02.11.2025

Szymon Kaźmierczak 251546
Ireneusz Bartoszek 251481

# Zadanie 2 - symulowane wyżarzanie

Sprawozdanie z implementacji i analizy algorytmu Symulowanego Wyżarzania (SA)

## 1. Opis algorytmu

Symulowane Wyżarzanie jest metaheurystyczną metodą optymalizacji globalnej, inspirowaną procesem wyżarzania w metalurgii. W procesie tym materiał jest podgrzewany do wysokiej temperatury, a następnie powoli chłodzony, co pozwala na osiągnięcie stanu o minimalnej energii wewnętrznej (strukturze krystalicznej).

Algorytm SA działa analogicznie:

1. Rozpoczyna z wysoką "temperaturą" (T0), która pozwala na częstą akceptację gorszych rozwiązań, co umożliwia "przeskakiwanie" ponad ekstremami lokalnymi.
2. W każdej iteracji generowane jest nowe rozwiązanie (sąsiad) na podstawie bieżącego.
3. Jeśli nowe rozwiązanie jest lepsze (ma niższy "koszt" lub "energię"), jest ono zawsze akceptowane.
4. Jeśli nowe rozwiązanie jest gorsze, jest akceptowane z pewnym prawdopodobieństwem P, zależnym od "temperatury" T oraz różnicy w koszcie (α).
5. Temperatura T jest stopniowo obniżana zgodnie z tzw. "harmonogramem chłodzenia".

Dzięki akceptacji gorszych rozwiązań, algorytm ma możliwość eksploracji większej przestrzeni poszukiwań i unikania ugrzęźnięcia w lokalnych ekstremach. W miarę spadku temperatury, prawdopodobieństwo akceptacji gorszych rozwiązań maleje.

## 2. Opis implementacji

Implementację przeprowadzono w języku Python. Poniżej przedstawiono kluczowe fragmenty kodu charakterystyczne dla algorytmu SA.

Inicjalizacja parametrów i argumenty funkcji solve(), :

Przedstawione zostały podstawowe parametry klasy SimulatedAnnealing:

```
class SimulatedAnnealing:
   def __init__(self, T0, A, M, k):
```

Szymon Kaźmierczak 251546
Ireneusz Bartoszek 251481

```
    self.T0 = T0 # temperatura początkowa
    self.A = A # współczynnik/sposób chłodzenia
    self.M = M # liczba iteracji
    self.k = k # współczynnik k, stała Boltzmanna
```

Argumenty pobierane są z pliku main.py.

Funkcja solve(), która rozwiązuje Wyżarzanie przyjmuje prametry:

```
def solve(self, objective_function, x_min, x_max):
```

*x_min – dolna granica dziedziny*

*x_max – górna granica dziedziny*

*objective_function – przyjmuje nazwe funkcji rozpatrywanej:*

```
def funkcja_przykład3(x):
  if not (-150 <= x <= 150):
    return 0
  if -105 <= x <= -95:
    return -2 * abs(x + 100) + 10
  elif 95 <= x <= 105:
    return -2.2 * abs(x - 100) + 11
  else:
    return 0
def funkcja_przykład4(x):
  if not (-1 <= x <= 2):
    return 0
  return x*math.sin(10*math.pi*x) + 1
```

Wybór pierwszego punktu dla algorytmu:

```
x_current = random.uniform(x_min, x_max)
f_current = objective_function(x_current)
x_best = x_current
f_best = f_current
```

Wybór pierwszego punktu to losowanie wartości X z przedziału:

```
x_min<x_current<xmax
```

Punkt przypisywany jest do aktualnie znalezionego najlepszego punktu.

Szymon Kaźmierczak 251546
Ireneusz Bartoszek 251481

Otwierana jest pętla:

```
 T_min = 0.0001
while T > T_min:
   for _ in range(self.M):
          {
          "Iteracje w stałej T"
          }
 T = T * self.A
```

*Ustawiony warunek stopu T_min kończy wykonanie algorytmu. Wewnątrz pętli While T>T_min wykonywane są iteracje w stałej T – pętla for przechodząca przez ilość iteracji określonej przez użytkownika. Metoda schładzania to T = T*α*

W iteracjach w stałej T, wybierany jest nowy punkt z zakresu kroku:

```
step_size = (x_max - x_min) * (T / self.T0) * 0.1
 x_new = x_current + random.uniform(-step_size, step_size)
 x_new = max(min(x_new, x_max), x_min)
```

Wielkość kroku (odległość z jakiej będzie losowany kolejny punkt) zależny jest od aktualnego stanu algorytmu (schładzania) – na początku krok będzie duży, z upływem algorytmu wartość maleje poprzez czynnik T*T0 – krok zmierza do 0. Czynnik 0.1, pełni role tłumika – odległość kroku dzięki niemu na początku nie jest wielkości dziedziny, tylko tłumi go do 10%. Wartość ta pozwala na to żeby wyjść z lokalnego ekstremum i kolejny punkt nie jest losowy, tylko jest rzeczywistym sąsiadem. Nowy punkt to suma argumentu i wartości losowanej z zakresu kroku, następnie robione jest przecięcie – jeśli wyjdzie poza zakres dziedziny, ustawiana jest wartość skrajna.

Kolejne to sprawdzanie nowego sąsiada:

```
f_new = objective_function(x_new)
        delta_f = f_new - f_current

        if delta_f > 0:
            # Jeśli nowy punkt jest wyższy to go akceptujemy
            x_current = x_new
            f_current = f_new
            if f_new > f_best:
                x_best = x_new
                f_best = f_new
```

```
else:
    if self.k * T <= 0:
        prob = 0
    else:
        prob = math.exp(delta_f / (self.k * T))
        if random.random() < prob:
            x_current = x_new
            f_current = f_new
```

*Obliczana jest wartość funkcji w argumencie X i obliczana jest delta funkcji – różnica między poprzednim a nowym – ona decyduje czy będzie to nowy punkt. W przypadku gdy delta jest większa od 0 to jest to nowy punkt, a w przypadku gdy jest mniejsza, może być przyjęta pod prawdopodobieństwem – liczone jest wartość:* $P = e^{-\frac{delta}{kT}}$ *– jeśli ta wartość jest większa od liczby wylosowanej, punktem zostaje gorszy punkt. Dzięki temu unika się utknięciu w ekstremum. Cały proces wykonywany jest M razy w jednej stałej T. Algorytm działa do momentu wygaśnięcia.*

3. **Opis uruchomienia programu**

Program uruchamiany jest w funkcji main(). Uruchomienie powoduje wypisanie na terminal aktualnych parametrów i możliwości uruchomienia programu.

```
------------------------------------------------------------
 GŁÓWNE MENU - ALGORYTM SYMULOWANEGO WYŻARZANIA (SA)
------------------------------------------------------------
Aktualne parametry: T0=1000.0, A=0.9, M=1000, k=1.0

Opcje:
  1. Zmień parametry algorytmu
  2. Uruchom eksperyment (Funkcja z Rozdziału 3)
  3. Uruchom eksperyment (Funkcja z Rozdziału 4)
  4. Wyjście
```

Można zmienić parametry:

```
------------------------------------------------------------
 GŁÓWNE MENU - ALGORYTM SYMULOWANEGO WYŻARZANIA (SA)
------------------------------------------------------------
Aktualne parametry: T0=1000.0, A=0.9, M=1000, k=1.0

Opcje:
  1. Zmień parametry algorytmu
  2. Uruchom eksperyment (Funkcja z Rozdziału 3)
  3. Uruchom eksperyment (Funkcja z Rozdziału 4)
  4. Wyjście

Wybierz opcję (1-4): 1

--- Zarządzanie Parametrami ---
Aktualne wartości:
  1. Temperatura początkowa (T0): 1000.0
  2. Współczynnik chłodzenia (A):  0.9  (musi być < 1.0 i > 0.0)
  3. Liczba iteracji (M):        1000  (musi być >= 1)
  4. Współczynnik (k):           1.0  (musi być > 0.0)
  5. Powrót do menu głównego
Wybierz parametr do zmiany (1-5):
```

