

PODSTAWY OPTYMALIZACJI HARMONOGRAMÓW

Dr inż. Jerzy Rośton, PSMB, IPMA
IIB WIL PW

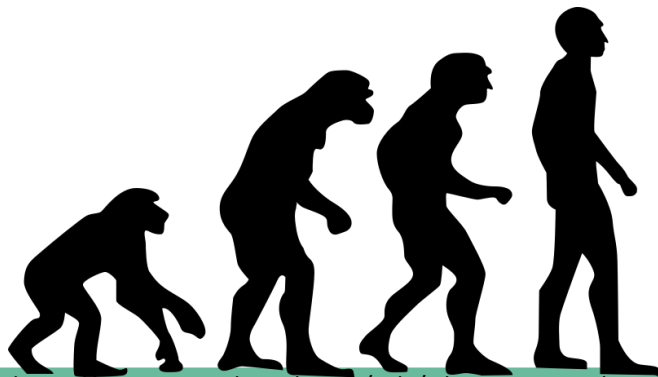
- **Problemy decyzyjne**, czyli takie problemy, w których dla podanych danych wejściowych rozwiązaniem jest zawsze prawda lub fałsz. Odpowiadają im procesy podejmowania decyzji.
- **Problemy przeszukiwania**, w których dla podanych danych wejściowych rozwiązaniem jest zbiór wyników spełniający pewne zadane warunki. W szczególnym przypadku wynikiem może być zbiór pusty, jeżeli nie istnieją wyniki spełniające założenia. Odpowiadają im procesy przeszukiwania.
- **Problemy optymalizacyjne** są to problemy, które opisano w taki sposób, że dla podanych danych wejściowych rozwiązaniem jest najlepszy możliwy do uzyskania wynik. Odpowiadają im procesy optymalizacji. Do takiej grupy problemów można zakwalifikować podstawowe problemy harmonogramowania.

Zgodnie ze Słownikiem Języka Polskiego PWN optymalizacja to:

- 1. Organizowanie jakichś działań, procesów itp. w taki sposób, aby dały jak największe efekty przy jak najmniejszych nakładach.*
- 2. Poszukiwanie za pomocą metod matematycznych najlepszego, ze względu na wybrane kryterium, rozwiązania danego zagadnienia gospodarczego, przy uwzględnieniu określonych ograniczeń*

Z kolei w Encyklopedii PWN podaje, że:

optymalizacja [łac. optimus 'najlepszy'], [to] wyznaczenie najlepszego rozwiązania jakiegoś zadania (np. techn., ekon., społ.) ze względu na przyjęte kryterium (wskaźnik specyficznie rozumianej jakości, np. koszt, zysk, niezawodność, dokładność, czas realizacji zadania), przy uwzględnieniu istniejących ograniczeń.



Z matematycznego punktu widzenia optymalizacja jest problemem polegającym na odnalezieniu najlepszych możliwych elementów x^* ze zbioru \mathbb{X} , zgodnie ze zbiorem kryteriów

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$$

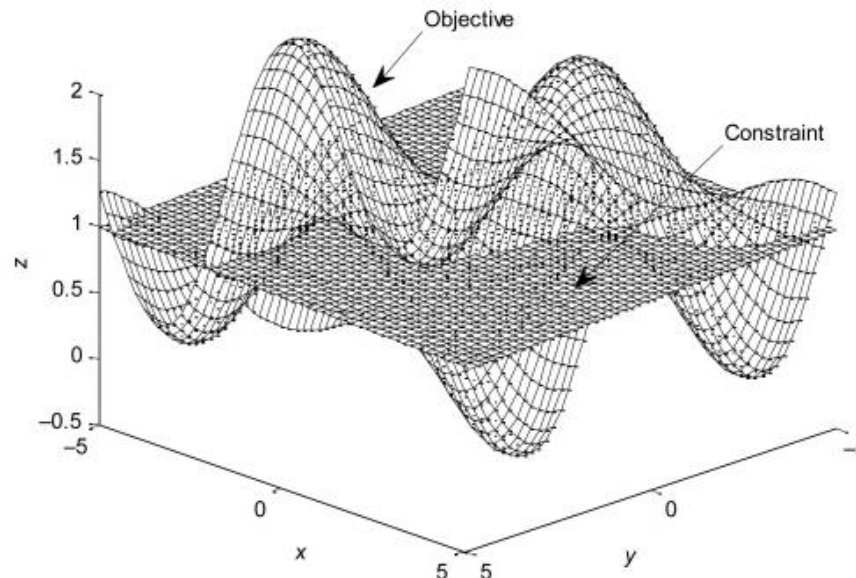
Kryteria te są wyrażane za pomocą funkcji matematycznych, tak zwanych **funkcji celu**.

Funkcja taka ($f: \mathbb{X} \rightarrow Y$) podlega optymalizacji.

Przy czym przeciwdziedzina Y funkcji celu, a także jej zakres, musi być podzbiorem zbioru liczb rzeczywistych ($Y \subseteq \mathbb{R}$). Dziedzina \mathbb{X} funkcji f nazywana jest przestrzenią problemów i może być odwzorowaniem różnych elementów (np. liczb, list, harmonogramów, itd.). Zadanie optymalizacji polega na odnalezieniu takiej wartości $x^* \in \mathbb{X}$, że dla każdego $x \in \mathbb{X} \setminus \{x^*\}$ zachodzi odpowiednio $f(x) > f(x^*)$ dla minimalizacji (znalezienie minimum funkcji) oraz $f(x) < f(x^*)$ dla maksymalizacji (znalezienie maksimum funkcji).

Zadania optymalizacji można podzielić ze względu na stopień trudności znajdowania ich rozwiązań np. na zadania:

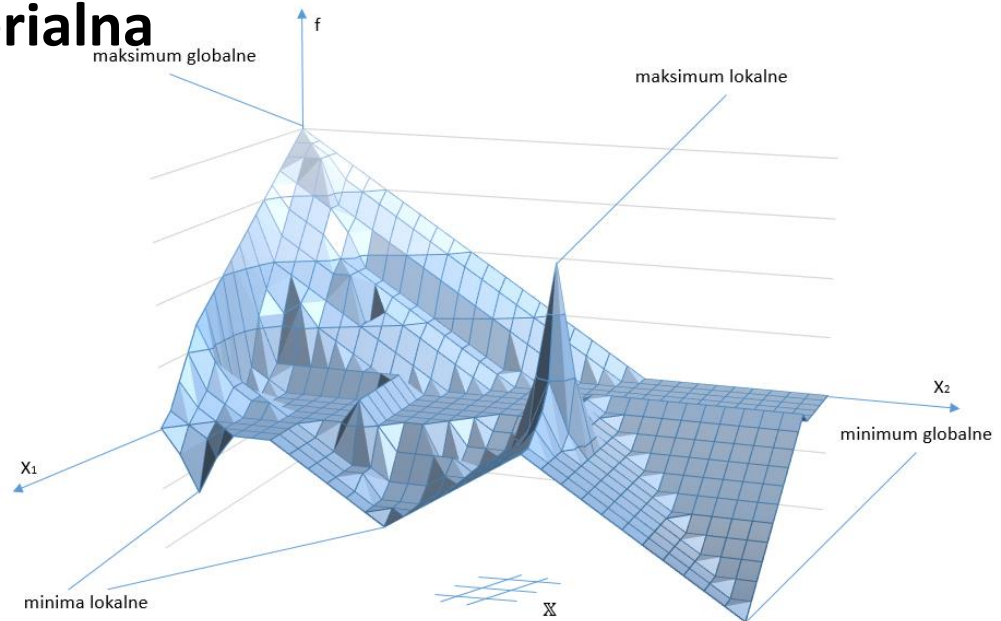
- jednokryterialne i wielokryterialne,
- bez ograniczeń (jak np. opisana w rozdziale czwartym klasa UPSP) i z ograniczeniami (np. RCPSP, MRCPSp).



Inne, przykładowe klasyfikacje zadań optymalizacyjnych:

- statyczne (sprowadzające się do poszukiwania ekstremum funkcji, liczba ograniczeń musi być przeliczalna i skończona),
 - dynamiczne (sprowadzające się do poszukiwania ekstremum funkcjonatu - zmienne przybierają postać funkcji, co może obrazować np. zachowanie obiektu w czasie; zadania takie posiadają nieskończoną i nieprzeliczalną liczbę ograniczeń chwilowych).
-
- ciągłe (przestrzeń poszukiwań jest iloczynem kartezjańskim zbioru liczb rzeczywistych),
 - dyskretne (wartości zmiennych niezależnych należą do zbioru dyskretnego: zbiór liczb całkowitych, zbiór liczb binarnych),
 - mieszane (wartości zmiennych niezależnych należą zarówno do zbioru liczb rzeczywistych, jak i do zbioru liczb w postaci dyskretniej).

Optymalizacja jednokryterialna



Ekstrema lokalne i globalne

Minimum lokalne $\check{x}_l \in \mathbb{X}$ funkcji celu $f: \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{R}$ istnieje, jeśli w pewnym otoczeniu otwartym U punktu \check{x}_l dla każdego $x \in U$, $f(x) \geq f(\check{x}_l)$.

Można to również zapisać w następujący sposób: $\forall \check{x}_l \exists \varepsilon > 0: f(x) \geq f(\check{x}_l) \forall x \in \mathbb{X}, |x - \check{x}_l| < \varepsilon$

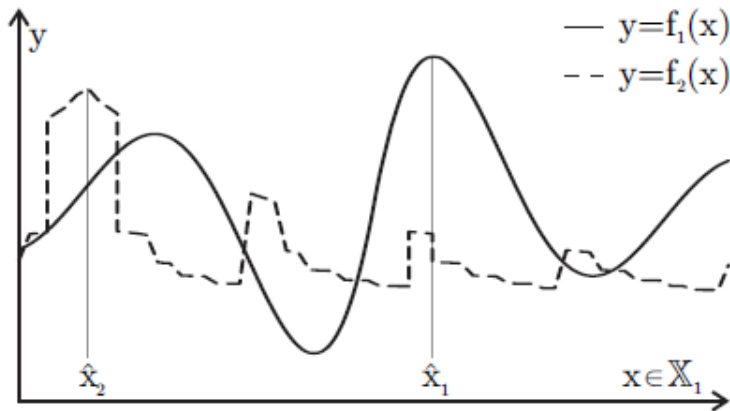
Maksimum lokalne $\hat{x}_l \in \mathbb{X}$ funkcji celu $f: \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{R}$ istnieje, jeśli w pewnym otoczeniu otwartym U punktu \hat{x}_l dla każdego $x \in U$, $f(x) \leq f(\hat{x}_l)$.

