



## WYKORZYSTANIE ALGORYTMU TABU SEARCH DO LOKALIZACJI BATERII KONDENSATORÓW W SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

mgr inż. Paweł Wicher / Politechnika Wrocławska  
prof. dr hab. inż. Kazimierz Wilkosz / Politechnika Wrocławska

### 1. WPROWADZENIE

Jednym z problemów występujących w systemach elektroenergetycznych jest zagadnienie nadmiernych przepływów mocy biernej. Przepływy te są przyczyną zwiększonych strat mocy czynnej, zwiększonych różnic modułów napięcia w węzłach sieci elektroenergetycznej oraz zmniejszenia przepustowości sieci. Podejmowane są więc wysiłki w celu ograniczania nadmiernych przepływów mocy biernej. Cel ten można osiągnąć poprzez instalację baterii kondensatorów [1].

Proces znajdowania najkorzystniejszej lokalizacji baterii kondensatorów jest zadaniem optymalizacji kombinatorycznej. Należy do bardziej złożonych zadań. Należy zauważyć, że baterie kondensatorów są charakteryzowane przez parametry, które są wielkościami dyskretnymi. Wielkości charakteryzujące stan systemu elektroenergetycznego (napięcia w węzłach sieci) są z kolei wielkościami ciągłymi. W celu rozwiązania omawianego zadania proponowane było zastosowanie metod programowania matematycznego [1]. Jednak wyniki zastosowania takiej koncepcji nie są zadowalające z punktu widzenia dokładności otrzymywanego rozwiązania oraz wielkości nakładów obliczeniowych. Interesującym sposobem rozwiązywania problemu lokalizacji baterii kondensatorów jest zastosowanie metaheurystyk. Wybrana metaheurystyka w procesie iteracyjnym prowadzi do rozwiązania znajdującego się w pobliżu ekstremum globalnego, a nie ekstremum lokalnego, co jest istotną różnicą w stosunku do postępowania na podstawie programowania matematycznego [4]. W pracy rozpatrywane jest wykorzystanie metaheurystyki, którą jest algorytm poszukiwania z tabu (Tabu Search, TS) [4].

Celem artykułu jest przedstawienie wyników analizy porównawczej metod lokalizacji baterii kondensatorów z wykorzystaniem algorytmu TS. Na zakończenie pracy podsumowywane są najważniejsze własności rozpatrywanych metod.

### 2. OGÓLNY OPIS ALGORYTMU TS

Algorytm TS jest jednym z nowoczesnych heurystycznych algorytmów optymalizacji [5, 6]. Może być on wykorzystywany do rozwiązywania problemów optymalizacji kombinatorycznej. Jest to iteracyjny algorytm poszukiwania rozwiązania. Należy do algorytmów samotnego poszukiwacza, wykorzystujących metodę lokalnych ulepszeń wyszukiwania. Stosowana jest w nim zasada osłabiania reguły selekcji. Polega ona na tym, że każde bieżące rozwiązanie jest zastępowane przez najlepsze rozwiązanie z jego sąsiedztwa, nawet jeśli spowoduje to pogorszenie wyniku rozwiązania.

Prawidłowe działanie algorytmu zależy od zdefiniowania następujących elementów: przejść (pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami), listy tabu, kryterium aspiracji, kryterium stopu oraz w przypadku wyszukiwania optymalnej lokalizacji baterii kondensatorów zasady oceny tych lokalizacji.

#### Streszczenie

Artykuł traktuje o znajdowaniu najkorzystniejszej lokalizacji baterii kondensatorów w sieci elektroenergetycznej. Po ogólnym omówieniu rozwiązywania tego zadania autorzy skupili uwagę na wykorzystaniu algorytmu poszukiwania z tabu (Tabu Search). W dalszej części pracy znajdujemy zasady postępowania według algorytmu

poszukiwania z tabu. Po tym zaprezentowano charakterystykę różnych metod znajdowania optymalnej lokalizacji baterii kondensatorów, których wspólną cechą jest stosowanie algorytmu poszukiwania z tabu. Na zakończenie artykułu dokonano porównania przedstawionych metod lokalizacji baterii kondensatorów.



### a. Przejścia

Podstawą prawidłowego funkcjonowania algorytmu TS jest zdefiniowanie zestawu działań pozwalających na generowanie przejść do nowych rozwiązań problemu, poprawiających rozważaną funkcję celu. W pewnych sytuacjach, gdy nie ma możliwości poprawienia funkcji celu, algorytm wybierze przejście, które w najmniejszym stopniu będzie pogarszało wartość tej funkcji.

### b. Lista tabu

Lista tabu jest listą przejść, które są zabronione. Celem tworzenia listy tabu jest przeciwdziałanie pojawianiu się przejść cyklicznych oraz powrotom do lokalnego minimum, z którego wcześniej wykonywane było przejście. Tutaj przyjmujemy (dalej tak samo jest to zakładane, o ile nie będzie innego wskazania), że wspomniana wcześniej funkcja celu w poszukiwaniu z tabu jest minimalizowana.

Lista tabu odgrywa bardzo istotną rolę przy poszukiwaniu rozwiązania. Pozwala ona zmniejszyć przestrzeń poszukiwań, a co za tym idzie, skrócić czas obliczeń.

### c. Kryterium aspiracji

Kryterium aspiracji pozwala uchylić zakaz wykonania przejścia, wynikający z umieszczenia tego przejścia na liście tabu. Często kryterium aspiracji jest tak formułowane, że uchylenie zakazu wykonania przejścia ma miejsce wtedy, gdy dane przejście prowadzi do zmniejszenia wartości funkcji celu, czyli  $f(S_k + \text{tabu\_move}) < f(S_k^*)$ , gdzie:  $f(\cdot)$  jest funkcją celu,  $\text{tabu\_move}$  jest przejściem do następnego rozwiązania,  $S_k^*$  jest najlepszym z dotychczas osiągniętych rozwiązań,  $S_k^*$  jest rozwiązaniem, z którego przejście  $\text{tabu\_move}$  prowadzi do kolejnego rozwiązania charakteryzowanego przez mniejszą wartość funkcji celu, niż to było dla rozwiązania  $S_k^*$ .

Kryterium aspiracji pozwala zwiększyć elastyczność poszukiwania z tabu poprzez skierowanie poszukiwań w kierunku bardziej atrakcyjnych przejść.

### d. Kryterium stopu

Kryterium stopu, określające warunki, przy których poszukiwanie z tabu zostanie zakończone, często zakłada konieczność spełnienia przynajmniej jednego z warunków:

1. liczba iteracji od znalezienia najlepszego dotychczas rozwiązania przekracza ustaloną wartość
2. liczba iteracji przekracza zakładaną maksymalną wartość.

## 3. CHARAKTERYSTYKA METOD LOKALIZACJI BATERII KONDENSATORÓW Z WYKORZYSTANIEM ALGORYTMU TS

### 3.1. Metoda Yanga, Huanga i Huanga

Metoda Yanga, Huanga i Huanga [7] zakłada, że najkorzystniejsze lokalizacje baterii kondensatorów będą znajdowane w trakcie minimalizacji funkcji:

$$K_{E\_str} + K_I \quad (1)$$

przy ograniczeniach:

$$\mathbf{g}(\mathbf{X}, \mathbf{Q}_z) = 0 \quad (2)$$

$$V_{i, \min} \leq V_i \leq V_{i, \max}, \quad 1 \leq i \leq n, \quad 0 \leq Q_{Bi, j} \leq Q_{Bi, \max}, \quad 1 \leq i \leq n_B, \quad 1 \leq j \leq l, \quad (3)$$

gdzie:  $K_{E\_str}$  jest kosztem strat energii w sieci elektroenergetycznej,  $K_I$  jest kosztem instalacji baterii kondensatorów,  $\mathbf{g}(\cdot) = 0$  jest równaniem rozptywu mocy w sieci elektroenergetycznej,  $\mathbf{x}$  jest wektorem napięć węzłowych,  $\mathbf{Q}_z$  jest wektorem mocy znamionowych dodatkowych źródeł mocy biernej, zainstalowanych w węzłach sieci elektroenergetycznej,  $V_i$  jest modulem napięcia w węźle  $i$ ,  $n$  jest liczbą węzłów,  $V_{i, \min}$ ,  $V_{i, \max}$  są modułami napięcia  $V_p$ , odpowiednio minimalnym i maksymalnym,  $Q_{Bi, \max}$ ,  $Q_{Bi, j}$  są mocami znamionowymi  $i$ -tej baterii



kondensatorów, odpowiednio, maksymalną oraz dla  $j$ -tego poziomu obciążenia,  $n_B$  jest liczbą baterii kondensatorów,  $l$  jest liczbą poziomów obciążenia.

Dodatkowymi źródłami mocy biernej rozpatrywanymi w metodzie są baterie kondensatorów. W procesie minimalizacji funkcji (1) wyznaczane są moce  $Q_{Bi, max}$ ,  $Q_{Bi, j}$ .

W początkowym etapie procedury optymalizacyjnej, w celu określenia potencjalnych lokalizacji baterii kondensatorów, wykorzystywane są doświadczenia eksploatacyjne. W dalszej kolejności dla wskazanego wcześniej celu wykorzystywane są wyniki analizy czułościowej. Zasadniczą część procesu optymalizacyjnego jest realizowana z wykorzystaniem klasycznego algorytmu TS.

Obliczenia testowe metody wykonano na 69-węzłowym systemie testowym.

### 3.2. Metoda Gana, Qu i Cai

Metoda Gana, Qu i Cai, opisana w literaturze [9], wykorzystuje funkcję celu (1), która jest minimalizowana przy ograniczeniach (2), (3) oraz:

$$K_{Ti, min} \leq K_{Ti} \leq K_{Ti, max}, \quad 1 \leq i \leq t, \quad Q_{Gi, min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi, max}, \quad 1 \leq i \leq g, \quad (4)$$

$$0 \leq Q_{Di, j} \leq Q_{Di, max}, \quad 1 \leq i \leq n_D, \quad 1 \leq j \leq l, \quad (5)$$

gdzie:  $K_{Ti}$ ,  $K_{Ti, min}$ ,  $K_{Ti, max}$  są przekładniami transformatora  $i$ , odpowiednio, rzeczywiście występującą, minimalną i maksymalną,  $t$  jest liczbą transformatorów,  $Q_{Gi}$ ,  $Q_{Gi, min}$ ,  $Q_{Gi, max}$  są mocami biernymi dostarczonymi przez generator  $i$ , odpowiednio, rzeczywiście występującą, minimalną i maksymalną,  $g$  jest liczbą generatorów,  $Q_{Di, max}$ ,  $Q_{Di, j}$  są mocami znamionowymi  $i$ -tego dławika kompensującego, odpowiednio, maksymalną oraz dla  $j$ -tego poziomu obciążenia,  $n_D$  jest liczbą dławików kompensujących.

W poszukiwaniu optymalnej lokalizacji oraz parametrów dodatkowych źródeł mocy biernej w systemie elektroenergetycznym metoda wykorzystuje algorytm TS. Dla takiej sytuacji w pracy [9] pokazany został sposób postępowania, gdy w zadaniu optymalizacyjnym oprócz wielkości dyskretnych są także wielkości ciągłe.

Jednym z czynników, od których zależy efektywność algorytmu TS, jest sprawna realizacja przejść do kolejnych rozwiązań. Autorzy przedstawili oryginalny sposób oceny rozwiązań z otoczenia aktualnego rozwiązania, który taką realizację przejść pomiędzy rozwiązaniami zapewnia.

Metoda była testowana z wykorzystaniem 200-węzłowego rzeczywistego systemu elektroenergetycznego. Testy uwidaczniają wyraźnie większą efektywność obliczeniową algorytmu TS w stosunku do symulowanego wyżarzania.

### 3.3. Metoda Moriego i Ogity

Metoda Moriego i Ogity, opisana w [10], wykorzystuje funkcję celu (1) oraz ograniczenia (2). W charakteryzowanej metodzie, w celu zwiększenia efektywności przeszukiwania z punktu widzenia zużywanego czasu oraz dokładności otrzymywanego wyniku, wykorzystywana jest koncepcja równoległych poszukiwań z tabu. Przy tym sposobie poszukiwania z tabu rozpatrywana jest dekompozycja sąsiedztwa rozwiązania. Pozwala to dekomponować poszukiwanie najlepszych rozwiązań do wyróżnionych obszarów sieci. Spośród tych rozwiązań wybierane jest najlepsze. Takie postępowanie daje w efekcie redukcję czasu obliczeń. Zakłada się również zwielokrotnianie list tabu, co ma zapewnić zwiększenie różnorodności rozwiązań i efektywniejsze znajdowanie lepszych z nich. Zapewnia to także zwiększenie niezawodności poszukiwań. Wrażliwość poszukiwań na warunki początkowe ulega zdecydowanemu ograniczeniu.

Metoda była testowana z wykorzystaniem 27- i 69-węzłowego systemu rozdzielczego.

### 3.4. Metoda Changa i Lerna

Metoda Changa i Lerna [11] bierze pod uwagę maksymalizację rozpatrywanej w niej funkcji celu:

$$\max_{q_i} (Z_{AP\_str} + Z_{AE\_str} - K_l) \quad (6)$$



gdzie:  $Z_{\Delta P, str}$ ,  $Z_{\Delta E, str}$  są zyskami wynikającymi, odpowiednio, z ograniczenia szczytowych strat mocy oraz strat energii w sieci elektroenergetycznej.

Optymalna lokalizacja i parametry baterii kondensatorów są wyznaczone dla każdego wyróżnianego poziomu obciążenia sieci elektroenergetycznej.

Do znajdowania optymalnej lokalizacji i parametrów baterii kondensatorów wykorzystywane jest poszukiwanie z tabu. Stosowana procedura składa się z trzech etapów. Każdy z nich obejmuje wiele iteracji, w czasie których znajdowane są kolejne rozwiązania problemu lokalizacji baterii kondensatorów. Wyróżnienie trzech etapów postępowania ma na celu takie ograniczenie znajdowanego w każdym z nich optymalnego rozwiązania, by sumaryczna pojemność branych pod uwagę baterii kondensatorów nie przekraczała pewnej ustalonej wartości. Wartość ta jest różna dla poszczególnych etapów. Jest ona ustalana losowo, podobnie jak liczba baterii kondensatorów rozważanych w rozwiązaniu wstępnym.

Metoda była testowana z wykorzystaniem 34-węzłowego systemu rozdzielczego.

### 3.5. Metoda Gallega, Monticellego i Romera

Metoda Gallega, Monticellego i Romera [12] jest metodą hybrydową, która wykorzystuje koncepcję poszukiwania z tabu, jednocześnie uwzględniając pewne idee podejść kombinatorycznych zaprezentowanych w algorytmach genetycznych, symulowanym wyżarzaniu oraz praktycznych podejściach heurystycznych (analiza czułościowa).

Minimalizowaną funkcją celu jest funkcja (1). Zadanie znajdowania najlepszych lokalizacji baterii kondensatorów rozwiązywane jest przy ograniczeniach (2), (3).

W istocie metoda wyróżnia dwie fazy: fazę heurystycznego wyszukiwania lokalizacji baterii kondensatorów oraz fazę poszukiwania z tabu. Efektem pierwszej fazy jest wyszukanie nie jednej, a wielu (niekoniecznie optymalnych) lokalizacji baterii kondensatorów, które stanowią punkt wyjścia do dalszych poszukiwań najlepszych lokalizacji. W tej fazie lokalizacje baterii kondensatorów są wskazywane w wyniku zastosowania analizy czułościowej. W pracy [12] wykorzystywane są różne parametry czułościowe i w efekcie otrzymywane są różne lokalizacje baterii kondensatorów.

