

# Algorytmy Optymalizacji Inspirowane Naturą

## Projekt startowy

Jakub Wasilewski 263852

20.11.2025

### Spis treści

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Sformułowanie zadania</b>  | <b>3</b>  |
| <b>2 Sposób rozwiązywania zadania</b>                                 | <b>3</b>  |
| <b>3 Metody użyte do rozwiązania zadania</b>                          | <b>3</b>  |
| <b>4 Implementacja</b>  | <b>3</b>  |
| 4.1 Reprezentacja i dekoder . . . . .                                 | 3         |
| 4.2 Algorytm losowy . . . . .   | 3         |
| 4.3 Algorytm zachłanny . . . . .                                      | 3         |
| 4.4 Symulowane wyżarzanie (SA) . . . . .                              | 4         |
| 4.5 Algorytm ewolucyjny (EA) . . . . .                                | 4         |
| 4.6 Konfiguracja i logi . . . . .                                     | 5         |
| <b>5 Pliki wejściowe</b>  | <b>5</b>  |
| <b>6 Procedura badawcza</b>   | <b>5</b>  |
| <b>7 Wyniki badań przed strojeniem metaheurystyk</b>                  | <b>5</b>  |
| 7.1 Wyniki zbiorcze . . . . .   | 5         |
| 7.2 Wykresy . . . . .   | 7         |
| 7.3 Wnioski (etap bazowy) . . . . .                                   | 11        |
| <b>8 Wyniki badań po strojeniu</b>                                    | <b>11</b> |
| 8.1 Strojenie #1: Lepsze operatory + podstawowe wzmocnienie . . . . . | 11        |
| 8.1.1 Cel i parametry . . . . .                                       | 11        |
| 8.1.2 Wyniki . . . . .  | 12        |
| 8.1.3 Analiza wyników . . . . .                                       | 12        |
| 8.1.4 Wykresy (A-n45-k6) . . . . .                                    | 13        |
| 8.2 Strojenie #2: Eksplotacja lokalna . . . . .                       | 14        |
| 8.2.1 Cel i parametry . . . . .                                       | 14        |
| 8.2.2 Wyniki . . . . .  | 14        |
| 8.2.3 Analiza wyników . . . . .                                       | 14        |
| 8.2.4 Wykresy (A-n45-k6) . . . . .                                    | 15        |
| 8.3 Strojenie #3: Czysta eksploracja . . . . .                        | 16        |
| 8.3.1 Cel i parametry . . . . .                                       | 16        |
| 8.3.2 Wyniki . . . . .  | 16        |
| 8.3.3 Analiza wyników . . . . .                                       | 16        |
| 8.3.4 Wykresy (A-n45-k6) . . . . .                                    | 17        |

|       |                                    |    |
|-------|------------------------------------|----|
| 8.4   | Strojenie #4: Hybrydowe połączenie | 18 |
| 8.4.1 | Cel i parametry                    | 18 |
| 8.4.2 | Wyniki                             | 18 |
| 8.4.3 | Analiza wyników                    | 18 |
| 8.4.4 | Wykresy (A-n45-k6)                 | 19 |
| 8.5   | Podsumowanie strojeń               | 20 |

## 1 Sformułowanie zadania

Celem jest implementacja i przebadanie metaheurystyki Algorytmu Ewolucyjnego (EA) dla problemu cVRP oraz porównanie jej z metodami nieewolucyjnymi: algorytmem zachłannym (greedy), symulowanym wyżarzaniem (SA) i losowym przeszukiwaniem. Funkcja celu minimaлизuje łączny koszt tras floty pojazdów o ograniczonej pojemności.

## 2 Sposób rozwiązywania zadania

Rozwiązania kodowane są jako permutacje klientów (jak w TSP). Dekoder dzieli permutację na trasy spełniające ograniczenie pojemności i liczy koszt sumując odległości (EUC\_2D, zaokrąglanie). Metaheurystyki operują na permutacjach; ocena to łączny koszt z dekodera.

## 3 Metody użyte do rozwiązywania zadania

- Algorytm losowy (random)
- Algorytm zachłanny (greedy)
- Symulowane wyżarzanie (SA)
- Algorytm ewolucyjny (EA)

## 4 Implementacja

### 4.1 Reprezentacja i dekoder

Każde rozwiązanie to permutacja klientów (magazyn pomijany). Dekoder przechodzi po permutacji, sumuje zapotrzebowanie i gdy pojemność jest przekroczona, rozpoczyna nową trasę. Koszt to suma odległości z/do magazynu i między kolejnymi klientami (EUC\_2D, zaokrąglone).

### 4.2 Algorytm losowy

- Proste losowe przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań bez heurystyk.
- W każdej iteracji generowana jest losowa permutacja klientów, która jest następnie dekodowana na rozwiązanie cVRP.
- **Parametry:** Liczba iteracji: 2000 (`random_iterations=2000`).
- **Log:** W każdej iteracji zapisywane są: najlepsze rozwiązanie dotąd (best), bieżące (current), średnia ze wszystkich (avg), najgorsze dotąd (worst).

### 4.3 Algorytm zachłanny

- Konstrukcja rozwiązania poprzez zachłanny wybór najbliższego nieodwiedzonego klienta (nearest-neighbour).
- Algorytm rozpoczyna od wybranego punktu startowego i iteracyjnie dodaje najbliższego klienta do trasy, aż wszyscy zostaną odwiedzeni. Dekoder automatycznie tworzy nowe trasy przy przekroczeniu pojemności.
- **Multi-start:** Wykonuje się wiele restartów z różnymi punktami startowymi (rotacja po klientach), by zwiększyć szansę na znalezienie dobrego rozwiązania.

- **Parametry:** Liczba restartów: `greedy_restarts` (domyślnie równa liczbie klientów).
- **Log:** Po każdym restarcie zapisywane są statystyki best/current/avg/worst.

#### 4.4 Symulowane wyżarzanie (SA)

- Metaheurystyka inspirowana procesem wyżarzania metali - stopniowe ”oziębianie” systemu pozwala na wyjście z minimów lokalnych.
- **Rozwiążanie startowe:** Losowa permutacja klientów (każde uruchomienie startuje z innego punktu przestrzeni rozwiązań).
- **Sąsiedztwo:** Operator swap - zamiana dwóch losowych pozycji w permutacji. Prosty operator pozwalający na eksplorację różnych konfiguracji tras.
- **Akceptacja rozwiązania:**
  - Jeśli nowe rozwiązanie jest lepsze (niższy koszt) - zawsze akceptowane.
  - Jeśli gorsze - akceptowane z prawdopodobieństwem  $\exp(-\Delta/T)$ , gdzie  $\Delta$  to różnica kosztów, a  $T$  to bieżąca temperatura.
  - Wysoka temperatura na początku pozwala akceptować gorsze ruchy (eksploracja), niska na końcu wymusza schodzenie do minimum (eksploatacja).
- **Schemat chłodzenia:** Temperatura obniżana geometrycznie:  $T_{i+1} = \alpha \cdot T_i$ , gdzie  $\alpha$  to współczynnik chłodzenia (np. 0.995).
- **Parametry:** Temperatura początkowa  $T_0$ , minimalna  $T_{\min}$ , współczynnik chłodzenia  $\alpha$ , liczba iteracji na każdą temperaturę.
- **Kryterium stopu:** Algorytm kończy się gdy temperatura spadnie poniżej  $T_{\min}$ .
- **Log:** W każdej iteracji zapisywane są best/current/avg/worst, co pozwala obserwować charakterystyczne ”skoki” przy akceptacji gorszych rozwiązań.

#### 4.5 Algorytm ewolucyjny (EA)

- **Metoda:** Metaheurystyka inspirowana ewolucją biologiczną - populacja rozwiązań ewoluje przez selekcję, krzyżowanie i mutację.
- **Inicjalizacja:** Populacja losowych permutacji (rozmiar `ea_population`), każda dekodowana i oceniana.
- **Selekcja:** Turniejowa - losujemy `ea_tournament` osobników i wybieramy najlepszego. Większy turniej zwiększa presję selekcyjną (silniejsze osobniki mają większą szansę reprodukcji).
- **Krzyżowanie:**
  - Operator Ordered Crossover (OX) - kopiuje segment od rodzica 1, uzupełnia brakujące elementy w kolejności z rodzica 2.
  - Operator Partially Mapped Crossover (PMX) - wymienia segmenty między rodzicami i naprawia konflikty przez mapowanie pozycji.
  - Oba operatory zachowują poprawność permutacji (każdy klient występuje dokładnie raz).
  - Stosowane z prawdopodobieństwem `ea_crossover_rate` (Px); w przeciwnym razie kopowany jest rodzic bez zmian.

