

## Strona tytułowa

# Zastosowanie metod formalnych

Karol Kozłowski,

Wydział elektryczny, Politechnika Warszawska

6 kwietnia 2025

## Spis tresci

- 1 Wprowadzenie do metod formalnych
- 2 Wykorzystanie metod formalnych w systemie PVS
  - Wprowadzenie do systemu PVS
  - Jaki problem rozwiązuje system PVS?
  - Rozwiązanie PVS
  - Formalna specyfikacja niezmienników
  - Automatyczna weryfikacja warunków spójności
  - Półautomatyczne dowodzenie poprawności
  - Podsumowanie
- 3 Zastosowanie metod formalnych: TLA+

# Czym sa metody formalne?

## Definicja

Metody formalne to techniki matematyczne służące do:

- Specyfikacji - precyzyjnego opisu systemów za pomocą języków matematycznych (np. logika temporalna, rachunek procesów)
- Weryfikacji - dowodzenia poprawności systemów poprzez np. model checking (np. narzędzie SPIN) lub dowody twierdzeń (np. Coq, Isabelle)
- Automatyzacji analizy wykrywania sprzeczności lub luk w projektach na etapie modelowania (np. weryfikacja protokołów kryptograficznych)

Wiecej na ten temat mozna znalezc w [6].

## Kluczowe zalety

- Formalne gwarancje poprawności - zapewnienie matematycznie udowodnionej poprawności systemów, szczególnie w przypadku wymagań bezpieczeństwa.
- Precyzyjna specyfikacja wymagań - eliminacja niejednoznaczności dzięki matematycznym modelom i notacjom.
- Wykrywanie złożonych błędów - identyfikacja problemów takich jak zakleszczenia (deadlocks) czy warunki wyścigu (race conditions), które trudno wykryć tradycyjnymi metodami testowania.

Wiecej na ten temat mozna znalezc w [7].

## System PVS w pigułce

System PVS służy do opracowania i weryfikacji specyfikacji opisujących różne zagadnienia. PVS posiada rozbudowaną składnię i umożliwia operowanie w logice wyższego rzędu, definiowanie własnych typów i podtypów danych oraz tworzenie teorii parametryzowanych [5].

```
pointer_env [P: TYPE, T: TYPE]: THEORY
BEGIN
  pointer: TYPE = P + {nil}
  env: TYPE = [pointer -> (T + {undefined})]
END pointer_env
```

## Problem: Weryfikacja struktur dynamicznych

### Główne wyzwania

- **Złożoność struktur wskaźnikowych:**
  - Wycieki pamięci
  - Nieprawidłowe dereferencje
  - Zakleszczenia w systemach współbieżnych
- **Niejednoznaczność specyfikacji:**
  - Niewystarczalność logiki pierwszego rzędu
  - Potrzeba logiki wyższego rzędu (PVS)
- **Krytyczne zastosowania:**
  - Systemy sterowania (metro, koleje)
  - Aplikacje medyczne
  - Systemy awioniki i kosmiczne

Wiecej na ten temat mozna znalezc w [5].

# Rozwiązanie PVS

- Formalna specyfikacja niezmienników
- Automatyczna weryfikacja warunków spójności
- Półautomatyczne dowodzenie poprawności

## Przykład

### Przykład

```
accessed_disjoint?(accessed? : pred[pointer[P]]) :  
boolean =  
FORALL(v11,v12 : (valid_finseq_list?)) :  
  (accessed?(v11) AND accessed?(v12) AND v11  
  /= v12 =>  
    FORALL(1 : pointer[P]) : value?(1) =>  
      NOT list_member?(1,v11) OR NOT  
      list_member?(1,v12))
```



## Przykład

TCC1 dla niepustości listy, TCC2 dla zachowania typu w rekurencji,  
TCC3 dla warunku stopu rekurencji

```
last_TCC1: OBLIGATION
FORALL (v1: (valid_finseq_list?)): NOT empty?(v1)

last_TCC2: OBLIGATION
FORALL (v1: (valid_finseq_list?)):
    length(v1) > 1 IMPLIES valid_finseq_list?(tail(v1))

last_TCC3: OBLIGATION
FORALL (v1: (valid_finseq_list?)):
    length(v1) > 1 IMPLIES length(tail(v1)) < length(v1)
```

## Podsumowanie

- Metoda skuteczna dla list i drzew.
- Wymaga dużego nakładu pracy.
- Obiecujące wyniki dla systemów krytycznych.