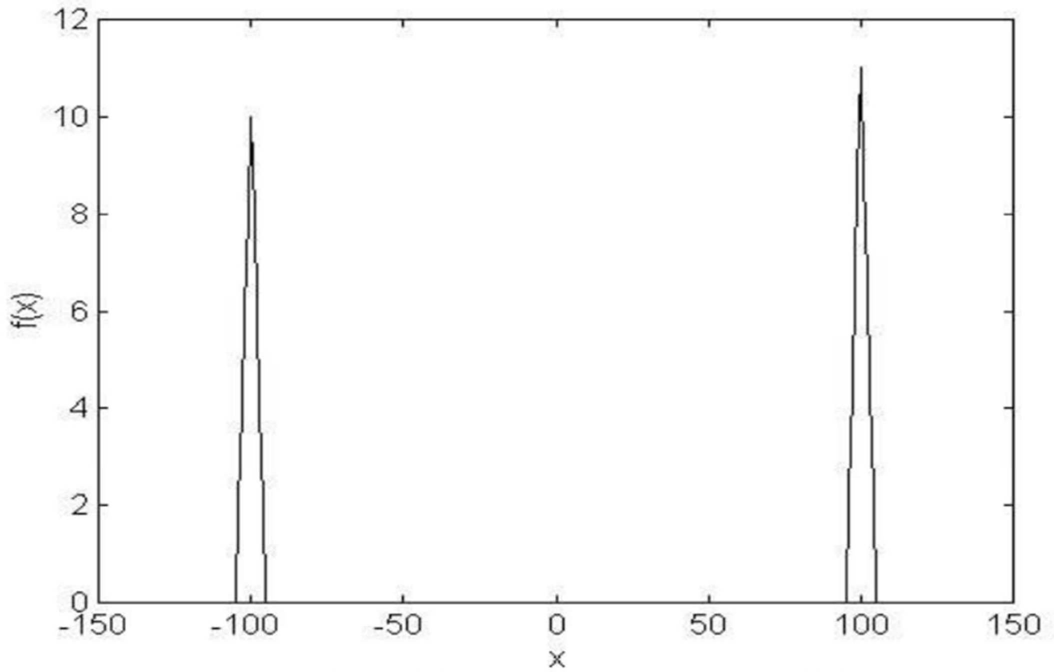
## 4. Opis funkcji testowych i ich właściwości

Funkcja testowa z przykładu 3:

Dana jest funkcja f(x) w przedziale [-150, 150]. Określona jest ona wzorem

$$f(x) = \begin{cases} -2|x+100|+10 & dla \quad x \in (-105, -95) \\ -2.2|x-100|+11 & dla \quad x \in (95, 105) \\ 0 \quad dla \quad x \notin (-105, -95) \cup (95, 105) & \end{cases}$$

Funkcja posiada bardzo odległe od siebie maksima lokalne.
Posiada ona tylko dwa maksima lokalne. Oddalone są one od siebie o 200. Funkcja została tak specjalnie dobrana, aby było wiadomo z góry, w których punktach ma maksima i ile one wynoszą. Dla tej funkcji jest: f(-100)=10, f(100)=11. Funkcja utworzona jest z modułów i posiada wartości różne od zera jedynie w przedziałach (95- ,105- (i (95, 105). Dla pozostałych argumentów z przedziału [-150, 150] funkcja ma wartość 0.

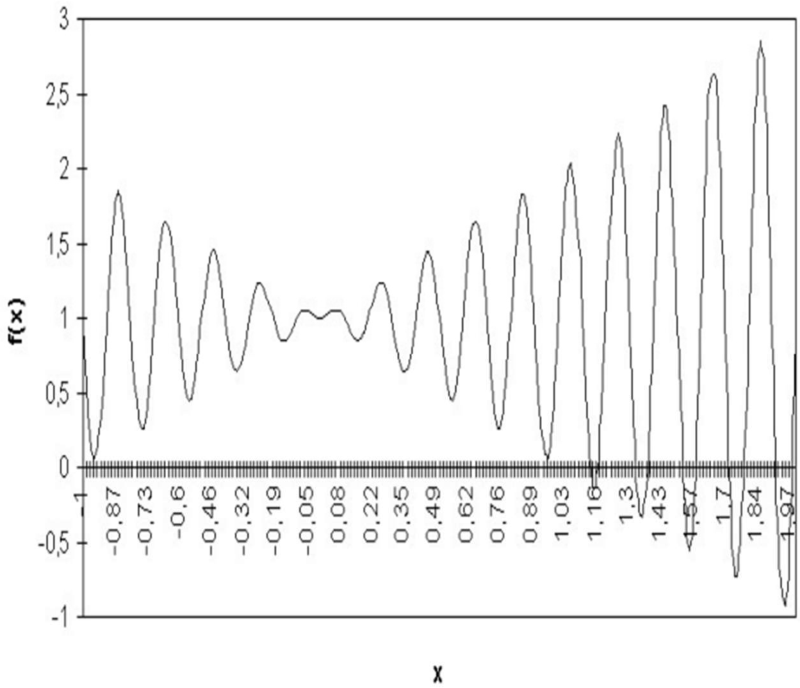



**Rys. 1.** Funkcja utworzona z dwóch modułów

Funkcja z przykładu 4:

$$f(x)=x\cdot\sin(10\pi x)+1 \text{ w przedziale } [-1, 2].$$

Funkcja ta posiada 17 maksimów lokalnych w przedziale [-1, 2] (wliczając w to także wartości na końcach przedziału). Maksimum globalne w tym przedziale występuje dla x=1.850547 i wynosi f(x)=2.85027376656965.




**Rys. 7.** Wykres funkcji $f(x)=x\cdot\sin(10\pi x)+1$

02.11.2025

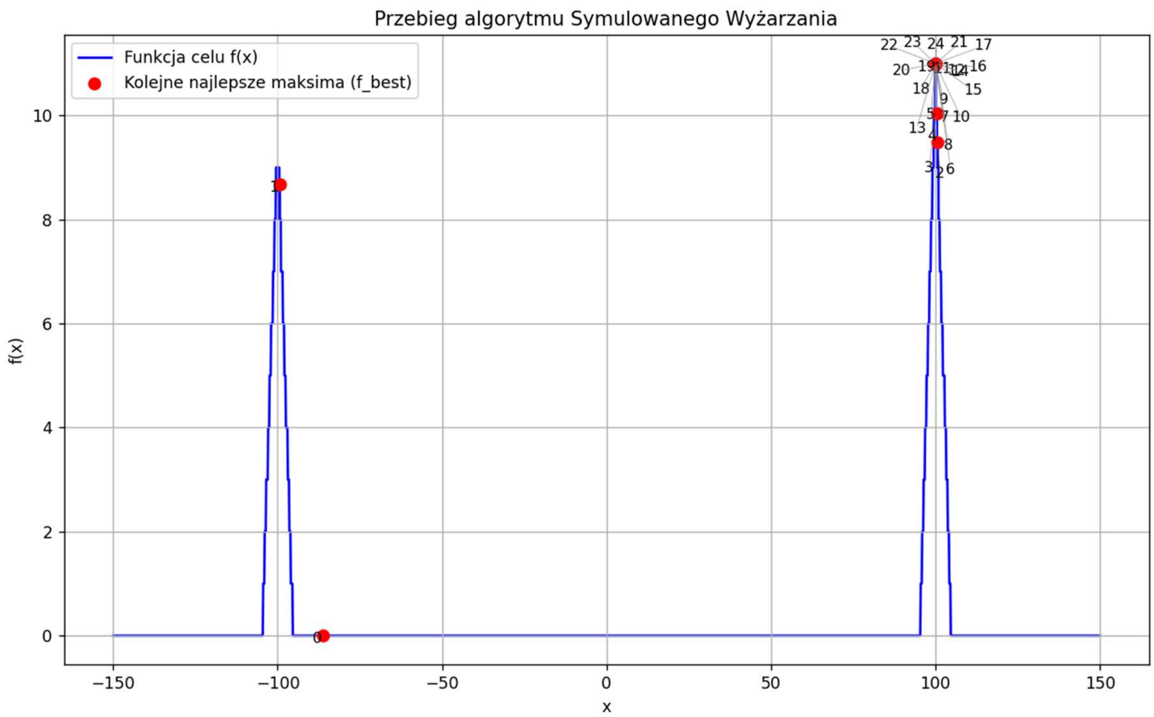
Szymon Kaźmierczak 251546
Ireneusz Bartoszek 251481

