

KOMPARATIVNA ANALIZA METAHEURISTIČKIH METODA ZA REŠAVANJE PROBLEMA OPTIMALNIH TOKOVA SNAGA

Miloš Milovanović

Jordan Radosavljević

Miroljub Jevtić

Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka,
Kosovska Mitrovica



Uvod – 1/2

- › Jedan od najvažnijih aspekata ekonomične eksploatacije elektroenergetskih sistema (EES) jeste ostvarivanje optimalnih tokova snaga (OTS)
- › Osnovni zadatak kod OTS je optimizacija funkcije cilja, pri čemu moraju biti zadovoljena sva pogonska ograničenja u sistemu
- › Determinističke i heurističke metode za rešavanje problema OTS
- › Klasične heurističke metode i metaheurističke metode
- › Ideja ovog rada je da se izvrši objektivno poređenje i ocena nekoliko metaheurističkih metoda



Uvod – 2/2

- › Razmatrano je 8 različitih metaheurističkih metoda:
 - Optimizacija rojem čestica (PSO)
 - Optimizacija zasnovana na veštačkoj koloniji pčela (ABC)
 - Gravitacioni pretraživački algoritam (GSA)
 - Bio-geografska optimizacija (BBO)
 - Takmičarski imepijalistički algoritam (ICA)
 - Algoritam sivih vukova (GWO)
 - Optimizacija inspirisana kretanjem vazduha (WDO)
 - Algoritam sa pretraživanjem unazad (BSA)
- › Ocena razmatranih metoda je izvedena na osnovu statističke evaluacije rezultata dobijenih u 20 uzastopnih izvršavanja proračuna OTS svakom od metoda za tri funkcije cilja

Matematička formulacija problema OTS

› Problem OTS se može matematički iskazati na sledeći način:

$$\min F(\mathbf{x}, \mathbf{u})$$

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0 \quad \mathbf{x} = [P_{G1}, V_{L1} \dots V_{LNL}, Q_{G1} \dots Q_{GNG}, S_{I1} \dots S_{INTL}]^T$$

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0 \quad \mathbf{u} = [P_{G2} \dots P_{GNG}, V_{G1} \dots V_{GNG}, T_1 \dots T_{NT}, Q_{C1} \dots Q_{CNC}]^T$$

$$\mathbf{u} \in \mathbf{U}$$

F - funkcija cilja koju treba minimizirati

\mathbf{x} - vektor zavisnih promenljivih

\mathbf{u} - vektor nezavisnih promenljivih

P_{G1} - aktivna snaga balansno-referentnog (BLR) čvora

V_G, V_L - moduli napona generatora i potrošačkih čvorova

P_G, Q_G - aktivne i reaktivne snage generatora

S_l - tokovi snaga po granama mreže

T - položaji regulacionih otcepa regulacionih transformatora

Q_c - reaktivne snage otočnih VAR kompenzatora

Funkcija cilja

- › Slučaj 1: Minimizacija troškova goriva

$$F_1 = \sum_{i=1}^{NG} f_{Ci}(P_{Gi}) = \sum_{i=1}^{NG} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2)$$

a_i , b_i i c_i - odgovarajući koeficijenti kvadratne funkcije troškova goriva

- › Slučaj 2: Minimizacija gubitaka snage

$$F_2 = \sum_i^{NTL} P_{gub_i}$$

P_{gubi} - gubici snage u i -toj grani mreže

- › Slučaj 3: Minimizacija odstupanja napona u potrošačkim čvorovima mreže

$$F_3 = \sum_{i=1}^{NL} |U_{ref} - U_i|$$

U_{ref} i U_i - moduli referentnog napona i napona u i -tom čvoru, respektivno

Ograničenja

- › Ograničenja tipa jednakosti ($G(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0$):

$$P_{Gi} - P_{Di} - U_i \sum_{k=1}^{NB} U_k \left[G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) \right] = 0$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - U_i \sum_{k=1}^{NB} U_k \left[G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) \right] = 0$$