## Czym jest TLA+?

- TLA+ (Temporal Logic of Actions) - język specyfikacji formalnej opracowany przez Lesliego Lamport.
- Służy do opisu systemów współbieżnych i rozproszonych.
- System definiowany jako zbiór zmiennych i akcji - przejść między stanami.
- Deklaratywny - skupia się na zachowaniu, nie na implementacji.
- Bazuje na logice temporalnej i matematyce zbiorów.

## Narzędzie TLC i model checking

- Weryfikacja poprawności specyfikacji odbywa się z użyciem narzędzia TLC.
- TLC używa techniki model checking:
  - automatyczne przeszukiwanie przestrzeni stanów,
  - sprawdzanie właściwości bezpieczeństwa i ciągłości.

## Metoda 1: Modelowanie matematyczne (FIFO)

### Fragment specyfikacji bufora w TLA+:

VARIABLE queue

Init == queue = << >>

Enq(x) == queue' = Append(queue, x)

Deq == /\ queue # << >>  
      /\ queue' = Tail(queue)

- Bufor jako lista (queue).
- Akcje opisują przejścia między stanami.

## Metoda 2: Inwariant bezpieczeństwa

### Fragment definicji inwariantu w TLA+:

```
TypeInvariant ==  
  /\ queue \in Seq(Int)  
  /\ Len(queue) >= 0
```

```
Inv == TypeInvariant
```

- Bufor jest sekwencją liczb całkowitych.
- Długość bufora nie może być ujemna.
- Inwarianty są sprawdzane automatycznie przez TLC.
- Chronią przed błędami, np. usunięciem z pustej kolejki.

## Metoda 3: Własności temporalne

Fragment specyfikacji własności temporalnych w TLA+:

Safety == [] (Len(queue) >= 0)

Liveness == <>(queue = << >>)

- Safety (bezpieczeństwo): długość bufora nigdy nie jest ujemna.
- Liveness (ciągłość): bufor w końcu się opróżni.
- Temporalne właściwości opisują zachowanie w czasie.

## Zastosowania TLA+

- Firmy: Amazon, Microsoft, Google.
- Projektowanie i weryfikacja systemów:
  - rozproszonych,
  - bazodanowych,
  - komunikacyjnych,
  - chmurowych.
- Identyfikacja błędów przed implementacją - kluczowa dla systemów krytycznych.



## Bibliografia



Leslie Lamport, *Specifying Systems: The TLA+ Language and Tools for Hardware and Software Engineers*, Addison-Wesley, 2002.



Chris Newcombe et al., *How Amazon Web Services Uses Formal Methods*, Communications of the ACM, 2015.



Igor Konnov, Jure Kukovec, Thanh-Hai Tran, *TLA+ Model Checking Made Symbolic*, CAV 2019.



Hillel Wayne, *Practical TLA+: Planning Driven Development*, Lospinato Books, 2018.



S. Poreda, *Wykorzystanie metod formalnych do specyfikacji struktur wskaźnikowych*, Uniwersytet Warszawski, 2023.



Sławomir Lasota, *Weryfikacja protokołu Needhama-Schroedera przy użyciu narzędzi SPIN i UPPAAL*, Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Uniwersytet Warszawski, [https://www.mimuw.edu.pl/~sl/teaching/03\\_04/WPKWK/PREZENTACJE-SPIN\\_UPPAAL/NS/](https://www.mimuw.edu.pl/~sl/teaching/03_04/WPKWK/PREZENTACJE-SPIN_UPPAAL/NS/).



Igor Wojnicki, *Weryfikacja własności systemów współbieżnych z użyciem metod formalnych*, Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława