

# Kalibracja modeli sieci wodociągowych – analiza dziedziny

*Igor Swat, Rafał Piwowar*

Niniejszy dokument skupia się na analizie problematyki symulowania a także optymalizacji modeli sieci wodociągowych, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania algorytmów genetycznych w tej dziedzinie.

## 1. Modele sieci wodociągowych

### 1.1 Historia i wprowadzenie

Już od starożytności sieci wodociągowe i gospodarka wodna jest istotnym elementem funkcjonowania społeczeństwa. Już w starożytności wiadano, że np. akwedukty muszą mieć stałe nachylenie co powodowało rzymskim konstruktorom wiele problemów przy górach i dolinach (tak powstały rzymskie akwedukty). Współcześnie modele sieci wodociągowe opracowuje się używając modeli komputerowych. W Polsce takie prace pojawiają się od lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych. Zwykle skupiają się na odporności i awaryjności systemów, wprowadzaniu oszczędności oraz zapewnieniu odpowiedniego przepływu i ciśnienia.

### 1.2 Zagrożenia i wyzwania

- precyzyjna inwentaryzacja systemu i zużycie materiału
- złożoność symulacji - nieliniowe równania, zużycie wody, sezonowość, warunki atmosferyczne, stałe wyznaczone tylko eksperymentalnie, zużycie zależne od pory dnia
- synchronizacja między modelem teoretycznym a rzeczywistym
- testowania i kalibracja do zmieniających się warunków

### 1.3 Najnowsze osiągnięcia

- Systemy SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)
- Digital twins - repliki rzeczywistych systemów które synchronizują się z terenowych czujników IoT
- Machine Learning i najnowsze rozwiązania w AI, w przyszłości może sieci PINN
- integracja symulacji i monitoringu infrastruktury

[201\\_WODA2012\\_T1.pdf](#)

[https://www.researchgate.net/profile/Arjun-Kumar-18/publication/282331598\\_DESIGN\\_OF\\_WATER\\_DISTRIBUTION\\_SYSTEM\\_USING\\_EPANET/links/560cb13a08ae6c9b0c42cee4/DESIGN-OF-WATER-DISTRIBUTION-SYSTEM-USING-EPANET.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Arjun-Kumar-18/publication/282331598_DESIGN_OF_WATER_DISTRIBUTION_SYSTEM_USING_EPANET/links/560cb13a08ae6c9b0c42cee4/DESIGN-OF-WATER-DISTRIBUTION-SYSTEM-USING-EPANET.pdf)  
(PDF) A review of pipe network optimisation techniques

## 2. Podstawy teoretyczne

**2.1 Równanie Bernoulliego** - przedstawia bilans energii dla cieczy doskonałej, która nie ponosi żadnych strat.

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

gdzie:

$p_1$  i  $p_2$  - przekroje rur,

$v_1$  i  $v_2$  - prędkości cieczy w rurach,

$h_1$  i  $h_2$  - wysokość na jakich znajdują się odcinki rur,

$g$  - przyspieszenie ziemskie

Warto zauważyć, że

*Ciecz, płynąc w rurze o zmieniającym się przekroju, ma mniejsze ciśnienie na odcinku, gdzie przekrój jest mniejszy.*

## 2.2 Wzór Chézy

$$v = C\sqrt{SR}$$

gdzie:

$v$  - średnia prędkość przepływającej wody [m/s].

$C$  - współczynnik, wartość przyjmowana jako stała, ale zależna od szorstkości rury, hydraulicznego ciśnienia oraz spadku,

$S$  - spadek

$R$  - Promień hydrauliczny

Służy do obliczania prędkości przepływu cieczy w otwartych kanałach lub rurach - pierwszy raz zastosowany w kanale Courpalet oraz w Sekwanie.

## 2.3 Równanie Hazena-Williamsa

$$v = kCR^{0.63}S^{0.54}$$

gdzie

$k$  - współczynnik przeliczenia jednostek

$C$  - współczynnik gładkości ścianek rur

$R$  - Promień hydrauliczny

$S$  - spadek hydrauliczny

Jednostki zależą od przyjętego układu jednostek (np. SI) co wpływa na wartość stałej k. Stała 0.63 wskazuje jak szybko następuje wzrost prędkości przy zwiększeniu przekroju dla przepływu o stałym spadku. Może być niedokładna dla małych średnic. Stałą 0.54 ustalono aby była jak najbardziej uniwersalna - dla różnych rur (różne średnice, różne materiały, różne spadki). Obecnie używana jedynie do przybliżonych obliczeń - nie uwzględnia temperatury i lepkości wody

### 2.3 Równanie Darcy'ego-Weisbacha

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2}$$

lub

$$\Delta h = \lambda \frac{L}{D} \frac{u^2}{2g}$$

gdzie:

$\Delta p$  - spadek ciśnienia [Pa],

$\Delta p$  - wysokość strat ciśnienia [m],

$\lambda$  - współczynnik oporu zależny od liczby Reynoldsa  $Re$  i chropowatości względnej rury (bezwymiarowy),

$L$  - długość przewodu [m],

$D$  - średnica przewodu [m],

$\rho$  - gęstość płynu [ $\text{kg/m}^3$ ]

$u$  - prędkość płynu [m/s]

$g$  - przyspieszenie ziemskie [ $\text{m/s}^2$ ]

W większości przypadków do obliczeń hydraulicznych wykorzystuje się wzór Darcy-Weisbacha.