Można to również zapisać w następujący sposób: $\forall \hat{x}_l \exists \varepsilon > 0: f(x) \leq f(\hat{x}_l) \forall x \in \mathbb{X}, |x - \hat{x}_l| < \varepsilon$

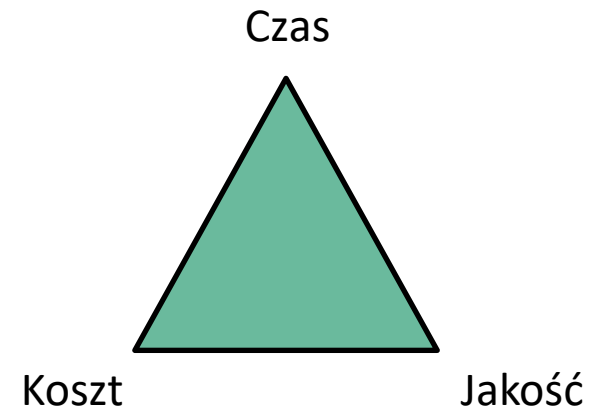
Minimum globalne $\check{x} \in \mathbb{X}$ funkcji celu $f: \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{R}$ istnieje, jeśli $\forall x \in \mathbb{X}, f(x) \geq f(\check{x})$.

Maksimum globalne $\hat{x} \in \mathbb{X}$ funkcji celu $f: \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{R}$ istnieje, jeśli $\forall x \in \mathbb{X}, f(x) \leq f(\hat{x})$.

Optymalizacja wielokryterialna



Two functions f_1 and f_2 with different maxima \hat{x}_1 and \hat{x}_2 .



W wielu rzeczywistych problemach związanych z projektowaniem lub podejmowaniem decyzji techniki optymalizacji są stosowane do zbioru składającego się z $n = |F|$ funkcji celu f_i , z których każda odpowiada jednemu kryterium do zoptymalizowania.

$$F = \{f_i : X \mapsto Y_i : 0 < i \leq n, Y_i \subseteq \mathbb{R}\}$$

Algorytmy zaprojektowane do optymalizacji takich funkcji celu są zwykle nazywane z przedrostkiem wielo(kryterialne) (na przykład wielokryterialne algorytmy ewolucyjne).

Optymalizacja Pareto

Element (rozwiązanie) x_1 dominuje (jest bardziej pożądane) niż element x_2 ($x_1 \vdash x_2$) jeśli x_1 jest lepsze od x_2 pod względem chociaż jednego kryterium i jednocześnie nie gorsze pod względem pozostałych (x_2 jest zdominowane przez x_1). Odnosząc się do zbioru F funkcji celu, można zapisać:

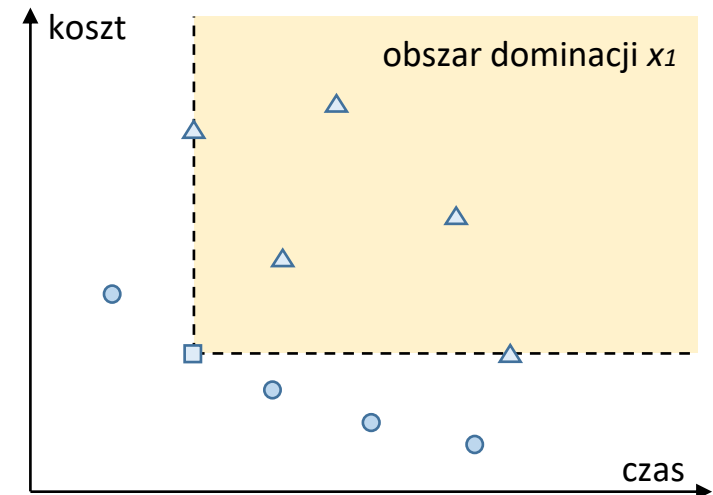
$$x_1 \vdash x_2 \Leftrightarrow \forall i : 0 < i \leq n \Rightarrow \omega_i f_i(x_1) \leq \omega_i f_i(x_2) \wedge \exists j : 0 < j \leq n \Rightarrow \omega_j f_j(x_1) < \omega_j f_j(x_2)$$

gdzie

$$\omega_i = \begin{cases} 1 & \text{jeśli } f_i \text{ podlega minimalizacji} \\ -1 & \text{jeśli } f_i \text{ podlega maksymalizacji} \end{cases}$$

Element $x^* \in \mathbb{X}$ jest optymalny w sensie Pareto / Pareto optymalny (a zatem jest częścią zbioru optymalnego X^*), jeśli nie jest zdominowany przez żaden inny element w przestrzeni rozwiązań \mathbb{X} . W sensie optymalizacji Pareto, X^* nazywamy zbiorem Pareto lub frontem Pareto.

$$x^* \in X^* \Leftrightarrow \nexists x \in \mathbb{X} : x \vdash x^*$$



- x_1
- △ elementy zdominowane przez x_1
- elementy niezdominowane przez x_1

Redukcja problemów optymalizacji wielokryterialnej

Najpopularniejszą z metod redukowania do problemów z jednym kryterium jest **metoda sumy ważonej**. Metoda ta zakłada utworzenie **metafunkcji** $g(x)$ na podstawie funkcji $f_i \in F$. Każde kryterium optymalizacji f_i jest mnożone przez wagę w_i opisującą jego ważność. Użycie znaków (ujemny, dodatni) dla wag pozwala na łączenie kryteriów minimalizowanych i maksymalizowanych:

$$g(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) = \sum_{\forall f_i \in F} w_i f_i(x)$$
$$x^* \in X^* \Leftrightarrow g(x^*) \geq g(x) \quad \forall x \in \mathbb{X}$$

W metodzie tej szczególnie istotny jest odpowiedni dobór wag. Problemem może się okazać subiektywizm. Główną zaletą metody jest jej prostota.

Przykłady innych metod:

- **metoda optymalizacji hierarchicznej** (w ramach metody szereguje się kryteria),
- **metoda ε -ograniczeń** (wybór najważniejszego kryterium i przekształcenie pozostałych w ograniczenia),
- **metoda funkcji odległości** (wprowadzająca tzw. wektor poziomemu popytu)

Ograniczenia

Zakładając, że w danym zadaniu istnieje p ograniczeń w postaci równości g oraz q ograniczeń w postaci nierówności h , kandydat na rozwiązanie (ang. *solution candidate*) x jest dopuszczalny (rozwiązanie jest dopuszczalne) tylko wtedy jeżeli $g_i(x) \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, p$ oraz $h_i(x) = 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, q$. Optymalne rozwiązanie zadania musi być rozwiązaniem dopuszczalnym.

Podejścia:

- kara śmierci

X

- funkcje kar

- stałe
- liniowe
- wykładnicze

$$\text{np. } f'(x) = f(x) + v \sum_{i=1}^p [g_i(x)]^{-1}$$

- ograniczenia jako kolejna funkcja celu

$$\text{np. } g(x) \geq 0 \quad \text{w} \quad f^*(x) = \min \{-g(x), 0\}$$

- inne...

Carroll, C. W. (1961). The created response surface technique for optimizing nonlinear, restrained systems. *Operations Research*, 9(2), 169-184.

Weise, T. (2009). *Global optimisation algorithms-theory and application*. Self-Published., 25-26

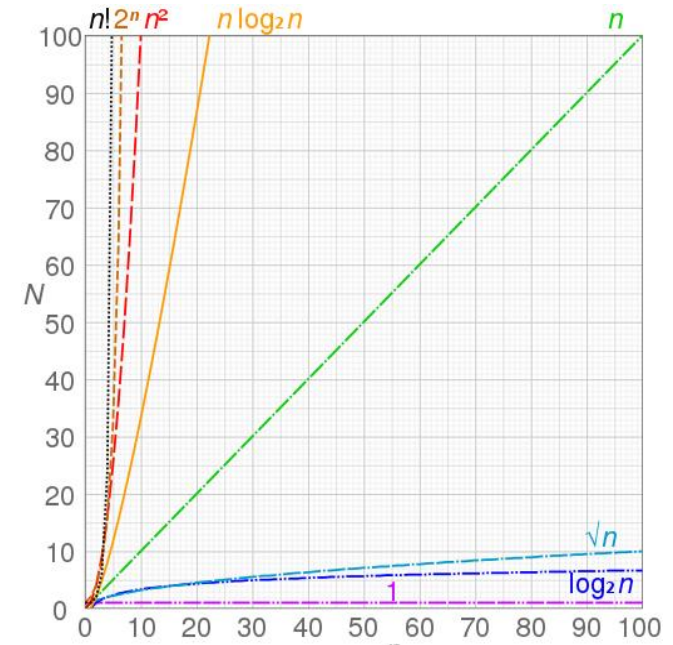
Complexity

Praktyczne problemy w budownictwie można łatwo zakwalifikować jako tzw. **NP-trudne** (non-deterministic polynomial-time hard problems). Czas potrzebny na rozwiązanie tych problemów rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem rozmiaru problemu.

Co najmniej $O(c^n)$ aby znaleźć rozwiązanie.

Co najmniej $O(n^c)$ lub $O(c^n)$ żeby sprawdzić rozwiązanie.