**5. Wyniki obliczeń**

**a) Wyniki dla funkcji z przykładu 3:**

**Wywołanie 1**

parametry: T0=500.0, A=0.999, M=3000, k=0.1 – tożsame z artykułem



Szymon Kaźmierczak 251546
Ireneusz Bartoszek 251481

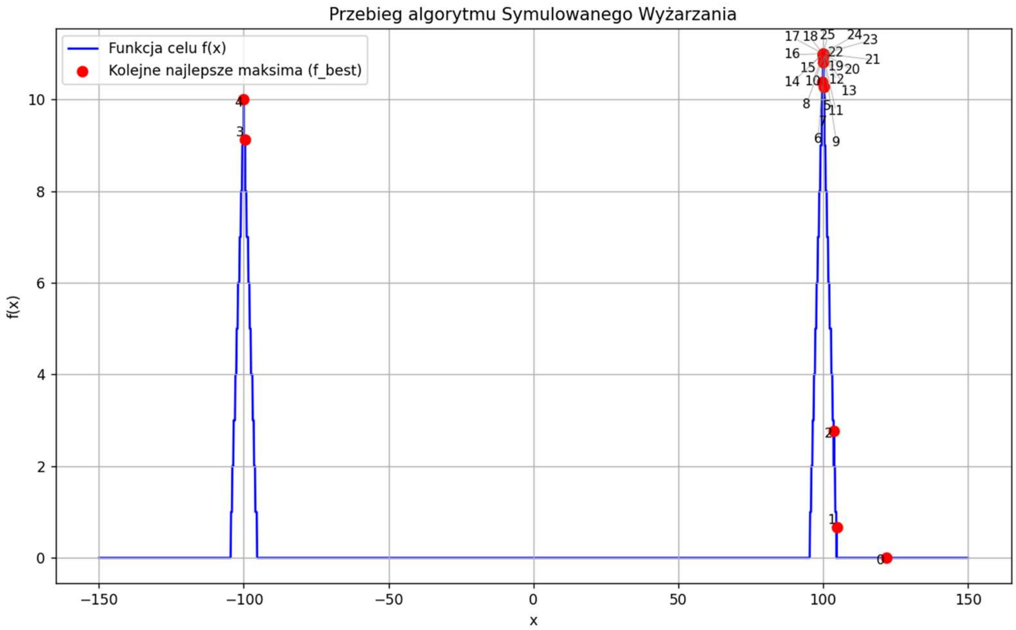
```
Całkowita liczba iteracji: 46254000
Liczba zaakceptowanych korekcji rozwiązań: 24
Czas wykonania: 32.398464 s
Najlepsze rozwiązanie znaleziono w iteracji: 44589903

Najlepsze znalezione rozwiązanie: x = 99.99999999999873523393
Wartość funkcji: f(x) = 10.99999999999721822519

--- Historia najlepszych rozwiązań (kolejne korekcje) ---
Indeks     | x                        | f(x)
--------------------------------------------------------------
0          | -86.09147776679438379688 | 0.00000000000000000000
1          | -99.34050290971758556680 | 8.68100581943517113359
2          | 100.68682593775037048545 | 9.48898293694918493202
3          | 100.43228567091820480073 | 10.04897152397994908313
4          | 99.99424138348700807910  | 10.98733104367141777402
5          | 99.99928144173127009253  | 10.99841917180879491411
6          | 100.00034651917928840703 | 10.99923765780556550453
7          | 100.00008709559212149998 | 10.99980838969733198951
8          | 99.99993000145104815601  | 10.99984600319230665377
9          | 99.99996028816150328566  | 10.99991263395530793900
10         | 100.00000729812421695897 | 10.99998394412672197973
11         | 100.00000191396750892636 | 10.99999578927148036200
12         | 99.99999938739584592895  | 10.99999865227086104369
13         | 100.00000021707784014779 | 10.99999952242875167485
14         | 100.00000019677563045661 | 10.99999956709361370599
15         | 99.99999988644053416920  | 10.99999975016917552750
16         | 99.99999994087654897612  | 10.99999986992840739219
17         | 99.99999998705132497889  | 10.99999997151291530884
18         | 100.00000000671239774874 | 10.99999998523272459749
19         | 100.00000000199165128834 | 10.99999999561836716566
20         | 100.00000000049662673973 | 10.99999999890742152786
21         | 99.99999999993109156549  | 10.99999999984840215461
22         | 99.99999999998573230187  | 10.99999999996861177465
23         | 100.00000000000397903932 | 10.99999999999124611350
24         | 99.99999999999873523393  | 10.99999999999721822519
```

**Wywołanie 2:**

Aktualne parametry: T0=500.0, A=0.8, M=3000, k=0.1

02.11.2025

Szymon Kaźmierczak 251546
Ireneusz Bartoszek 251481



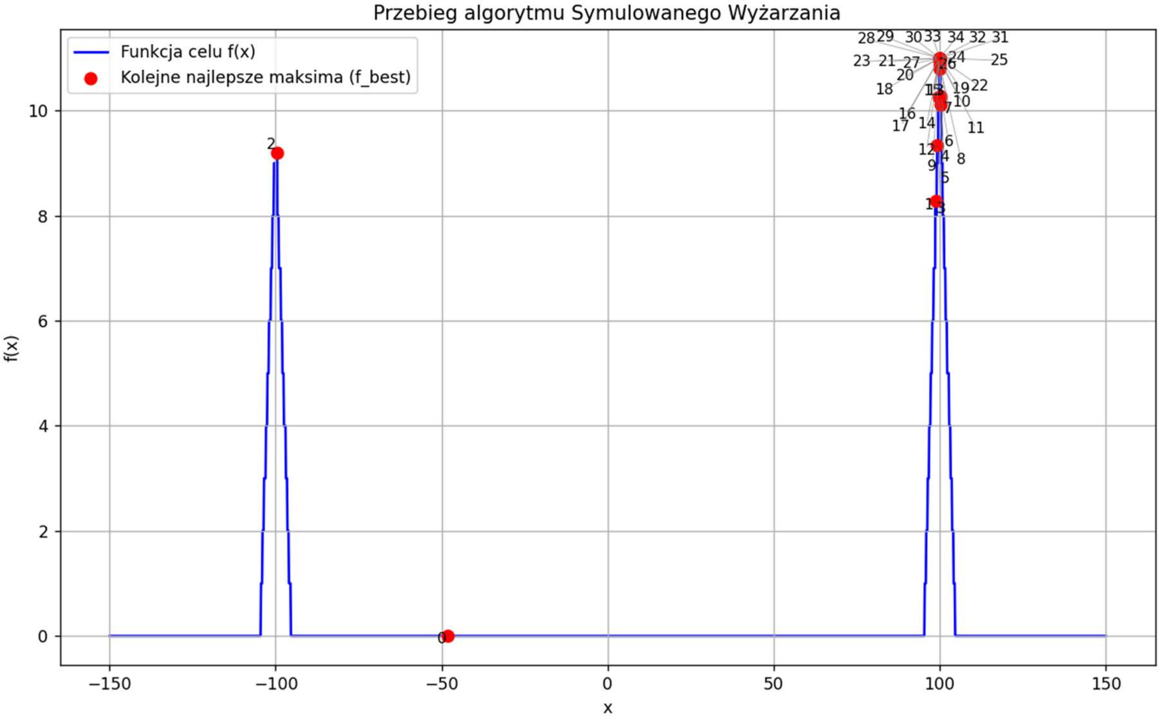

```
Całkowita liczba iteracji: 210000
Liczba zaakceptowanych korekcji rozwiązań: 25
Czas wykonania: 0.151668 s
Najlepsze rozwiązanie znaleziono w iteracji: 209584

Najlepsze znalezione rozwiązanie: x = 100.00000000121801235764
Wartość funkcji: f(x) = 10.99999999732037281319

--- Historia najlepszych rozwiązań (kolejne korekcje) ---
Indeks     | x                         | f(x)
--------------------------------------------------------------
0          | 121.75693786339991220302  | 0.00000000000000000000
1          | 104.69558935942092148252  | 0.66970340927397131736
2          | 103.73780151872024646309  | 2.77683665881545671539
3          | -99.56469325865296582379  | 9.12938651730593164757
4          | -100.00049956163692854716 | 9.99900087672614290568
5          | 100.32774896783296014746  | 10.27895227076748696504
6          | 99.71906539868064101029   | 10.38194387709740951209
7          | 100.08145987255937825466  | 10.82078828036936712920
8          | 100.03867305108724394813  | 10.91491928760806295884
9          | 100.01415103310897336542  | 10.96886772716025859609
10         | 99.98594678271308566764   | 10.96908292196878775826
11         | 99.99694638583775940788   | 10.99328204884307069733
12         | 100.00058000330307095282  | 10.99872399273324319324
13         | 100.00008590791723861457  | 10.99981100258207433740
14         | 100.00005619852183258445  | 10.99987636325196760367
15         | 100.00001503198096486358  | 10.99996692964187694486
16         | 100.00000118476486932195  | 10.99999739351728678116
17         | 100.00000086499284179808  | 10.99999809701574804421
18         | 100.00000067363112066232  | 10.99999851801153383235
19         | 100.00000057546003517928  | 10.99999873398792260559
20         | 99.99999976587123740046   | 10.99999948491672263629
21         | 100.00000009180436677525  | 10.99999979803039273918
22         | 100.00000006238427374683  | 10.99999986275459740170
23         | 100.00000001069986410585  | 10.99999997646029825660
24         | 100.00000000300086355765  | 10.99999999339810052845
25         | 100.00000000121801235764  | 10.99999999732037281319
```

