frac{0}{5+5} + \frac{0}{4+4} + \frac{0}{5+5} + \frac{3}{4+3}}{22} = 0.0195$$

$$M_o = (1 - 0.0195)^4 = 0.9243$$

#### 2.4.4.3. Obliczanie precyzji

Potrzebna jest ilość osiągalnych kolejnych zdarzeń dla danej aktywności. Zależy ona od kontekstu, w jakim dana aktywność jest wykonywana np. dla bramki I - AND można jako kolejne wykonać tyle aktywności, ile nie zostało do tej pory wykonanych w tej bramce, z wyjątkiem ostatniej i gdzie przechodzimy do kolejnych aktywności spoza bramki. Dla demonstrowanego przykładu wygląda to następująco:

Poprzedzające zdarzenia	Zdarzenia w logu	Ilość zdarzeń w logu	Zdarzenia w modelu	Ilość zdarzeń w modelu
[]	['a']	1	['a']	1
['a']	['b', 'c']	2	['b', 'c']	2
['a', 'b']	['c']	1	['c']	1
['a', 'b', 'c']	['b']	1	['b', 'e', 'd']	3
['a', 'b', 'c', 'b']	['d']	1	['e', 'd']	2
['a', 'b', 'c', 'b', 'd']	['koniec']	1	['koniec']	1
['a', 'c']	['b']	1	['b']	1
['a', 'c', 'b']	['d', 'e']	2	['b', 'd', 'e']	3
['a', 'c', 'b', 'd']	['koniec']	1	['koniec']	1
['a', 'c', 'b', 'e']	['d']	1	['b', 'd']	2
['a', 'c', 'b', 'e', 'd']	['koniec']	1	['koniec']	1

**Rys. 2.13.** Kolejne zdarzenia

Podstawiając te dane do wzoru:

$$M_{pre} = (1 - (\frac{1-1}{1} + \frac{2-2}{2} + \frac{1-1}{1} + \frac{3-1}{3} + \frac{2-1}{2} + \frac{1-1}{1} + \frac{1-1}{1} + \frac{3-2}{3} + \frac{1-1}{1} + \frac{2-1}{2} + \frac{1-1}{1}))^{\frac{1}{3}} = 0.9465$$

#### 2.4.4.4. Obliczanie generalizacji

Słabością tej metryki jest to, że wpływa na nią rozmiar dziennika zdarzeń. Jeśli ilość rekordów jest mała, jak w powyższym przykładzie, to generalizacja będzie słaba. Starając się znaleźć najlepszy model

dla danego dziennika zdarzeń, on pozostaje stały, więc nie wpływa to na prawidłowość rozwiązania. W tym przypadku:

$$M_g = 1 - \frac{(\frac{1}{\sqrt{5}} + \frac{1}{\sqrt{4}} + \frac{1}{\sqrt{4}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{1}} + \frac{1}{\sqrt{5}})}{6} = 0.3997$$

#### 2.4.4.5. Obliczanie złożoności

Najpierw obliczana jest złożoność dla poszczególnych bramek, co jest konieczne na wcześniejszym etapie działania algorytmu, a następnie te wartości są podstawiane do wzoru wraz z błędem dopasowania obliczonym w sekcji ??:

$$zlozonosc\_dla\_bramki\_AND = 2! = 2$$

$$zlozonosc\_dla\_bramki\_OR = 2! * \frac{2!}{(2! * (2-2)!)} + 1! * \frac{2!}{(1! * (2-1)!)} + 0! * \frac{2!}{(0! * (2-0)!)} = 2 + 2 + 1 = 5$$

$$zlozonosc = 1 * 2 * 5 * 1 = 10$$

$$M_z = 1 - \frac{1}{\sqrt{1+0.0195 * \sqrt{10}}} = 0.9706$$

## 3. Projekt i implementacja

### 3.1. Wykorzystane technologie

#### 3.1.1. Python 3.8.1

Do implementacji algorytmu został użyty Python. Jest to najpopularniejszy język programowania w dziedzinie uczenia maszynowego. Wymagana jest wersja 3.8 lub wyższa ze względu na użycie w implementacji metod dostępnych od tej wersji.

#### 3.1.2. PonyGE2

PonyGE2 [40] jest implementacją ewolucji genetycznej w języku Python. Pozwala na łatwą konfigurację parametrów ewolucji genetycznej oraz możliwość dodania własnych problemów, a także sposobów ewaluacji rozwiązań. Niestety, PonyGE2 nie jest przystosowane do bycia dołączaną jako niezależna biblioteka i nie umożliwia dostępu poprzez wygodny interfejs.



Rys. 3.1. Ogólny schemat działania PonyGE2

### 3.2. Tworzenie gramatyki procesu biznesowego

Projektując gramatykę procesu biznesowego, przyjęto dwa początkowe założenia. Uznano, że generowane modele muszą być łatwe do przełożenia na notację BPMN oraz nie powinny być tworzone

modele niespójne strukturalnie, co pozwala na zredukowanie przestrzeni rozwiązań, jednocześnie gwarantując tworzenie niegenerujących błędów modeli.

Przy tworzeniu gramatyki procesu biznesowego ważne jest, żeby znaleźć balans, jeśli chodzi o poziom skomplikowania modelu, jaki będzie możliwy do wygenerowania, używając zaproponowanej gramatyki. W pracy [41] przeanalizowano składniki języka BPMN pod kątem częstotliwości ich stosowania. Najczęściej używanymi elementami modeli procesu biznesowego, jeśli chodzi o bramki, są: XOR - ALBO kodowane w proponowanej gramatyce jako xor, AND - I jako and oraz pętle jako lo<0\_n>. Do przedstawionej dalej gramatyki dodano także bramki OR - LUB reprezentowane jako opt. Ponadto konieczne jest użycie symbolu seq, która oznacza, że aktywności następują kolejno po sobie.

Zgodnie z zaleceniami w sekcji 2.2.1 przyjmuje się, że dobrą praktyką jest, żeby model zawierał tylko jedno zdarzenie początkowe i końcowe. Z tego powodu przyjęto, że zdarzenia te są domyślnie odpowiednio na początku i końcu wygenerowanego słowa i nie są one jawnie reprezentowane w gramatyce.

W sekcji 2.3.5 opisano problemem ewolucji gramatyki dla metod opartych o krzyżowanie i mutację punktową lub n-punktową, dlatego zdecydowano się na stworzenie gramatyki pod kątem wersji tych operatorów używających fenotypu - drzewa. Lokalne przeszukiwanie często staje się słabym punktem algorytmów ewolucyjnych. Stosując wspomniane operatory, prawdopodobna jest sytuacja, że mała modyfikacja blisko korzenia może poprawić rozwiązanie, jednak jej zaistnienie wymaga wygenerowania identycznego poddrzewa na nowo, przez co prawdopodobieństwo zaistnienia takiej sytuacji jest niskie. Do rozwiązania tego problemu mogą służyć metody inspirowane algorytmami memetycznymi, a działające na drzewach [42]. Dają one możliwość aplikowania lokalnych zmian bez konieczności powtórnego generowania całego poddrzewa, co pozwala na usprawnienie procesu ewolucji. Niestety, użyta biblioteka nie posiada podobnych metod lokalnej optymalizacji. Żeby w pewnym stopniu zaradzić temu problemowi, zmniejszono głębokość potrzebnego do reprezentacji modelu drzewa, jednocześnie zwiększając szanse na lokalne mutacje poprzez wprowadzenie symbolu nieterminalnego <slots>. Sprawia to, że drzewo rośnie bardziej wszczepnie i oprócz jednego symbolu <anygate>, którego użycie ma zapewnić tworzenie poprawnych, niepustych rozwiązań, generowane są symbole <slot>, które mogą pozostać puste lub wygenerować symbol <anygate> z 10% prawdopodobieństwem. Przekłada się to na większą ilość lokalnych zmian na późniejszych etapach ewolucji. Lokalne przeszukiwanie wspomaga także poprzez reprezentowanie bramki jako dwa odrębne symbole - <name>(<slots>). Dzięki temu w wyprowadzeniu nazwa bramki <name> jest oddzielona od jej zawartości, co sprawia, że możliwa jest zmiana nazwy bramki bez modyfikacji jej wnętrza.

Zaadresowano również konieczność odwzorowania w gramatyce częstotliwości występowania poszczególnych bramek logicznych. Zgodnie z [41] połączenia i bramki XOR - ALBO, AND - I są tworzone przez większą ilość produkcji niż rzadziej występujące pętle i bramki OR - LUB.

Zapis GE\_RANGE:n jest rozszerzeniem notacji zapewnianym przez PonyGE2, które umożliwia dodanie wygodne dodanie n zmiennych, czyli GE\_RANGE:2 w BNF oznacza 0|1|2. Podobny jest zapis

GE\_RANGE:dataset\_vars, który umożliwia dodanie ilości zmiennych odpowiadającej ich ilości w zbiorze danych w tym wypadku w liczbie aktywności w dzienniku zdarzeń. Został on dodany, dzięki rozszerzeniu standardowego, zapewnianego przez PonyGE2 parsera gramatyki.

Wszystkie bramki mają nazwy tej samej długości - 3 znaki, co ułatwia parsowanie gramatyki. Symbol startowy to <e>.

```
<e> ::= <slot><slot><anygate><slot><slot>

<anygate> ::= <anygate><anygate> | <name>(<slots>) | {<event>}

<slot> ::= <anygate> | ' ' | ' ' | ' ' | ' ' | ' ' | ' ' | ' ' | ' ' | ' '

<slots> ::= <slot><slot><anygate><slot><slot>

<name> ::= and | xor | seq | and | xor | seq | and | xor | seq |
          and | xor | seq | and | xor | seq | lo<0_n> | lo<0_n> | opt

<event> ::= GE_RANGE:dataset_vars

<0_n> ::= GE_RANGE:5
```

**Listing 3.1.** Proponowana gramatyka procesu biznesowego

Model, dla którego zaprezentowanie obliczanie metryk (rys. 2.10) byłby za pomocą powyższej notacji zakodowany jako:

$$(\{a\}and(\{b\}\{c\})opt(\{b\}\{e\}))\{d\}$$

Zapis lo<0\_n> jest nieoczywisty, jednak konieczny do reprezentacji pętli, które mogą być przerywane na innej aktywności, niż kończy się ich pojedyncza iteracja. Poniższy przykład pokazuje model, który ciężko opisać przy pomocy podstawowych bramek logicznych:



**Rys. 3.2.** Przykład problemu z pętlą

Jest to możliwe za pomocą słowa - lop oznacza pętlę:

$$\{a\}and(\{b\}\{c\})\{d\}lop(\{e\}and(\{b\}\{c\})\{d\})xor(\{f\}\{g\})$$

Użycie powyższego zapisu jest poprawne, jednak kodowanie pętli w ten sposób sprawia, że powstałe słowo jest skomplikowane, a jego wyewoluowanie mało prawdopodobnie. Problem ten rozwiązano, używając zapisu lo<0\_n>, gdzie <0\_n> oznacza, ile znaków ma być pominięte w pierwszej iteracji pętli,

dzięki czemu możliwe jest zakodowanie takiej pętli przy użyciu znacznie mniejszej liczby symboli, co ułatwia wyewoluowanie takiego modelu. Ten sam model opisany za pomocą stworzonej gramatyki wygląda następująco:

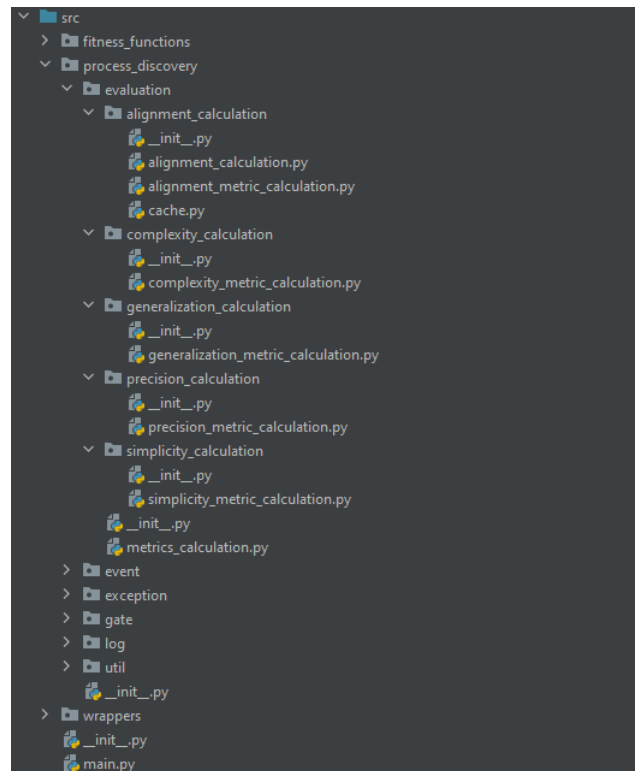
$$\{a\}lo1(\{e\}and(\{b\}\{c\})\{d\})xor(\{f\}\{g\})$$

### 3.3. Projekt systemu

#### 3.3.1. Podział na moduły

Implementację podzielono na następujące moduły:

- wrappers - PonyGE2 nie jest przystosowane do zaimportowania jako biblioteka, dlatego, żeby oddzielić kod PonyGE2 od logiki odkrywania procesów biznesowych, w tym module rozszerzono lub nadpisano część z modułów tej biblioteki. Dodano także rozszerzenia do PonyGE2 dodające nowe, brakujące funkcjonalności.
- fitness\_functions - moduł, w którym znajduje się klasa do obliczania dopasowania, która korzysta z metod w module process\_discovery.
- process\_discovery - moduł zawiera całą logikę parsowania modelu i obliczenia metryk.



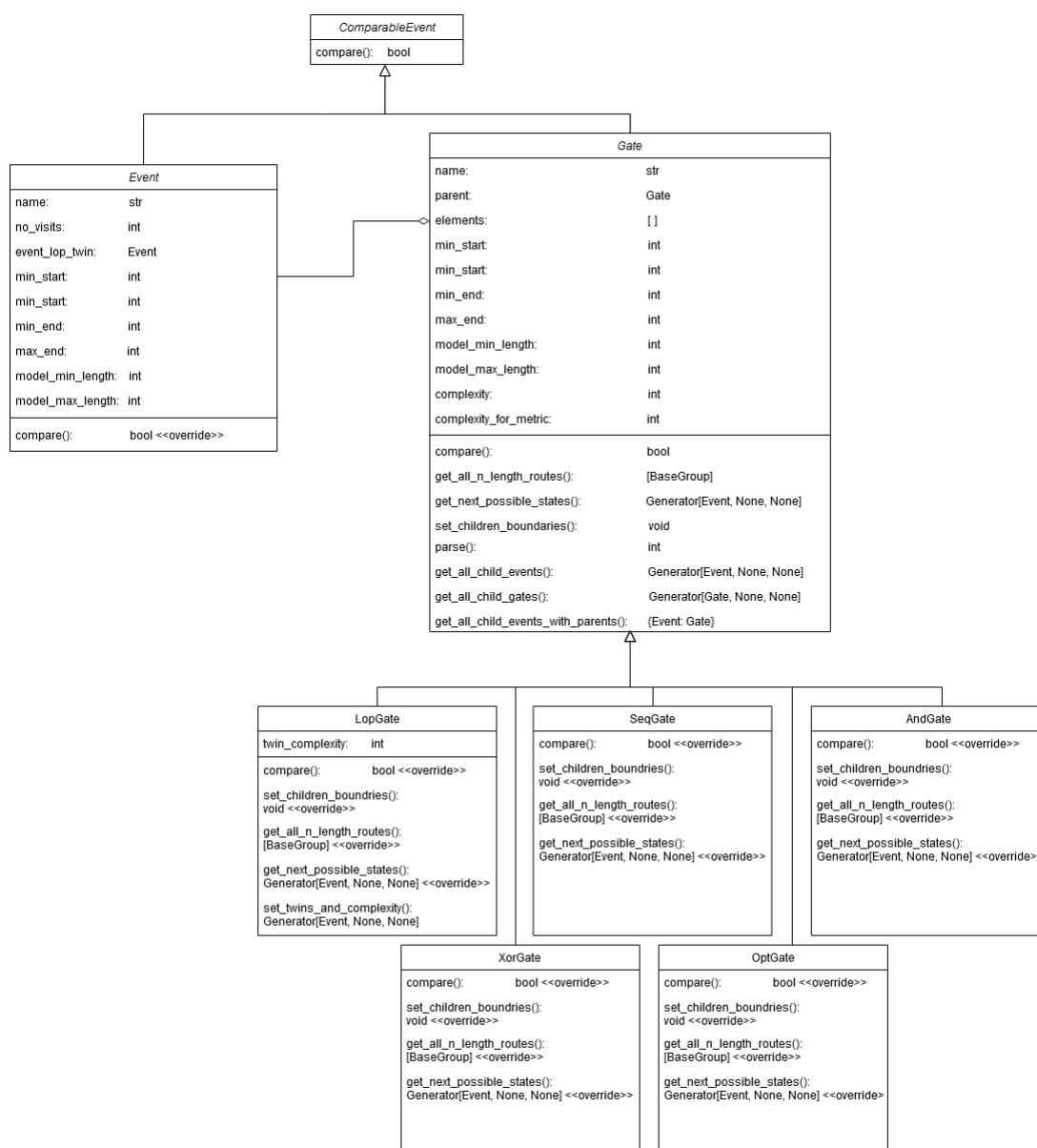
Rys. 3.3. Podział na moduły



### 3.3.2. Model

Zdecydowano się na podział na dwie reprezentacje modelu procesu biznesowego wykorzystywane na różnym etapie procesowania. Wszystkie klasy implementują interfejs ComparableEvent pozwalający na ich porównywanie definiowanych przez nie obiektów. Aktywności są reprezentowane przez obiekty Event, które przechowują także informacje o ilości przejść w modelu przez dane zdarzenie, potrzebną do obliczenia generalizacji.

Klasa Gate i klasy po niej dziedziczące są reprezentacją bliższą realnemu modelowi.



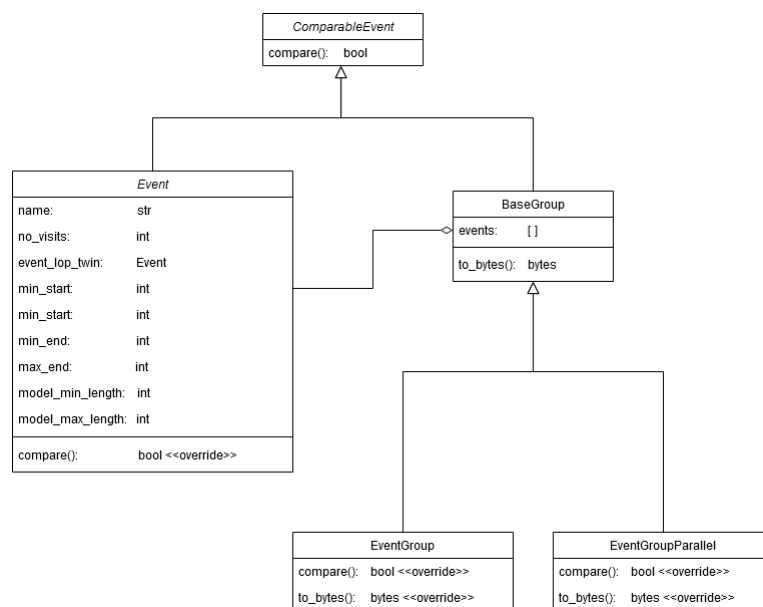
Rys. 3.4. Gate UML

Model w formie ciągu znaków musi być zamieniony na formę, na której łatwiej będzie operować. Zakodowane zgodnie z zasadami gramatyki słowo zostaje sparsowane w metodzie `parse()` klasy **Gate** na

obiekty klas po niej dziedziczących odpowiadające poszczególnym bramką logicznym. Obiekty posiadają wskaźnik na swojego rodzica, czyli bramkę - obiekt Gate, w której się znajdują oraz na bramki lub aktywności - obiekty Event, które zawierają. Przechowują też leniwie obliczaną informację o złożoności. Najważniejsze metody, które klasy dziedziczące po Gate muszą nadpisać to:

- `get_next_possible_states()` - zwraca jako generator możliwe kolejne aktywności, co jest potrzebne przy liczeniu precyzji.
- `get_all_n_length_routes()` - zwraca możliwe ścieżki w modelu o danej długości jako tablicę obiektów `BaseGroup`, co jest potrzebne przy liczeniu odwzorowania

Obliczanie metryk dla klasy Gate byłoby utrudnione z uwagi na dużą ilość bramek logicznych, dlatego konieczne jest przerobienie tych obiektów na uproszczoną formę pośrednią. Są nią obiekty klas dziedziczących po `BaseGroup`, które dzielą się pod względem tego, czy aktywności w nich zgrupowane mogą być wykonywane w dowolnej kolejności - `EventGroupParallel` czy muszą być wykonywane kolejno po sobie - `EventGroup`. Są to wystarczające informacje do obliczenia dopasowania, a dzięki temu algorytmu ten jest prostszy. Takie rozgraniczenie pozwala również na dodawanie nowych bramek logicznych bez konieczności zmiany metody obliczania dopasowania, która jest najbardziej złożonym algorytmem występującym w programie i warto ograniczyć do minimum szansę na konieczność ewentualnych jego modyfikacji.



Rys. 3.5. BaseGroup UML

Pojedyncze aktywności lub ich grupy są przechowywane jako tablica. Jedyna metoda, która musi zostać nadpisana w klasach rozszerzających `BaseGroup` to `to_bytes()` potrzebna przy cachowaniu.