- **Mutacja:**
  - Swap - zamienia miejscami dwa losowo wybrane geny (klientów) w permutacji. Prosty operator lokalnej zmiany.
  - Inversion - odwraca kolejność genów w losowo wybranym segmencie permutacji. Większa zmiana niż swap.
  - Wprowadzają różnorodność genetyczną, pozwalając uciec z minimów lokalnych.
  - Każdy gen mutowany z prawdopodobieństwem `ea_mutation_rate` (Pm).
- **Elitaryzm:** Kopiowanie `ea_elites` najlepszych osobników do następnego pokolenia bez zmian - zapewnia że najlepsze rozwiązania nie zostaną utracone.
- **Parametry:** `ea_population`, `ea_generations`, `ea_crossover_rate`, `ea_mutation_rate`, `ea_tournament`, `ea_elites`, typ krzyżowania, typ mutacji.
- **Kryterium stopu:** Algorytm kończy się po wykonaniu `ea_generations` pokoleń.
- **Log:** W każdym pokoleniu zapisywane są statystyki całej populacji: best (najlepszy osobnik), avg (średnia populacji), worst (najgorszy osobnik) - pozwala śledzić zbieżność i różnorodność.

## 4.6 Konfiguracja i logi

Parametry w plikach `config_baseline.ini` / `config_tuning.ini` (katalogi danych/logów, liczba uruchomień per algorytm, ustawienia EA/SA/greedy/losowy). Program zapisuje logi dla każdego uruchomienia w plikach CSV, a zbiorcze statystyki w `summary.csv`. Skrypt `scripts/plot_logs.py` generuje wykresy pojedynczych przebiegów, zestawienia i wykres słupkowy najlepszych wyników.

## 5 Pliki wejściowe

Instancje z katalogu `inputs/`: A-n32-k5, A-n37-k6, A-n39-k5, A-n45-k6, A-n48-k7, A-n54-k7, A-n60-k9. Optymalne koszty z `optimal-solutions/*.sol`.

## 6 Procedura badawcza

- Uruchomienie: `./bin/vrp_runner config_baseline.ini`.
- Parametry bazowe: `random_runs=1000` (`iteracje=2000`), `greedy_runs=N` (`restarts=32`), `sa_runs=10` ( $T_0 = 100$ ,  $T_{min} = 0,01$ ,  $\alpha = 0,995$ , `iter/temp=20`), `ea_runs=10` (`pop=100`, `gen=2000`, `Px=0,7`, `Pm=0,1`, `tour=5`, `elites=1`, krzyżowanie: OX, mutacja: swap).
- Wizualizacje: `plot_logs.py` generuje wykresy single/combined/bar\_best do `logs_*/` oraz `plots_*/`.

## 7 Wyniki badań przed strojeniem metaheurystyk

### 7.1 Wyniki zbiorcze

Tabela przedstawia statystyki wyników z wielu uruchomień każdego algorytmu. Dla każdego algorytmu przeprowadzono N niezależnych uruchomień, każde zwracające najlepsze znalezione rozwiązanie. Kolumny Best/Worst/Avg/Std oznaczają odpowiednio: najlepszy wynik ze wszystkich N uruchomień, najgorszy wynik, średnią arytmetyczną oraz odchylenie standardowe.

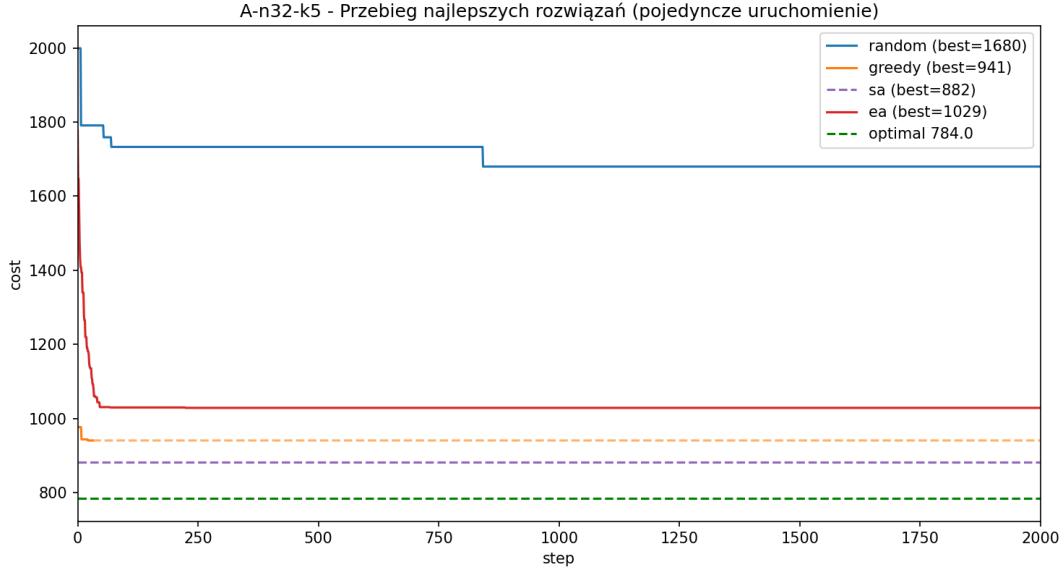
Tabela 1: Wyniki zbiorcze przed strojeniem metaheurystyk

| Instance | Optimal | Random Runs | Random Best | Random Worst | Random Avg | Random Std | Greedy Runs | Greedy Best | Greedy Worst | Greedy Avg | Greedy Std | EA Runs | EA Best | EA Worst | EA Avg | EA Std | SA Runs | SA Best | SA Worst | SA Avg | SA Std |
|----------|---------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|---------|---------|----------|--------|--------|---------|---------|----------|--------|--------|
| A-n32-k5 | 784     | 1000        | 1306        | 1745         | 1627.68    | 46.93      | 32          | 941         | 941          | 941        | 0.00       | 10      | 914     | 1066     | 991.5  | 48.55  | 889     | 937     | 889      | 36.10  |        |
| A-n37-k6 | 949     | 1000        | 1551        | 1866         | 1762.47    | 43.20      | 37          | 1058        | 1058         | 1058       | 0.00       | 10      | 1066    | 1131     | 1064.7 | 38.71  | 10      | 995     | 1066     | 1028.2 | 22.64  |
| A-n39-k5 | 822     | 1000        | 1518        | 1820         | 1720.1     | 43.49      | 39          | 920         | 920          | 920        | 0.00       | 10      | 935     | 1108     | 1015.2 | 31.17  | 10      | 862     | 1022     | 940.6  | 49.76  |
| A-n43-k6 | 944     | 1000        | 1986        | 2295         | 2234.01    | 53.15      | 45          | 1119        | 1119         | 1119       | 0.00       | 10      | 116     | 1454     | 1244.5 | 44.98  | 10      | 1007    | 1224     | 1129.0 | 70.88  |
| A-n48-k7 | 1073    | 1000        | 2108        | 2472         | 2354.95    | 56.97      | 48          | 1301        | 1301         | 1301       | 0.00       | 10      | 1256    | 1452     | 1365.2 | 59.04  | 10      | 1208    | 1318     | 1257.4 | 30.73  |
| A-n54-k7 | 1167    | 1000        | 2395        | 2814         | 2689.17    | 59.84      | 54          | 1380        | 1380         | 1380       | 0.00       | 10      | 1380    | 1610     | 1509   | 73.11  | 10      | 1298    | 1436     | 1350.8 | 40.73  |
| A-n60-k9 | 1354    | 1000        | 2777        | 3193         | 3068.58    | 62.74      | 60          | 1524        | 1524         | 1524       | 0.00       | 10      | 1563    | 1823     | 1672.7 | 86.57  | 10      | 1501    | 1638     | 1570.3 | 43.11  |

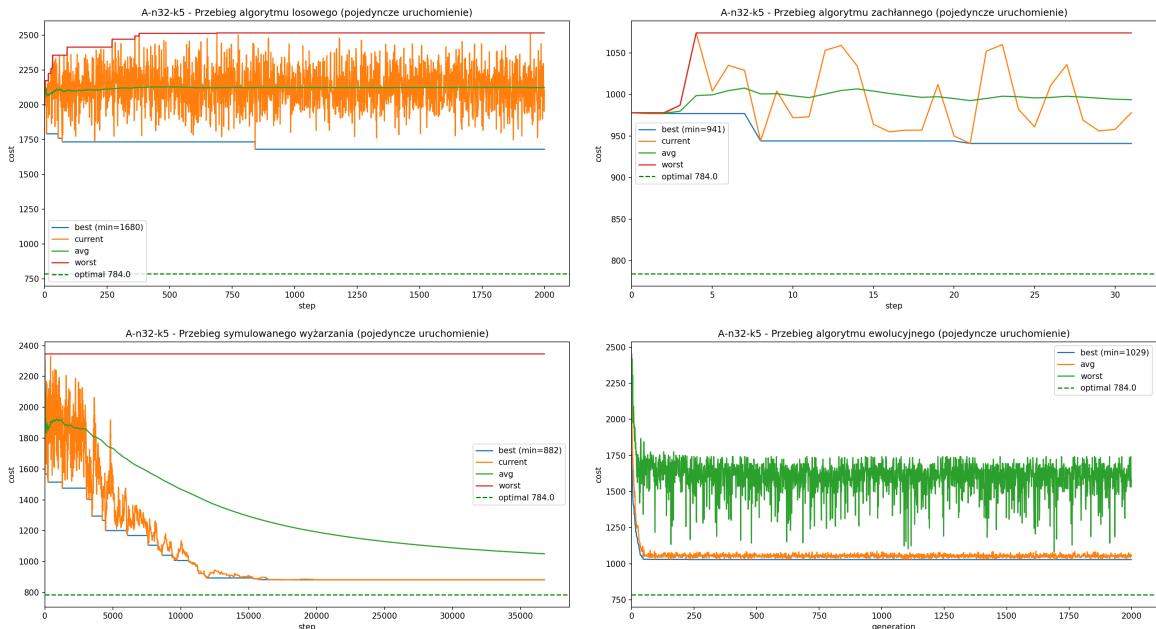
## 7.2 Wykresy

Poniżej przedstawiono wykresy dla trzech wybranych instancji. Dla każdej instancji pokazano:

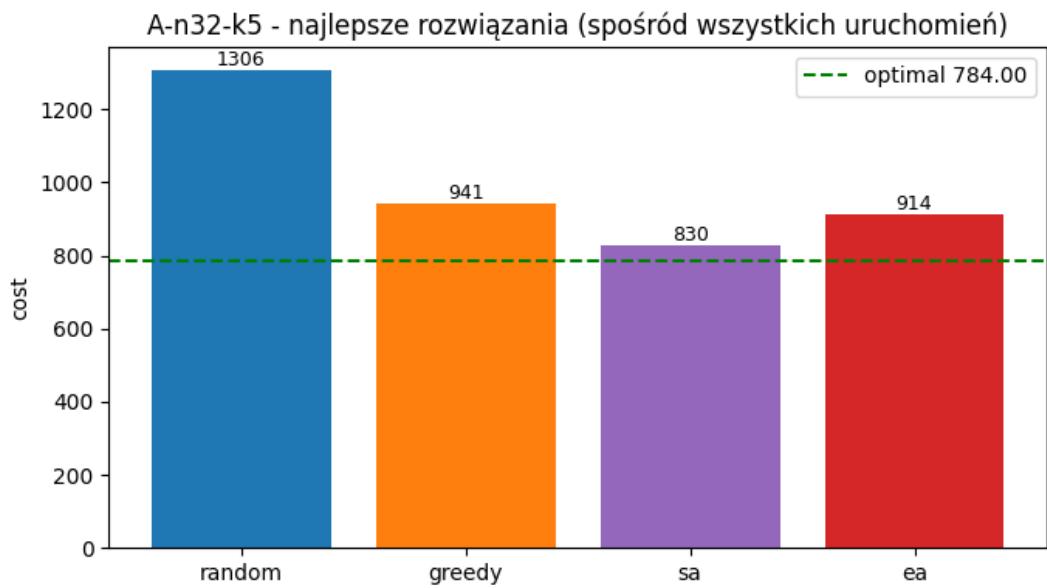
- Porównanie najlepszych przebiegów (best) wszystkich algorytmów (pojedyncze uruchomienie),
- Przebiegi: najlepsze (best) / bieżące (current) / średnie (avg) / najgorsze (worst) poszczególnych algorytmów (pojedyncze uruchomienie),
- Porównanie najlepszych wyników ze wszystkich uruchomień (wykres słupkowy).



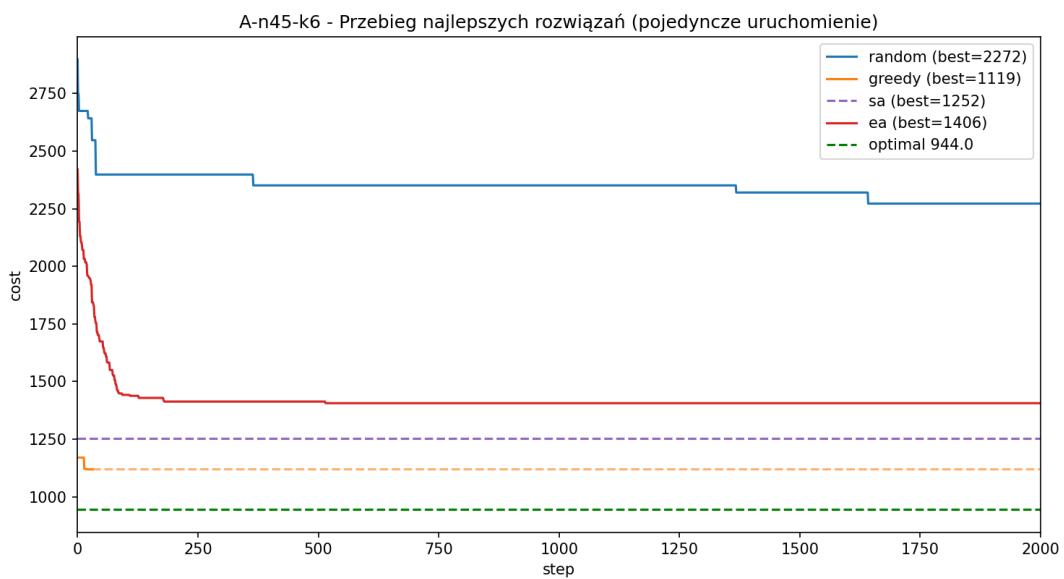
Rysunek 1: A-n32-k5: porównanie najlepszych przebiegów (best) wszystkich algorytmów (pojedyncze uruchomienie)



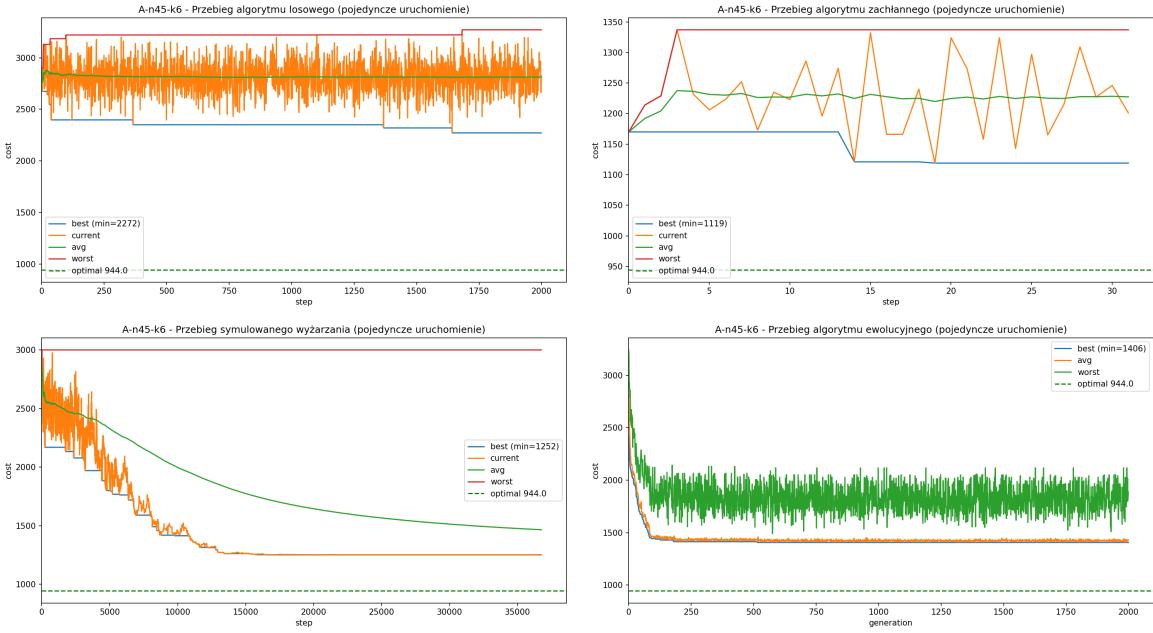
Rysunek 2: A-n32-k5: przebiegi poszczególnych algorytmów - najlepsze/bieżące/średnie/najgorsze (best/current/avg/worst) dla pojedynczego uruchomienia



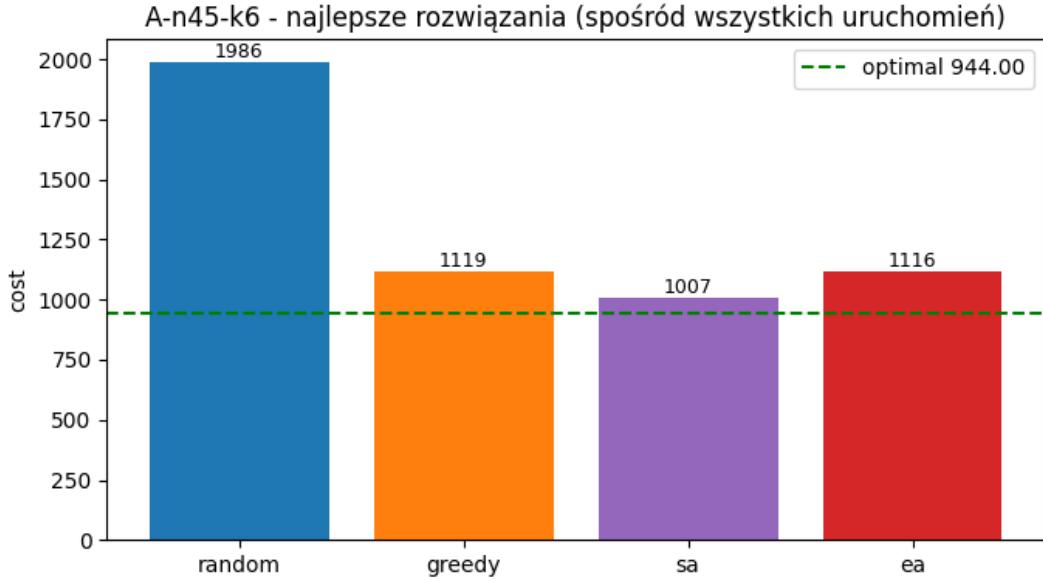
Rysunek 3: A-n32-k5: porównanie najlepszych wyników ze wszystkich uruchomień z linią optimum