W fazie drugiej przeprowadzane jest poszukiwanie z tabu. Jeżeli wszystkie dotychczas wskazane lokalizacje zostały już uwzględnione, generowane są nowe lokalizacje z wykorzystaniem: rekombinacji, strategii Path Relinking i konfiguracji elitarnych.

Autorzy przewidują znajdowanie lokalizacji baterii kondensatorów dla różnych obciążeń sieci, w szczególności dla obciążenia szczytowego.

Metoda była testowana z wykorzystaniem spotykanych w literaturze systemów testowych posiadających 9 oraz 69 węzłów i 135-węzłowego systemu rzeczywistego.

### 3.6. Metoda Zhanga, Liu i Liu

Metoda Zhanga, Liu i Liu jest opisana w pracy [13]. Metoda przewiduje możliwość poszukiwania nie tylko optymalnej lokalizacji źródeł energii biernej pojemnościowej (baterii kondensatorów), ale także źródeł energii biernej indukcyjnej (dławików kompensujących). W poszukiwaniu optymalnej lokalizacji źródeł energii biernej, wykorzystując wiedzę inżynierską, wyróżnia się obciążenia duże, średnie i małe. Stwierdza się, że przy dużym obciążeniu zachodzi potrzeba dostarczenia do sieci energii biernej pojemnościowej, przy małym – energii biernej indukcyjnej [13]. W przypadku obciążeń dużych zakładane jest wykorzystanie funkcji celu (1) minimalizowanej przy ograniczeniach (2)–(5) oraz ograniczeniu  $S_{Li} \leq S_{Li, max}$ ,  $1 \leq i \leq m$ , gdzie:  $S_{Li}$ ,  $S_{Li, max}$  są mocami pozornymi dla linii elektroenergetycznej  $i$ , odpowiednio, rzeczywistocie występującej i maksymalnej,  $m$  jest liczbą linii elektroenergetycznych. Składnik  $K_i$  w funkcji celu reprezentuje koszty związane z zainstalowaniem baterii kondensatorów. Dla małych obciążeń składnik  $K_i$  w funkcji celu reprezentuje koszty związane z zainstalowaniem dławików kompensujących. Dla obciążeń średnich składnik  $K_i$  nie występuje.

Dla dużych obciążeń zamiast warunku  $0 \leq Q_{Bi, j} \leq Q_{Bi, max}$ ,  $1 \leq i \leq n_B$ ,  $1 \leq j \leq l$  brany jest pod uwagę warunek  $0 \leq Q_{B^i}$ ,  $1 \leq i \leq n_B$ , a dla małych obciążeń, oprócz warunku  $0 \leq Q_{Bi, j} \leq Q_{Bi, max}$ ,  $1 \leq i \leq n_B$ ,  $1 \leq j \leq l$ , także warunek  $0 \leq Q_{D^i}$ ,  $1 \leq i \leq n_D$ .

Każdy z wyróżnianych przypadków obciążenia rozpatrywany jest osobno.

Przy znajdowaniu optymalnych lokalizacji źródeł mocy biernej wykorzystywany jest zmodyfikowany algorytm TS. Wstępne rozwiązania ustalane są na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych i analizy czułościowej.

Do testowania metody był wykorzystany 137-węzłowy rzeczywisty (chiński) system elektroenergetyczny.

Bardzo podobna metoda do metody Zhanga, Liu i Liu jest opisana w [14]. W pracy tej stwierdzono, że w porównaniu ze zwykłym algorytmem zmodyfikowany algorytm TS (modyfikacja wstępnych rozwiązań w oparciu o doświadczenia eksploatacyjne i analizę czułościową) pozwala w krótszym czasie otrzymać mniejszą wartość funkcji celu.

### 3.7. Metoda Piresa, Martinsa i Antunesa

Metoda Piresa, Martinsa i Antunesa [15] opracowana została w celu rozwiązania zadania optymalizacji wielokryterialnej liczby, lokalizacji, parametrów oraz chwil czasu, w których następują przełączenia baterii kondensatorów w sieci rozdzielczej. W metodzie rozpatrywane są dwie funkcje celu, a mianowicie straty mocy czynnej ( $P_{\Sigma str}$ ) oraz koszty wprowadzenia do sieci baterii kondensatorów ( $K_{I,B}$ ). Uwzględniane są ograniczenia: (2), (3) oraz ograniczenie, by co najwyżej tylko jedna bateria kondensatorów była instalowana w jednym węźle.

W metodzie wykorzystywany jest algorytm TS. Wstępne rozwiązanie ustalane jest drogą losowania. W wyniku poszukiwania z tabu znajdujący jest niewielki obszar rozwiązań niedominujących. Wybór ostatecznego rozwiązania pozostawia się przeprowadzającemu obliczenia.

Metoda była testowana z wykorzystaniem 94-węzłowego rzeczywistego (portugalskiego) systemu rozdzielczego.

### 3.8. Metoda Moriego i Tsunokawy

Metoda Moriego i Tsunokawy [16] wykorzystuje funkcję celu (1) oraz uwzględnia ograniczenia (2), (3). Łączy poszukiwania z tabu z przeszukiwaniem zmiennego sąsiedztwa. Przeszukiwanie zmiennego sąsiedztwa pozwala na większe zróżnicowanie potencjalnych rozwiązań i przez to uzyskanie lepszych efektów końcowych. Metoda zapewnia bardziej efektywne poszukiwanie rozwiązania globalnego niż inne metody.

Metoda była testowana z wykorzystaniem 32-węzłowego systemu rozdzielczego. Zauważono, że odchylenie standardowe funkcji celu jest w przypadku opisywanej metody o 25% mniejsze niż w przypadku metody, w której nie ma przeszukiwania zmiennego sąsiedztwa.

### 3.9. Podsumowanie

Zestawienie charakterystycznych cech rozpatrywanych metod podane jest w tab. 1.

Tab. 1. Zestawienie charakterystycznych cech rozpatrywanych metod

Metoda	Funkcja celu	Wstępne ustalenie rozwiązania	Obszar przejść	Prace	Rok opubl.
Yanga, Huanga i Huanga	$K_{E\_str} + K_{IB}$	doświadczenia eksploatacyjne, analiza czułościowa	sąsiedztwo	7, 8	1995, 1996
Gana, Qu i Cai	$K_{E\_str} + K_{IB} + K_{ID}$	losowanie	sąsiedztwo	9	1996
Morigo i Ogity	$K_{E\_str} + K_{IB}$	losowanie	zdekomponowane sąsiedztwo	10	(1999) 2000
Changa i Lerna	$Z_{\Delta P\_str} + Z_{\Delta E\_str} - K_{IB}$	losowanie	sąsiedztwo	11	2000
Gallega, Monticellego i Romera	$K_{E\_str} + K_{IB}$	analiza czułościowa	dokładnie zdefiniowany	12	2001
Zhanga, Liu i Liu	$K_{E\_str} + K_{IB} + K_{ID}$	doświadczenia eksploatacyjne, analiza czułościowa	sąsiedztwo	13	2002 (2010)
Piresa, Martinsa i Antunesa	$P_{\Sigma str}, K_{IB}$	losowanie	sąsiedztwo	15	2005
Morigo i Tsunokawy	$K_{E\_str} + K_{IB}$	nie ma baterii kondensatorów	zmiennie sąsiedztwo	16	2005

Omówione w pracy metody powstały stosunkowo niedawno. W większości z analizowanych metod wykorzystywana jest funkcja celu, która stanowi sumę kosztów strat energii oraz kosztów związanych z instalacją baterii kondensatorów w sieci elektroenergetycznej. Istotne różnice pomiędzy rozpatrywanymi metodami występują w zakresie wstępnego ustalenia rozwiązania oraz definicji obszaru przejść pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami. W trzech metodach, tj. w metodzie Yanga, Huanga i Huanga, metodzie Gallega, Monticellego





i Romera oraz metodzie Zhanga, Liu i Liu, przy ustalaniu wstępnego rozwiązania wykorzystywane są wyniki analizy czułościowej. W dwóch metodach korzysta się z doświadczenia eksploatacyjnego, w jednej metodzie zakłada się, że punktem wyjściowym do analiz jest brak baterii kondensatorów w sieci. W pozostałych metodach na drodze losowania ustala się rozwiązanie początkowe.