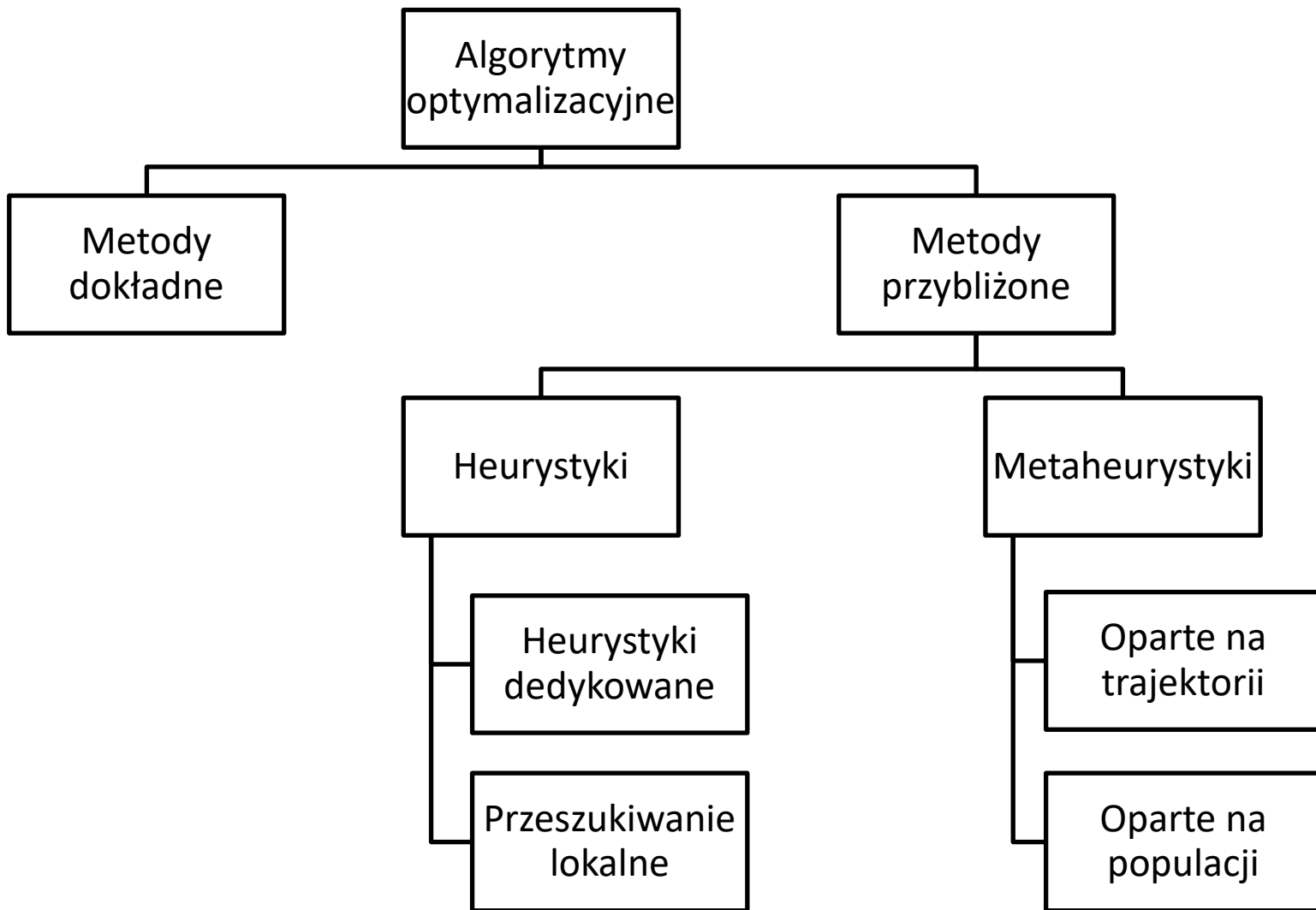
Wiek wszechświata $\approx 10^{10}$ lat!



https://en.wikipedia.org/wiki/File:Comparison_computational_complexity.svg

Rozmiar danych	10	20	50	100	200	1000
Złożoność obliczeniowa O						
log n	3,32 ns	4,23 ns	5,64 ns	6,64 ns	7,64 ns	9,97 ns
n	10 ns	20 ns	50 ns	100 ns	200 ns	1 μs
n log n	33,21 ns	86,44 ns	282,2 ns	664,4 ns	1,53 μs	9,97 μs
n ²	100 ns	400 ns	2,5 μs	10 μs	40 μs	1 ms
2 ⁿ	1 μs	1,05 ms	13 days	4·10 ¹³ lat	5,1·10 ⁴³ lat	3,4·10 ²⁸⁴ lat
n!	3,6 ms	77 lat	9,6·10 ⁴⁴ lat	3·10 ¹⁴¹ lat	2,5·10 ³⁵⁸ lat	1,27·10 ²⁵⁵¹ lat

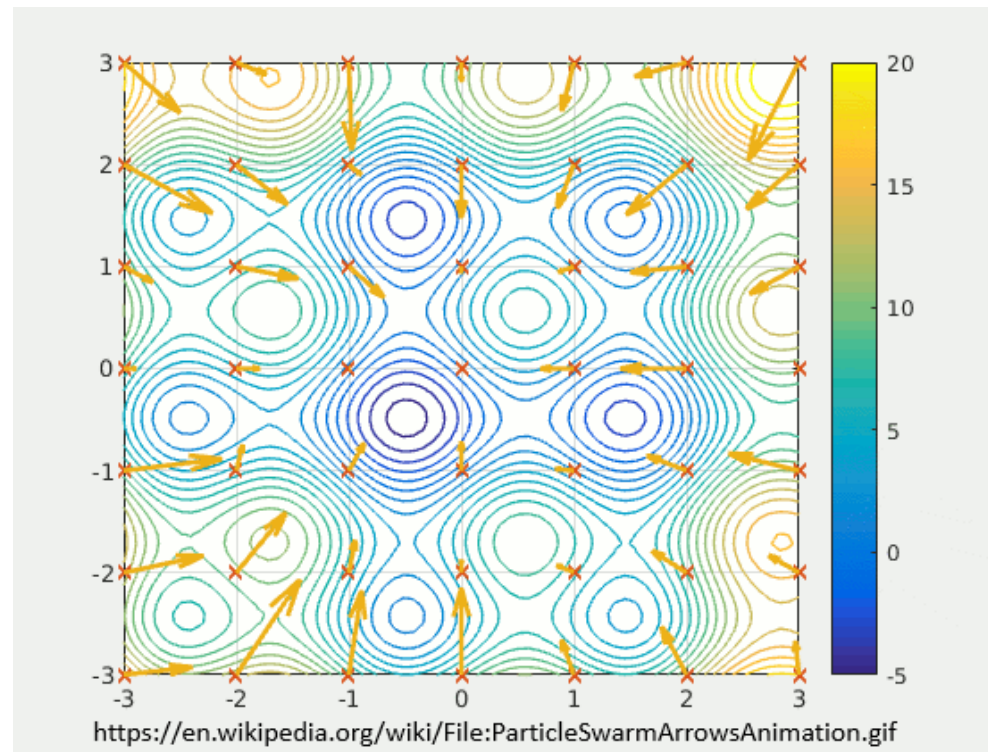
Algorytmy optymalizacyjne



Particle Swarm Optimization (PSO) - Algorytmy roju cząstek

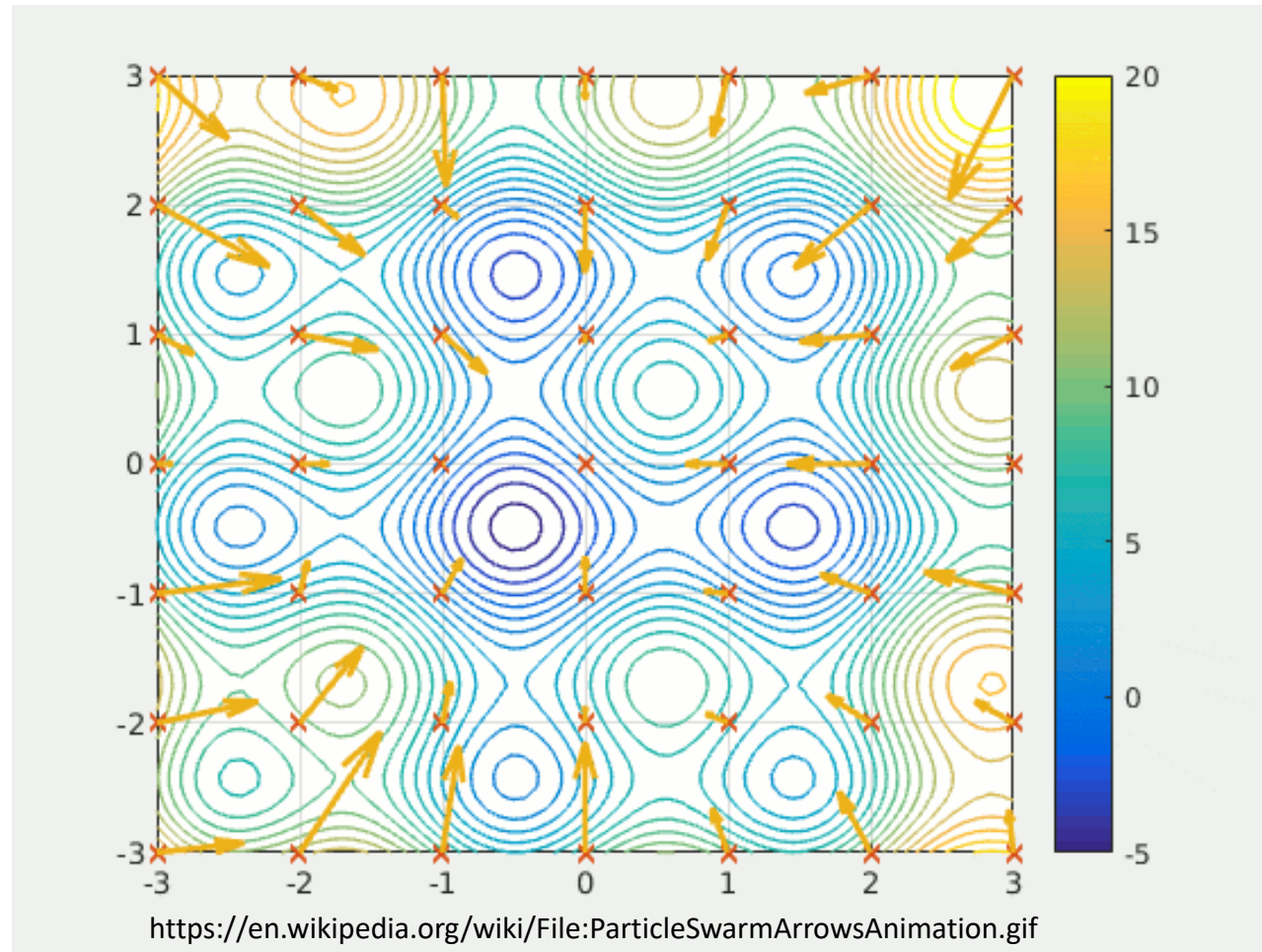
Algorytm śledzi kilka ogólnych zmiennych: warunek celu, najlepszy wynik (zwany od ang. *global best*: *gBest*) – wartość pokazującą która cząstka jest obecnie najbliższej celu, oraz warunek stop (który określa kiedy należy zakończyć działanie algorytmu).