[\(PDF\) A review of pipe network optimisation techniques](#)

[\(PDF\) Co kryje w sobie wzór Hazena-Williamsa?](#)

Przedstawione wyżej równania to tylko wybrane - niezbędne były również prace związane z określeniem lepkości oraz z opisem charakteru ruchu i punktu przejścia ruchu laminarnego w turbulentny.

## 3. Optymalizacja modelu sieci

Symulacje sieci wodociągowych pozwalają na odwzorowywanie rzeczywistego zachowania sieci w warunkach środowiska wirtualnego. Główne cele stosowania symulacji sieci wodociągowych to m. in:

- Identyfikacja problemów i awarii
- Zarządzanie kryzysowe
- Wsparcie decyzji inwestycyjnych

Ponadto, symulacje pozwalają na dopasowanie schematu i parametrów sieci, aby ta jak najlepiej odpowiadała rzeczywistym potrzebom.

Na przestrzeni lat zaproponowanych zostało wiele różnych podejść do optymalizacji parametrów modeli sieci wodociągowych - od podejść klasycznych do algorytmów genetycznych i innych meta-heurystyk.

Poniżej opisane zostały znane podejścia do optymalizacji modeli sieci wodociągowych (i nie tylko), z podziałem na metody klasyczne i wykorzystujące meta-heurystyki.

### 3.1 Metody klasyczne

Jednym z klasycznych podejść jest iteracyjna metoda analizy przepływów **Hardy Cross**, opracowana przez amerykańskiego inżyniera Hardy'ego Crossa i po raz pierwszy opublikowana w 1936 roku

(([https://en.wikipedia.org/wiki/Hardy\\_Cross\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Hardy_Cross_method))).

Proces iteracyjny w metodzie Hardy'ego Crossa polega na:

1. **Przyjęciu początkowych wartości przepływów** w poszczególnych odcinkach sieci, które spełniają warunek ciągłości przepływu w węzłach.
2. **Obliczeniu strat ciśnienia** dla każdej pętli na podstawie przyjętych przepływów.
3. **Korekcie przepływów** poprzez dodanie odpowiednich poprawek, tak aby zminimalizować różnice w stratach ciśnienia w każdej pętli.
4. **Powtarzaniu procesu** aż do osiągnięcia zadowalającej dokładności, czyli gdy suma strat ciśnienia w każdej pętli będzie bliska zeru.

Innym znanym podejściem jest zastosowanie metody **Linear Programming Gradient (LPG)**. Jest to technika optymalizacyjna stosowaną m. in. w projektowaniu sieci wodociągowych, mającą na celu minimalizację kosztów przy jednoczesnym spełnieniu wymagań hydraulicznych. Zgodnie z artykułem "Analysis of the Linear Programming Gradient Method for Optimal Design of Water Supply Networks" autorstwa Avnera Kesslera i Uriego Shamira

([https://www.researchgate.net/publication/230873061\\_Analysis\\_of\\_the\\_Linear\\_Programming\\_Gradient\\_Method\\_for\\_Optimal\\_Design\\_of\\_Water\\_Supply\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/230873061_Analysis_of_the_Linear_Programming_Gradient_Method_for_Optimal_Design_of_Water_Supply_Networks)),

metoda ta składa się z dwóch naprzemiennie rozwiązywanych etapów:

1. **Rozwiązanie problemu programowania liniowego (LP)** dla danego, dopuszczalnego rozkładu przepływów w sieci.
2. **Przeprowadzenie poszukiwań w przestrzeni zmiennych przepływu**, opartych na gradiencie funkcji celu (GOF).

## 3.2 Meta-heurystyki

W ostatnich czasach na popularności zyskuje podejście optymalizacji parametrów sieci w oparciu o meta-heurystyki - algorytmy genetyczne czy populacyjne.

W artykule autorstwa Uchit Sangroula, Kuk-Heon Ha , Kang-Min Koo, Kapil Gnawali oraz Kyung-TaekYum (<https://www.mdpi.com/2073-4441/14/6/851>) opisane zostało podejście do optymalizacji parametrów sieci wodociągowej z użyciem algorytmów genetycznych (w szczególności SOP-WDN) i środowiska EPANET 2. Autorzy opisują ogólną procedurę postępowania w przypadku zastosowania algorytmu genetycznego do wspomnianego zadania:

### 1. Definicja funkcji celu kalibracji

Etap ten polega na zdefiniowaniu pewnej funkcji, która wyrazi błąd między mierzonymi wartościami (np. między ciśnieniami w poszczególnych węzłach), a wynikami symulacji hydraulicznej. Może to być np. funkcja MSE (Mean Squared Error) uzupełniona o pewne dodatkowe kary za naruszenie warunków hydraulicznych lub założeń projektu.