Na definicję obszaru przejść pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami zwraca szczególną uwagę kilka metod. W metodzie Moriego i Ogity dokonywana jest dekompozycja sąsiedztwa otoczenia aktualnego rozwiązania. W jednej z późniejszych metod, tj. w metodzie Gallega, Monticellego i Romera, obszar przejść pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami jest początkowo definiowany na podstawie analizy czułościowej, a następnie z wykorzystaniem: rekombinacji, strategii Path Relinking i konfiguracji elitarnych. Inne podejście do ustalania rozpatrywanego obszaru przejść można znaleźć w metodzie Moriego i Tsunokawy. W otoczeniu aktualnego rozwiązania wyznaczane są dwa obszary przejść. Gdy w jednym z nich nie zostanie znalezione rozwiązanie lepsze od dotychczasowego, to kontynuowane jest poszukiwanie kolejnego rozwiązania w drugim z obszarów.

#### 4. UWAGI KOŃCOWE

Zainteresowanie wykorzystaniem algorytmu TS do optymalizacji lokalizacji baterii kondensatorów wiąże się z dążeniem do znalezienia możliwie najkorzystniejszej metody co do dokładności wyników oraz czasu obliczeń. Zadanie wspomnianej optymalizacji nie należy do wyzwań prostych. Należy bowiem znaleźć ekstremum pewnej funkcji w obszarze dyskretnej przestrzeni wielowymiarowej, obejmującym wiele dopuszczalnych punktów. Ogólnie biorąc, wspomniana funkcja ma wiele ekstremów. Algorytm TS zapewnia mechanizm dający możliwość znalezienia ekstremum globalnego w relatywnie krótkim czasie.

Należy zauważyć, że podejście heurystyczne, które ma także miejsce, gdy stosowany jest algorytm TS, pozwala lepiej uwzględnić rzeczywiste warunki. Często metody analityczne opierają się na nierealistycznych założeniach, takich jak na przykład: równomierny rozkład obciążenia, stałość obciążeń, podczas gdy w przypadku podejścia heurystycznego nie ma potrzeby ich stosowania.

Algorytm TS jest jedną z bardziej efektywnych metaheurystyk. Ma on charakter deterministyczny. Jest on prostszy niż inne algorytmy poszukiwania rozwiązania w określonej przestrzeni. Jego zalety są istotne z punktu widzenia optymalizacji kombinatorycznej, która występuje przy poszukiwaniu najlepszej w sensie przyjętego kryterium lokalizacji źródeł mocy biernej. Stwierdzono [17], że efekty wykorzystania zwykłego algorytmu TS do znajdowania optymalnej lokalizacji baterii kondensatorów – bez uwzględniania czasu obliczeń – są porównywalne z efektami otrzymywanymi z wykorzystaniem algorytmu genetycznego bądź symulowanego wyżarzania. Zauważa się jednak [10], że zarówno algorytmy genetyczne, jak i symulowane wyżarzanie są mniej korzystne z punktu widzenia dokładności uzyskiwanych wyników oraz czasu obliczeń w porównaniu z algorytmem TS, o ile dekomponowane jest otoczenie aktualnego rozwiązania. Szczególnie wniosek ten dotyczy większych sieci elektroenergetycznych. W pracy [18] stosuje się łącznie zwykły algorytm TS oraz algorytm genetyczny. Okazuje się, że otrzymane w takim przypadku wyniki są lepsze niż wtedy, gdy stosowany jest tylko algorytm TS.