- › Ograničenja tipa nejednakosti ($H(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0$):

$$U_{Li}^{\min} \leq U_{Li} \leq U_{Li}^{\max} \quad Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad S_{li}^{\min} \leq S_{li} \leq S_{li}^{\max}$$

- › Ograničenja upravljačkih promenljivih ($\mathbf{u} \in \mathbf{U}$):

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \quad Q_{Ci}^{\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{\max}$$



Metaheurističke metode – 1/3

- › Metaheurističke metode su populacione, stohastičke, iterativne optimizacione tehnike
- › Populacija je skup jedinki koje predstavljaju potencijalna rešenja problema
- › Suština metaheurističkih metoda je iterativna popravka rešenja
- › Performanse metaheurističkih metoda zavise od pravilnog podešavanja odgovarajućih algoritamskih parametara
- › Za to podešavanje često ne postoje opšta pravila već se ono vrši na osnovu iskustva, odnosno principa probaj-greši

Metaheurističke metode – 2/3

› Uopštena struktura metaheurističkih metoda:

Inicijalizacija

Definisanje prostora mogućih rešenja \mathbf{U} i funkcije cilja $F(\mathbf{u}_i)$;

Izbor početne populacije $\mathbf{POP}_1 = [\mathbf{u}_1^1, \mathbf{u}_2^1, \dots, \mathbf{u}_N^1]^T \subseteq \mathbf{U}$

$$F^* = \min \{ F(\mathbf{u}_i^1), i = 1, \dots, N \}, \quad \mathbf{u}^* = \arg F^*$$

$t = 1$

Iterativna procedura

Određivanje vrednosti $F(\mathbf{u}_i^t)$ svaku jedinku, iz populacije \mathbf{POP}_t

Generisanje operatora na $\mathbf{POP}_{t+1} = [\mathbf{u}_1^{t+1}, \mathbf{u}_2^{t+1}, \dots, \mathbf{u}_N^{t+1}]^T \subseteq \mathbf{U}$ delovanjem algoritamskih

jedinke iz prethodne populacije $F_{\min} = \min \{ F(\mathbf{u}_i^t), i = 1, \dots, N \}$

