



**POLSKA AKADEMIA NAUK**  
**Instytut Badań Systemowych**

---

**BADANIA SYSTEMOWE**

**Tom 76**

**MODELOWANIE MATEMATYCZNE,  
OPTYMALIZACJA I STEROWANIE  
PRACĄ PRZEPLYWOWYCH  
OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW**

**Bartosz Szelaǳ**

**Warszawa 2019**

**MODELOWANIE MATEMATYCZNE, OPTYMALIZACJA I STEROWANIE PRACĄ  
PRZEPLYWOWYCH OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW, Bartosz Szelaǳ**



**POLSKA AKADEMIA NAUK  
INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH**

**Seria: BADANIA SYSTEMOWE  
Tom 76**

---

**Redaktor naukowy:  
Prof. dr hab. inż. Olgierd Hryniewicz**

**Warszawa 2019**

Rada redakcyjna serii: BADANIA SYSTEMOWE

Prof. Janusz Kacprzyk – przewodniczący

Prof. Olgierd Hryniewicz

Prof. Tadeusz Kaczorek

Prof. Jerzy Klamka

Prof. Józef Korbicz

Prof. Zbigniew Nahorski

Prof. Ngoc Thanh Nguyen

Prof. Marek Niezgódka

Prof. Ewaryst Rafajłowicz

Prof. Leszek Rutkowski

Prof. Roman Słowiński

Prof. Jan Studziński

Prof. Tomasz Szapiro

**Bartosz Szelaĝ**

**MODELOWANIE MATEMATYCZNE,  
OPTYMALIZACJA I STEROWANIE  
PRACĄ PRZEPIYWOWYCH  
OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW**

**Warszawa 2019**

Copyright © by Instytut Badań Systemowych PAN  
Warszawa 2019

**Autor:**

**Dr inż. Bartosz Szela**  
Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki  
Politechnika Świętokrzyska  
bszelag@tu.kielce.pl

**Recenzenci:**

**Dr hab. inż. Ewa Burszta-Adamiak, prof. nadzwyczajny**  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

**Dr hab. inż. Izabela Rojek, prof. nadzwyczajny**  
Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

**Skład:** Anna Gostyńska / Aneta M. Pielak

**Wydawca:**

Instytut Badań Systemowych  
Polska Akademia Nauk  
Newelska 6, 01-447 Warszawa  
www.ibspan.waw.pl

*Publikacja sfinansowana ze środków projektu RID  
Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr 025/RID/2018/19*

**ISSN 0208-8029**

**ISBN 978-83-89475-62-6**

## **Słownik wprowadzonych terminów**

- ABC – algorytm optymalizacji kolonii pszczół (ang. Artificial Bee Colony),
- ADM – fizyczny model fermentacji beztlenowej (ang. Activated Digestion Model),
- AGF – dobór zmiennych niezależnych bazujący na logice rozmytej z adaptacyjnym, gradientowym algorytmem uczenia, określany metodą filtra Kalmana; (ang. Adaptive Gradient with Fuzzy Variable Selection)
- Alk – alkaliczność,
- ANFIS – adaptacyjne sieci neuronowe (ang. Adaptive Neuro Fuzzy System),
- ANN – sztuczna sieć neuronowa (ang. Artificial Neural Network),
- AR – model autoregresyjny (ang. AutoRegressive model),
- ARIMA – model autoregresyjny średniej ruchomej (ang. AutoRegressive Integrated Moving Average),
- ASM(1, 2, 2d, 3) – modele do symulacji osadu czynnego (ang. Activated Sludge Model),
- (K)ASP – oczyszczalnia ścieków komunalnych bazująca na osadzie czynnym,
- (P)ASP – oczyszczalnia ścieków przemysłowych bazująca na osadzie czynnym,
- A2O – trójstopniowy system oczyszczania ścieków, znany również pod nazwą BARDENPHO,
- BSM(1, 2) – typ modeli fizycznych do symulacji osadu czynnego (ang. Benchmark Simulation Model),
- BT – metoda drzew wzmacnianych (ang. Boosted Tree),
- BZT<sub>5</sub> – biochemiczne zapotrzebowanie na tlen,
- BSM, SIMBA, WEST, GPS-X, STOAT – programy do symulacji pracy oczyszczalni ścieków,

- C – współczynnik regularyzacji,
- CALPUFF – program do prognozy jakości powietrza,
- CBZT – całkowite biochemiczne zapotrzebowanie na tlen,
- ChZT<sub>Cr</sub>(ChzT) – chemiczne zapotrzebowanie na tlen,
- CN – cjanki,
- CNN – kaskadowe sieci neuronowe (ang. Cascade Neural Network),
- c-NN – metoda analizy skupień c-średnich (ang. c-Nearest Neighbour),
- COA – algorytm optymalizacji „kukułki” (ang. Cuckoo Optimization Algorithm),
- COND – konduktywność,
- COR – współczynnik niezawodności,
- C&RT – klasyfikacyjne drzewa regresyjne (ang. Classification Regression Tree),
- DO – stężenie tlenu rozpuszczonego,
- EKF – metoda rozszerzonego filtra Kalmana (ang. Extended Kalman Filter),
- EnEI – zapotrzebowanie na energię elektryczną obiektu,
- ESM – metoda wygładzania eksponentjalnego (ang. Exponential Smoothing Method),
- EWMA – metoda wykładniczo ważonej średniej ruchomej (ang. Exponentially Weighted Moving Average),
- EQI – współczynnik jakości ścieków na odpływie z oczyszczalni ścieków (ang. Effluent Quality Index),
- Fe(OH)<sub>3</sub>, FePO<sub>4</sub>, Fe<sub>x</sub>Z<sub>y</sub> – związki żelaza do chemicznego strącania fosforu,
- FL – metoda bazująca na logice rozmytej (ang. Fuzzy Logic),
- FNN – rozmyte sieci neuronowe (ang. Fuzzy Neural Network),
- F/M – obciążenie substratowe,
- FR – metoda zbiorów rozmytych – przybliżeniowa (ang. Fuzzy Rough set),
- GA – genetyczny algorytm optymalizacji (ang. Genetic Algorithm),
- GHI – współczynnik emisji gazów cieplarnianych (ang. Greenhouse Emission Index),
- GM – tzw. model grey – box, bazujący na równaniach różniczkowych (ang. Grey Dynamic Modeling),

- GP – metoda programowania genetycznego (ang. Genetic Programming),
- GRNN – uogólniające sztuczne sieci neuronowe (ang. GeneRealized Neural Network),
- HCA – hierarchiczna analiza skupień (ang. Hierarchical Analysis Cluster),
- HRO – hierarchiczne sieci neuronowe (ang. High Order Hierarchical Neural Network),
- HT – hydrauliczny czas zatrzymania,
- $I_o$  – objętościowy indeks osadu (Mohlmana),
- IWA – International Water Association (pol. Międzynarodowe Stowarzyszenie Wodne),
- K – oczyszczalnia ścieków komunalnych,
- kLA – współczynnik transferu tlenu (ang. Coefficient Transfer Oxygen),
- k-NN – metoda najbliższych sąsiadów (ang. k-Nearest Neighbours),
- KOC – komory osadu czynnego,
- L – instalacja laboratoryjna,
- LDA – liniowy model dyskryminacyjny (ang. Linear Discriminant Model),
- LI – strata po prażeniu (ang. Loss on ignition),
- LKT – Lotne Kwasy Tłuszczowe,
- LN – rozkład lognormalny
- $L_{N-NH_4}$  – dobowy ładunek azotu amonowego,
- $\xi_z$  – ładunek wybranego wskaźnika jakości ścieków na wylocie z oczyszczalni,
- MAE – średni błąd bezwzględny (ang. Mean Average Error),
- MAPE – średni błąd względny (ang. Mean Average Percent Error),
- MARS – wieloraka adaptacyjna regresja sklejana (ang. Multivariate Adaptive Regression Spline),
- MBR, MMBR, SMBR – membranowe technologie oczyszczania ścieków,
- MLP – sieć neuronowa perceptron wielowarstwowy (ang. MultiLayer Perceptron),
- MOUSE – program do symulacji pracy systemów kanalizacyjnych,
- MLR – liniowa regresja wieloraka (ang. MultiLayer Regression),
- $M_{nadm}$  – dobowa ilość osadów nadmiernych,