Poszczególne osobniki (cząstki) przechowują następujące dane: pozycję (reprezentuje ona możliwe rozwiązanie), własny najlepszy wynik (zwany od ang. *personal best*: *pBest*) oraz prędkość (wartość wskazującą jak może zmieniać się obecna pozycja/ dane osobnika).



Particle Swarm Optimization (PSO)

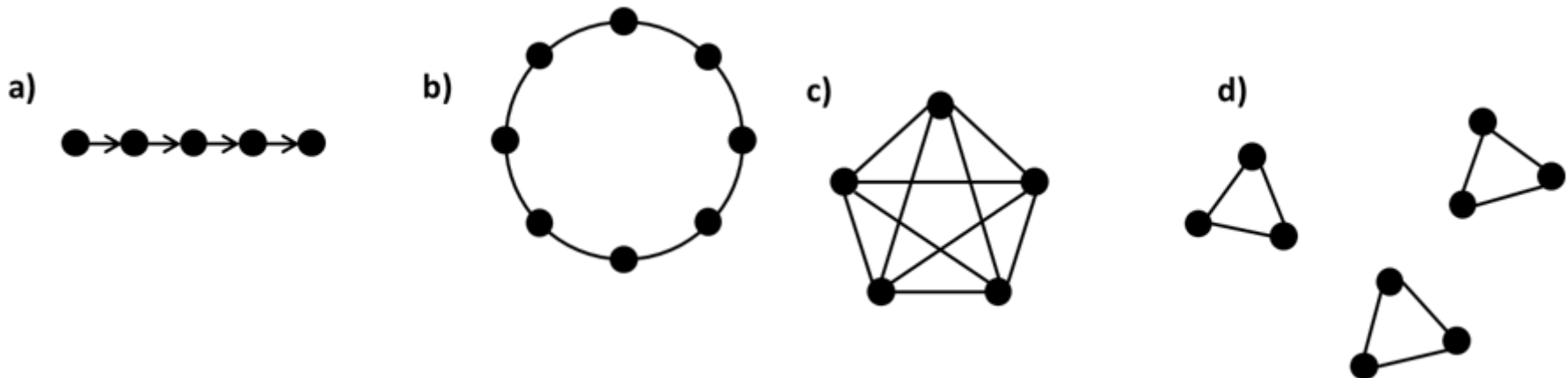
Algorytm zainspirowany był działaniami stadnymi zwierząt, owadów, ptaków, ryb, etc. Twórcy zajmowali się komputerowymi symulacjami grup ptaków kluczących nad źródłami pokarmu. W pewnym momencie zorientowali się, że ich algorytm dobrze sprawdzał się do optymalizacji.



Particle Swarm Optimization (PSO)

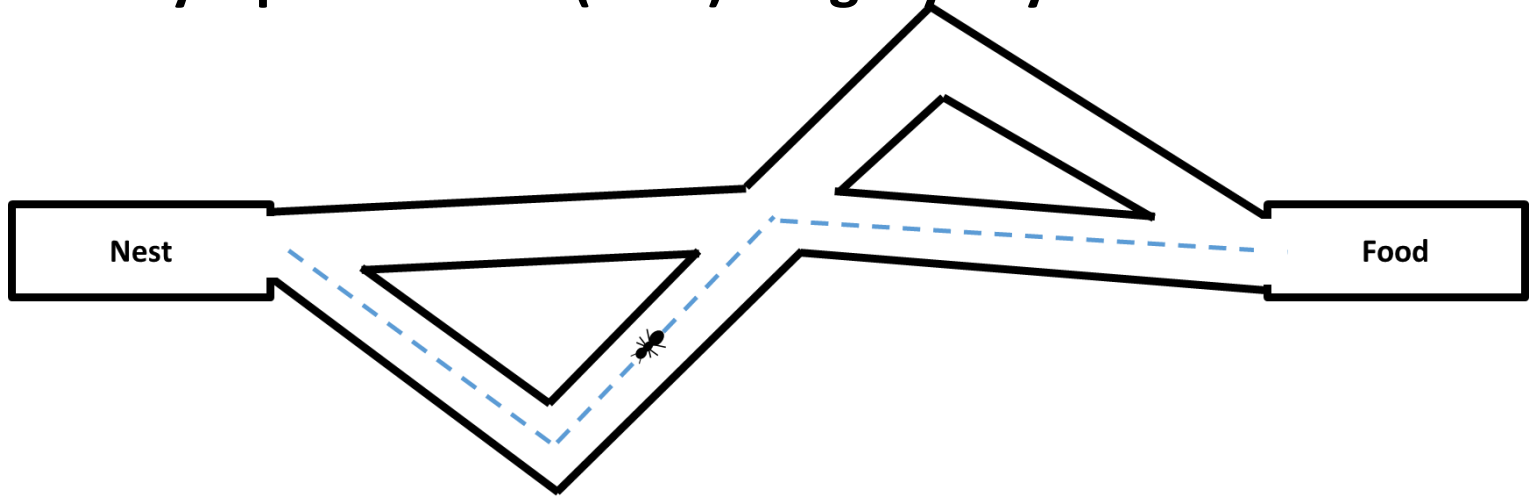
W celu unikania blokowania się cząstek w lokalnych optimach można użyć jednej z proponowanych topologii populacji (sąsiedztw). Takie rodzaje sąsiedztw mogą zakładać działania cząstek w konkretnych podgrupach (opisując wzajemną komunikację), lub podział obszaru poszukiwań. Niektóre z popularnych topologii to:

- a) topologii jednokierunkowa – osobniki porównują się tylko z najlepszym z sąsiadów,
- b) topologia pierścieniowa – każda cząstka komunikuje się tylko z sąsiadem po lewej i po prawej stronie,
- c) w pełni połączona topologia – osobniki porównują swoje wartości ze wszystkimi innymi osobnikami,
- d) topologia odizolowana – cząstki komunikują się tylko w ramach określonych grup.

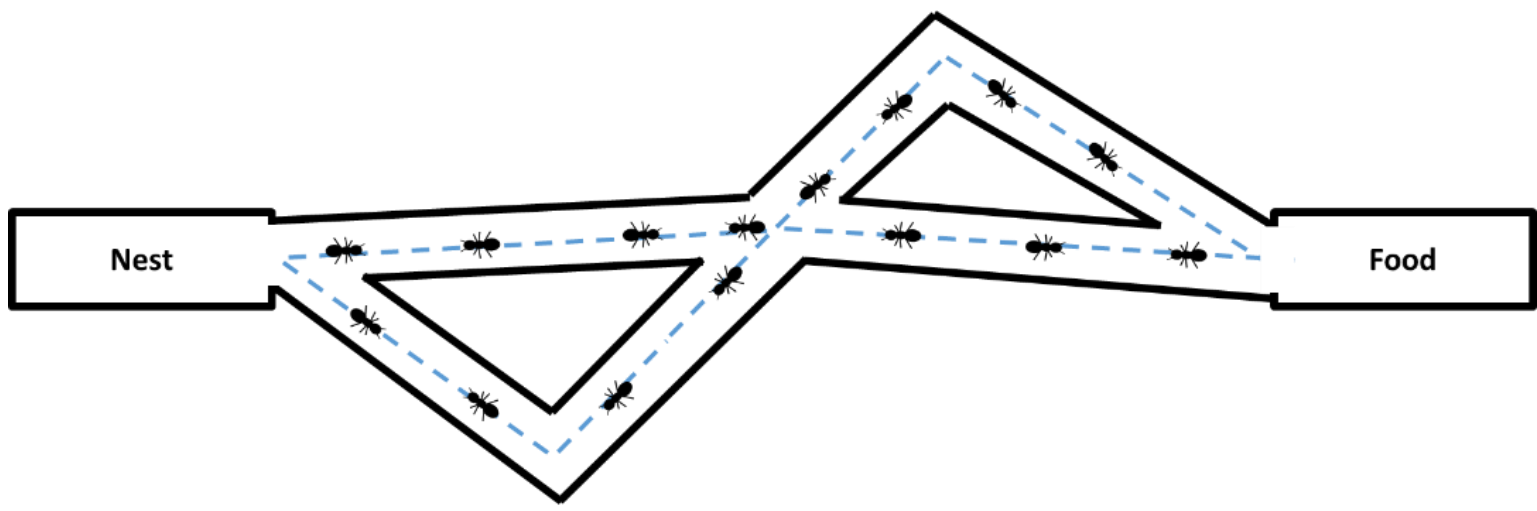


Ant Colony Optimization (ACO) - Algorytmy kolonii mrówek

1)