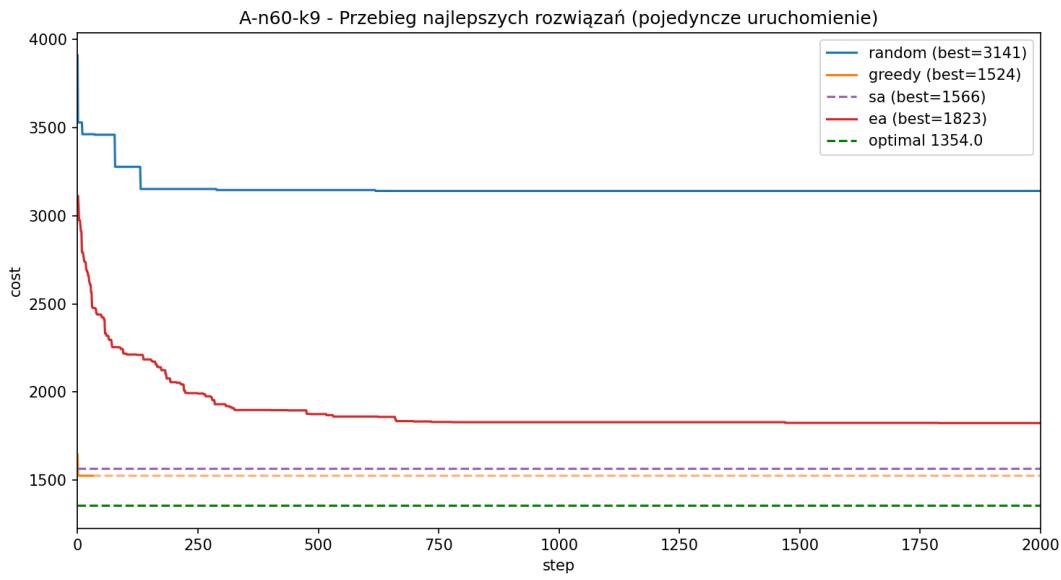
Rysunek 4: A-n45-k6: porównanie najlepszych przebiegów (best) wszystkich algorytmów (pojedyncze uruchomienie)



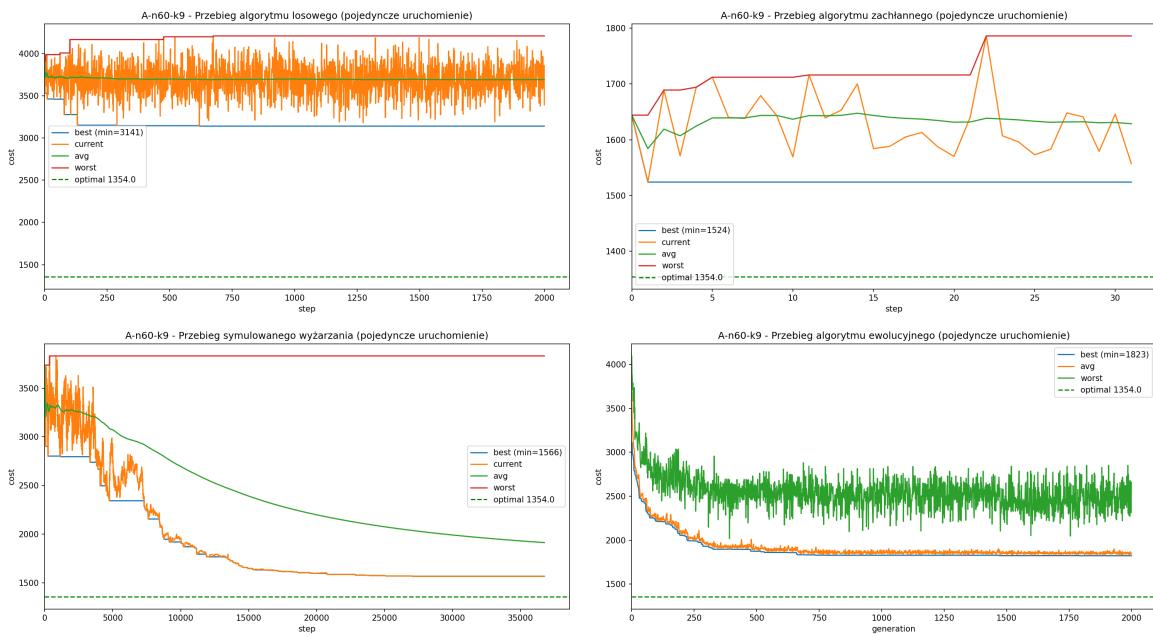
Rysunek 5: A-n45-k6: przebiegi poszczególnych algorytmów - najlepsze/bieżące/średnie/najgorsze (best/current/avg/worst) dla pojedynczego uruchomienia



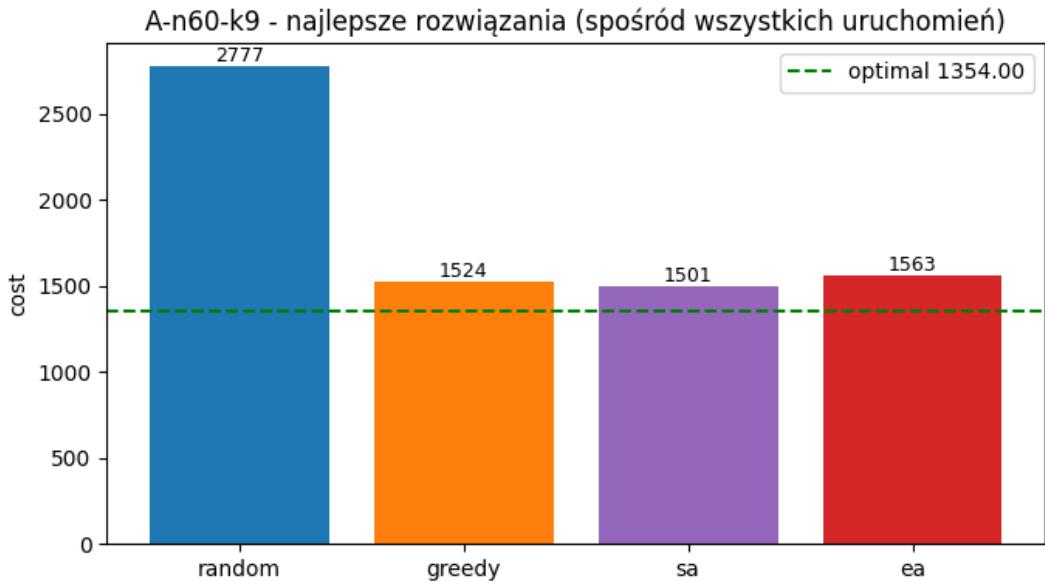
Rysunek 6: A-n45-k6: porównanie najlepszych wyników ze wszystkich uruchomień z linią optimum



Rysunek 7: A-n60-k9: porównanie najlepszych przebiegów (best) wszystkich algorytmów (pojedyncze uruchomienie)



Rysunek 8: A-n60-k9: przebiegi poszczególnych algorytmów - najlepsze/bieżące/średnie/najgorsze (best/current/avg/worst) dla pojedynczego uruchomienia



Rysunek 9: A-n60-k9: porównanie najlepszych wyników ze wszystkich uruchomień z linią optimum

### 7.3 Wnioski (etape bazowy)

- Greedy jest stabilny i często lepszy od niedostrojonych EA/SA przy obecnym krótkim budżecie obliczeń.
- SA w ustawieniach bazowych jest blisko optimum, wymaga więcej kroków/temperatur, by przebić greedy na trudniejszych instancjach.
- EA (OX+swap, mała populacja/pokolenia) przegrywa z greedy; potrzebne: większa populacja, bogatsze mutacje (inwersja/2-opt), lepsze krzyżowania (PMX/CX), inicjalizacja z greedy.
- Dalsze kroki: strojenie parametrów, dodanie nowych operatorów.

## 8 Wyniki badań po strojeniu

Przeprowadzono cztery etapy dostrajania parametrów algorytmów EA i SA, testując różne strategie optymalizacji. Każde strojenie koncentrowało się na innym aspekcie: lepsze operatory genetyczne, eksploracja lokalna, czysta eksploracja oraz hybrydowe połączenie najlepszych cech.

### 8.1 Strojenie #1: Lepsze operatory + podstawowe wzmacnienie

#### 8.1.1 Cel i parametry

Celem pierwszego strojenia było wprowadzenie bardziej zaawansowanych operatorów genetycznych oraz wzmacnienie parametrów obu metaheurystyk. Kluczowe zmiany względem baseline:

##### **EA:**

- Zmiana operatorów krzyżowania: OX → PMX
- Zmiana operatorów mutacji: swap → inversion

- Populacja: 100 → 120
- Crossover rate: 0.7 → 0.85
- Mutation rate: 0.1 → 0.20
- Turnament: 5 → 3 (słabsza presja selekcyjna)
- Elites: 1 → 2

### SA:

- Temperatura początkowa: 100 → 800 (8x wzrost)
- Iteracje na temperaturę: 20 → 150 (7.5x wzrost)
- Szacowana liczba kroków: ~1800 → ~16000

## 8.1.2 Wyniki

Tabela przedstawia statystyki wyników z 10 uruchomień EA i SA dla każdej instancji (format jak w sekcji baseline: Best/Worst/Avg/Std oznaczają odpowiednio najlepszy, najgorszy, średni i odchylenie standardowe wyników ze wszystkich uruchomień).

Tabela 2: Wyniki strojenia #1 - lepsze operatory (PMX + inversion)

| Instance | Optimal | Random Runs | Random Best | Random Worst | Random Avg | Random Std | Greedy Runs | Greedy Best | Greedy Worst | Greedy Avg | Greedy Std | EA Runs | EA Best | EA Worst | EA Avg | EA Std | SA Runs | SA Best | SA Worst | SA Avg | SA Std |
|----------|---------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|---------|---------|----------|--------|--------|---------|---------|----------|--------|--------|
| A-n32-k5 | 784     | 1000        | 1404        | 1793         | 1655.46    | 52.12      | 941         | 941         | 941          | 941        | 0.00       | 10      | 807     | 926      | 884.2  | 38.32  | 10      | 796     | 863      | 829.6  | 17.14  |
| A-n37-k6 | 949     | 1000        | 1602        | 1893         | 1788.62    | 48.76      | 37          | 1058        | 1058         | 1058       | 0.00       | 10      | 977     | 1057     | 1017.8 | 24.21  | 10      | 963     | 1013     | 989.8  | 17.74  |
| A-n40-k5 | 922     | 1000        | 1257        | 1851         | 1745.73    | 48.75      | 39          | 920         | 920          | 920        | 0.00       | 10      | 807     | 947      | 847.7  | 32.11  | 10      | 838     | 944      | 873.7  | 32.29  |
| A-n45-k6 | 944     | 1000        | 1916        | 2434         | 2299.73    | 60.24      | 45          | 1119        | 1119         | 1119       | 0.00       | 10      | 1008    | 1216     | 1131.4 | 66.37  | 10      | 971     | 1098     | 1007.8 | 37.88  |
| A-n48-k7 | 1073    | 1000        | 2155        | 2526         | 2388.64    | 59.29      | 48          | 1301        | 1301         | 1301       | 0.00       | 10      | 1237    | 1353     | 1295.3 | 37.68  | 10      | 1120    | 1188     | 1162.1 | 21.15  |
| A-n54-k7 | 1167    | 1000        | 2453        | 2864         | 2722.84    | 60.67      | 54          | 1380        | 1380         | 1380       | 0.00       | 10      | 1250    | 1450     | 1361.1 | 62.44  | 10      | 1232    | 1317     | 1262   | 27.39  |
| A-n60-k9 | 1354    | 1000        | 2762        | 3245         | 3103.12    | 65.95      | 60          | 1524        | 1524         | 1524       | 0.00       | 10      | 1558    | 1753     | 1638.6 | 50.62  | 10      | 1396    | 1532     | 1473.9 | 38.56  |

### 8.1.3 Analiza wyników

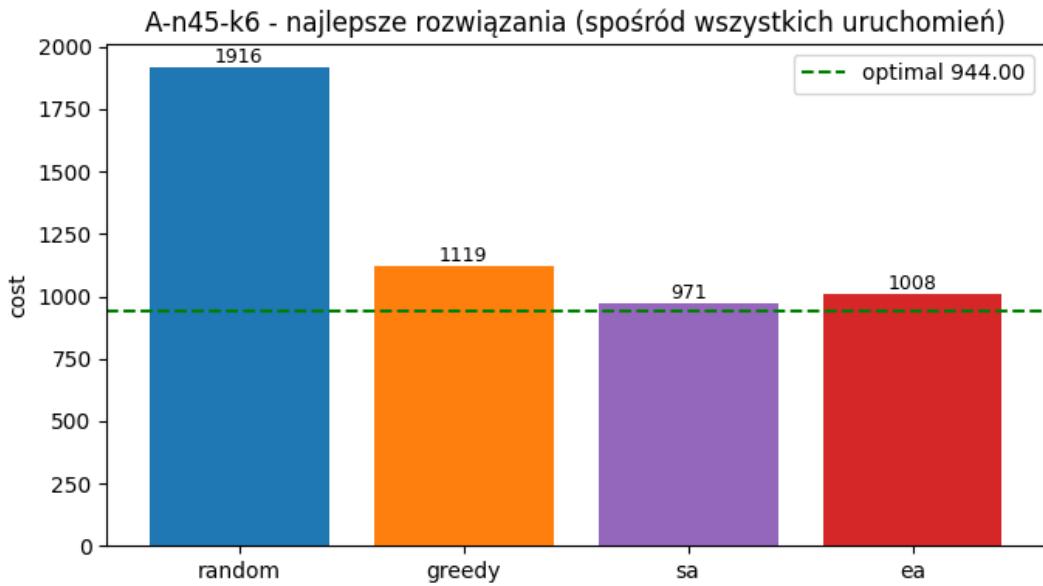
#### Poprawa względem baseline:

- **EA:** Średnia najlepszych wyników (z kolumny best dla wszystkich 7 instancji): 1167.1 → 1099.1 (poprawa o 5.8%). Wprowadzenie operatorów PMX i inversion znacząco poprawiło jakość rozwiązań.
- **SA:** Średnia najlepszych wyników: 1100.1 → 1044.3 (poprawa o 5.1%). Zwiększenie budżetu obliczeń pozwoliło na lepszą eksplorację przestrzeni.
- **EA vs Greedy:** EA zaczął osiągać lepsze wyniki niż greedy (np. A-n32-k5: 807 vs 941).

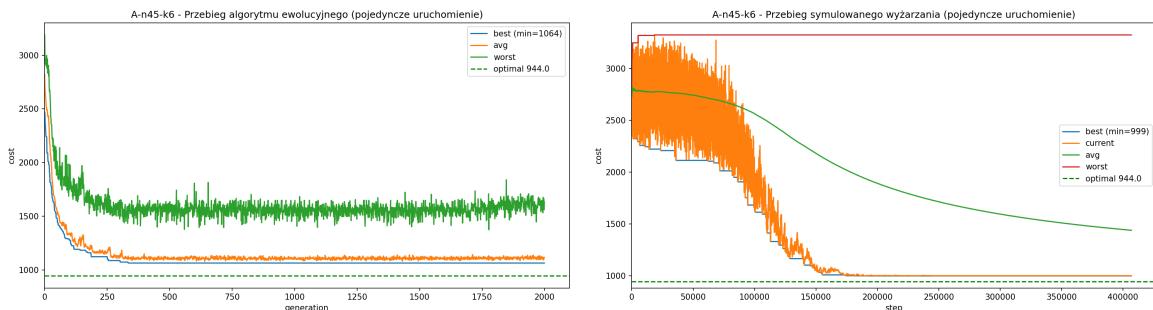
#### Wnioski:

- Operatory PMX i inversion są wyraźnie lepsze niż OX i swap dla problemu CVRP:
  - PMX lepiej zachowuje względne pozycje klientów (ważne dla struktury tras)
  - Inversion wprowadza większe zmiany niż swap, co poprawia eksplorację przestrzeni rozwiązań
- Zwiększenie budżetu obliczeń SA dało wyraźną poprawę bez ryzyka przedwczesnej zbieżności.
- Zmniejszenie presji selekcyjnej (turnament 5→3) pomogło w utrzymaniu różnorodności populacji.

#### 8.1.4 Wykresy (A-n45-k6)



Rysunek 10: Strojenie #1 (A-n45-k6): porównanie najlepszych wyników ze wszystkich uruchomień



Rysunek 11: Strojenie #1 (A-n45-k6): przebiegi pojedynczych uruchomień EA i SA

## 8.2 Strojenie #2: Eksplotacja lokalna

### 8.2.1 Cel i parametry

Celem drugiego strojenia było przetestowanie czy eksplotacja lokalna (greedy seeding + 2-opt) poprawi wyniki EA. Wprowadzono mechanizmy szybkiego znajdowania dobrych rozwiązań poprzez:

**EA:**

- Populacja: 120 → 150
- Generacje: 2000 → 2500
- Crossover rate: 0.85 → 0.90
- Mutation rate: 0.20 → 0.15 (mniej eksploracji)
- Turnament: 3 → 5 (silniejsza presja)
- Elites: 2 → 3
- **Greedy init: 0.0 → 0.3** (30% populacji z greedy)
- **2-opt rate: 0.0 → 0.2** (lokalna poprawa)

**SA:**

- Temperatura początkowa: 800 → 1400
- Minimalna temperatura: 0.001 → 0.0005
- Cooling rate: 0.995 → 0.996
- Iteracje na temperaturę: 150 → 200
- Szacowana liczba kroków: ~16000 → ~65000

### 8.2.2 Wyniki

Tabela 3: Wyniki strojenia #2 (eksplotacja)

| Instance | Optimal | Random Run | Random Best | Random Worst | Random Avg | Random Std | Greedy Run | Greedy Best | Greedy Worst | Greedy Avg | Greedy Std | EA Run | EA Best | EA Worst | EA Avg | EA Std | SA Run | SA Best | SA Worst | SA Avg | SA Std |
|----------|---------|------------|-------------|--------------|------------|------------|------------|-------------|--------------|------------|------------|--------|---------|----------|--------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|
| A-n32-k5 | 784     | 1000       | 1428        | 1778         | 1853.2     | 52.79      | 941        | 941         | 941          | 941        | 0.00       | 10     | 811     | 880      | 847.4  | 22.60  | 10     | 807     | 880      | 835.9  | 19.81  |
| A-n37-k6 | 949     | 1000       | 1623        | 1890         | 1789.93    | 44.82      | 37         | 1058        | 1058         | 1058       | 0.00       | 10     | 970     | 989      | 976.8  | 6.85   | 10     | 956     | 1007     | 978.4  | 15.07  |
| A-n39-k6 | 822     | 1000       | 1567        | 1856         | 1748.07    | 46.63      | 39         | 928         | 920          | 920        | 0.00       | 10     | 834     | 858      | 844    | 7.39   | 10     | 830     | 875      | 850.4  | 14.45  |
| A-n45-k6 | 944     | 1000       | 2001        | 2455         | 2300.71    | 59.04      | 45         | 1119        | 1119         | 1119       | 0.00       | 10     | 962     | 1063     | 1021.2 | 26.05  | 10     | 960     | 1042     | 1000.1 | 23.85  |
| A-n48-k7 | 1075    | 1000       | 2183        | 2217         | 2207.01    | 57.76      | 48         | 1391        | 1391         | 1391       | 0.00       | 10     | 1059    | 1189     | 1177   | 10.00  | 10     | 1114    | 1187     | 1157.1 | 14.97  |
| A-n54-k7 | 1167    | 1000       | 2347        | 2866         | 2723.43    | 60.82      | 54         | 1380        | 1380         | 1380       | 0.00       | 10     | 1226    | 1282     | 1248.1 | 16.11  | 10     | 1201    | 1290     | 1252.1 | 25.09  |
| A-n60-k9 | 1354    | 1000       | 2880        | 3243         | 3106.46    | 62.77      | 60         | 1524        | 1524         | 1524       | 0.00       | 10     | 1376    | 1421     | 1394   | 12.17  | 10     | 1407    | 1490     | 1447.7 | 27.93  |

### 8.2.3 Analiza wyników

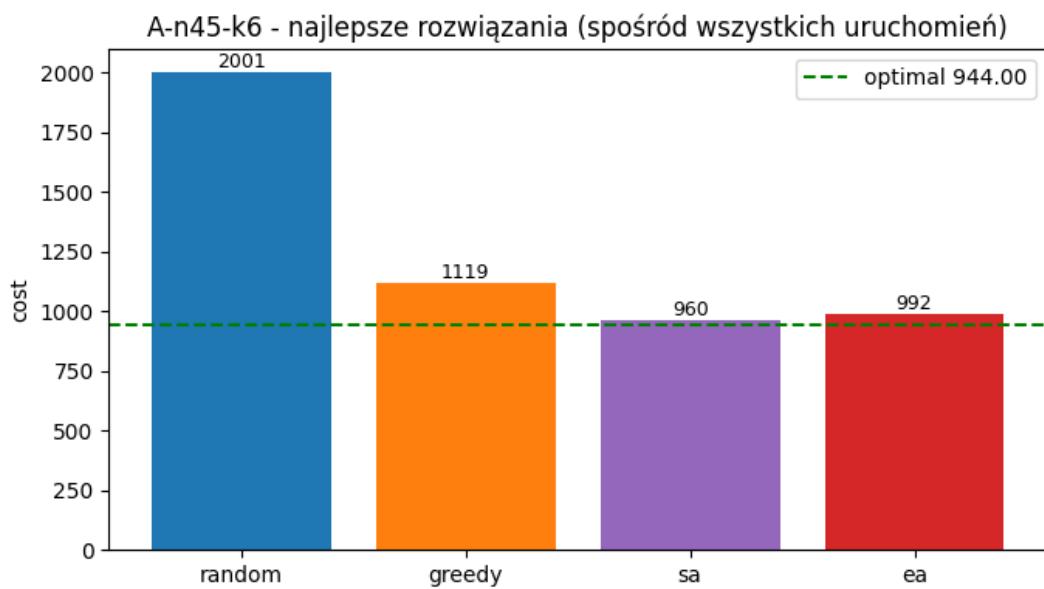
#### Poprawa względem strojenia #1:

- **EA:** Średnia najlepszych wyników (z kolumny best dla wszystkich 7 instancji): 1099.1 → 1049.3 (poprawa o 4.5%). Najlepszy wynik EA spośród wszystkich strojeń!
- **SA:** Średnia najlepszych wyników: 1044.3 → 1039.3 (poprawa o 0.5%).
- **Stabilność EA:** Zauważalnie mniejsze odchylenie standardowe (np. A-n54-k7: 62.44 → 16.11).

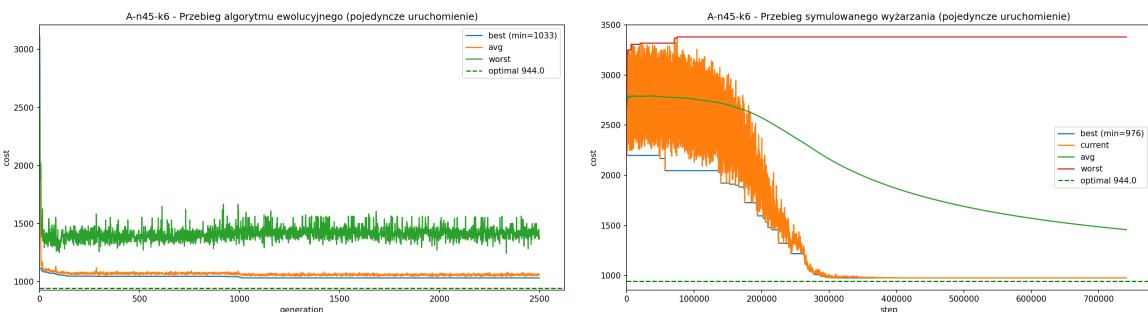
**Wnioski:**

- Eksplotacja (greedy seeding + 2-opt) faktycznie pomogła EA osiągnąć najlepsze średnie wyniki, co nie było spodziewane.
- Greedy seeding (30% populacji) pozwolił na szybsze znalezienie dobrych obszarów przestrzeni rozwiązań.
- Lokalna poprawa 2-opt skutecznie dopracowywała rozwiązania przed oceną.
- Ryzyko: analiza przebiegów EA pokazuje, że silna eksplotacja (strojenie #2) prowadzi do przedwczesnej zbieżności - najlepszy wynik osiągnął wartość 1045 już w połowie eksperymentu i nie poprawił się w drugiej połowie, a avg zbliżyło się do best (różnica 1%), co wskazuje na utratę różnorodności populacji.

#### 8.2.4 Wykresy (A-n45-k6)



Rysunek 12: Strojenie #2 (A-n45-k6): porównanie najlepszych wyników ze wszystkich uruchomień



Rysunek 13: Strojenie #2 (A-n45-k6): przebiegi pojedynczych uruchomień EA i SA

### 8.3 Strojenie #3: Czysta eksploracja

#### 8.3.1 Cel i parametry

Trzecie strojenie testowało przeciwnie podejście: czystą eksplorację bez mechanizmów eksplotacji. Celem było sprawdzenie czy wolniejsza, ale szersza eksploracja przestrzeni da lepsze wyniki niż eksplotacja ze strojenia #2.

**EA:**

- Populacja: 150 → 200 (większa różnorodność)
- Generacje: 2500 → 4000 (więcej czasu)
- Crossover rate: 0.90 → 0.75 (więcej czystej mutacji)
- Mutation rate: 0.15 → 0.30 (dwukrotnie wyższa)
- Tournament: 5 → 2 (minimalna presja)
- Elites: 3 → 1
- **Greedy init: 0.3 → 0.0** (bez greedy seeding)
- **2-opt rate: 0.2 → 0.0** (bez lokalnej poprawy)

**SA:**

- Temperatura początkowa: 1400 → 1800 (maksymalna)
- Minimalna temperatura: 0.0005 (bez zmian)
- Cooling rate: 0.996 → 0.9975 (najwolniejsze chłodzenie)
- Iteracje na temperaturę: 200 → 250 (maksimum)
- Szacowana liczba kroków: ~65000 → ~400000

#### 8.3.2 Wyniki

Tabela 4: Wyniki strojenia #3 (czysta eksploracja)

| Instance | Optimal | Random Run | Random Best | Random Worst | Random Avg | Random Std | Greedy Run | Greedy Best | Greedy Worst | Greedy Avg | Greedy Std | EA Run | EA Best | EA Worst | EA Avg | EA Std | SA Run | SA Best | SA Worst | SA Avg | SA Std |
|----------|---------|------------|-------------|--------------|------------|------------|------------|-------------|--------------|------------|------------|--------|---------|----------|--------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|
| A-32-k5  | 784     | 1000       | 1472        | 1766         | 1654.27    | 50.15      | 941        | 941         | 941          | 941        | 0.00       | 10     | 814     | 872      | 843.5  | 17.51  | 10     | 801     | 852      | 817.2  | 16.78  |
| A-337-k6 | 949     | 1000       | 1577        | 1888         | 1789.28    | 45.69      | 37         | 1058        | 1058         | 1058       | 0.00       | 10     | 975     | 1057     | 1008.1 | 25.67  | 10     | 949     | 1018     | 972.8  | 19.96  |
| A-39-k5  | 822     | 1000       | 1507        | 1879         | 1749.35    | 46.68      | 39         | 926         | 926          | 926        | 0.00       | 10     | 833     | 908      | 873.6  | 27.88  | 10     | 839     | 888      | 853.8  | 12.79  |
| A-45-k6  | 944     | 1000       | 2011        | 2438         | 2303.45    | 56.27      | 45         | 1119        | 1119         | 1119       | 0.00       | 10     | 953     | 1077     | 1022.8 | 37.16  | 10     | 973     | 1045     | 1003.1 | 21.33  |
| A-480-k7 | 1073    | 1000       | 2100        | 2526         | 2303.14    | 57.54      | 48         | 1391        | 1391         | 1391       | 0.00       | 10     | 1242    | 1320     | 1250.5 | 10     | 10     | 1118    | 1147     | 1147   | 17.11  |
| A-54-k7  | 1167    | 1000       | 2476        | 2872         | 2723.63    | 60.37      | 54         | 1380        | 1380         | 1380       | 0.00       | 10     | 1221    | 1342     | 1288.8 | 37.52  | 10     | 1190    | 1240     | 1218.2 | 16.19  |
| A-660-k9 | 1354    | 1000       | 2797        | 3252         | 3104.53    | 63.49      | 60         | 1524        | 1524         | 1524       | 0.00       | 10     | 1475    | 1586     | 1502.3 | 30.94  | 10     | 1391    | 1473     | 1413.5 | 27.02  |

#### 8.3.3 Analiza wyników

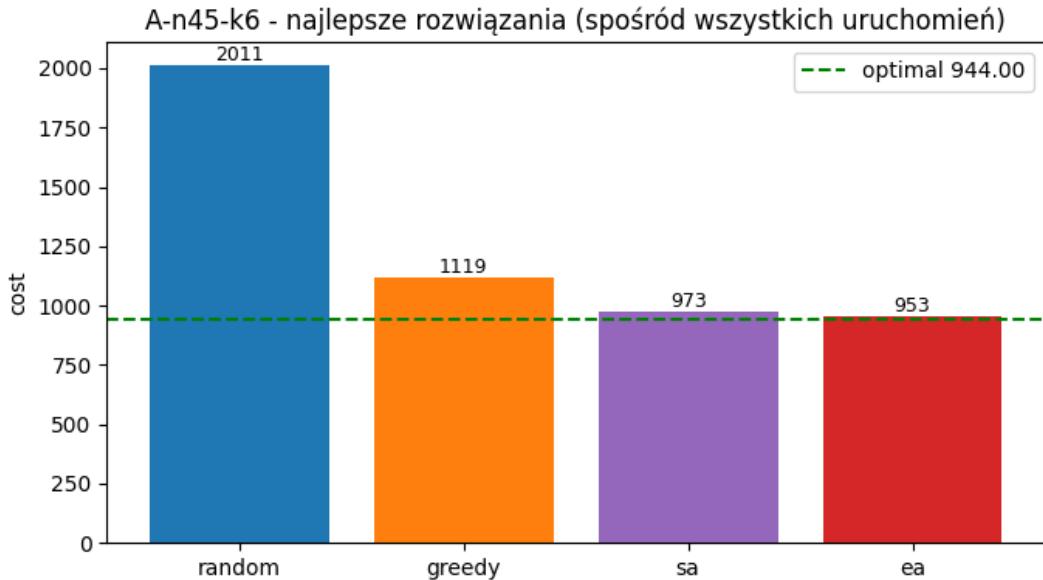
##### Porównanie ze strojeniem #2:

- **EA:** Średnia najlepszych wyników (best): 1049.3 → 1054.7 (pogorszenie o 0.5%). Czysta eksploracja była nieznacznie gorsza.
- **SA:** Średnia najlepszych wyników (best): 1039.3 → 1037.3 (poprawa o 0.2%). Najlepszy wynik SA!
- **Stabilność:** EA ma większe odchylenie standardowe (eksploracja vs eksplotacja).

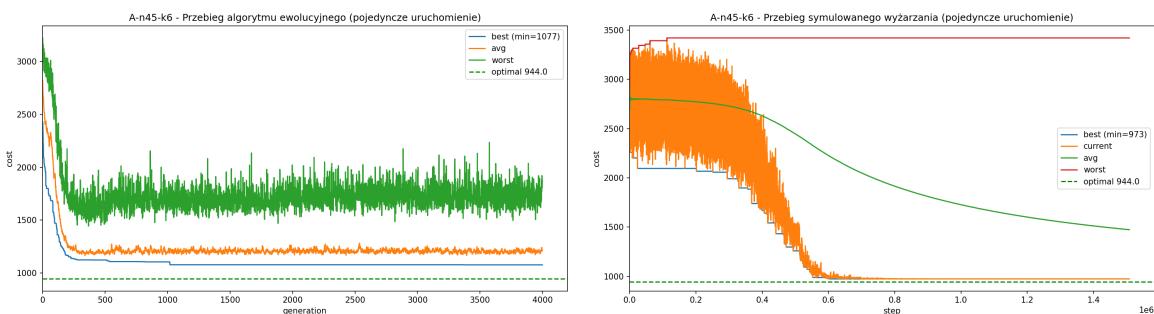
**Wnioski:**

- Czysta eksploracja dała nieznacznie gorsze wyniki niż eksploatacja w (strojeniu #2) dla EA. Jedyny zysk z eksploracji zauważono dla średnio trudnych instancji.
- SA skorzystał na maksymalnych parametrach - długi budżet obliczeń pozwolił na dogłębną eksplorację.
- EA: brak greedy seeding oznaczał start z gorszych rozwiązań, co wymagało więcej pokoleń na osiągnięcie dobrych wyników.
- Wysoka mutacja (0.30) mogła zakłócać konwergencję do optymalnych rozwiązań.

#### 8.3.4 Wykresy (A-n45-k6)



Rysunek 14: Strojenie #3 (A-n45-k6): porównanie najlepszych wyników ze wszystkich uruchomień



Rysunek 15: Strojenie #3 (A-n45-k6): przebiegi pojedynczych uruchomień EA i SA

## 8.4 Strojenie #4: Hybrydowe połączenie

### 8.4.1 Cel i parametry

Czwarte strojenie łączy najlepsze cechy eksploracji (strojenie #2) i eksploracji (strojenie #3). Na podstawie wyników poprzednich eksperymentów zaprojektowano zbalansowane parametry:

**EA:**

- Populacja: 180 (między 150 a 200)
- Generacje: 3500 (między 2500 a 4000)
- Crossover rate: 0.82 (między 0.90 a 0.75)
- Mutation rate: 0.23 (między 0.15 a 0.30)
- Tournament: 3 (między 5 a 2)
- Elites: 2 (między 3 a 1)
- **Greedy init: 0.15** (połowa ze strojenia #2)
- **2-opt rate: 0.10** (połowa ze strojenia #2)

**SA:**

- Parametry jak w strojeniu #3 (maksymalne, udowodniony sukces)
- Temperatura: 1800, min: 0.0005, cooling: 0.9975, iter/temp: 250

### 8.4.2 Wyniki

Tabela 5: Wyniki strojenia #4 (hybryda)

| Instance | Optimal | Random Runs | Random Best | Random Worst | Random Avg | Random Std | Greedy Runs | Greedy Best | Greedy Worst | Greedy Avg | Greedy Std | EA Runs | EA Best | EA Worst | EA Avg | EA Std | SA Runs | SA Best | SA Worst | SA Avg | SA Std |
|----------|---------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|---------|---------|----------|--------|--------|---------|---------|----------|--------|--------|
| A-n32-k5 | 784     | 1000        | 1414        | 1767         | 1656.6     | 48.36      | 32          | 941         | 941          | 941        | 0.00       | 10      | 829     | 866      | 838.4  | 11.83  | 10      | 801     | 875      | 826.8  | 21.66  |
| A-n37-k6 | 949     | 1000        | 1601        | 1904         | 1787.76    | 46.74      | 37          | 1058        | 1058         | 1058       | 0.00       | 10      | 970     | 983      | 974.4  | 4.01   | 10      | 953     | 992      | 971.8  | 12.87  |
| A-n43-k6 | 1000    | 1000        | 1485        | 1490         | 1745.98    | 48.35      | 39          | 920         | 920          | 920        | 0.00       | 10      | 834     | 851      | 840.4  | 5.62   | 10      | 832     | 876      | 853.2  | 14.77  |
| A-n45-k6 | 944     | 1000        | 2079        | 2430         | 2386.06    | 57.65      | 45          | 1119        | 1119         | 1119       | 0.00       | 10      | 902     | 1026     | 994.9  | 24.35  | 10      | 94747   | 1083     | 980    | 21.87  |
| A-n48-k7 | 1073    | 1000        | 2125        | 2517         | 2385.71    | 60.70      | 48          | 1301        | 1301         | 1301       | 0.00       | 10      | 1154    | 1207     | 1186.6 | 14.75  | 10      | 1107    | 1183     | 1146.1 | 21.62  |
| A-n54-k7 | 1167    | 1000        | 2490        | 2885         | 2726.76    | 60.02      | 54          | 1380        | 1380         | 1380       | 0.00       | 10      | 1206    | 1257     | 1235.3 | 16.91  | 10      | 1190    | 1286     | 1231.2 | 32.70  |
| A-n60-k9 | 1354    | 1000        | 2855        | 3238         | 3108.23    | 61.58      | 60          | 1524        | 1524         | 1524       | 0.00       | 10      | 1374    | 1423     | 1398.6 | 18.32  | 10      | 1380    | 1474     | 1414.9 | 25.57  |

### 8.4.3 Analiza wyników

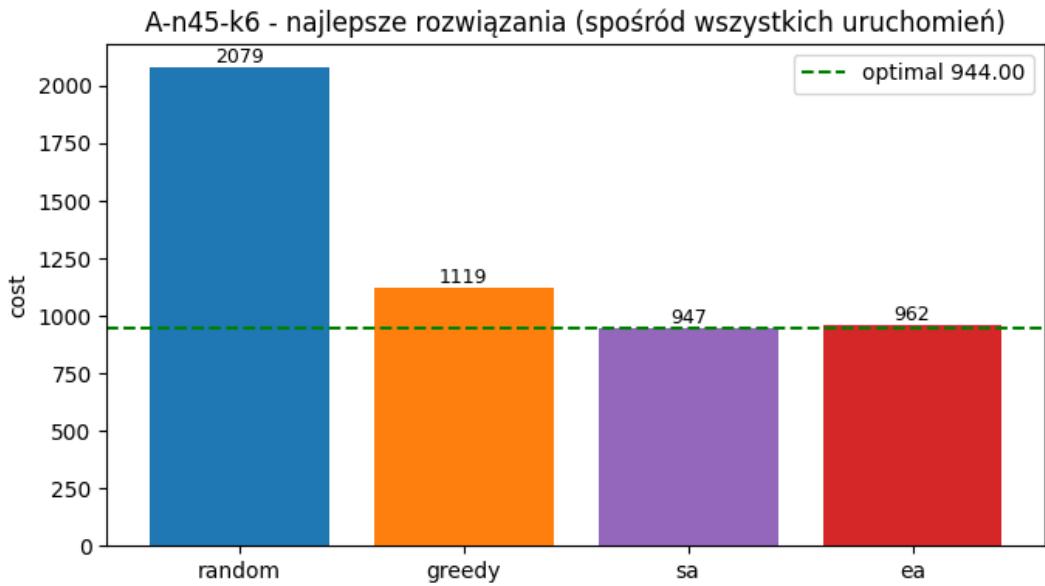
#### Porównanie z najlepszymi wynikami:

- **EA:** Średnia najlepszych wyników (z kolumny best dla wszystkich 7 instancji): 1048.1 - między strojeniem #2 (1049.3) a #3 (1054.7).
- **SA:** Średnia najlepszych wyników: 1041.0 - nieznacznie gorszy niż strojenie #3 (1037.3).
- **Stabilność EA:** Bardzo niskie odchylenia standardowe (np. A-n37-k6: 4.01), najlepsze spośród wszystkich strojeń.

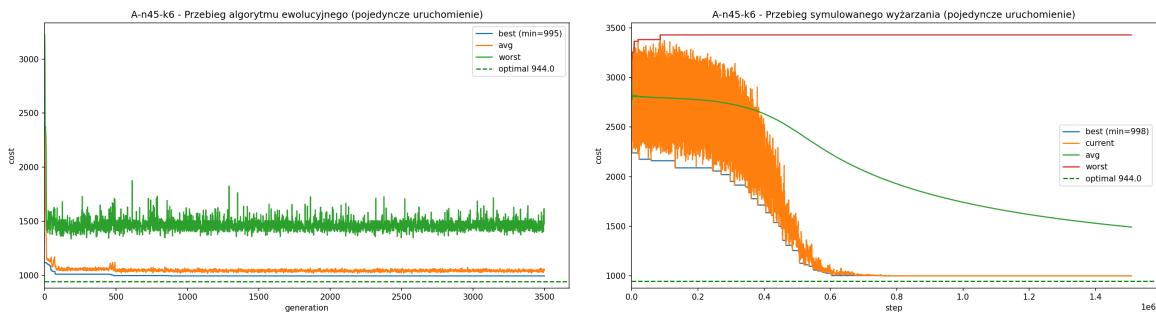
#### Wnioski końcowe:

- Hybrydowe podejście dla EA osiągnęło bardzo stabilne wyniki (niskie std dev) dzięki zbalansowaniu eksploracji i eksploracji.
- Umiarkowana eksploracja (greedy 15%, 2-opt 10%) okazała się dobrym kompromisem.
- Najlepsze absolutne wyniki EA pochodzą ze strojenia #2 (eksploracja), ale kosztem większej zmienności. Zwiększenie budżetu obliczeniowego w podejściu hybrydowym mogłoby przynieść poprawę.
- SA osiągnął plateau w strojeniu #3 - dalsze zwiększanie parametrów prawdopodobnie nie przyniesie poprawy.

#### 8.4.4 Wykresy (A-n45-k6)



Rysunek 16: Strojenie #4 (A-n45-k6): porównanie najlepszych wyników ze wszystkich uruchomień



Rysunek 17: Strojenie #4 (A-n45-k6): przebiegi pojedynczych uruchomień EA i SA

## 8.5 Podsumowanie strojeń

Tabela 6: Porównanie średnich najlepszych wyników (best) spośród wszystkich strojeń

| Strojenie        | EA Best (śr.) | SA Best (śr.) | EA std      | SA std |
|------------------|---------------|---------------|-------------|--------|
| Baseline         | 1167.1        | 1100.1        | 64.7        | 41.3   |
| #1 (operatory)   | 1099.1        | 1044.3        | 48.1        | 27.4   |
| #2 (eksplatacja) | <b>1049.3</b> | 1039.3        | 17.6        | 20.5   |
| #3 (eksploracja) | 1054.7        | <b>1037.3</b> | 31.5        | 18.6   |
| #4 (hybryda)     | 1048.1        | 1041.0        | <b>13.3</b> | 21.6   |

### Kluczowe obserwacje:

1. Wprowadzenie operatorów PMX i inversion (strojenie #1) dało największy skok jakości (5.8% dla EA).
2. Eksplatacja (strojenie #2) wygrała z czystą eksploracją (strojenie #3) w EA, mimo że strojenie #3 miało 60% więcej generacji (4000 vs 2500). Pokazuje to, że balans między eksploracją a eksplatacją jest kluczowy - zbyt słaba presja selekcyjna i brak lokalnej poprawy prowadzą do gorszych wyników nawet przy dłuższym czasie obliczeń.
3. SA konsekwentnie poprawiał się z każdym strojeniem, osiągając optimum w strojeniu #3.
4. Hybrydowe podejście (strojenie #4) dla EA dało najbardziej stabilne wyniki przy minimalnie gorszej średniej.

### Najlepszy algorytm dla CVRP:

W przeprowadzonym badaniu Symulowane Wyżarzanie (SA) okazało się najbardziej skuteczną metaheurystyką dla CVRP, osiągając konsekwentnie lepsze wyniki od Algorytmu Ewolucyjnego we wszystkich konfiguracjach (średnia przewaga 1-6%). Szczególnie imponujący był wynik w konfiguracji baseline, gdzie SA osiągnęło lepsze rezultaty przy 5x mniejszym budżecie ewaluacji (37,000 vs 200,000). W tym miejscu należy wspomnieć, że różne budżety obliczeniowe w strojeniach utrudniają bezpośrednie porównanie jakości algorytmów. W strojeniach zaawansowanych (#2-#4) różnice jakości się zmniejszyły - SA miało nieznaczną przewagę, natomiast korzystało z większego budżetu obliczeniowego. Niemniej jednak, SA wyróżnia się prostotą implementacji, mniejszą liczbą hiperparametrów oraz brakiem kosztownych operacji genetycznych, co w całokształcie czyni je praktycznym wyborem dla problemów CVRP.