### 2. Kodowanie parametrów kalibracji

Parametry modelu (np. średnice czy szorstkość rur) kodowane są jako ciągi binarne. Odpowiadają one wówczas koncepcji chromosomu w algorytmach genetycznych.

### 3. Generowanie początkowej populacji

Rozpoczęcie eksploracji parametrów od wygenerowania losowej populacji kandydatów.

### 4. Symulacja hydrauliczna

Dla każdego kandydata przeprowadza się symulację sieci przy użyciu np. narzędzia EPANET. Wyniki symulacji (np. ciśnienia w węzłach) porównywane są z danymi obserwacyjnymi, a na ich podstawie obliczana jest wartość funkcji celu (patrz punkt 1).

### 5. Operatory genetyczne

Na podstawie obliczonej funkcji celu obliczany jest tzw. fitness (np. jako odwrotność błędu kalibracji). Następnie, przy użyciu operatorów takich jak selekcja (gdzie lepiej dopasowane chromosomy mają wyższe prawdopodobieństwo reprodukcji), krzyżowanie (łącznie cechy dwóch rodziców w celu uzyskania potomstwa) oraz mutacja (wprowadzająca niewielkie losowe zmiany, które pozwalają na uniknięcie utknięcia w minimum lokalnym), generowana jest nowa populacja rozwiązań. Proces ten jest iteracyjny i powtarza się do momentu dostatecznie silnej populacji (tzn. reprezentującej rozwiązanie o zadanej dokładności kalibracyjnej).

### 6. Selekcja najlepszego rozwiązania i walidacja

Po osiągnięciu kryterium zatrzymania (np. liczby iteracji lub minimalnego błędu) wybierany jest najlepszy kandydat, którego zestaw parametrów stanowi skalibrowany model sieci. Dla wybranego zestawu parametrów

przeprowadzana jest walidacja - porównanie z niezależnymi danymi obserwacyjnymi.

W artykule "Optimization of water distribution of network systems using the Harris Hawks optimization algorithm" autorstwa Saeid Khalifeh

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016120301680>)

zaprezentowane zostało podobne podejście, jednak z użyciem algorytmu Harris Hawks zamiast SOP-WDN. W artykule wymienionych zostało kilka interesujących aspektów optymalizacji:

- Zastosowanie **kodu Graya** do kodowania parametrów w celu poprawienia płynności zmian między kolejnymi wartościami (np. średnicami rur)
- Analiza specjalnych systemów kar do penalizowania rozwiązań naruszających ograniczenia hydrauliczne, np. minimalne ciśnienie w węzłach.

#### 4. Algorytmy populacyjne, White Shark Optimizer (WSO)

Algorytm **White Shark Optimizer** (WSO) jest przykładem algorytmu populacyjnego i został zaprezentowany w artykule "White Shark Optimizer: A novel bio-inspired meta-heuristic algorithm for global optimization problems" autorstwa Malik Braik (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705122001897>).

Zasada działania algorytmu jest następująca:

##### 1. Inicjalizacja populacji

Standardowy etap dla algorytmów populacyjnych.

##### 2. Symulacja zachowań łowieckich

WSO imituje kilka kluczowych aspektów polowania białych rekinów:

- **Wykrywanie ofiary:** Każdy osobnik ocenia swoje otoczenie za pomocą funkcji celu, analogicznie do tego, jak rekin wykrywa potencjalną ofiarę.
- **Podejście do ofiary:** Gdy rekin „wyczuje” obszar o wysokim potencjale (tj. dobrej wartości funkcji celu), przystępuje do intensywniejszej eksploatacji tego regionu. Mechanizm ten polega na przemieszczeniu się w kierunku obszaru, który obiecuje znalezienie lepszego rozwiązania.
- **Nagły atak:** Jednym z wyróżniających elementów jest model nagłego, gwałtownego „ataku” – rekin wykonuje dynamiczny ruch, który ma na celu szybkie przybliżenie się do globalnego optimum. Takie zachowanie umożliwia zarówno szybką eksplorację, jak i eksploatację wybranych regionów przestrzeni rozwiązań.

##### 3. Aktualizacja pozycji i adaptacja parametrów

W zależności od wyników oceny jakości rozwiązania, algorytm może:

- Zwiększyć intensywność eksploracji, gdy obecne rozwiązania nie wykazują znaczącej poprawy.
- Skupić się na eksploatacji obszaru, gdy znaleziono region o wysokiej wartości funkcji celu.