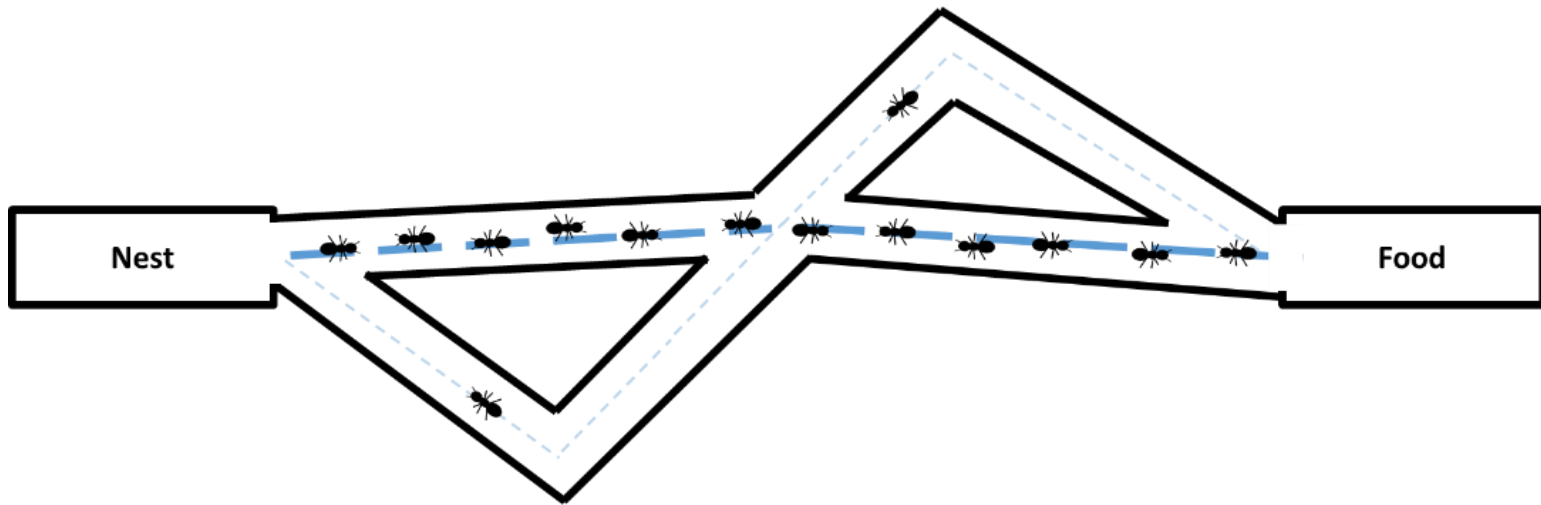


2)

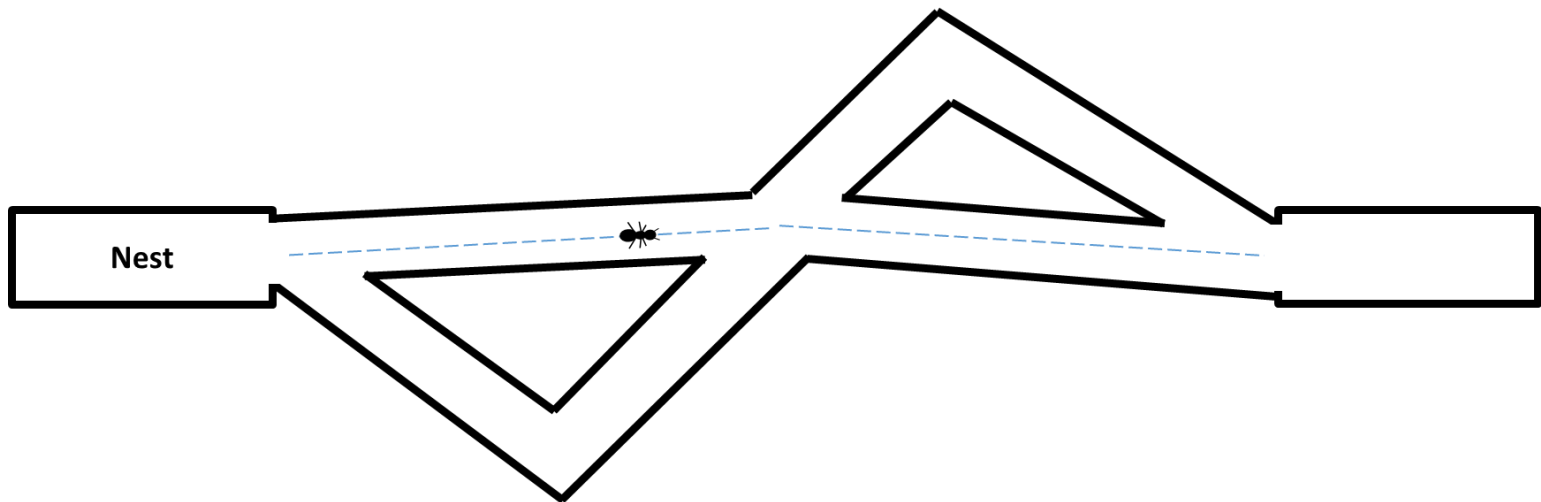


Ant Colony Optimization (ACO)

3)

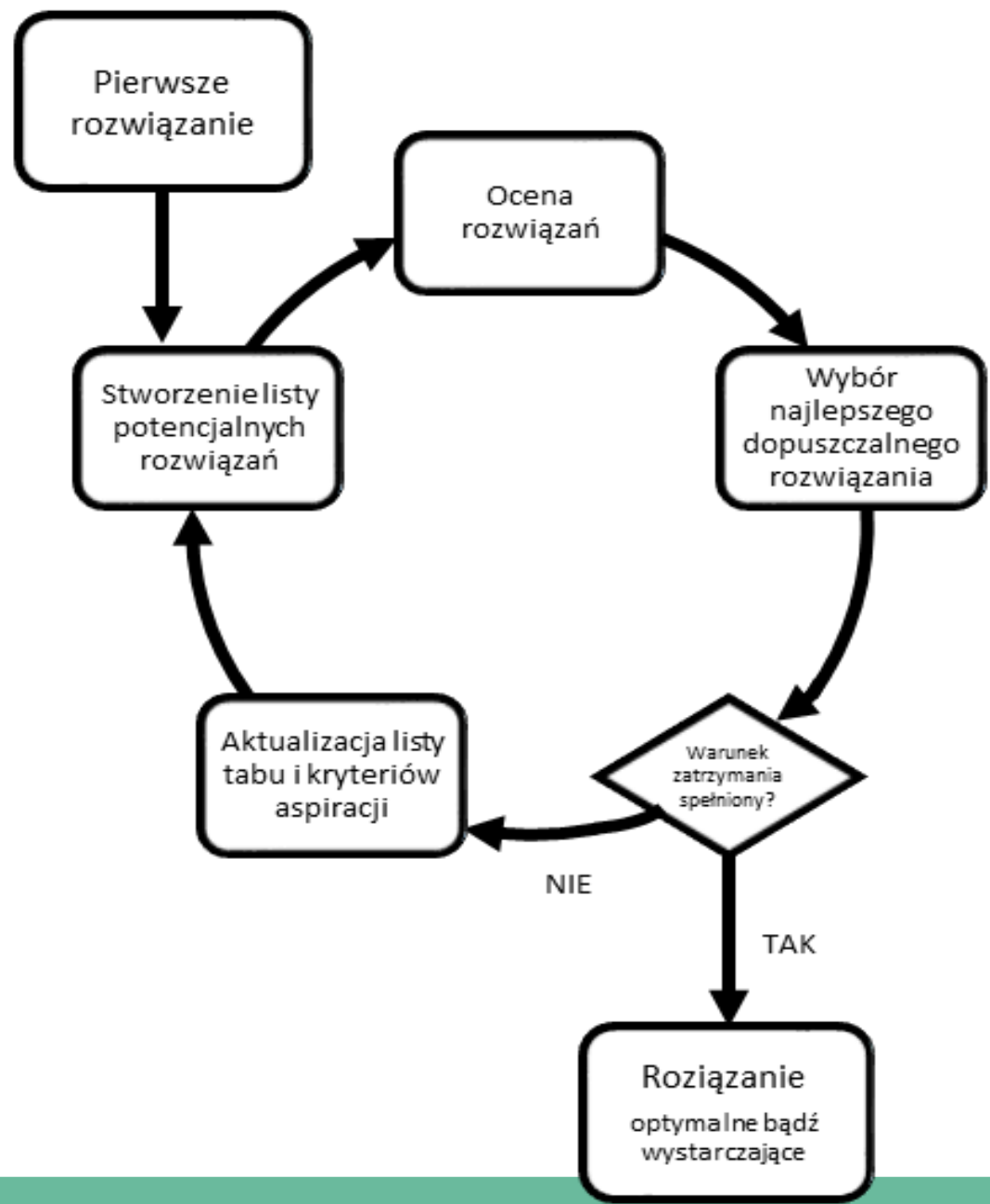


4)