W wielu przypadkach, przy opracowywaniu metody optymalizacji lokalizacji źródeł mocy biernej z wykorzystaniem algorytmu TS, zwraca się uwagę na wstępne ustalenie rozwiązania zadania oraz odpowiednie określenie obszaru przejść pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami. W publikacjach podkreślany jest istotny wpływ tych czynników na wyniki postępowania optymalizacyjnego.



## BIBLIOGRAFIA

1. Ng H.N., Salama M.M.A., Chikhani A.Y., Classification of Capacitor Allocation Techniques. *IEEE Trans. on PD*, 2000, vol. 15, no. 1, s. 387–392.
2. Zhang W., Tolbert L.M., Survey of Reactive Power Planning Methods. *IEEE PES General Meeting*, 2005, s. 1430–1440.
3. Zhang W., Fangxing L., Tolbert L.M., Review of Reactive Power Planning: Objectives, Constraints, and Algorithms. *IEEE Trans. on PS*, 2007, vol. 22, no. 4, s. 2177–2186.
4. Glover F., Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. *Computation & Operations Research*, 1986, vol. 13, no. 5, s. 533–549.
5. Glover F., Tabu Search – Part I, *ORSA J. on Computing*, 1989, vol. 1, no. 3, s. 190–206.
6. Glover F., Tabu Search – Part II, *ORSA J. on Computing*, 1990, vol. 2, no. 1, s. 4–32.
7. Yang H-T., Huang Y-Ch., Huang Ch-L., Solution to Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Method. *Inter. Conf. on Energy Management and Power Delivery*, 1995, vol. 1, s. 388–393.
8. Huang Y-Ch., Yang H-T., Huang Ch-L., Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Approach. *IEEE Trans. on PS*, 1996, vol. 11, no. 4, s. 1868–1873.
9. Gan D., Qu Z., Cai H., Large Scale Var Optimization and Planning by Tabu Search. *Electric Power Systems Research*, 1996, vol. 39, no. 3, s. 195–204.
10. Mori H., Ogita Y., Parallel Tabu Search for Capacitor Placement in Radial Distribution Systems. *IEEE PES Winter Meeting*, 2000, vol. 4, s. 2334–2339.
11. Chang C.S., Lern L.P., Application of Tabu Search Strategy in Solving Non-Differentiable Savings Function for the Calculation of Optimum Savings due to Shunt Capacitor Installation in a Radial Distribution System. *IEEE PES Winter Meeting*, 2000, vol. 4, s. 2323–2338.
12. Gallego R.A., Monticelli A.J., Romero R., Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks. *IEEE Trans. on PS*, 2001, vol. 16, no. 4, s. 630–637.
13. Zhang W., Liu Y., Liu Y., Optimal Var Planning in Area Power System. *Inter. Conf. on Power System Technology*, 2002, vol. 4, s. 2072–2075.
14. Zou Y., Optimal Reactive Power Planning Based on Improved Tabu Search Algorithm. *Inter. Conf. on Electrical and Control Engg*, 2010, Wuhan, s. 3945–3948.
15. Pires D.F., Martins A.G., Antunes C.H., A Multiobjective Model for Var Planning in Radial Distribution Networks Based on Tabu Search. *IEEE Trans. on PS*, 2005, vol. 20, no. 2, s. 1089–1094.
16. Mori H., Tsunokawa S., Variable Neighborhood Tabu Search for Capacitor Placement in Distribution Systems. *IEEE Inter. Symp. on Circuits and Systems*, 2005, s. 4747–4750.
17. Al-Mohammed A.H., Elamin I., Capacitor Placement in Distribution Systems Using Artificial Intelligent Techniques. *IEEE PowerTech*, 2003, Bologna, Italy, vol. 4, s. 1–7.
18. Nikoukar J., Gandomkar M., Capacitor Placement in Distribution Systems Using Genetic Algorithms and Tabu Search. *The 4th WSEAS Inter. Conf. on Applications of Electrical Engineering*, 2005, Prague, Czech Republic, s. 354–358.