- $m_{PIX}$  – dobowa dawka koagulanta (PIX),
- N – rozkład normalny
- $NH_3$  – amoniak,
- NLR – nieliniowy model regresyjny (ang. NonLinear Regression Model),
- N –  $NH_4$  – zawartość w ściekach azotu amonowego,
- N –  $NO_3$  – zawartość w ściekach azotu azotanowego,
- $N_{og}$  – azot ogólny,
- $N_{sv}$  – liczba wektorów podtrzymujących,
- OCI – współczynnik kosztów eksploatacyjnych oczyszczalni ścieków,
- O&G – olej i smar,
- OP – opadalność osadu czynnego,
- ORP – potencjał oksydo-redukcyjny,
- OŚ – oczyszczalnia ścieków,
- P – oczyszczalnia ścieków przemysłowych,
- PCA – analiza składowych głównych (ang. Principle Component Analysis),
- PLS – metoda najmniejszych cząstkowych kwadratów (ang. Partial Least Square),
- P –  $PO_4$  – zawartość w ściekach fosforanów,
- PSO – algorytm optymalizacji roju cząstek (ang. Participle Swarm Optimization),
- $P_c(P)$  – całkowita dobowa wysokość opadu deszczu,
- $P_{og}$  – fosfor ogólny,
- R – współczynnik korelacji,
- $R(t)$  – niezawodność,
- RANN (HANN) – rekurencyjne sieci neuronowe (ang. Reccurent Artificial Neural Network),
- RBF – radialne sieci neuronowe (ang. Radial Neural Network),
- REC – stopień recykulacji,
- RF – metoda lasów losowych (ang. Random Forest),
- RLM – równoważna liczba mieszkańców,
- RMSE – błąd średniokwadratowy (ang. Root Mean Square Deviation),

- $R_z^2$  – błąd zliczeniowy,  
SBR – sekwencyjny reaktor biologiczny,  
SENS – wrażliwość (ang. Sensitivity),  
SOM – samoorganizujące się sieci neuronowe (ang. Self Organization Map),  
SORBF – model hybrydowy opierający się na metodzie RBF i SOM,  
SPEC – specyficzność (ang. Specifity),  
SVR (SVM) – metoda wektorów nośnych (ang. Support Vector Machines),  
 $S_{nh}$  – stężenie w fazie ciekłej azotu amonowego,  
 $S_s$  – stężenie w fazie ciekłej substancji łatwo biodegradowalnych,  
 $t_{zag}$  – czas zagęszczania osadu czynnego w osadniku wtórnym,  
TDS – suma substancji rozpuszczonych,  
TKN – azot Kjehdala (ang. Total Kjehdal Nitrogen),  
TSK – metoda zbiorów rozmytych Takagi–Sugeno,  
TOC – całkowity węgiel organiczny,  
 $t_{bd}$  – okres bezdeszczowy,  
 $T_{dop}$  – temperatura ścieków na dopływie do reaktora,  
 $T_{KOC}$  – temperatura w komorach osadu czynnego,  
VIF – współczynnik podbicia wariancji,  
 $v$  – prędkość przepływu ścieków w systemie Carousel  
 $V_K$  – objętość komory nityfikacji,  
W – wilgotność,  
WANN – falkowe sieci neuronowe (ang. Wavelet Neural Network),  
WKF – wydzielona komora fermentacyjna,  
WO – wiek osadu,  
 $X_{ba}$  – stężenie biomasy autotroficznej,  
 $X_{bh}$  – stężenie biomasy heterotroficznej,  
 $X_i$  – stężenie w zawieszynie organicznych substancji inertnych,  
 $X_{OC}$  – stężenie osadu czynnego,

- $X_{OCV}$  – zawiesina organiczna osadu czynnego w reaktorze,
- $X_{dop}$  – wartości zmiennych na dopływie,
- $X_{odp}$  – wartości zmiennych na odpływie,
- $X_p$  – stężenie w zawieszynie substancji inertnych powstałych na skutek wymierania biomasy,
- $X_R$  – stężenie osadu recykulowanego,
- $X_s$  – stężenie w zawieszynie substancji organicznych wolno biodegradowalnych,
- $Z_{og}$  – zawiesina ogólna,
- $Q$  – natężenie dopływu ścieków do oczyszczalni; (h), (d), (r) – odniesione odpowiednio do godziny, doby i roku,
- QUALE – program opracowany przez EPA do prognozy jakości wód w odbiornikach,
- $Q_{woda}$  – zapotrzebowanie na wodę,
- $Q_{dop}(Q)$  – natężenie ścieków na dopływie do reaktora,
- $Q_{wewn}$  – recyrkulacja wewnętrzna,
- %BZT<sub>5</sub> – stopień redukcji biochemicznego zapotrzebowania na tlen,
- %ChZT – stopień redukcji chemicznego zapotrzebowania na tlen,
- %N<sub>og</sub> – stopień redukcji azotu ogólnego,
- %P<sub>og</sub> – stopień redukcji fosforu ogólnego,
- %Z<sub>o</sub> – stopień redukcji zawiesin,
- %Z<sub>og</sub> – stopień redukcji zawiesin ogólnych.

**ISSN 0208-8029**  
**ISBN 978-83-89475-62-6**

---

**INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH**  
**POLSKIEJ AKADEMII NAUK**  
tel.: (+48) 22 3810246 / 22 3810277 / 22 3810241 / 22 3810273  
e-mail: [biblioteka@ibspan.waw.pl](mailto:biblioteka@ibspan.waw.pl)