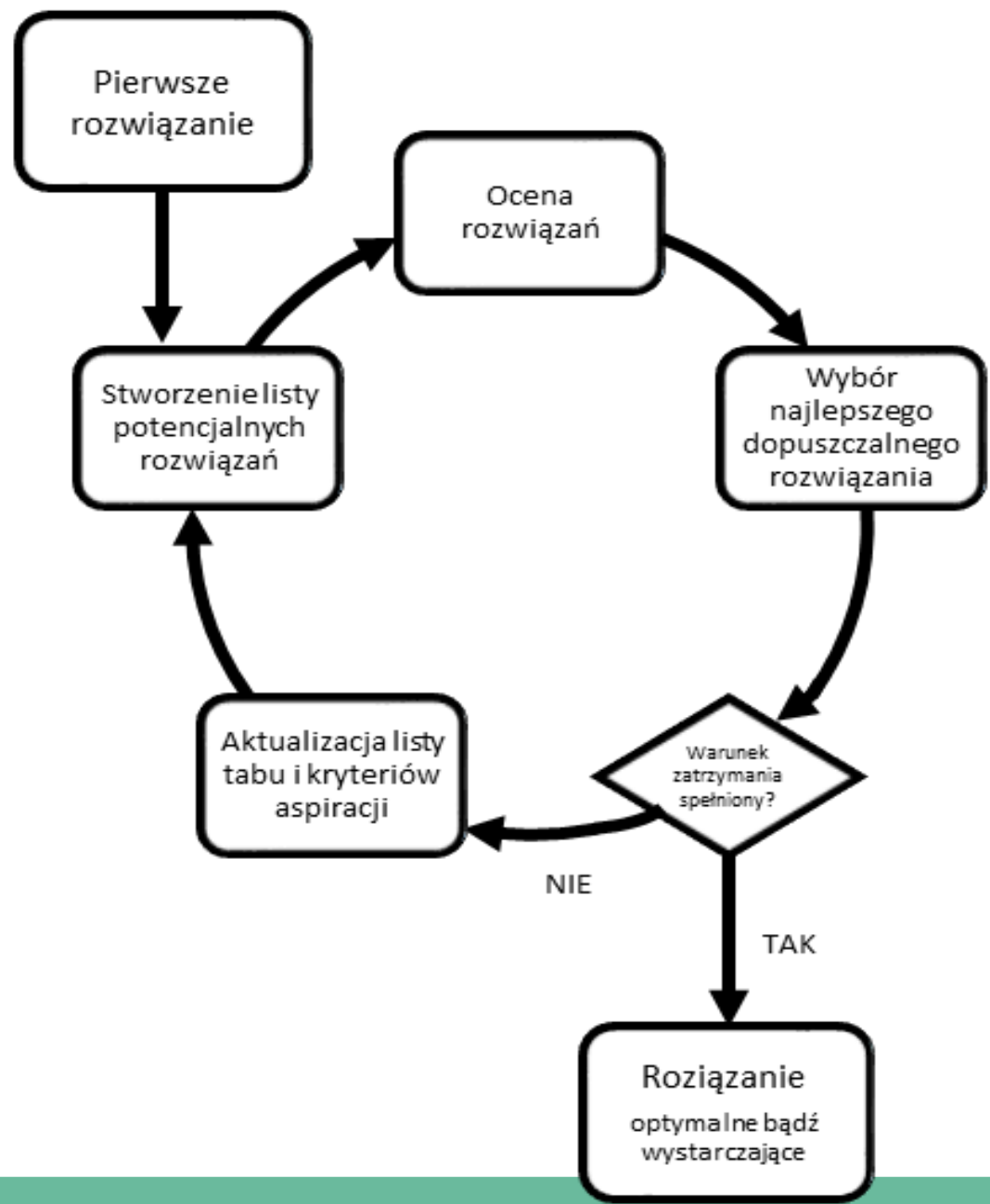
Tabu Search (TS)

Przeszukiwanie tabu



Tabu Search (TS)

Przeszukiwanie tabu



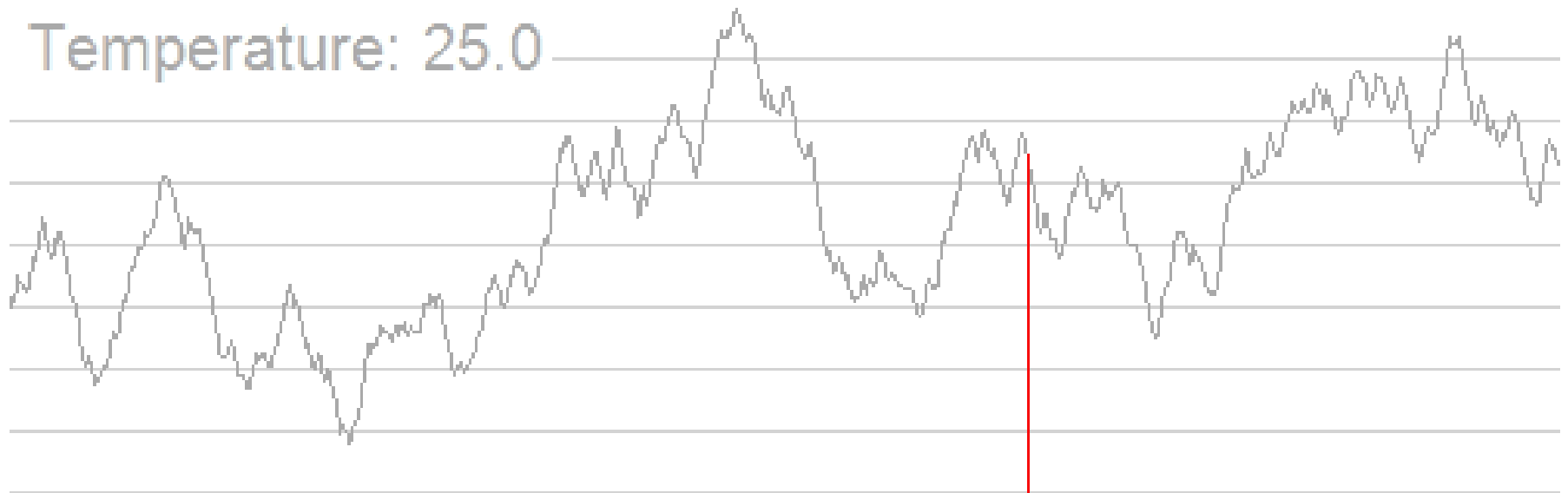
Simulated Annealing (SA) - Symulowane wyżarzanie

Algorytm symulowanego wyżarzania (ang. Simulated Annealing - SA) został opracowany przez Kirkpatrick'a na podstawie prac Metropolis. Fizyczne wyżarzanie zostało zastąpione symulacją komputerową.

Relation between annealing in metallurgy and simulated annealing optimisation algorithm

Metalurgia	Algorytm optymalizacji
Stany układu	Rozwiązania
Energia	Cel optymalizacji (czyli czas i koszty)
Zmiana stanu	Rozwiązania sąsiadujące
Temperatura	Parametr temperatury symulacji
Stan stały	Uzyskane rozwiązanie

Simulated Annealing (SA)



https://en.wikipedia.org/wiki/File:Hill_Climbing_with_Simulated_Annealing.gif

Genetic Algorithms (GA) - Algorytmy genetyczne

Osobnik (możliwe rozwiązanie) – jest podstawową jednostką podlegającą ewolucji. W biologii, osobniki żyją w pewnym środowisku. Celem ewolucji jest powstanie osobnika, najlepiej przystosowanego do danego środowiska (osobnika alfa). W GA osobniki są reprezentowane przez możliwe/przykładowe rozwiązania problemu optymalizacji (np. przykładowy harmonogram).

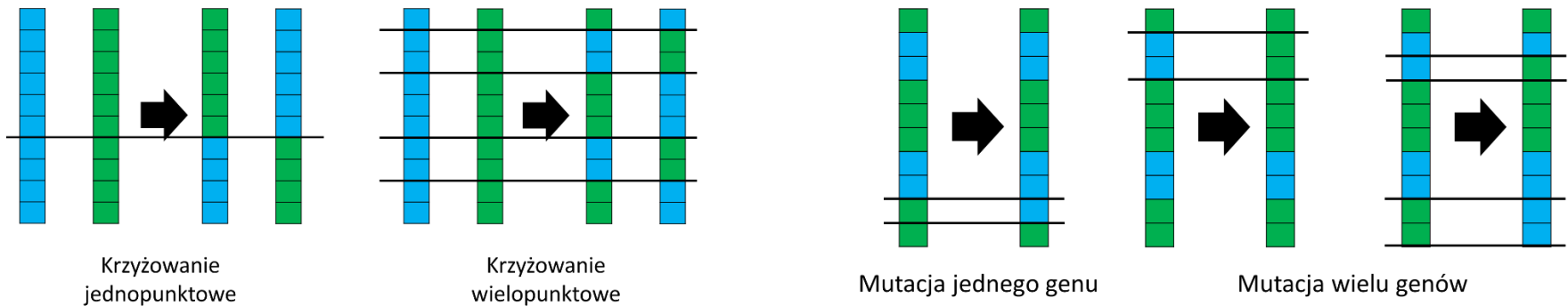
Populacja – zbiór osobników podlegających ewolucji.

Przystosowanie – funkcja, która pozwala na ocenę poszczególnych osobników (zgodnie z problemem optymalizacyjnym).