$$F_{\min} < F^* \quad F^* = F_{\min} \quad \mathbf{u}^* = \arg F_{\min}$$

Ako je
Kraj

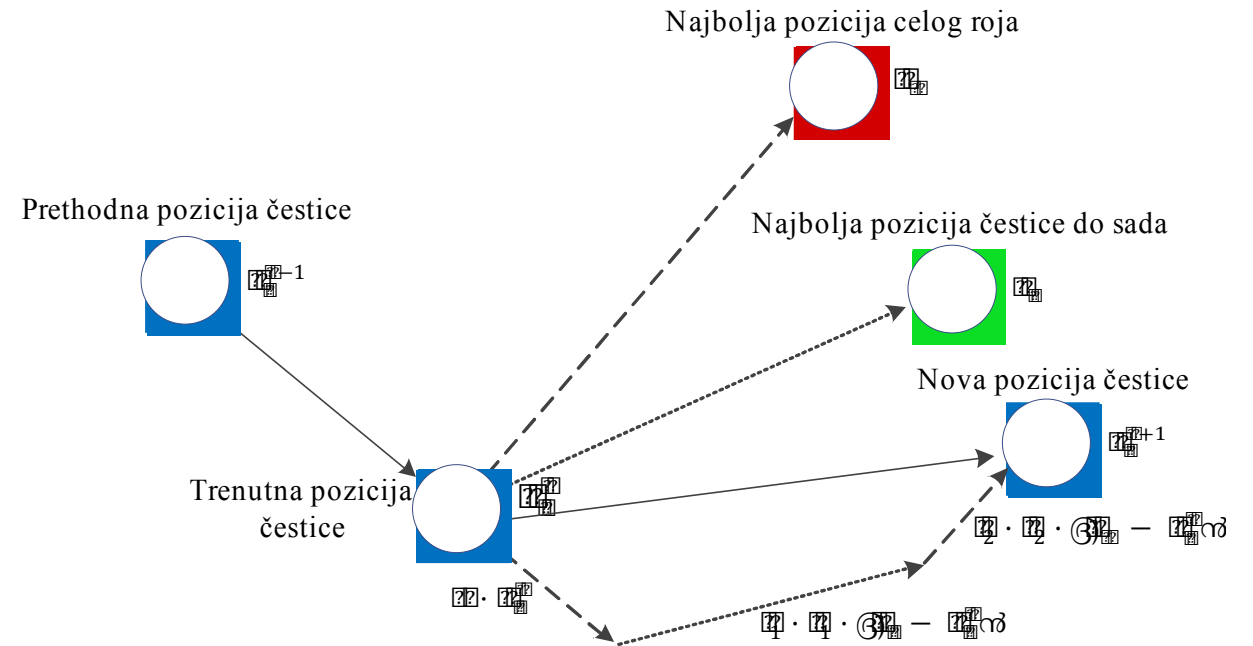


Metaheurističke metode – 3/3

- › Optimizacija rojem čestica (PSO)
- › Optimizacija zasnovana na veštačkoj koloniji pčela (ABC)
- › Gravitacioni pretraživački algoritam (GSA)
- › Bio-geografska optimizacija (BBO)
- › Takmičarski imepijalistički algoritam (ICA)
- › Algoritam sivih vukova (GWO)
- › Optimizacija inspirisana kretanjem vazduha (WDO)
- › Algoritam sa pretraživanjem unazad (BSA)

Optimizacija rojem čestica (PSO)

- › Algoritam je inspirisan društvenim ponašanjem jata ptica, koje se kreću u dopustivom prostoru u potrazi za hranom
- › Svaka čestica (jedinka) u roju, definisana svojom pozicijom i brzinom, predstavlja jedno rešenje problema
- › Ažuriranje pozicije čestice u tekućoj iteraciji se vrši uzimanjem u obzir prethodne pozicije čestice, najbolje pozicije koju je ova čestica zauzela u toku kretanja, pozicije čestice za koju se ima najbolje rešenje u okviru celog roja u svim prethodnim iteracijama i brzine čestice

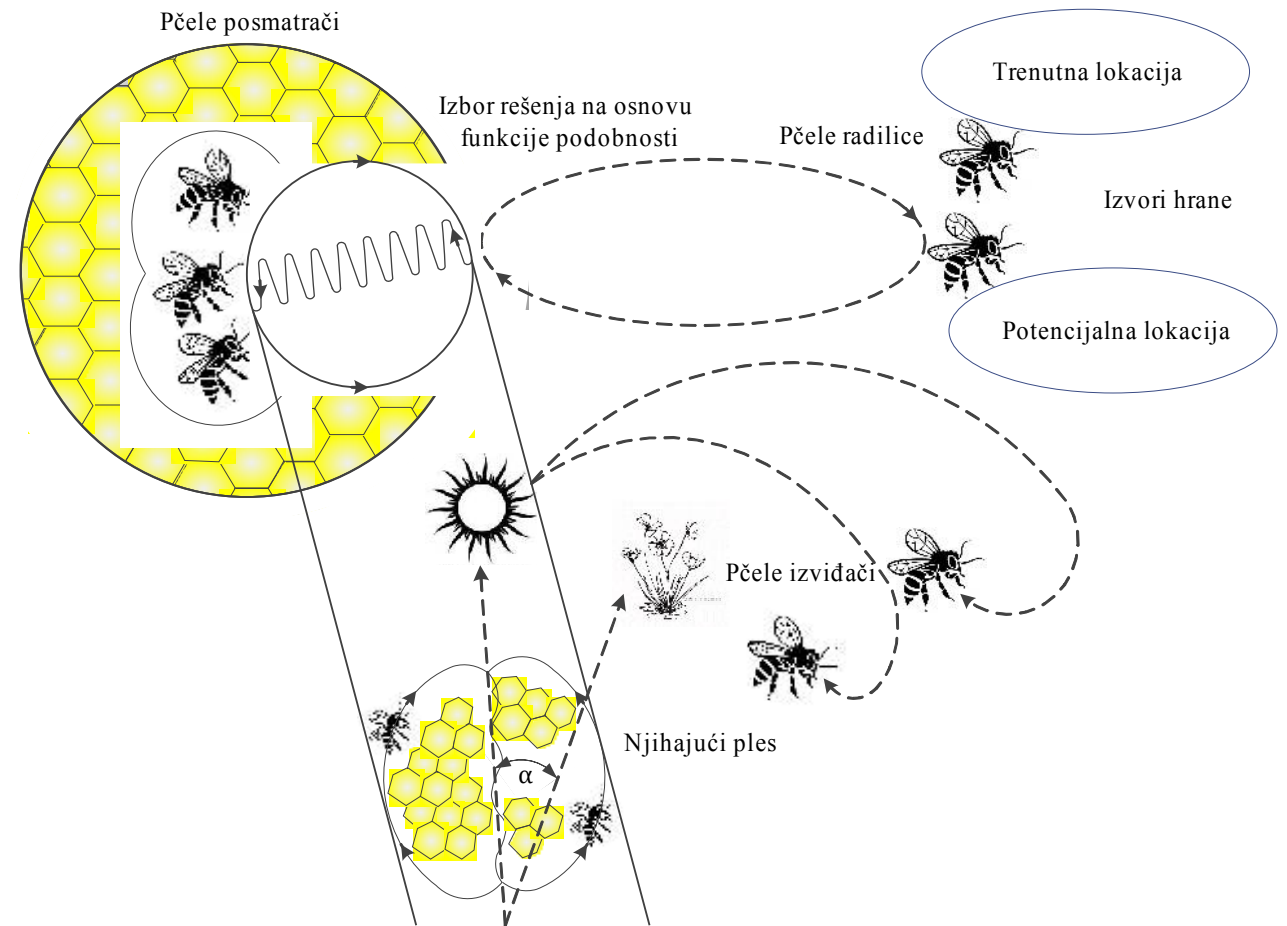


$$v_i^{k+1} = w \times v_i^k + r_1 \times c_1 \times (p_i - x_i^k) + r_2 \times c_2 \times (p_g - x_i^k)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1}$$

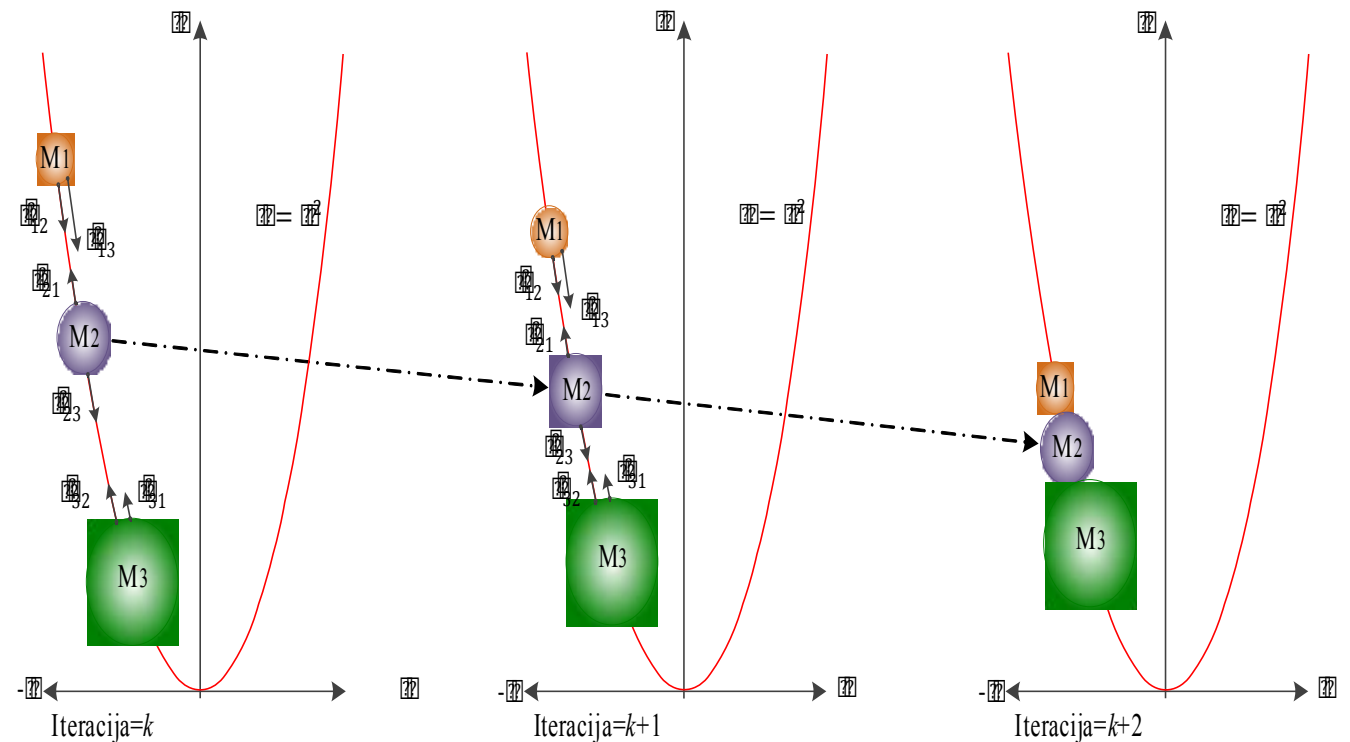
Optimizacija veštačkom kolonijom pčela (ABC)

- › Ovaj metaheuristički algoritam je inspirisanih ponašanjem pčela u prirodi tokom potrage za hranom
- › U ABC algoritmu pozicija izvora hrane se posmatra kao moguće rešenje optimizacionog problema, a količina nektara u izvoru hrane kao vrednost kriterijuma optimalnosti u tom rešenju
- › Proces pretrage vrše tri grupe veštačkih pčela: pčele radilice, pčele posmatrači i pčele izviđači



Gravitacioni pretraživački algoritam (GSA)

- › Osnovni princip algoritma baziran na Njutnovim zakonima gravitacije i kretanja
- › Pretraživački agenti (jedinke) u algoritmu su objekti koji se karakterišu preko njihovih masa
- › Kod GSA postoji gravitaciona interakcija između objekata (masa), pri čemu se objekti manjih masa kreću ka objektu najveće mase
- › Kretanje je uslovljeno podešavanjem gravitacionih i inercionih masa objekta, čije se vrednosti određuju na osnovu funkcije dobrote





Bio-geografska optimizacija (BBO)

- › Raspodela i dinamika bioloških vrsta u ostrvskim okruženjima poslužili su kao glavna inspiracija za razvoj algoritma
- › Matematički modeli BBO opisuju kako vrste migriraju sa jednog ostrva na drugo, kako nastaju nove vrste i kako vrste izumiru
- › Staništa se mogu posmatrati kao moguće rešenje problema, a broj vrsta u staništu kao vrednost kriterijuma optimalnosti
- › Proces pretrage kod BBO algoritma se izvodi uzastopnim izborima boljih rešenja primenom mehanizama migracije i mutacije



Takmičarski imperijalistički algoritam (ICA)

- › Društveno i političko ponašanje ljudi poslužilo je kao inspiracija za razvoj ovog algoritma
- › Osnovni princip algoritma se bazira na populaciji zemalja koje su svrstane u dve kategorije: imperijaliste i kolonije
- › Takmičenjem između imperijalista formira se optimizacioni algoritam u kome se slabe imperije urušavaju, a snažne zauzimaju njihove kolonije
- › Algoritam konvergira ka zemlji u kojoj postoji samo jedna imperija i kolonije imaju istu vrednost funkcije dobrote kao i imperijalista



Algoritam sivih vukova (GWO)

- › Ponašanje sivih vukova u prirodi za vreme lova poslužilo je kao glavna inspiracija za razvoj ovog algoritma
- › Stroga hijerarhija društvene organizacije
- › Društvena hijerarhija sivih vukova je podeljena u četiri grupe: alfa (α), beta (β), delta (δ) i omega (ω)
- › Grupni lov je još jedno zanimljivo društveno ponašanje sivih vukova



Optimizacija inspirisana kretanjem vazduha (WDO)

- › WDO algoritam simulira kretanje vazdušnih masa u Zemljinoj atmosferi
- › Na brzinu i pravac kretanja vazdušne čestice utiču: sila gradijenta pritiska, Koriolisova sila, sila trenja i gravitaciona sila
- › Svaka vazdušna čestica (jedinka) je potencijalno rešenje optimizacionog problema
- › Ažuriranje pozicije čestice se vrši na osnovu njene trenutne pozicije i brzine, kao i pozicije najbolje čestice u tekućoj iteraciji

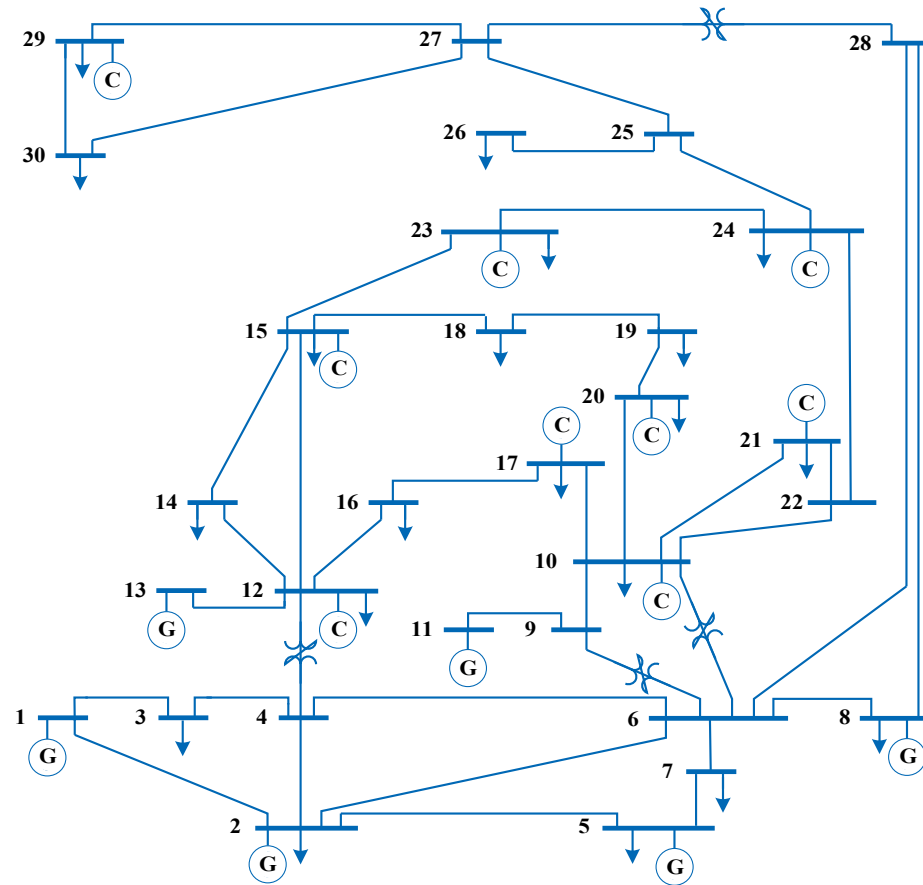


Algoritam sa pretraživanjem unazad (BSA)

- › Jedinstveni koncepti ovog algoritma su istorijska populacija i karta matrice
- › U procesu traganja za optimalnim rešenjem, BSA algoritam uzima u obzir sva moguća rešenja i obavlja detaljnu pretragu prostora za pretraživanje
- › Da bi se izbegle zamke lokalnog minimuma, BSA koristi istorijsku populaciju da istraži novo područje rešenja
- › Karta matrice se koristi da precizira rešenje u eksploatacionoj potrazi