02.11.2025

Szymon Kaźmierczak 251546
Ireneusz Bartoszek 251481

**Wywołanie 3:**

Aktualne parametry: T0=200.0, A=0.999, M=2000, k=0.1

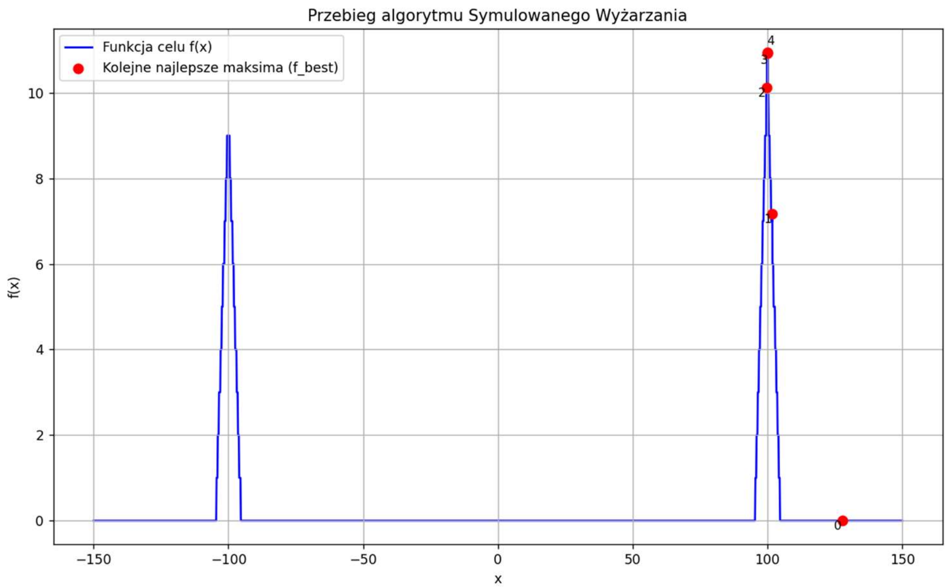



```
Całkowita liczba iteracji: 29004000
Liczba zaakceptowanych korekcji rozwiązań: 34
Czas wykonania: 21.527295 s
Najlepsze rozwiązanie znaleziono w iteracji: 27869156

Najlepsze znalezione rozwiązanie: x = 99.99999999999860733624
Wartość funkcji: f(x) = 10.99999999999693578445

--- Historia najlepszych rozwiązań (kolejne korekcje) ---
Indeks     | x                         | f(x)
--------------------------------------------------------------
0          | -48.08390431843136525458  | 0.00000000000000000000
1          | 98.76220914469598710639   | 8.27686011833117163405
2          | -99.59554983028536412348  | 9.19109966057072824697
3          | 99.24476842210924587562   | 9.33849052864034057109
4          | 100.40549547396679486155  | 10.10790995727305130458
5          | 99.66442744944751552794   | 10.26174038878453487200
6          | 100.32651630480926030486  | 10.28166412941962803984
7          | 100.09039635942448853712  | 10.80112800926612592889
8          | 100.06276079979592452673  | 10.86192624044896604119
9          | 99.97617327418767274594   | 10.94758120321288075161
10         | 99.97858911919482238773   | 10.95289606222860889773
11         | 100.01323088239948333467  | 10.97089205872113737428
12         | 100.00113169419635994473  | 10.99751027276800741106
13         | 100.00101392328012650523  | 10.99776936878372168849
14         | 100.00098324739292365848  | 10.99783685573556724080
15         | 100.00007972816285928275  | 10.99982459804170886741
16         | 99.99992400219599630873   | 10.99983280483119152393
17         | 100.00007568893161646884  | 10.99983348435044305802
18         | 99.99997282186440372698   | 10.99994020810168748881
19         | 100.00000118149782224464  | 10.99999740070479070653
20         | 99.9999922273850927468   | 10.99999829002472040429
21         | 100.0000008260339257049  | 10.99999981827253670019
```

```
21             | 100.00000008260339257049 | 10.99999981827253670019
22             | 99.99999995602428271013  | 10.99999990325342125175
23             | 100.00000002688688027774 | 10.99999994084886267842
24             | 100.00000000204016714633 | 10.99999999551163298861
25             | 99.99999999845157105938  | 10.99999999659345562009
26             | 99.99999999846617981802  | 10.99999999662559524438
27             | 99.99999999974896525146  | 10.99999999944772355320
28             | 99.99999999977569586918  | 10.99999999950653162273
29             | 99.99999999985294607541  | 10.99999999967648101062
30             | 99.99999999990635046743  | 10.99999999979397102834
31             | 100.00000000007442224614 | 10.99999999983627141376
32             | 100.00000000004939693099 | 10.99999999989132604128
33             | 99.99999999997015720510  | 10.99999999993434585122
34             | 99.99999999999860733624  | 10.99999999999693578445
```