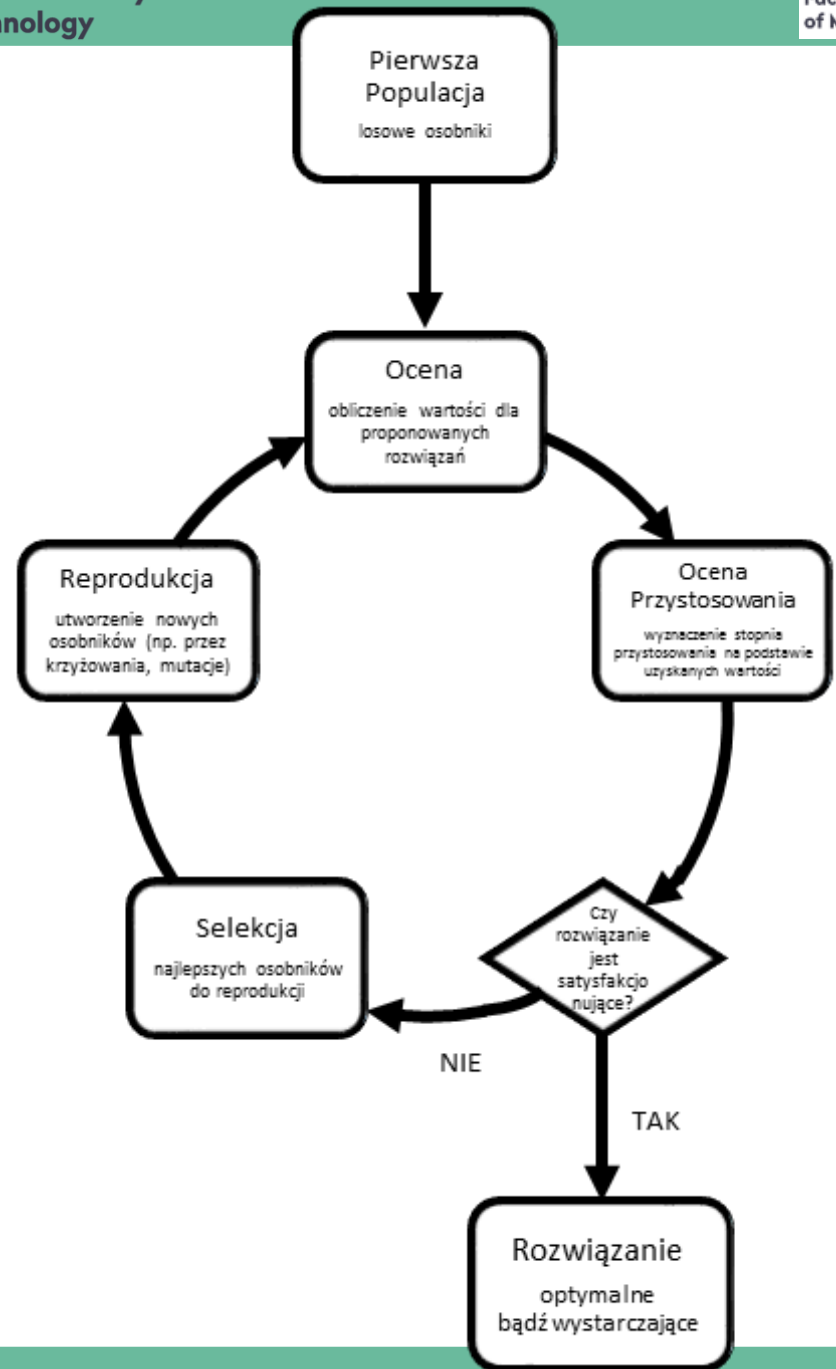
Fenotyp – ujawniające się cechy osobnika, które determinują jego przystosowanie do danego środowiska. W algorytmie genetycznym są to parametry rozwiązania, które podlegają ocenie (np. czas realizacji projektu, NPV).

Genotyp – struktura reprezentująca fenotyp. Pełny opis osobnika. Genotypem może być pojedynczy chromosom. W problemie budowlanym, może to być np. wektor terminów rozpoczęcia poszczególnych czynności w harmonogramie.

Chromosom – ciąg kodowy, składający się z genów/cech, jest to miejsce przechowywania genotypu osobnika.

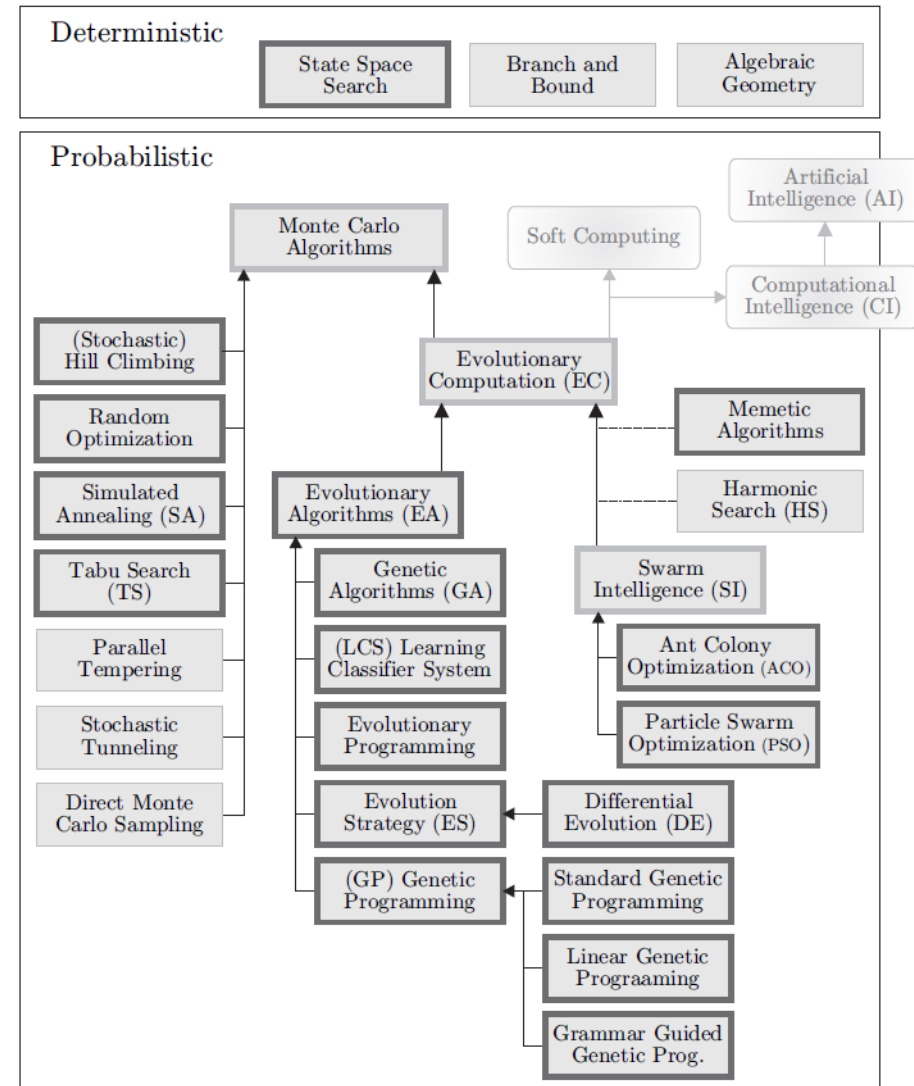


Genetic Algorithms (GA)



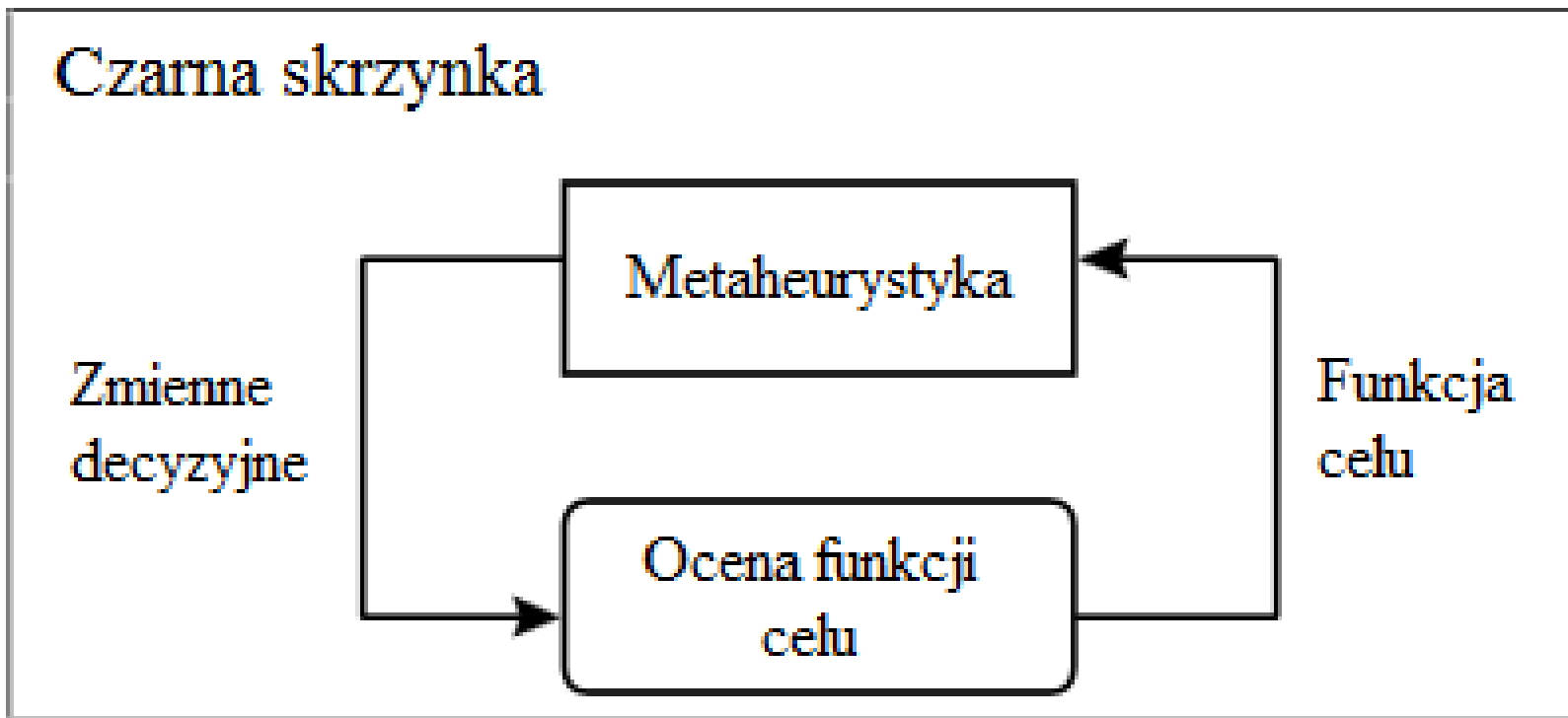
Wybrane inne algorytmy

- Variable Neighborhood Search (VNS)
- Local Search (LS)
- Iterated Local Search (ILS)
- Monte-Carlo Tree Search (MCTS)
- Harmony Search (HS)
- Artificial Immune System (AIS)
- Frog-Leaping Algorithm (FLA)
- Artificial Bee Colony (ABC)
- Bee Colony Optimization (BCO)
- Marriage in honey-Bee Optimization (MBO)
- Social Cognitive Optimization (SCO)
- Differential Evolution (DE)
- Scatter Search (SS)
- Estimation of Distribution Algorithm (EDA)
- Rider Optimization Algorithm (ROA)
- NSGA-II (and other GA variants)
- hybrid algorithms
- memetic algorithms
- parallel metaheuristics
- ...