### 3.4. Implementacja

W tej części przedstawiono listingi z pseudokodem opartym na języku Python. Tam, gdzie to konieczne pozostawiono słowa kluczowa oraz operatory tego języka.

#### 3.4.1. Ogólny schemat blokowy



Rys. 3.6. Ogólny schemat blokowy

#### 3.4.2. Parsowanie gramatyki

Parser pozwala na przetworzenie wyników uzyskanych na drodze ewolucji gramatycznej na postać, na której łatwiej będzie operować. Rezultaty uzyskane na drodze ewolucji gramatycznej w PonyGE2 są

w formie tekstowej, z którą praca byłaby niewygodna, dlatego używamy parsera, żeby otrzymać wynik w postaci zagnieżdżonych obiektów Gate, które zawierają obiekty Event.

Metoda należy do obiektu Gate i bezpośrednio modyfikuje obiekt, na którym jest wywoływana. Argumentem metody jest wyrażenie wygenerowane w procesie ewolucji. Zwracana jest natomiast ilość przeparsowanych znaków. To na tym etapie odrzucamy też procesy, które, mimo że gramatyka pozwala na ich stworzenie, nie mają sensu z punktu widzenia biznesowego. Pozwala na ograniczenie zbędnego wykorzystania zasobów i niekontynuowanie obliczeń dla modeli, które są bezwartościowe. Są to na przykład procesy, które pozwalają na posiadanie w jednej bramce dwóch takich samych aktywności. Parsując, korzystamy z faktu, że przy projektowaniu gramatyki wszystkie bramki logiczne zostały oznaczone 3-literowymi symbolami, a wszystkie aktywności otoczone są nawiasami klamrowymi. Pasowanie bramek można podzielić na trzy przypadki:

- Bramki „seq” wewnątrz bramek „lop” lub „seq” są redundantne i mogą zostać pominięte.
- Pętle ze względu na konieczność specjalnego parsowania ze względu na problem opisany w sekcji 3.2.
- Pozostałe przypadki.

```
def parsuj(wyrazenie: str) -> int:

    for i in range(długość_wyrażenia):
        if wyrażenie[i] == "{":
            zdarzenie := Event(wyrażenia[i + 1])
            dodaj_zdarzenie_do_aktualnie_parsowanej_bramki
            i += 2
        elif wyrażenie[i] == ")":
            return i+1
        elif i+4 < długość_wyrażenia:
            if wyrażenie[i:i + 3] == "seq" and
                (self.name == "seq" or self.name == "lop"):
                # pomiń zbędne bramki
                i += 3
                przeparsowane_znaki = bramka.parsuj(wyrazenie[i+4:])
                i += ilość_przeparsowanych_znaków
            else:
                if wyrażenie[i:i+2] == 'lo' and wyrażenie[i:i+3] != 'lop':
                    bramka := stwórz_nową_bramkę_Gate_typu_zgodnego_z_wyrażeniem
                    i += 3
                    przeparsowane_znaki = bramka.parsuj(wyrazenie[i+4:])
                    if self.name == "seq" or self.name == "lop":
                        if int(wyrazenie[i+2]) <= długość(bramka.elementy):
                            for x in bramka.elementy[int(wyrazenie[i+2]):]:
                                self.dodaj_element(x)
                    dodaj_zdarzenie_do_aktualnie_parsowanej_bramki
```

```

        i += ilość_przeparsowanych_znaków
    else:
        bramka := stwórz_nową_bramkę_Gate_typu_zgodnego_z_wyrażeniem
        i += 3
        przeparsowane_znaki = bramka.parsuj(wyrażenie[i+4:])
        dodaj_zdarzenie_do_aktualnie_parsowanej_bramki
        i += ilość_przeparsowanych_znaków
    else:
        wyrzucić_wyjątek

```

Listing 3.2. Parser gramatyki

### 3.4.3. Obliczanie metryk

Argumentami metody są obiekt `LogInfo` zawierający dane i metody dotyczące wariantów, model, czyli obiekt `Gate`, najkrótsza i najdłuższa dozwolona długość modelu obliczane na podstawie parametru podanego w konfiguracji programu, dzięki czemu możliwe jest zmniejszenie ilości obliczeń oraz cache. Zwracana jest natomiast średnia ważona metryk, czyli wartość funkcji dopasowania. Metryką, która nie wymaga czasochłonnego obliczenia dopasowania, jest prostota, dlatego możemy ją obliczyć wcześniej, co przy niskim wyniku pozwala na wstępne odrzucenie części rezultatów. Łatwo można zauważyć, że jeżeli zdarzenie znajduje się w logu, a nie znajduje się w modelu, dopasowanie nie będzie dobre. Pozwala to przerwać obliczenia, jeżeli stosunek wspólnych zdarzeń w logu i modelu jest mniejszy niż skonfigurowany parametr. Pozostałe metryki wymagają już obliczenia odwzorowania i są obliczane dla najlepiej dopasowanej gramatyki.

Odwzorowanie obliczane jest osobno dla każdego wariantu w logu, który jest reprezentowany jako tablica znaków. Jeśli błąd dopasowania wynosi 0, to ilość wystąpień danego wariantu konieczna do obliczenia precyzji jest zapisywany w słowniku. Dodawana do każdej aktywności jest też ilość jej dotychczasowych wystąpień potrzebna we wzorze na generalizację.

Po uzyskaniu tych informacji dla wszystkich wariantów obliczamy średnią ważoną metryk zgodnie ze wzorami w sekcji 2.4.3 i uzyskujemy w ten sposób wartość funkcji dopasowania.

```

def oblicz_metryki(log_info, model, najkrótsza_dozwolona_długość,
                  najdłuższa_dozwolona_długość, cache) -> int:

    lista_zdarzeń_w_modelu = model.zwróć_listę_zdarzeń_w_modelu()
    metryki['PROSTOTA'] := oblicz_metrykę_prostota(lista_zdarzeń_w_modelu,
                                                  unikalne_zdarzenia_w_logu)

    if metryki['PROSTOTA'] < MINIMALNY_PRÓG_PROSOTY:
        return 0
    stosunek_wspólnych_zdarzeń_w_logu_i_modelu :=
        oblicz_stosunek_wspólnych_zdarzeń_w_logu_i_modelu(lista_zdarzeń_w_modelu,
                                                         unikalne_zdarzenia_w_logu)

    if stosunek_wspólnych_zdarzeń_w_logu_i_modelu <
        MINIMALNY_STOSUNEK_WSPÓLNYCH_ZDARZEŃ_W_LOGU_I_MODELU:

```

```
    return stosunek_wspólnych_zdarzeń_w_logu_i_modelu/10

idealnie_dopasowane_logi := pusty_słownik
skumulowany_błąd := 0

for wariant in log:
    minimalny_błąd_dopasowania, najlepiej_dopasowane_zdarzenia, najlepsza_ścieżka :=
        oblicz_dopasowanie_dla_jednego_wariantu(wariant, model,
                                                najkrótsza_dozwolona_długość,
                                                najdłuższa_dozwolona_długość, cache)

    if minimalny_błąd_dopasowania == 0:
        idealnie_dopasowane_logi[najlepiej_dopasowane_zdarzenia] :=
            log_info[wariant].ilość_wystąpień
        dodaj_wystąpienia(lista_zdarzeń_w_modelu, najlepiej_dopasowane_zdarzenia,
                        log_info[wariant].ilość_wystąpień)

metryki := oblicz_metryki
fitness := oblicz_średnia_ważona_metryk
return fitness
```

**Listing 3.3.** Obliczanie metryk

#### 3.4.4. Obliczanie dopasowania dla pojedynczego wariantu

Procedurę obliczenia dopasowania można podzielić następująco:

- Znalezienie ścieżek o długości **n** w modelu.
- Przerobienie ścieżek na postać BaseGroup.
- Obliczenie dopasowania.

Argumentami metody są wariant, model, najkrótsza i najdłuższa dozwolona długość modelu oraz cache. Zwracane są natomiast minimalny błąd dopasowania jako liczba całkowita niedodatnia, najlepiej dopasowane zdarzenia jako tablica obiektów Event oraz najlepsza ścieżka jako obiekt BaseGroup.

Algorytm obliczania dopasowania wymaga ścieżek o stałej, określonej długości. Ważne jest, żeby jak najbardziej ograniczyć czas potrzebny na znalezienie najlepszej ścieżki, dlatego obliczanie dopasowania rozpoczynamy o **n** równego długości wariantu. Jeśli **n** jest różne od długości ścieżki, błąd dopasowania zawsze będzie równy przynajmniej różnicy tych wartości. Jednak wciąż może być lepszy niż aktualnie najmniejszy, więc obliczamy dopasowanie kolejno dla ścieżek o długości **n-1**, **n+1**, **n-2**, **n+2**... aż do momentu, dopóki jest możliwe uzyskanie mniejszego błędu lub zostanie osiągnięty limit, do którego w konfiguracji zezwolono na szukanie.

Następnie obliczane jest najwcześniejsze i najpóźniejsze wystąpienie danej aktywności w modelu, co ułatwi dalsze obliczenia. W kolejnym kroku znajdowane są wszystkie ścieżki o długości **n** w modelu

i są one sortowane względem procentu wspólnych zdarzeń w modelu i logu. Możemy z tego wywnioskować jakie najlepsze dopasowanie można otrzymać dla danej ścieżki i ewentualnie jeśli przekroczona jest dopuszczalna tolerancja błędu dopasowania lub nie jest możliwe już zmniejszenie błędu przerwanie obliczeń dla niej.

W końcu zgodnie z kolejnością po sortowaniu obliczane jest dopasowanie i jeśli błąd jest mniejszy niż aktualnie najmniejszy, zamieniane są wartości minimalnego błędu dopasowania, najlepiej dopasowane zdarzenia i najlepsza ścieżka, a jeśli błąd wynosi 0, algorytm jest przerywany i te wartości są zwracane.

```
def oblicz_dopasowanie_dla_jednego_wariantu(wariant, model,
                                           najkrótsza_dozwolona_długość,
                                           najdłuższa_dozwolona_długość, cache):
    długość_wariantu := oblicz_długość(wariantu)
    n := długość_wariantu
    i := 1
    minimalny_błąd_dopasowania := -(długość_wariantu + model.minimalna_długość)
    najlepiej_dopasowane_zdarzenia := []
    najlepsza_ścieżka := []
    dolny_limit_osiagnięty := False
    górny_limit_osiagnięty := False

    while not (dolny_limit_osiagnięty and górny_limit_osiagnięty):
        if n >= min(oblicz_maksymalna_dozwolona_długość(długość_procesu),
                   długość_procesu - minimalny_błąd_dopasowania):
            górny_limit_osiagnięty := True
            n += (-i if i % 2 == 1 else i); i += 1
            continue
        if n <= max(oblicz_minimalna_dozwolona_długość(długość_wariantu),
                   długość_wariantu + minimalny_błąd_dopasowania):
            dolny_limit_osiagnięty := True
            n += (-i if i % 2 == 1 else i); i += 1
            continue

    if najkrótsza_dozwolona_długość <= n <= najdłuższa_dozwolona_długość:
        ustaw_najwcześniejsze_i_najpóźniejsze_wystąpienie_zdarzenia(model, n)
        ścieżki = model.znajdź_wszystkie_ścieżki_długości_n(n, wariant)
        if ścieżki istnieją:
            for ścieżka in ścieżki:
                procent_wspólnych_zdarzeń := oblicz_procent_wspólnych_zdarzeń_
                                              w_modelu_i_logu(ścieżka, wariant)
                if procent_wspólnych_zdarzeń >= 1 - TOLERANCJA_BŁĘDU_DOPASOWANIA:
                    dodaj_ścieżkę_do_listy_ścieżek_do_obliczenia
            posortowane_ścieżki := posortuj_listę_ścieżek_do_obliczenia
            for ścieżka in posortowane_ścieżki:
                if procent_wspólnych_zdarzeń <= 1 + minimalny_błąd_dopasowania /
                   długość_wariantu:
```

```

        break
    błąd_dopasowania, najlepiej_dopasowane_zdarzenia :=
    oblicz_dopasowanie(ścieżka, wariant, cache)
    if błąd_dopasowania > minimalny_błąd_dopasowania:
        minimalny_błąd_dopasowania := błąd_dopasowania
        najlepiej_dopasowane_zdarzenia := dopasowane_zdarzenia
        najlepsza_ścieżka := ścieżka
    if błąd_dopasowania == 0:
        return minimalny_błąd_dopasowania, najlepiej_dopasowane_
            zdarzenia, najlepsza_ścieżka
    n += (-i if i % 2 == 1 else i); i += 1
return minimalny_błąd_dopasowania, najlepiej_dopasowane_zdarzenia,
    najlepsza_ścieżka

```

**Listing 3.4.** Obliczanie dopasowania dla jednego wariantu

### 3.4.5. Wyszukiwanie w modelu ścieżek o określonej długości

Łatwiejszym niż obliczenie dopasowania dla modelu składającego się z bramek logicznych jest znalezienie najpierw w modelu wszystkich ścieżek o określonej długości. Algorytm służący do tego jest kolejno wywoływane dla wszystkich bramek - podmodeli, a następnie na podstawie ścieżek znalezionych w podmodelach są tworzone ścieżki dla całego modelu. Implementacja różni się w zależności od przeszukiwanej bramki logicznej. Poniżej zaprezentowano przykład dla bramki „and”.

Argumentami metody długość szukanej ścieżki oraz wariant jako tablica znaków potrzebny wyszukiwanie ścieżek dla obiektu `LopGate`. Zwracana jest natomiast lista wszystkich ścieżek o określonej długości jako obiekty `BaseGroup`, a w przypadku błędu `None`.

Bramki mogą zawierać różną ilość elementów, dlatego należy obliczyć minimalne i maksymalne długości, czyli ilość zdarzeń dla wszystkich dzieci. Jeśli dziecko jest obiektem `Event`, wtedy dodawane jest bezpośrednio do listy rezultatów. W innym wypadku, kiedy jest obiektem `Gate`, na podstawie długości dzieci obliczany jest dolny i górny limit długości, dla jakich zostanie dla danego elementu wywołana metoda `znajdź_wszystkie_ścieżki_długości_n`. Dzięki temu może znacznie ograniczyć ilość długości, dla jakich trzeba przeszukiwać podmodele. Wszystkie znalezione ścieżki są dodawane do listy, a całość do globalnej listy.

Rezultat nie może być jednak zagnieżdżoną listą, więc musi ona zostać przerobiony na listę jednowymiarową rozwiązań. Każda lista składa się 2-wymiarowej listy ścieżek dla każdego elementów modelu. Ścieżki każdego podmodelu są łączone ze ścieżkami kolejnych podmodeli każda z każdą, żeby utworzyć możliwe przejścia dla całego modelu. Celem jest znalezienie tylko tych o długości **n**, więc pozostałe odrzucamy. Na końcu, jako że jest to bramka „and” wszystkie ścieżki o długości większej niż 1 są opakowywane w `EventGroupParallel`, żeby zachować informacje o tym, że zdarzenia mogą być wykonywane w dowolnej kolejności.



```

def znajdź_wszystkie_ścieżki_długości_n(n, wariant) -> [BaseGroup]:
    if n == 0:
        return []
    if self.minimalna_długość_modelu < n or n < self.maksymalna_długość_modelu:
        return None

    minimalne_długości := self.oblicz_minimalne_długości_dzieci()
    maksymalne_długości := self.oblicz_maksymalne_długości_dzieci()
    globalna_lista := []

    for element in self.elementy:
        lokalna_lista := []
        if isinstance(element, Event):
            lokalna_lista.dodaj(elem)
            minimalne_długości.usuń_na_pozycji(0)
            maksymalne_długości.usuń_na_pozycji(0)
        else:
            dolny_limit, górny_limit :=
                self.oblicz_docelowy_zakres(n, globalna_lista, minimalne_długości,
                                            maksymalne_długości)
            for i in range(dolny_limit, górny_limit + 1):
                try:
                    wszystkie_ścieżki_dziecka_o_długości_n :=
                        element.znajdź_wszystkie_ścieżki_długości_n(i, wariant)
                except ValueError:
                    return None
                if wszystkie_ścieżki_dziecka_o_długości_n is not None:
                    lokalna_lista.dodaj(wszystkie_ścieżki_dziecka_o_długości_n)

            if lokalna_lista:
                globalna_lista.dodaj(lokalna_lista)

    ścieżki = []
    if globalna_lista:
        for element in spłaszcz_listę(globalna_lista):
            if self.sprawdź_długość(n, elem):
                if n == 1:
                    ścieżki.dodaj(element[0])
                else:
                    ścieżki.dodaj(EventGroupParallel(element))
    if ścieżki:
        return ścieżki
    else:
        return None

```

**Listing 3.5.** Wyszukiwanie procesów o długości n

### 3.4.6. Obliczanie dopasowania

Pomysł zaczerpnięty z algorytmu Needleman-Wunsch [43], który jest uogólnieniem odległości Levenshteina dla dowolnych wartości błędów. Tworzymy macierz o wymiarach długość modelu i długość logu, w której obliczana jest najmniejsza suma błędów. Rozwinięty o możliwość przeszukiwania modelu rekurencyjnie oraz o możliwość podawania listy równoległych zdarzeń.

Podstawowy algorytm można opisać za pomocą czterech kroków dla każdego zdarzenia:

1. Oblicz wartość w poprzednim wierszu i kolumnie dodać błąd „dopasowanie” lub „brak dopasowania”.
2. Oblicz wartość w poprzednim wierszu dodać błąd „przerwa”.
3. Oblicz wartość w poprzedniej kolumnie dodać błąd „przerwa”.
4. Wybierz najmniejszą wartość.

		C	B	A	G	D	C
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
A	-1	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗
B	-2	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗
C	-3	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗
D	-4	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗
E	-5	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗
F	-6	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗	↖ ↗

Rys. 3.7. Klasyczny algorytm Needleman-Wunsch

Argumentami metody model jako obiekt Gate oraz wariant jako tablica znaków. Zwracane są natomiast ostatni wiersz, który zawiera błąd dopasowania modelu oraz pośrednie błędy dla wszystkich zawsze zaczynając od pierwszego zdarzenia możliwych długości wariantu, co jest potrzebne, jeśli model zawiera podmodele oraz najlepiej dopasowana ścieżka. Metoda opakowana jest w metodę, która jeśli dla danego modelu i wariantu zostało już obliczone dopasowanie, zwraca rozwiązanie z cache bez powtarzania obliczeń.

Zgodnie z ?? brakujące zdarzenie to błąd wynosi 1, a jeśli się nie zgadzają - 2. Stworzona macierz jest inicjalizowana zerami, a następnie pierwsza kolumna jest wypełniana stosownymi wartościami błędu. Są

trzy opcja normalne obliczenie zgodne z klasycznym algorytmem, a także sytuacja, w której model zawiera podmodele, gdzie algorytm jest powtórnie wywoływany dla podmodelu i dla wszystkich zawsze zaczynając od pierwszego zdarzenia możliwych długości wariantu lub gdy zawiera zdarzenia równoległe - EventGroupParallel wtedy stosujemy inny algorytm, który bezpośrednio porównuje wszystkie zdarzenia w wariacie ze zdarzeniami w obiekcie EventGroupParallel.

```
def oblicz_dopasowanie(model, wariant):
    bład := {'DOPASOWANIE': 0, 'BRAK_DOPASOWANIA': -2, 'PRZERWA': -1}
    ilość_wierszy = długość(model) + 1
    ilość_kolumn = długość(wariant) + 1
    najlepiej_dopasowane_ścieżki_podmodeli := [None] * ilość_wierszy
    macierz_rozwiązań := zainicjalizuj_macierz_zerami()

    for j in range(ilość_kolumn):
        macierz_rozwiązań[0][j] := bład['PRZERWA'] * j

    for i in range(1, ilość_wierszy):
        if jest_podmodelem(model[i-1]):
            macierz_rozwiązań[i], najlepiej_dopasowane_ścieżki_podmodeli[i] :=
                dopasowanie_podmodeli(macierz_rozwiązań[i - 1], model[i - 1],
                                        [x for x in odwrócone_substringi(wariant)], i)
        elif długość(model[i-1]) > 1:
            macierz_rozwiązań[i], najlepiej_dopasowane_ścieżki_podmodelu[i] :=
                dopasowanie_równoległe(macierz_rozwiązań[i - 1], model[i - 1],
                                        [x for x in odwrócone_substringi(wariant)], kara, i)
        else:
            macierz_rozwiązań[i][0] := macierz_rozwiązań[i-1][0] + kara['PRZERWA']
            dopasowanie(macierz_rozwiązań, model[i - 1], wariant, kara, i, ilość_kolumn)

    najlepiej_dopasowana_ścieżka :=
        znajdź_ścieżkę(macierz_rozwiązań, bład['PRZERWA'], model, wariant,
                       najlepiej_dopasowana_ścieżka_podmodelu)

    return macierz_rozwiązań[ilość_wierszy-1], najlepiej_dopasowana_ścieżka
```

**Listing 3.6.** Obliczanie dopasowania

### 3.4.7. Znajdowanie najlepiej dopasowanych aktywności w modelu

Potrzebne do obliczenia precyzji oraz generalizacji. Algorytm obliczanie dopasowania zwraca najmniejszy bład, ale nie daje informacji o tym, dla jakiej ścieżki otrzymano ten bład. Dodatkowo Znajdowanie najlepiej dopasowanych aktywności w modelu jest utrudnione przez fakt, że modele może składać się z podmodeli - BaseGroup.

Argumentami metody są kopia macierzy rozwiązań, model, kopia wariantu oraz rozwiązania podmodeli. Zwracana jest natomiast najlepiej dopasowana ścieżka.