**Wywołanie 4:**

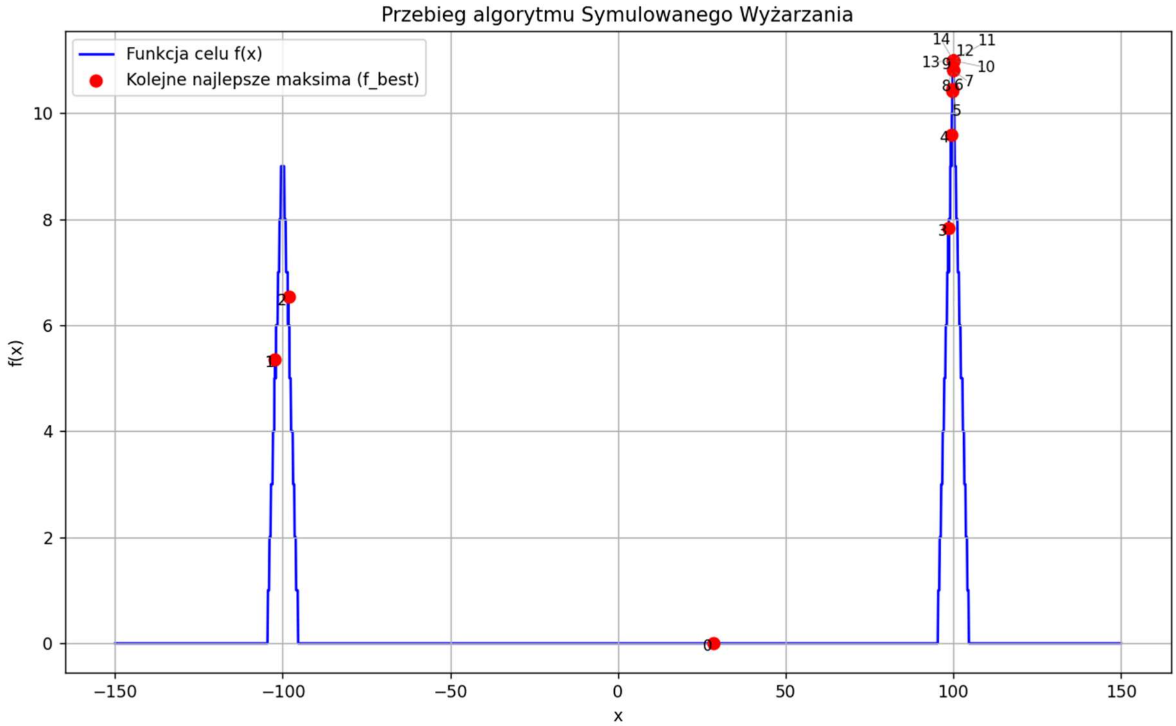
Aktualne parametry: T0=1000.0, A=0.7, M=1000, k=0.5




```
Całkowita liczba iteracji: 46000
Liczba zaakceptowanych korekcji rozwiązań: 4
Czas wykonania: 0.033496 s
Najlepsze rozwiązanie znaleziono w iteracji: 1831

Najlepsze znalezione rozwiązanie: x = 100.02189998608687915294
Wartość funkcji: f(x) = 10.95182003060886621881

--- Historia najlepszych rozwiązań (kolejne korekcje) ---
Indeks         | x                          | f(x)
----------------------------------------------------------------
0              | 127.88146794161599473227   | 0.00000000000000000000
1              | 101.73698744603728982838   | 7.17862761871796273283
2              | 99.60461492090172441749    | 10.13015282598379407375
3              | 99.96890958880049993240    | 10.93160109536109914075
4              | 100.02189998608687915294   | 10.95182003060886621881
```

**Wywołanie 5:**

Aktualne parametry: T0=1000.0, A=0.4, M=1000, k=1



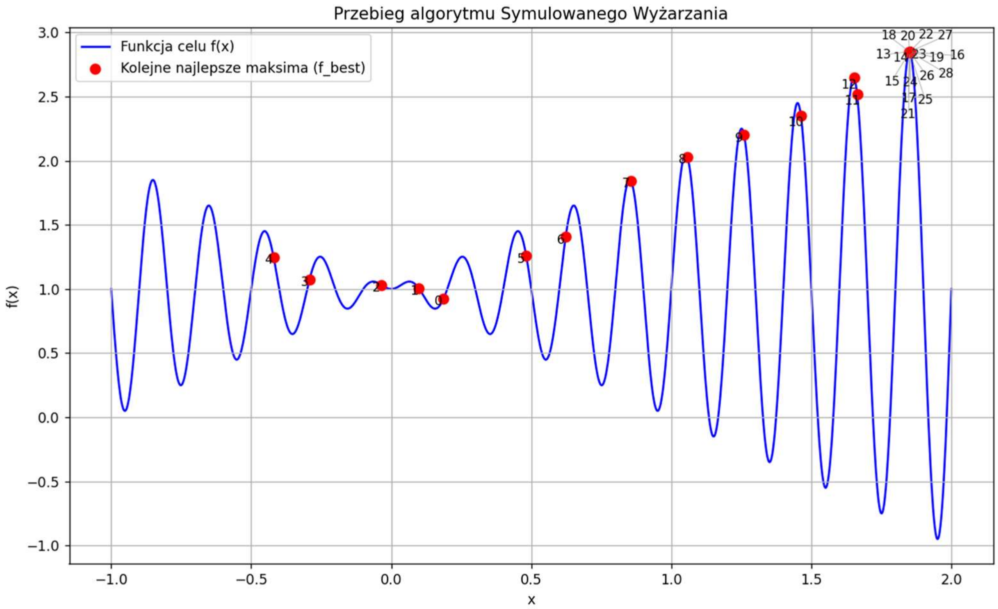

```
Całkowita liczba iteracji: 18000
Liczba zaakceptowanych korekcji rozwiązań: 14
Czas wykonania: 0.014983 s
Najlepsze rozwiązanie znaleziono w iteracji: 6763

Najlepsze znalezione rozwiązanie: x = 99.99943063641025275956
Wartość funkcji: f(x) = 10.99874740010255536049

--- Historia najlepszych rozwiązań (kolejne korekcje) ---
Indeks     | x                         | f(x)
--------------------------------------------------------------
0          | 28.46896664901922235913   | 0.00000000000000000000
1          | -102.31933509487723199527 | 5.36132981024553600946
2          | -98.26526660044916638981  | 6.53053320089833277962
3          | 98.56030842214362053255   | 7.83267852871596481634
4          | 99.36118184112181950240   | 9.59460005046800290529
5          | 99.73270781398011308738   | 10.41195719075624914751
6          | 99.75021986563254472458   | 10.45048370439159768353
7          | 99.91252302919920680324   | 10.80755066423825461186
8          | 99.91338078665462774097   | 10.80943773064018031960
9          | 100.00963356870414600053  | 10.97880614885087879884
10         | 99.99621602850909596327   | 10.99167526272001182974
11         | 99.99658986063606391781   | 10.99249769339933990864
12         | 100.00245876059292982063  | 10.99459072669555403934
13         | 100.00146274219812880801  | 10.99678196716411626710
14         | 99.99943063641025275956   | 10.99874740010255536049
```

Szymon Kaźmierczak 251546
Ireneusz Bartoszek 251481

**b) Wyniki dla funkcji z przykładu 4:**

**Wywołanie 1:**

Użyte parametry: T0=5.0, A=0.997, M=1200, k=0.1 – tożsame z artykułem

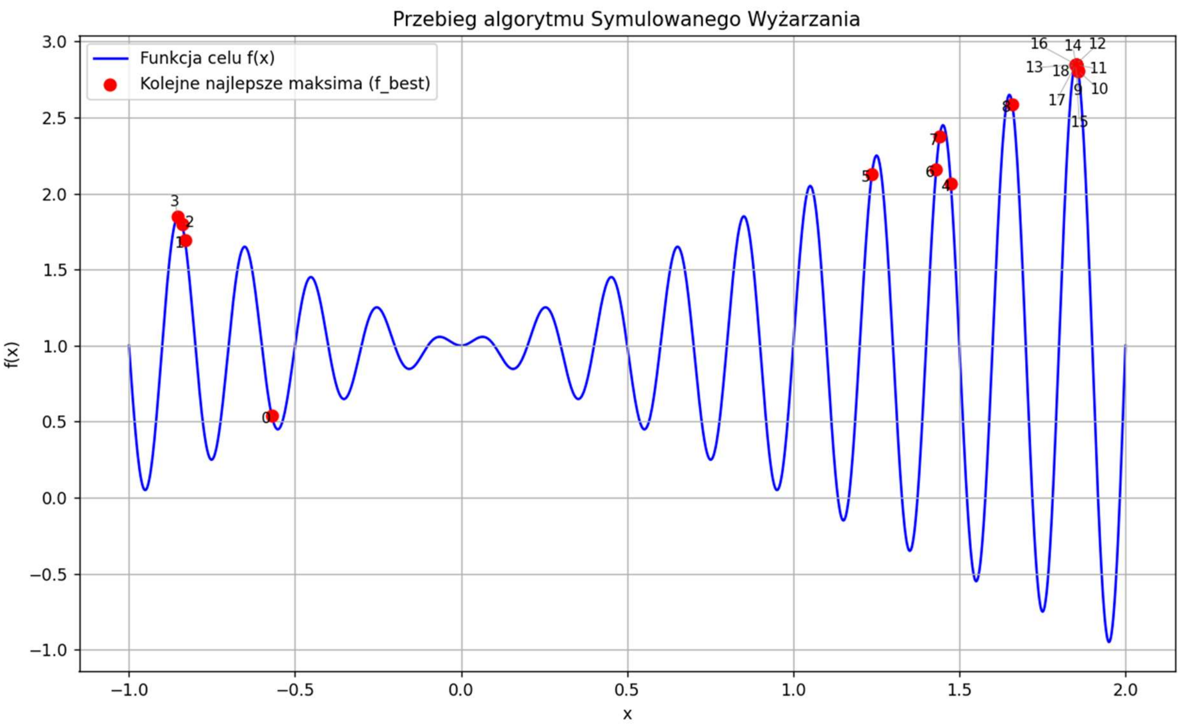



```
Całkowita liczba iteracji: 4322400
Liczba zaakceptowanych korekcji rozwiązań: 28
Czas wykonania: 3.079767 s
Najlepsze rozwiązanie znaleziono w iteracji: 3611448

Najlepsze znalezione rozwiązanie: x = 1.85054746577803186369
Wartość funkcji: f(x) = 2.85027376676809840461

--- Historia najlepszych rozwiązań (kolejne korekcje) ---
Indeks     | x                         | f(x)
----------------------------------------------------------
0          | 0.18701330021767814671    | 0.92579978339876678461
1          | 0.09839681335502414861    | 1.00495371897468355193
2          | -0.03452475038722097045   | 1.03052434010194948755
3          | -0.29173686625434325226   | 1.07488540494681172888
4          | -0.42029171490816069623   | 1.25014699395973227780
5          | 0.48204573851119636441    | 1.25770792441857515165
6          | 0.62261691976812139071    | 1.40609363040282242530
7          | 0.85497324914424199793    | 1.84455921308743664433
8          | 1.05723814220604839242    | 2.03002212131834092190
9          | 1.25977029491649150650    | 2.20089080176089924024
10         | 1.46247548177826569571    | 2.35158185270303743408
11         | 1.66329266223011162928    | 2.52035662178503194752
12         | 1.65239263880041731269    | 2.64772676711551824269
13         | 1.85038786127058529907    | 2.85025049504078076268
14         | 1.85045269949476498539    | 2.85026556216106463637
15         | 1.85054394469912697474    | 2.85027375543932448565
```

| | | |
|---|---|---|
| 15 | 1.85054394469912697474 | 2.85027375543932448565 |
| 16 | 1.85054971289607972373 | 2.85027376215591887743 |
| 17 | 1.85054529798478828440 | 2.85027376247361807771 |
| 18 | 1.85054705252048856678 | 2.85027376661185760653 |
| 19 | 1.85054785041404157298 | 2.85027376663313081195 |
| 20 | 1.85054712404502819112 | 2.85027376666122966853 |
| 21 | 1.85054726759066512365 | 2.85027376673211119140 |
| 22 | 1.85054739788658517696 | 2.85027376676385246768 |
| 23 | 1.85054747812956366104 | 2.85027376676796517785 |
| 24 | 1.85054745710630341726 | 2.85027376676802512989 |
| 25 | 1.85054745845263224346 | 2.85027376676804511391 |
| 26 | 1.85054746479072629306 | 2.85027376676809662825 |
| 27 | 1.85054746519235191471 | 2.85027376676809751643 |
| 28 | 1.85054746577803186369 | 2.85027376676809840461 |

**Wywołanie 2:**

Użyte parametry: T0=5.0, A=0.997, M=1200, k=2.0



Szymon Kaźmierczak 251546
Ireneusz Bartoszek 251481

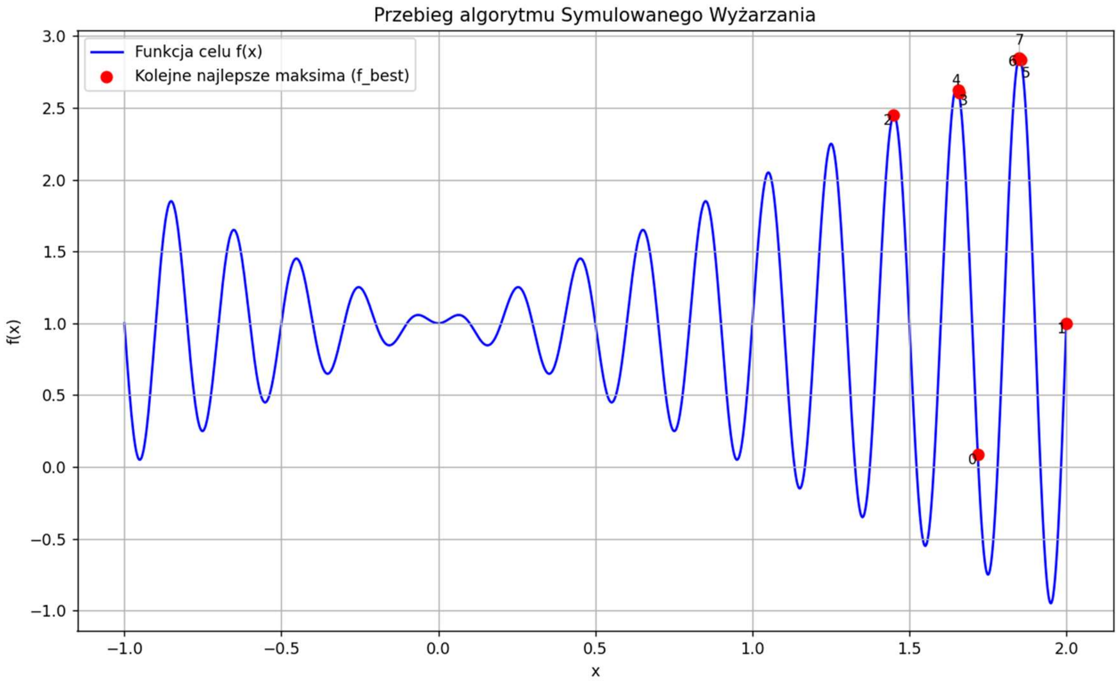
```
Całkowita liczba iteracji: 4322400
Liczba zaakceptowanych korekcji rozwiązań: 18
Czas wykonania: 2.821095 s
Najlepsze rozwiązanie znaleziono w iteracji: 828953

Najlepsze znalezione rozwiązanie: x = 1.8505459178980847578 8
Wartość funkcji: f(x) = 2.8502737645783478015 5

--- Historia najlepszych rozwiązań (kolejne korekcje) ---
Indeks     | x                          | f(x)
-------------------------------------------------------------
0          | -0.57015466958734883907    | 0.54036904090003723411
1          | -0.83162436442247078539    | 1.69685632777819694894
2          | -0.84008662084198992837    | 1.79967334138521151132
3          | -0.85304130171493652846    | 1.84915059574788820385
4          | 1.47425769063025713379     | 2.06648241798185416940
5          | 1.23665554990812132097     | 2.12956532442855106524
6          | 1.43018611700033115852     | 2.16194033490634840433
7          | 1.44029131144728106406     | 2.37381425758516328983
8          | 1.65921400147852438067     | 2.59018460146147777579
9          | 1.85785848012336529678     | 2.80152682583206225075
10         | 1.85734251916761472501     | 2.80814702192514609180
11         | 1.85242343981578860834     | 2.84705726639973466519
12         | 1.85066061231148593080     | 2.85026207015196808570
13         | 1.85047896767309438815     | 2.85026948017312609096
14         | 1.85057639191781997390     | 2.85027300233466407420
15         | 1.85056985616840030673     | 2.85027330875429019130
16         | 1.85056131185605021727     | 2.85027359162188975716
17         | 1.85054986352111106029     | 2.85027376151680122973
18         | 1.85054591789808475788     | 2.85027376457834780155
```

**Wywołanie 3:**

Aktualne parametry: T0=10.0, A=0.8, M=1200, k=0.1

02.11.2025

Szymon Kaźmierczak 251546
Ireneusz Bartoszek 251481



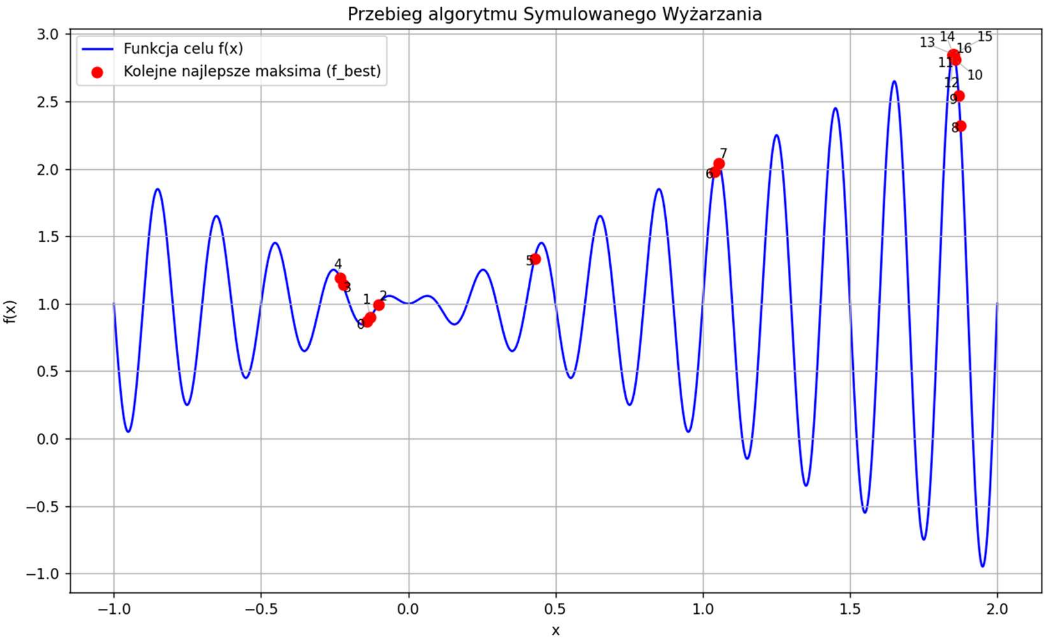

```
Całkowita liczba iteracji: 62400
Liczba zaakceptowanych korekcji rozwiązań: 7
Czas wykonania: 0.045016 s
Najlepsze rozwiązanie znaleziono w iteracji: 342

Najlepsze znalezione rozwiązanie: x = 1.85008054106481445444
Wartość funkcji: f(x) = 2.85007461870366585188

--- Historia najlepszych rozwiązań (kolejne korekcje) ---
Indeks     | x                         | f(x)
-----------------------------------------------------------
0          | 1.71784315503288320670    | 0.08669161077369891277
1          | 2.00000000000000000000    | 0.99999999999999511502
2          | 1.45000301062270087193    | 2.45000300413708327341
3          | 1.65813142555750814289    | 2.60432191610814189886
4          | 1.65637916204939572573    | 2.62322769590490434410
5          | 1.85474064503179714158    | 2.83420894452633653771
6          | 1.84756860493944574664    | 2.84218131670157081459
7          | 1.85008054106481445444    | 2.85007461870366585188
```

02.11.2025

Szymon Kaźmierczak 251546
Ireneusz Bartoszek 251481

**Wywołanie 4:**

Aktualne parametry: T0=5.0, A=0.997, M=1200, k=10



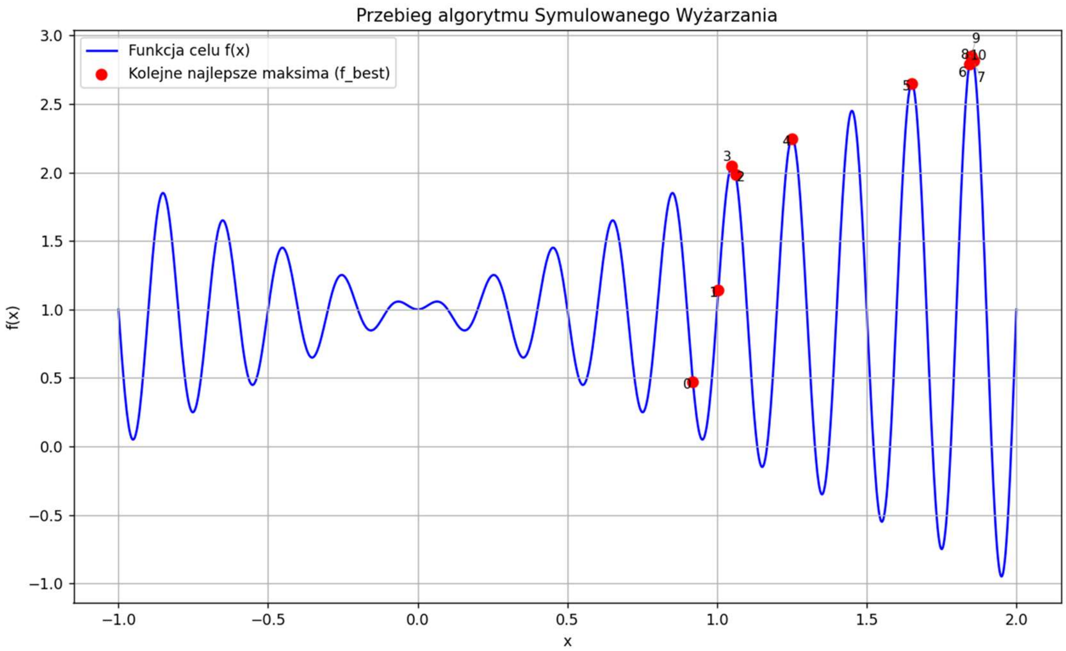

```
Całkowita liczba iteracji: 4322400
Liczba zaakceptowanych korekcji rozwiązań: 16
Czas wykonania: 2.784648 s
Najlepsze rozwiązanie znaleziono w iteracji: 499160

Najlepsze znalezione rozwiązanie: x = 1.85054718173404020298
Wartość funkcji: f(x) = 2.85027376669424148403

--- Historia najlepszych rozwiązań (kolejne korekcje) ---
Indeks     | x                          | f(x)
--------------------------------------------------------------
0          | -0.14022086834533320499    | 0.86634458033521033471
1          | -0.12868499642683561834    | 0.89910439818301990389
2          | -0.10151131272313196341    | 0.99518212561562846563
3          | -0.22153835250298234416    | 1.13872344535312808311
4          | -0.23092320770436952637    | 1.19067840568983585037
5          | 0.42833341928043305868     | 1.33287831478785934181
6          | 1.03904918869888329702     | 1.97816412724075063601
7          | 1.05469523712787616176     | 2.04324210654307414359
8          | 1.87507859627556139337     | 2.32260292072042062728
9          | 1.86900473123341015480     | 2.54566134172789837464
10         | 1.85712921855051460440     | 2.81074401036619647698
11         | 1.84769206583286837997     | 2.84283743837951696776
12         | 1.84828094506033324684     | 2.84558623719050540757
13         | 1.85000945766624402822     | 2.85000937600581405462
14         | 1.85054093511849093723     | 2.85027372779965348926
15         | 1.85054433802454743052     | 2.85027375782876379873
16         | 1.85054718173404020298     | 2.85027376669424148403
```

02.11.2025

Szymon Kaźmierczak 251546
Ireneusz Bartoszek 251481

**Wywołanie 5:**

Aktualne parametry: T0=1000, A=0.7, M=1200, k=0.1




```
Całkowita liczba iteracji: 55200
Liczba zaakceptowanych korekcji rozwiązań: 10
Czas wykonania: 0.039299 s
Najlepsze rozwiązanie znaleziono w iteracji: 3153

Najlepsze znalezione rozwiązanie: x = 1.85032711620105327910
Wartość funkcji: f(x) = 2.85022941080516023504

--- Historia najlepszych rozwiązań (kolejne korekcje) ---
Indeks     | x                          | f(x)
------------------------------------------------------------
0          | 0.91938278613666701844     | 0.47412350849391238228
1          | 1.00449455584896774063     | 1.14136443051119496062
2          | 1.06226220447577279771     | 1.98441175620602217045
3          | 1.04849489064609624478     | 2.04732298874323559446
4          | 1.24899479755585263163     | 2.24837206530408684202
5          | 1.64949798039598727328     | 2.64929283872471899031
6          | 1.84270597875143660183     | 2.79453797517775104353
7          | 1.85673180933747605792     | 2.81536393192901934768
8          | 1.84835208567599851293     | 2.84587565196766334452
9          | 1.85000415493981140713     | 2.85000413917924122487
10         | 1.85032711620105327910     | 2.85022941080516023504
```

## 6. Porównanie z wynikami

### Przykład z 3 rozdziału

Autor artykułu wykonał program z parametrami odpowiadającymi id=1

| id | M | A | T0 | k | ilość korekcji | czas | iteracje | najlepsze rozwiązanie w iteracji |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3000 | 0.999 | 500 | 0.1 | 24 | 32.398464 s | 46254000 | 44589903 |
| 2 | 3000 | 0.8 | 500 | 0.1 | 25 | 0.151668 s | 210000 | 209584 |
| 3 | 2000 | 0.999 | 200 | 0.1 | 34 | 21.527295 s | 29004000 | 27869156 |
| 4 | 1000 | 0.7 | 1000 | 0.5 | 4 | 0.033496 s | 46000 | 1831 |
| 5 | 1000 | 0.4 | 1000 | 1 | 14 | 0.014983 s | 18000 | 6763 |

| id | x | y |
|---|---|---|
| 1 | 99.99999999999873523393 | 10.99999999999721822519 |
| 2 | 100.00000000121801235764 | 10.99999999732037281319 |
| 3 | 99.99999999999860733624 | 10.99999999999693578445 |
| 4 | 100.02189998608687915294 | 10.95182003060886621881 |
| 5 | 99.99943063641025275956 | 10.99874740010255536049 |

Wyniki uzyskane przy zmianie parametrów dają satysfakcjonujący, a czasami lepszy wynik niż wartości parametrów, którymi posłużył się autor. Parametry autora wykonywały bardzo dużo iteracji, przez które czas wykonywania programu był bardzo wydłużony. Ilość korekcji, które przy jego parametrach różniła się od tego, co jest przedstawione w artykule (7). Zapewne powodem był inny pierwszy argument początkowy. Wynik w artykule to:

$$f(x)=10.980462 \text{ dla } x=100.008881.$$

Wartość ta jest zbliżona do uzyskanego wyniku w programie.

### Przykład z 4 rozdziału:

Autor artykułu wykonał program z parametrami odpowiadającymi id=1

| id | M | A | T0 | k | ilość korekcji | czas | iteracje | najlepsze rozwiązanie w iteracji |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1200 | 0.997 | 5 | 0.1 | 28 | 3.079767 s | 4322400 | 3611448 |
| 2 | 1200 | 0.997 | 5 | 2 | 18 | 2.821095 s | 4322400 | 828953 |
| 3 | 1200 | 0.8 | 10 | 0.1 | 7 | 0.045016 s | 62400 | 342 |
| 4 | 1200 | 0.997 | 5 | 10 | 16 | 2.784648 s | 4322400 | 499160 |
| 5 | 1200 | 0.7 | 1000 | 0.1 | 10 | 0.039299 s | 55200 | 3153 |

| id | x | y |
|---|---|---|
| 1 | 1.85054746577803186369 | 2.85027376676809840461 |
| 2 | 1.85054591789808475788 | 2.85027376457834780155 |
| 3 | 1.85008054106481445444 | 2.85007461870366585188 |
| 4 | 1.85054718173404020298 | 2.85027376669424148403 |
| 5 | 1.85032711620105327910 | 2.85022941080516023504 |

Wyniki uzyskane przy zmianie parametrów dają satysfakcjonujący, a czasami lepszy wynik niż wartości parametrów, którymi posłużył się autor. Ilość korekcji, które przy jego parametrach różniła się od tego, co jest przedstawione w artykule (11). Zapewne powodem był inny pierwszy argument początkowy. Wynik w artykule to:

f(x)= 2.85027325340030 dla x=1.85052376133795.

Wartość ta jest zbliżona do uzyskanego wyniku w programie.

## 7. Analiza wpływu parametrów na jakość rozwiązania

**A- (Współczynnik chłodzenia):** Wartości A bliskie 1 (np. 0.999, 0.997) są kluczowe dla znalezienia dobrych rozwiązań, ponieważ pozwalają na przeprowadzenie milionów iteracji. Gwałtowne chłodzenie (np. A=0.8 lub A=0.7) powoduje natychmiastowe "zamrożenie" algorytmu, przedwczesne zakończenie poszukiwań (tylko dziesiątki tysięcy iteracji) i utknięcie w bardzo słabych optimach lokalnych.

**M- (Liczba iteracji na krok):** Ma bezpośredni wpływ na jakość rozwiązania kosztem czasu. Zwiększenie M (przy optymalnym A) pozwoliło na znalezienie rozwiązania dokładniejszego.

**K- (Współczynnik akceptacji):** Ma silny, odwrotny wpływ na jakość. Najlepsze wyniki osiągnięto przy niskim k=0.1, które pozwala na dużą liczbę korekcji. Zwiększanie k (do 2.0 lub 10.0 – w przykładzie z rozdziału 4) czyniło algorytm zbyt "zachłannym", drastycznie redukując liczbę korekcji (do 16-18) i pogarszając wynik iteracji, w której znaleziono rozwiązanie (do 828k-499k).

**T0- (Temperatura początkowa):** Wyższa temperatura początkowa (T0=500 vs T0=200 – w przykładzie z rozdziału 4) w połączeniu z wolnym chłodzeniem (A=0.999) wydłużyła całkowity czas eksploracji (więcej iteracji), co przełożyło się na lepszy wynik (44.5M vs 27.8M).

Parametry działają synergicznie ze sobą. Większa ilość wykonanych iteracji, przy wolnym wygaszaniu i wysokiej temperaturze początkowej przekłada się na długość wykonania algorytmu.

## 8. Wnioski

Szymon Kaźmierczak 251546
Ireneusz Bartoszek 251481

**Kluczowa rola harmonogramu chłodzenia:** Eksperymenty dowiodły, że współczynnik chłodzenia A jest parametrem krytycznym. Wartości bardzo bliskie 1 (np. 0.999) są niezbędne do znalezienia globalnego optimum, podczas gdy szybkie chłodzenie (np. A=0.8) powoduje natychmiastowe "zamrożenie" algorytmu i utknięcie w słabych optimach lokalnych.

**Konieczność długiej eksploracji:** Testowane funkcje, zwłaszcza te o "iglicowej", multimodalnej strukturze (jak funkcja_przykład3), są niezwykle trudne do optymalizacji. Sukces wymagał długiej fazy eksploracji (wysokie M, wolne A) oraz zdolności do akceptacji gorszych rozwiązań (niski współczynnik k), aby "przeskoczyć" rozległe, nieoptymalne obszary.

**Bezpośrednia zależność kosztu i jakości:** Zaobserwowano wyraźny kompromis między czasem obliczeń a jakością wyniku. Znalezienie globalnego maksimum było możliwe, ale kosztowne obliczeniowo – wymagało milionów iteracji (ponad 30 sekund). Redukcja liczby iteracji drastycznie skracała czas (do < 0.1s), ale uniemożliwiała znalezienie rozwiązania bliskiego optimum.

**Wysoka wrażliwość na parametry:** Algorytm SA jest skuteczny, ale bardzo wrażliwy na strojenie. Optymalny wynik (id 1, Tabela 1) był wynikiem synergii wszystkich parametrów (wysokie T0, wolne A, duże M, niskie k). Zmiana któregokolwiek z nich w złą stronę prowadziła do wyników o rzędy wielkości gorszych.