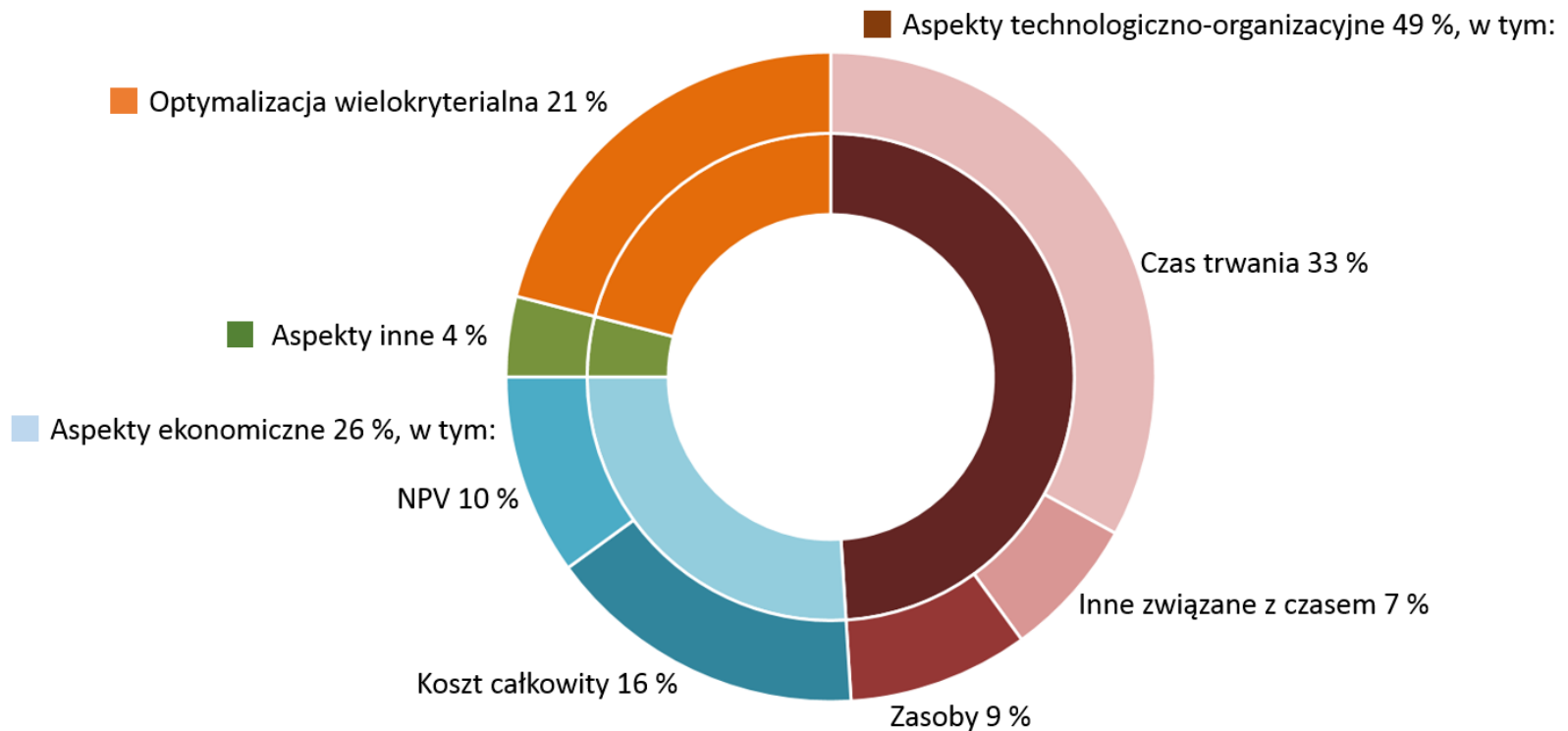
Weise, T. (2009). Global optimisation algorithms-theory and application.

A więc który najlepszy?



Harmonogramy budowlane – kryteria optymalizacyjne

Orientacyjna częstość optymalizacji harmonogramów wg. kryteriów - RCPSP:



Based on: Habibi, F., Barzinpour, F., & Sadjadi, S. (2018). Resource-constrained project scheduling problem: review of past and recent developments. *Journal of project management*, 3(2), 55-88.

Harmonogramy budowlane – kryteria optymalizacyjne

- cost / total cost / outcome / total cash demand
- profit = income - outcome
- maximum monthly cash demand
- Future Value, FV
- Present Value, PV
- Weighted Average Cost of Capital, WACC
- Net Present Value, NPV
- Internal Rate of Return, IRR
- Modified Net Present Value, MNPV
- Net Present Value Ratio, NPVR
- Profitability Index, PI
- Modified Profitability Index, MPI
- Modified Internal Rate of Return, MIRR
- duration / makespan / total makespan
- Total Project Delay – TPD
- quality
- schedule robustness
- value
- continuity of work
- work brigades delay
- cost of moving brigades
- resource supply
- holding cost
- maximum employment
- employment deviations
- resource quality level
- durability
- LCC – Life Cycle Cost
- CO₂ emission
- demand for energy
- waste generation
- safety
- reputation
- customer satisfaction
- employees satisfaction
- environmental nuisances

Funkcja celu / ograniczenia

Więcej informacji:

- Weise, T. (2009). Global optimisation algorithms-theory and application. Self-Published,, 25-26.
- CLOEMC - Construction Manager's Library - www.cloemcv.il.pw.edu.pl
- Neumann, K., Schwindt, C., Zimmermann, J. (2012). Project scheduling with time windows and scarce resources: temporal and resource-constrained project scheduling with regular and nonregular objective functions. Springer Science & Business Media.
- Sprecher, A., Kolisch, R., & Drexel, A. (1993). Semi-active, active and non-delay schedules for the resource-constrained project scheduling problem (No. 307). Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel.
- Kostrubiec, A. (2003). Harmonogramowanie realizacji projektów-przegląd modeli. W: Inżynieria zarządzania przedsiębiorstwami. Red. L. Zawadzka. Gdańsk, 2003.
- Google scholar

Partnership:

**Politechnika
Warszawska**



AEEBC



COMMON LEARNING OUTCOMES FOR EUROPEAN MANAGERS IN CONSTRUCTION V

CLOEMC I:

M1: PROJECT MANAGEMENT IN CONSTRUCTION,
M2: HUMAN RESOURCE MANAGEMENT IN CONSTRUCTION,
M3: PARTNERING IN CONSTRUCTION,
M4: BUSINESS MANAGEMENT IN CONSTRUCTION ENTERPRISE
M5: REAL ESTATE MANAGEMENT,
M6: ECONOMY AND FINANCIAL MANAGEMENT IN CONSTRUCTION,
M7: CONSTRUCTION MANAGEMENT.

CLOEMC II:

M8: RISK MANAGEMENT,
M9: PROCESS MANAGEMENT – LEAN CONSTRUCTION,
M10: COMPUTER METHODS IN CONSTRUCTION,
M11: PPP PROJECTS IN CONSTRUCTION,
M12: VALUE MANAGEMENT IN CONSTRUCTION,
M13: CONSTRUCTION PROJECTS – GOOD PRACTICE.

CLOEMC III:

M14: DUE-DILIGENCE IN CONSTRUCTION,
M15: MOTIVATION AND PSYCHOLOGY ASPECTS IN CONSTRUCTION INDUSTRY,
M16: PROFESSIONALISM AND ETHICS IN CONSTRUCTION,
M17: SUSTAINABILITY IN CONSTRUCTION,
M18: HEALTH AND SAFETY IN CONSTRUCTION,
M19: MANAGING BUILDING PATHOLOGY AND MAINTENANCE.

CLOEMC IV:

M20. REVITALISATION AND REFURBISHMENT IN CONSTRUCTION,
M21. BUILDING INFORMATION MODELLING – BIM,
M22. OPTIMISATION OF CONSTRUCTION PROCESSES,
M23. DIVERSITY MANAGEMENT IN CONSTRUCTION,
M24. MECHANICS OF MATERIALS AND STRUCTURES FOR CONSTRUCTION

COMMON LEARNING OUTCOMES FOR EUROPEAN MANAGERS IN CONSTRUCTION V

CLOEMC V:

M26: MENTORING AND COACHING IN CONSTRUCTION,

M27: ARCHEOLOGICAL AND HERITAGE PROTECTION ASPECTS IN CONSTRUCTION,

M28: DISRUPTIVE INNOVATION IN CONSTRUCTION MANAGEMENT,

M29: CIRCULAR ECONOMY IN CONSTRUCTION,

M30: AFFORDABLE HOUSING,

M31: SOCIAL SUSTAINABILITY IN CONSTRUCTION.

www.cloemcv.il.pw.edu.pl



Partnership:

**Politechnika
Warszawska**



AEEBC





Co-funded by
the European Union



Partnership:

**Politechnika
Warszawska**



COMMON LEARNING OUTCOMES FOR EUROPEAN MANAGERS IN CONSTRUCTION VI

www.cloemcvi.il.pw.edu.pl

MANUALS:

M33: DESIGN AND EXECUTION OF FACADES FOR CONSTRUCTION MANAGERS

Efficient and safe execution of facades at EU market

M34: DIGITAL TWIN IN CONSTRUCTION

Modern tools for construction managers

M35: URBAN MINING IN CONSTRUCTION

Recycling in construction

M36: ENVIRONMENTAL IMPACTS OF EARTHQUAKES AND MINING FOR CONSTRUCTIONS MANAGERS

Ground, foundations and building safety

M37: LOGISTICS IN CONSTRUCTION

Safe and efficient site and transport in construction

M38: GREEN TECHNOLOGY FOR CONSTRUCTION MANAGERS

Green construction state of the art

M39: TALENT MANAGEMENT AND FUTURE COMPETENCES OF CONSTRUCTION MANAGERS

Human resource management issues