Algorytm zaczyna znajdowanie ścieżki od ostatniego elementu i cofa się do początku. W komórkach, dla których znaleziono dopasowanie, wpisywane jest 0. Tak jak poprzednio, są trzy możliwości brak zdarzenia w modelu, w logu, oraz zupełna niezgodność. Ścieżki szuka się poprzez porównywanie wartości w komórce z sumą błędów z wartościami odpowiednich kolumn. Znalezioną ścieżkę pokazano na rysunku 3.7. Uwzględnione muszą być dwie sytuacje - taka, w której dana pozycja została obliczona dla podmodelu lub nie.

W tym drugim, jeśli zdarzenie zostało pominięte w modelu, to wpisywane jest do ścieżki None, natomiast jeżeli zostało znalezione dopasowanie, to dodajemy zdarzenie do modelu i usuwamy z wariantu.

Jeśli dana pozycja została obliczona dla podmodelu, algorytm działa podobnie, największą różnicą jest to, że w takiej sytuacji nie ma jednego zdarzenia tylko kilka i tylko część może się zgadzać. Dlatego znajdujemy ostatnie *k* zdarzeń w podmodelu dla każdego podwariantu i kolejno porównujemy ich ilość i różnicę w błędzie, dzięki czemu dowiemy się, dla którego podwariantu znaleziono najlepsze dopasowanie.

```
def znajdz_ścieżkę(macierz_rozwiązań, model, wariant,
                  rozwiązania_podmodeli) -> [Event]:
    ścieżka = []
    i = długość(model)
    j = długość(wariant)

    while i != 0:
        długość_podmodelu = długość(model[i - 1])
        if rozwiązania_podmodeli[i] is not None:
            znaleziono_dopasowanie := False
            if macierz_rozwiązań[i][j] ==
                macierz_rozwiązań[i - 1][j] + długość_podmodelu * błąd['PRZERWA']:
                [ścieżka.dodaj(None) for _ in range(długość_podmodelu)]
                macierz_rozwiązań[i][j] := 0
                i -= 1
            else:
                for k in range(j):
                    zdarzenia := znajdz_nie_none(rozwiazania_podmodeli[i][k])
                        [długość(rozwiazania_podmodeli[i][k]) - (j-k)], wariant)
                    if macierz_rozwiązań[i][j] == macierz_rozwiązań[i - 1][k] +
                        (długość_podmodelu + (j-k) - 2*długość(zdarzenia))*błąd['PRZERWA']:
                        [ścieżka.dodaj(x) for x in odwróć(zdarzenia)]
                        for x in zdarzenia:
                            wariant = wariant.usuń(x.nazwa)
                        [ścieżka.dodaj(None)
                            for _ in range(długość_podmodelu - długość(zdarzenia))]
                        macierz_rozwiązań[i][j] := 0
                        i -= 1
                        j = k
                        znaleziono_dopasowanie = True
                        break
```

```
    if not znaleziono_dopasowanie:
        if macierz_rozwiazan[i][j] == macierz_rozwiazan[i][j - 1] +
            blad['PRZERWA']:
            macierz_rozwiazan[i][j] := 0
            j -= 1
    else:
        if macierz_rozwiazan[i][j] == macierz_rozwiazan[i - 1][j] + kara:
            sciezka.dodaj(None)
            macierz_rozwiazan[i][j] := 0
            i -= 1
        elif macierz_rozwiazan[i][j] == macierz_rozwiazan[i][j - 1] + kara:
            macierz_rozwiazan[i][j] := 0
            j -= 1
        elif macierz_rozwiazan[i][j] == macierz_rozwiazan[i - 1][j - 1]:
            sciezka.dodaj(model[i-1])
            wariant = wariant.usun(model[i-1].nazwa)
            macierz_rozwiazan[i][j] := 0
            i -= 1
            j -= 1
    return sciezka
```

Listing 3.7. Znajdowanie ścieżki w modelu

### 3.4.8. Pozostałe wnioski dotyczące implementacji

Używając algorytmów genetycznych, konieczne jest wielokrotne obliczenie metryk, żeby znaleźć rozwiązanie. Z tego powodu, duży nacisk na położono na ograniczenie czasu obliczeń. W wielu miejscach zaimplementowano mechanizm przerywający obliczenia, jeżeli nie dają one perspektyw na znalezienie lepszego niż aktualnie najlepsze rozwiązanie. Użytkownik może też zdefiniować maksymalną złożoność modelu, co przełoży się także na czas jego znajdowania. Duże znaczenie ma też fakt, że algorytm pozwala na równoległe procesowanie.

W sytuacji, kiedy wiele obliczeń się powtarza, można znacząco przyspieszyć czas działania aplikacji poprzez zastosowanie cachowania. W przypadku naszego algorytmu można zauważyć dwa miejsca, w których często dochodzi to powtórzeń: Poprzednio obliczone rozwiązanie może się powtórzyć. W tym wypadku możemy skorzystać z cache genotypów, dostarczane przez bibliotekę PonyGE2. Podczas obliczania dopasowania, które jest najbardziej kosztownym obliczeniem. Ponadto z uwagi na dużą ilość obliczeń, żeby ograniczyć rozmiar cache, zaimplementowano cachowanie LRU.

Żeby ograniczyć czas pojedynczej iteracji, można wprowadzić ograniczenie czasowe na obliczanie metryk dla danego osobnika. Czas obliczania jest powiązany ze złożonością modelu. Przy odpowiednim ustawieniu timeoutu będzie on oddziaływał tylko na zbyt złożone rozwiązania i zostanie dla nich zwrócona wartość funkcji dopasowania równa 0.

Tworząc program, nacisk położono na możliwość łatwego rozszerzania i oddzielenie od biblioteki PonyGE2. Dzięki temu zwiększono niezależność od biblioteki i zmian w niej. Program może być też łatwo modyfikowany i ewentualnie usprawniany.

Rozszerzono także możliwość konfiguracji o nowe parametry, jednak aby umożliwić użytkownikowi niski próg wejścia w korzystanie z programu, starano się ograniczyć ilość parametrów potrzebnych do skonfigurowania i tam, gdzie to możliwe postarano się wstawić domyślne wartości, jeśli są one wystarczająco dobre.

### 3.5. Wybór parametrów algorytmu

Wybór parametrów algorytmu ma ogromny wpływ na jakość i szybkość znalezienia rozwiązania. Jest kilka zasad, którymi należy się kierować przy tym wyborze właśnie. Ilość parametrów wymagana przez ponyGE2 jest duża, mimo że starano się ograniczyć możliwość konfiguracji, która nie daje dużo korzyści do minimum, tworząc aplikacje, konieczne było dodanie kilku innych niezbędnych parametrów. Z tego powodu, poniżej przedstawiono i krótko omówiono niezbędne do działania aplikacji parametry.

Parametry wymagane przez PonyGE2 [44]:

```
CACHE: True
CODON_SIZE: 100000
CROSSOVER: subtree
CROSSOVER_PROBABILITY: 0.75
ELITE_SIZE: 3
GENERATIONS: 100000
MAX_GENOME_LENGTH: 500
GRAMMAR_FILE: process-subtree.bnf
INITIALISATION: PI_grow
INVALID_SELECTION: False
LOOKUP_FITNESS: True
MAX_INIT_TREE_DEPTH: 13
MAX_TREE_DEPTH: 21
MULTI_OBJECTIVE: False
MUTATION: subtree
MUTATION_EVENTS: 1
POPULATION_SIZE: 500
REPLACEMENT: generational
SAVE_STATE_STEP: 10
SELECTION: tournament
TOURNAMENT_SIZE: 8
MAX_WRAPS: 3
```

Dodatkowe parametry:

*ALIGNMENT\_CACHE\_SIZE: 32\*1024*

Określa wielkość cache przy liczeniu dopasowania.

*DATASET: discovered-processes.csv*

Nazwa pliku z wariantami. Potrzebna przy tworzeniu nazwy pliku wynikowego.

*MAX\_ALLOWED\_COMPLEXITY\_FACTOR: 300*

Maksymalne skomplikowanie modelu. Obliczane jako iloczyn ilości unikalnych aktywności w modelu i powyższego parametru.

*MIN\_SIMPLICITY\_THRESHOLD: 2/3*

Minimalna wartość prostoty, powyżej której metryki będą dalej obliczane.

*MINIMIZE\_SOLUTION\_LENGTH: True*

Dodaje małą karę za długość rozwiązania, co pozwala usunąć zbędne bramki, nawet jeśli wartość metryk jest taka sama.

*RESULT\_TOLERANCE\_PERCENT: 5*

Używany w kilku miejscach w programie. Określa jak złe pod względem wartości metryk modele, będą tolerowane i dalej procesowane. Zaleca się nie przekraczać wartości 10.

*TIMEOUT: 5*

Przestaje obliczać dopasowanie po przekroczeniu czasu - najprawdopodobniej model i tak jest zbyt skomplikowany

Rekomendowane wagi poszczególnych metryk. Dla małych modeli warto zwiększyć wagę precyzji:

*WEIGHT\_ALIGNMENT: 8*

*WEIGHT\_COMPLEXITY: 2*

*WEIGHT\_GENERALIZATION: 2*

*WEIGHT\_PRECISION: 4*

*WEIGHT\_SIMPLICITY: 2*



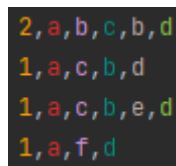


## 4. Dyskusja rezultatów

### 4.1. Przykładowe wyniki

#### 4.1.1. Wynik dla przykładu ze wstępu

Wracając do dziennika zdarzeń przedstawionego w sekcji 2.2.3, a dla którego stworzono przykładowy model i obliczono metryki w sekcji 2.4.4.2.



```
2, a, b, c, b, d
1, a, c, b, d
1, a, c, b, e, d
1, a, f, d
```

Rys. 4.1. Warianty procesu

Przy odkrywaniu modelu dla tego wariantu użyto następujących wag poszczególnych metryk: odwzorowanie = 18, złożoność = 2, generalizacja = 2, precyzja = 12, prostota = 2. Model dla tego dziennika zdarzeń znaleziony przy pomocy algorytmu to:

$$\{a\} \text{ xor } (\text{seq}(\text{opt}(\{b\})\{c\}\{b\} \text{ opt}(\{e\}))\{f\})\{d\}$$

oraz graficznie:



Rys. 4.2. Znaleziony model

Do znalezienia modelu potrzebne były 522 generacje, podczas których przeszukano 97771 unikalnych osobników. Zajęło to 1052.8 sekund, używając 4 wątków procesora. Natomiast, metryki mają następujące wartości:

Średnia ważona: 0.9550

Odwzorowanie: 1.0

Złożoność: 1.0

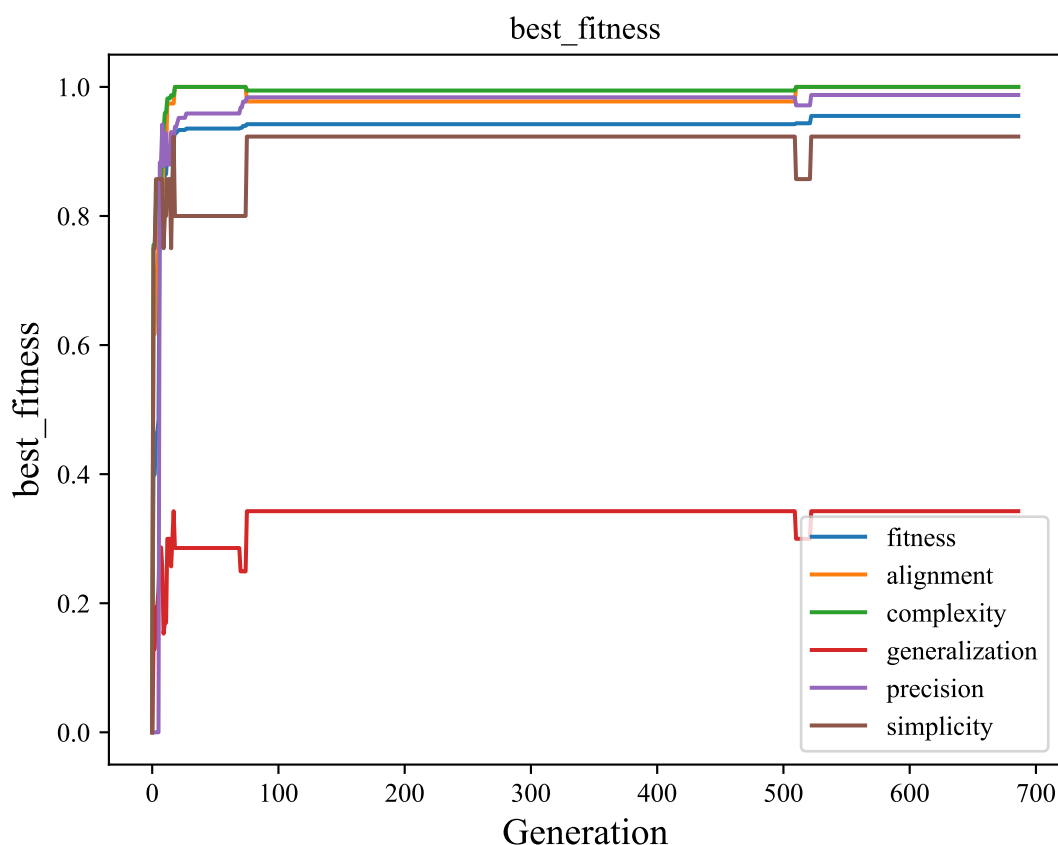
Generalizacja: 0.3426

Precyzja: 0.9875

Prostota: 0.9231

Dla porównania poszczególne metryki obliczone w sekcji 2.4.4.2 wynosiły odwzorowanie = 0.9243, złożoność = 0.9706, generalizacja = 0.3997, precyzja = 0.9465, prostota = 0.8333, a średnia ważona używając przyjętych wag, wyniosłaby 0.9001. Otrzymano więc znacznie lepszy model.

Poniżej zaprezentowano również wykres, na który zaprezentowano zmianę wartości metryk w kolejnych generacjach. Jest on generowany podczas działania algorytmu i kończy się w momencie przerwania działania algorytmu, a znalezienia rozwiązania.



Rys. 4.3. Przebieg ewolucji

### 4.1.2. Inne przykłady działania

Przykładowe dziennik zdarzeń wzięto z [1]. Część z nich została wygenerowana sztucznie, a część zawiera realne dane. Następnie log przerobiono na warianty procesu.

#### 4.1.2.1. Przykład #1

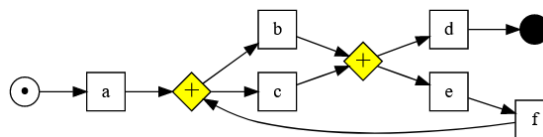
```
3,a,b,c,d
4,a,c,b,d
2,a,b,c,e,f,b,c,d
1,a,b,c,e,f,c,b,d
2,a,c,b,e,f,b,c,d
1,a,c,b,e,f,b,c,e,f,c,b,d
```

Rys. 4.4. Warianty procesu

Przy odkrywaniu modelu dla tego wariantu użyto następujących wag poszczególnych metryk: odwzorowanie = 8, złożoność = 2, generalizacja = 2, precyzja = 2, prostota = 2. Model dla tego dziennika zdarzeń znaleziony przy pomocy algorytmu to:

$$\{a\} \text{and} (\{b\}\{c\}) \text{lo} 4(\{e\}\{f\} \text{and} (\{b\}\{c\}))\{d\}$$

oraz graficznie:



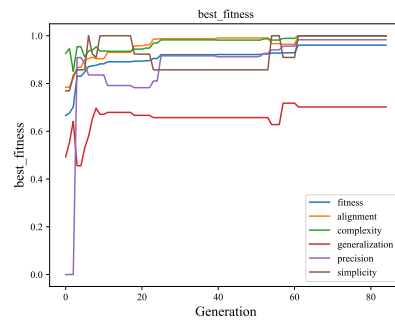
Rys. 4.5. Znaleziony model

Do znalezienia modelu potrzebne były 83 generacje, podczas których przeszukano 97771 unikalnych osobników. Zajęło to 321.5 sekund, używając 4 wątków procesora. Natomiast, metryki mają następujące wartości:

Średnia ważona: 0.9606  
 Odwzorowanie: 1.0  
 Złożoność: 1.0  
 Generalizacja: 0.7019  
 Precyzja: 0.9830  
 Prostota: 1.0

#### 4.1.2.2. Przykład #2

Przy odkrywaniu modelu dla tego wariantu użyto następujących wag poszczególnych metryk: odwzorowanie = 8, złożoność = 2, generalizacja = 2, precyzja = 2, prostota = 2. Model dla tego dziennika zdarzeń znaleziony przy pomocy algorytmu to:



Rys. 4.6. Przebieg ewolucji

```

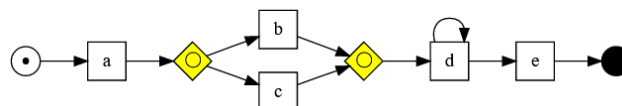
5,a,e
10,a,b,c,e
10,a,c,b,e
1,a,b,e
1,a,c,e
10,a,d,e
2,a,d,d,e
1,a,d,d,d,e

```

Rys. 4.7. Warianty procesu

$$\{a\}lo2(\{d\})opt(\{b\}\{c\})\{e\}$$

oraz graficznie:



Rys. 4.8. Znaleziony model

Do znalezienia modelu potrzebne było 11 generacji, podczas których przeszukano 97771 unikalnych osobników. Zajęło to 75.1730625629425 sekund, używając 4 wątków procesora. Natomiast, metryki mają następujące wartości:

Średnia ważona: 0.9722

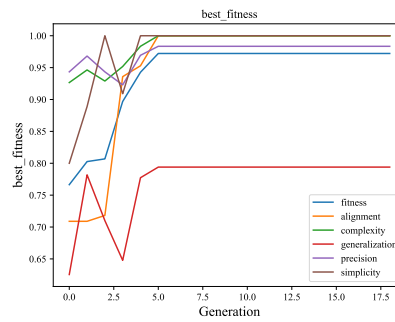
Odwzorowanie: 1.0

Złożoność: 1.0

Generalizacja: 0.7940

Precyzja: 0.9834

Prostota: 1.0



Rys. 4.9. Przebieg ewolucji

455	a	c	d	e	h
191	a	b	d	e	g
177	a	d	c	e	h
144	a	b	d	e	h
111	a	c	d	e	g
82	a	d	c	e	g
56	a	d	b	e	h
38	a	d	b	e	g

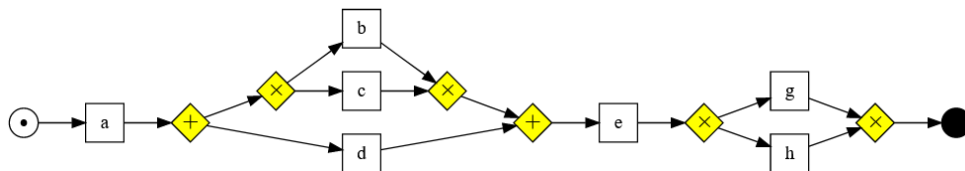
Rys. 4.10. Warianty procesu

#### 4.1.2.3. Przykład #3

Przy odkrywaniu modelu dla tego wariantu użyto następujących wag poszczególnych metryk: odwzorowanie = 8, złożoność = 2, generalizacja = 2, precyzja = 4, prostota = 2. Model dla tego dziennika zdarzeń znaleziony przy pomocy algorytmu to:

$$\{a\} \text{and} (\text{opt}(\{c\}\{b\})\{d\})\{e\} \text{xor} (\{h\}\{g\})$$

oraz graficznie:



Rys. 4.11. Znaleziony model

Do znalezienia modelu potrzebne były 233 generacje, podczas których przeszukano 97771 unikalnych osobników. Zajęło to 504.201382637023 sekund, używając 4 wątków procesora. Natomiast, metryki mają następujące wartości:

Średnia ważona: 0.9836

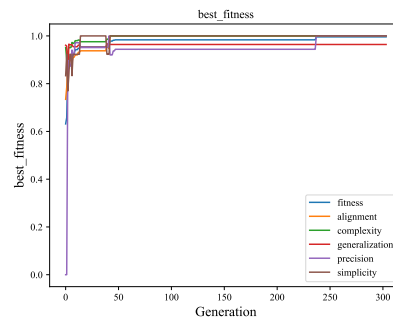
Odwzorowanie: 1.0

Złożoność: 1.0

Generalizacja: 0.9641

Precyzja: 0.9440

Prostota: 1.0



Rys. 4.12. Przebieg ewolucji

#### 4.1.2.4. Przykład #4

```

525,a,b,c,d,e,f,g,h,i
469,a,j,k,d,e,f,g,h,i
367,a,j,i
262,a,j,k,d,e,g,h,f,i
260,a,b,c,d,e,i
257,a,b,c,d,i
248,a,b,c,d,e,g,h,f,i
237,a,j,k,d,e,g,f,h,i
235,a,b,c,d,e,g,f,h,i
232,a,j,k,d,i
225,a,j,k,d,e,i
195,a,b,i

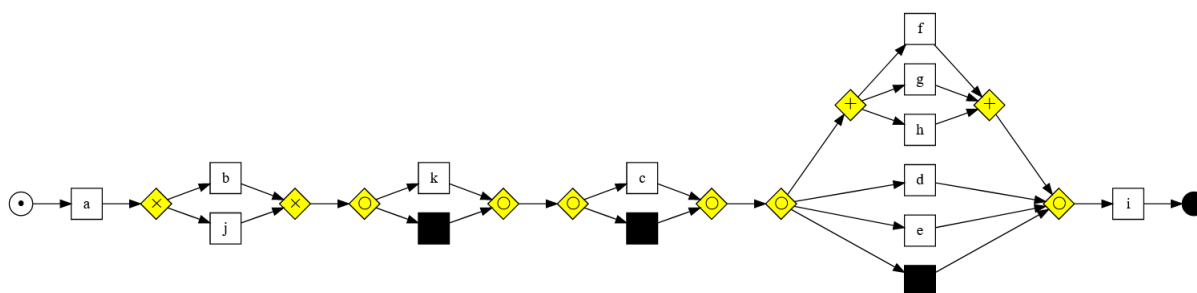
```

Rys. 4.13. Warianty procesu

Przy odkrywaniu modelu dla tego wariantu użyto następujących wag poszczególnych metryk: odwzorowanie = 8, złożoność = 2, generalizacja = 2, precyzja = 2, prostota = 2. Model dla tego dziennika zdarzeń znaleziony przy pomocy algorytmu to:

$$\{a\}opt(xor(\{j\}\{b\})\{k\})opt(opt(\{d\}\{e\})\{c\})opt(and(\{f\}\{h\}\{g\}))\{i\}$$

oraz graficznie:



Rys. 4.14. Znaleziony model

Do znalezienia modelu potrzebne było 4110 generacji, podczas których przeszukano 97771 unikalnych osobników. Zajęło to 17157.7 sekund, używając 4 wątków procesora. Natomiast, metryki mają następujące wartości:

Średnia ważona: 0.9748

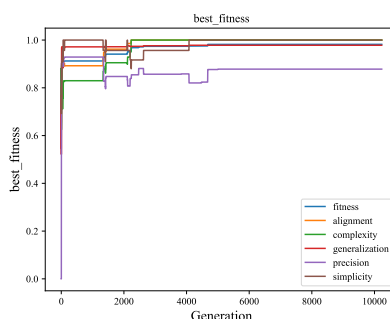
Odwzorowanie: 1.0

Złożoność: 1.0

Generalizacja: 0.9782

Precyzja: 0.8204

Prostota: 1.0



Rys. 4.15. Przebieg ewolucji

#### 4.1.2.5. Przykład #5

Przy odkrywaniu modelu dla tego wariantu użyto następujących wag poszczególnych metryk: odwzorowanie = 8, złożoność = 2, generalizacja = 2, precyzja = 2, prostota = 2. Model dla tego dziennika zdarzeń znaleziony przy pomocy algorytmu to:

$$\{a\}l1(\{f\}and(\{d\}xor(\{b\}\{c\}))\{e\})xor(\{g\}\{h\})$$

oraz graficznie:

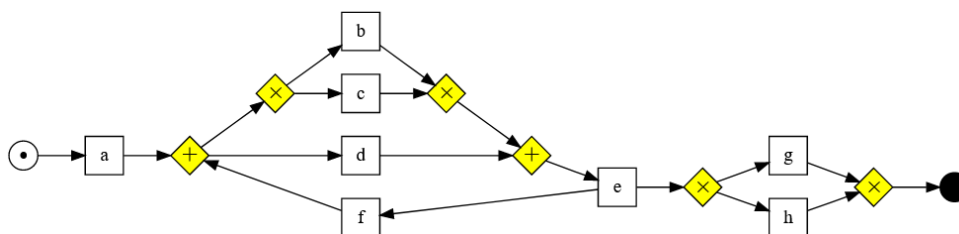
Do znalezienia modelu potrzebne było 2270 generacji, podczas których przeszukano 97771 unikalnych osobników. Zajęło to 15123.3 sekund, używając 4 wątków procesora. Natomiast, metryki mają następujące wartości:

```

455,a,c,d,e,h
191,a,b,d,e,g
177,a,d,c,e,h
144,a,b,d,e,h
111,a,c,d,e,g
82,a,d,c,e,g
56,a,d,b,e,h
47,a,c,d,e,f,d,b,e,h
38,a,d,b,e,g
33,a,c,d,e,f,b,d,e,h
14,a,c,d,e,f,b,d,e,g
11,a,c,d,e,f,d,b,e,g
9,a,d,c,e,f,c,d,e,h
8,a,d,c,e,f,d,b,e,h
5,a,d,c,e,f,b,d,e,g
3,a,c,d,e,f,b,d,e,f,d,b,e,g
2,a,d,c,e,f,d,b,e,g
2,a,d,c,e,f,b,d,e,f,b,d,e,g
1,a,d,c,e,f,d,b,e,f,b,d,e,h
1,a,d,b,e,f,b,d,e,f,d,b,e,g
1,a,d,c,e,f,d,b,e,f,c,d,e,f,d,b,e,g

```

Rys. 4.16. Warianty procesu



Rys. 4.17. Znaleziony model

Średnia ważona: 0.9940

Odwzorowanie: 1.0

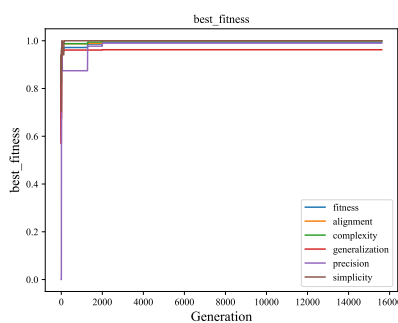
Złożoność: 1.0

Generalizacja: 0.9624

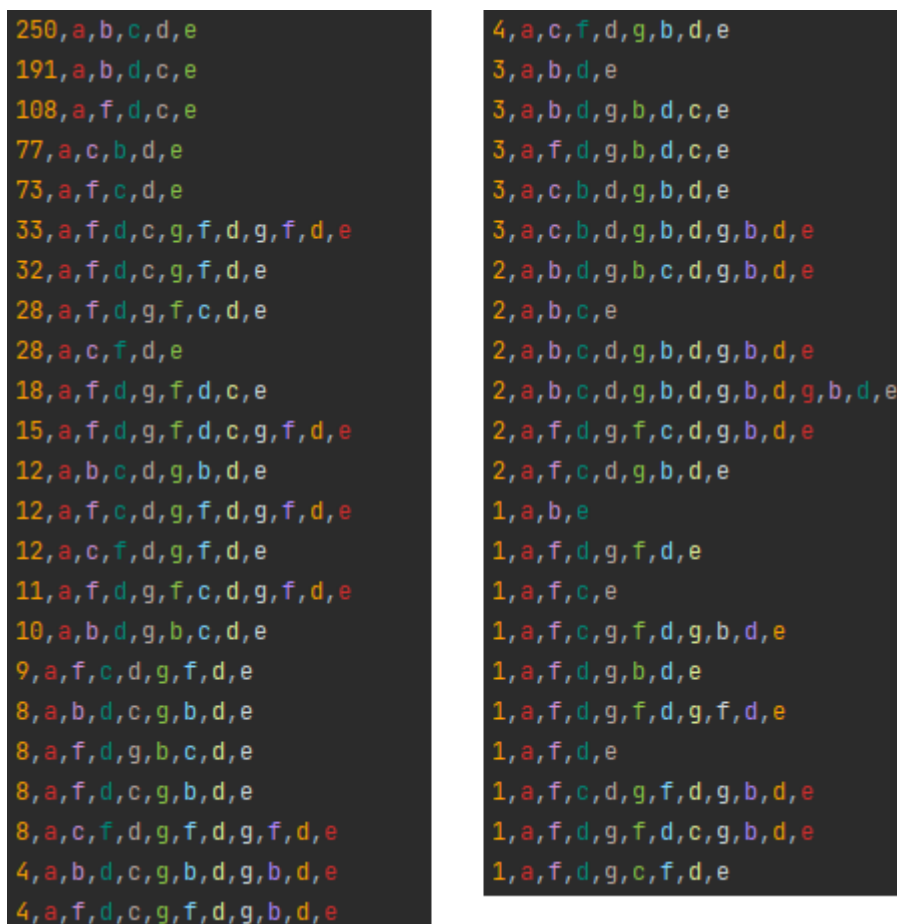
Precyzja: 0.9899

Prostota: 1.0





Rys. 4.18. Przebieg ewolucji



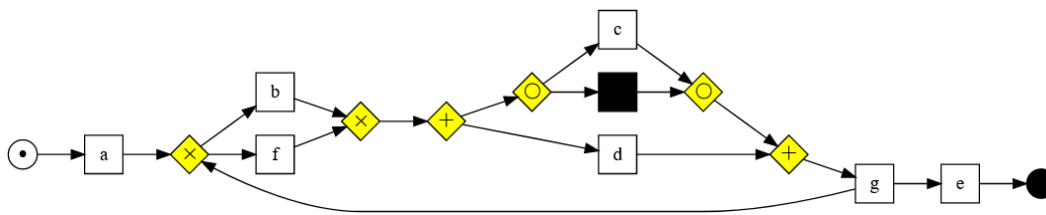
Rys. 4.19. Warianty procesu

#### 4.1.2.6. Przykład #6

Przy odkrywaniu modelu dla tego wariantu użyto następujących wag poszczególnych metryk: odwzorowanie = 8, złożoność = 2, generalizacja = 2, precyzja = 4, prostota = 1. Model dla tego dziennika zdarzeń znaleziony przy pomocy algorytmu to:

$$\{a\} \text{xor}(\{f\}\{b\}) \text{and}(\{d\} \text{opt}(\{c\})) \text{lo3}(\{g\} \text{xor}(\{f\}\{b\}) \text{and}(\{d\} \text{opt}(\{c\}))) \{e\}$$

oraz graficznie:



Rys. 4.20. Znaleziony model

Do znalezienia modelu potrzebne było 436 generacji, podczas których przeszukano 97771 unikalnych osobników. Zajęło to 4675.0 sekund, używając 4 wątków procesora. Natomiast, metryki mają następujące wartości:

Średnia ważona: 0.9859

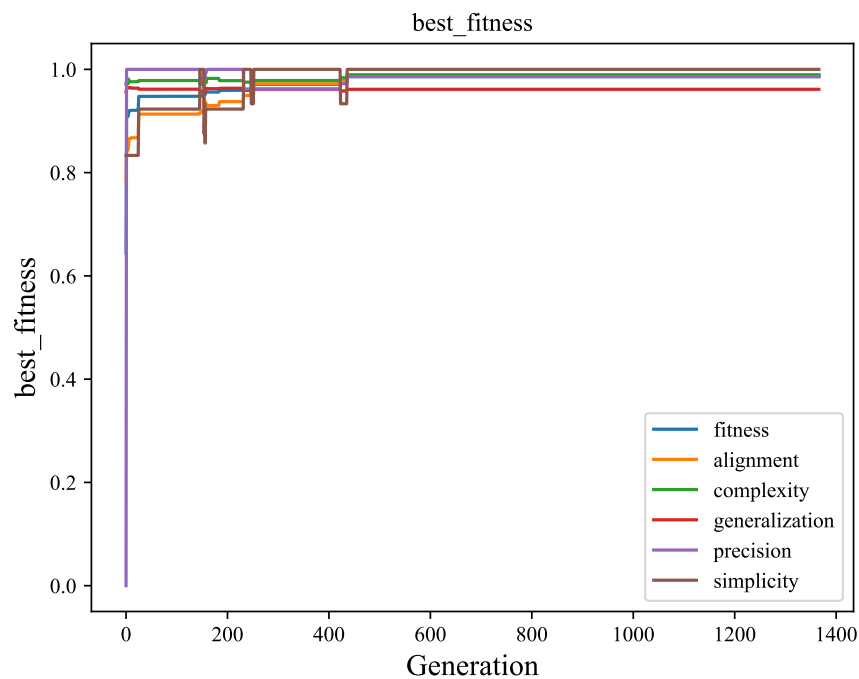
Odwzorowanie: 0.9896

Złożoność: 0.9891

Generalizacja: 0.9614

Precyzja: 0.9859

Prostota: 1.0



Rys. 4.21. Przebieg ewolucji

## **4.2. Wyniki w zależności od przyjętych wag poszczególnych metryk**

### **4.2.1. Złożoność**

### **4.3. Wnioski**



## **5. Podsumowanie**

Obie technologie przyszłościowe i wraz ze wzrostem mocy obliczeniowych.



## Bibliografia

- [1] Thomas H Davenport. *Process innovation: reengineering work through information technology*. Harvard Business Press, 1993.
- [2] Michael Hammer i James Champy. „Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution”. W: *Business Horizons* 36.5 (1993), s. 90–91. ISSN: 0007-6813. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-6813\(05\)80064-3](https://doi.org/10.1016/S0007-6813(05)80064-3).
- [3] Ivar Jacobson, Maria Ericsson i Agneta Jacobson. *The Object Advantage: Business Process Re-engineering with Object Technology*. USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1994. ISBN: 0201422891.
- [4] Hans-Erik Eriksson i Magnus Penker. *Business Modeling With UML: Business Patterns at Work*. 1st. USA: John Wiley i Sons, Inc., 1998. ISBN: 0471295515.
- [5] Geary A. Rummler i Alan P. Brache. *Improving performance: how to manage the white space on the organization chart*. Jossey-Bass, 1995.
- [6] Wil Aalst. „Business Process Management Demystified: A Tutorial on Models, Systems and Standards for Workflow Management”. W: t. 3098. Sty. 2003, s. 1–65. ISBN: 978-3-540-22261-3. DOI: [10.1007/978-3-540-27755-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-27755-2_1).
- [7] Nathaniel Palmer. *What is BPM?*
- [8] Wil Aalst. „Aalst, W.M.P.: Business process management: a comprehensive survey. ISRN Softw. Eng. 1-37”. W: *ISRN Software Engineering* (sty. 2012), ??–?? DOI: [10.1155/2013/507984](https://doi.org/10.1155/2013/507984).
- [9] M. Dumas i in. *Fundamentals of Business Process Management*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 9783642331435.
- [10] Jan Recker i in. „Business Process Modeling- A Comparative Analysis”. W: *Journal of the Association of Information Systems* 10 (kw. 2009). DOI: [10.17705/1jais.00193](https://doi.org/10.17705/1jais.00193).
- [11] OMG. *Business Process Model and Notation (BPMN), Version 2.0*. Object Management Group, 2011.
- [12] Jan Mendling, H.A. Reijers i Wil Aalst. „Seven Process Modeling Guidelines (7PMG)”. W: *Information and Software Technology* 52 (lut. 2010), s. 127–136. DOI: [10.1016/j.infsof.2009.08.004](https://doi.org/10.1016/j.infsof.2009.08.004).
- [13] Marc Kerremans. „Market Guide for Process Mining”. W: *Gartner* (kw. 2018).

- [14] Wil Aalst i in. „Process Mining Manifesto”. W: t. 99. Sierp. 2011, s. 169–194. ISBN: 978-3-642-28107-5. DOI: 10.1007/978-3-642-28108-2\_19.
- [15] Wil Aalst. „Process Mining: Overview and Opportunities”. W: *ACM Transactions on Management Information Systems* 3 (lip. 2012), s. 7.1–7.17. DOI: 10.1145/2229156.2229157.
- [16] Wil M. P. van der Aalst. *Process Mining - Data Science in Action, Second Edition*. Springer, 2016, s. 163–240. ISBN: 978-3-662-49850-7. DOI: 10.1007/978-3-662-49851-4.
- [17] Wil Aalst, A. Weijters i Laura Mărușter. „Workflow Mining: Discovering Process Models from Event Logs”. W: *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on* 16 (paź. 2004), s. 1128–1142. DOI: 10.1109/TKDE.2004.47.
- [18] Jan Martijn Van der Werf i in. „Process Discovery Using Integer Linear Programming”. W: t. 94. Czer. 2008, s. 368–387. ISBN: 978-3-540-68745-0. DOI: 10.1007/978-3-540-68746-7\_24.
- [19] A. Weijters, Wil Aalst i Alves Medeiros. *Process Mining with the Heuristics Miner-algorithm*. T. 166. Sty. 2006.
- [20] B Dongen i Wil Aalst. „Multi-phase process mining: Aggregating instance graphs into EPCs and Petri nets”. W: *Proceedings of the Second International Workshop on Applications of Petri Nets to Coordination, Workflow and Business Process Management* (sty. 2005).
- [21] Raji Ghawi. *Process Discovery using Inductive Miner and Decomposition*. Paź. 2016.
- [22] Wil M. P. van der Aalst. „Relating Process Models and Event Logs - 21 Conformance Propositions”. W: *Proceedings of the International Workshop on Algorithms & Theories for the Analysis of Event Data 2018 Satellite event of the conferences: 39th International Conference on Application and Theory of Petri Nets and Concurrency Petri Nets 2018 and 18th International Conference on Application of Concurrency to System Design ACS D 2018, Bratislava, Slovakia, June 25, 2018*. Red. Wil M. P. van der Aalst, Robin Bergenthum i Josep Carmona. T. 2115. CEUR Workshop Proceedings. CEUR-WS.org, 2018, s. 56–74.
- [23] F. Blum. „Metrics in process discovery”. W: 2015.
- [24] B. F. van Dongen, J. Mendling i W. M. P. van der Aalst. „Structural Patterns for Soundness of Business Process Models”. W: *2006 10th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC'06)*. 2006, s. 116–128. DOI: 10.1109/EDOC.2006.56.
- [25] Ahmed Awad i Frank Puhlmann. „Structural Detection of Deadlocks in Business Process Models”. W: t. 7. Grud. 2008, s. 239–250. ISBN: 978-3-540-79395-3. DOI: 10.1007/978-3-540-79396-0\_21.
- [26] P. A. Vikhar. „Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects”. W: *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)*. 2016, s. 261–265. DOI: 10.1109/ICGTSPICC.2016.7955308.



- [27] D. Noever i Subbiah Baskaran. *Steady-state vs. generational genetic algorithms: A comparison of time complexity and convergence properties*. Lip. 1992.
- [28] John R. Koza. *Non-Linear Genetic Algorithms for Solving Problems*. United States Patent 4935877. filed may 20, 1988, issued june 19, 1990, 4,935,877. Australian patent 611,350 issued september 21, 1991. Canadian patent 1,311,561 issued december 15, 1992. 1990.
- [29] John R. Koza. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1992. ISBN: 0262111705.
- [30] Conor Ryan, Jj Collins i Michael O Neill. „Grammatical evolution: Evolving programs for an arbitrary language”. W: *Lecture Notes in Computer Science Genetic Programming* (1998), 83–96. DOI: [10.1007/bfb0055930](https://doi.org/10.1007/bfb0055930).
- [31] J. Backus. „The syntax and semantics of the proposed international algebraic language of the Zurich ACM-GAMM Conference”. W: *IFIP Congress*. 1959.
- [32] Peter Naur. „A Course of Algol 60 Programming”. W: *ALGOL Bull.* Sup 9 (sty. 1961), 1–38. ISSN: 0084-6198.
- [33] Donald E. Knuth. „backus normal form vs. Backus Naur form”. W: *Communications of the ACM* 7.12 (1964), s. 735–736. ISSN: 0001-0782. DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/355588.365140>.
- [34] Miguel Nicolau i Alexandros Agapitos. „Understanding grammatical evolution: Grammar design”. W: sty. 2018, s. 23–53. DOI: [10.1007/978-3-319-78717-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78717-6_2).
- [35] Nichael Lynn Cramer. „A representation for the Adaptive Generation of Simple Sequential Programs”. W: *Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms and the Applications*. Red. John J. Grefenstette. Carnegie-Mellon University Pittsburgh PA USA, 1985, s. 183–187.
- [36] David Beasley, David R. Bull i Ralph R. Martin. „An Overview of Genetic Algorithms: Part 1, Fundamentals”. W: *University Computing* 15.2 (1993), s. 58–69.
- [37] J. C. A. M. Buijs, B. F. van Dongen i W. M. P. van der Aalst. „Quality Dimensions in Process Discovery: The Importance of Fitness, Precision, Generalization and Simplicity”. W: *International Journal of Cooperative Information Systems* 23.01 (2014), s. 1440001. DOI: [10.1142/S0218843014400012](https://doi.org/10.1142/S0218843014400012). eprint: <https://doi.org/10.1142/S0218843014400012>.
- [38] Wil van der Aalst, Arya Adriansyah i Boudewijn van Dongen. „Replaying history on process models for conformance checking and performance analysis”. W: *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery* 2.2 (2012), s. 182–192. DOI: <https://doi.org/10.1002/widm.1045>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/widm.1045>.
- [39] J. Munoz-Gama i J. Carmona. „Enhancing precision in Process Conformance: Stability, confidence and severity”. W: *2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining (CIDM)*. 2011, s. 184–191. DOI: [10.1109/CIDM.2011.5949451](https://doi.org/10.1109/CIDM.2011.5949451).

- [40] Michael Fenton i in. „PonyGE2”. W: *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion* (2017). DOI: 10.1145/3067695.3082469.
- [41] Michael zur Muehlen i Jan Recker. „How Much Language Is Enough? Theoretical and Practical Use of the Business Process Modeling Notation”. W: *Advanced Information Systems Engineering*. Red. Zohra Bellahsene i Michel Léonard. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, s. 465–479. ISBN: 978-3-540-69534-9.
- [42] Emad Mabrouk, Abdel-Rahman Hedar i Masao Fukushima. „Memetic Programming Algorithm with Automatically Defined Functions”. W: (grud. 2010).
- [43] Saul B. Needleman i Christian D. Wunsch. „A general method applicable to the search for similarities in the amino acid sequence of two proteins”. English (US). W: *Journal of Molecular Biology* 48.3 (mar. 1970), s. 443–453. ISSN: 0022-2836. DOI: 10.1016/0022-2836(70)90057-4.
- [44] <https://github.com/PonyGE/PonyGE2/wiki>.