Test primer

› Test sistem IEEE 30



Upravljačka promenljiva	Donja granica	Gornja granica
$P_{G1}(r.j.)$	0.50	2.50
$P_{G2}(r.j.)$	0.20	0.80
$P_{G3}(r.j.)$	0.15	0.50
$P_{G4}(r.j.)$	0.10	0.35
$P_{G11}(r.j.)$	0.10	0.30
$P_{G12}(r.j.)$	0.12	0.40
$V_{G1}(r.j.)$	0.95	1.10
$V_{G2}(r.j.)$	0.95	1.10
$V_{G3}(r.j.)$	0.95	1.10
$V_{G11}(r.j.)$	0.95	1.10
$V_{G12}(r.j.)$	0.95	1.10
$T_{12}(8-9)(r.j.)$	0.90	1.10
$T_{12}(8-10)(r.j.)$	0.90	1.10
$T_{12}(4-12)(r.j.)$	0.90	1.10
$T_{26}(28-27)(r.j.)$	0.90	1.10
$O_{C10}(r.j.)$	0.00	0.05
$O_{C11}(r.j.)$	0.00	0.05
$O_{C12}(r.j.)$	0.00	0.05
$O_{C17}(r.j.)$	0.00	0.05
$O_{C20}(r.j.)$	0.00	0.05
$O_{C21}(r.j.)$	0.00	0.05
$O_{C22}(r.j.)$	0.00	0.05
$O_{C23}(r.j.)$	0.00	0.05
$O_{C24}(r.j.)$	0.00	0.05
$O_{C25}(r.j.)$	0.00	0.05

Rezultati proračuna – 1/5

Upravljačke promenljive i funkcije cilja	Bazni slučaj	Slučaj 1: Minimizacija troškova goriva							
		PSO	ABC	BBO	WDO	GSA	BSA	ICA	GWO
P_{G1} [MW]	99.2223	176.8232	176.8079	178.0125	176.7441	177.3726	177.0133	176.2186	175.5340
P_{G2} [MW]	80.0000	48.8088	48.9001	47.0896	48.7285	48.8045	49.0932	47.1417	51.9386
P_{G3} [MW]	50.0000	21.6357	21.3851	18.7926	21.3101	21.4029	22.3036	21.4343	22.6085
P_{G4} [MW]	20.0000	21.9791	21.2277	21.5701	21.5065	20.9674	20.4138	25.6942	14.8865
P_{G11} [MW]	20.0000	11.9972	12.1458	13.3820	12.0108	11.9121	11.4738	10.0000	14.7691
P_{G12} [MW]	20.0000	12.0000	12.0000	13.7179	12.1659	12.0025	12.2138	12.0000	12.8067
V_{G1} [r.j.]	1.0500	1.0581	1.0817	1.0832	1.0864	1.0850	1.0813	1.0857	1.0829
V_{G2} [r.j.]	1.0400	1.0359	1.0608	1.0614	1.0657	1.0651	1.0639	1.0638	1.0649
V_{G3} [r.j.]	1.0100	0.9988	1.0276	1.0273	1.0322	1.0342	1.0307	1.0222	1.0369
V_{G4} [r.j.]	1.0100	0.9975	1.0349	1.0405	1.0374	1.0385	1.0403	1.0322	1.0398
V_{G11} [r.j.]	1.0500	1.0180	1.0210	1.0489	1.0628	1.0849	1.0373	1.1000	1.0808
V_{G12} [r.j.]	1.0500	1.0217	1.0536	1.0576	1.0448	1.0442	1.0442	1.0355	1.0345
$T_{11(8-9)}$ [r.j.]	1.0780	1.1000	1.0473	0.9911	0.9828	1.0355	1.0230	1.1000	1.0463
$T_{13(6-10)}$ [r.j.]	1.0690	0.9000	0.9180	0.9955	0.9745	0.9280	0.9352	0.9509	0.9834
$T_{15(4-12)}$ [r.j.]	1.0320	1.0260	1.0051	0.9911	0.9797	0.9663	1.0073	0.9900	0.9811
$T_{38(28-27)}$ [r.j.]	1.0680	0.9000	0.9841	0.9883	0.9705	0.9742	0.9943	0.9685	0.9691
Q_{C10} [MVar]	0.0000	5.0000	5.0000	3.7128	3.8636	1.8604	1.2418	5.0000	4.2992

Upravljačke promenljive i funkcije cilja	Bazni slučaj	Slučaj 1: Minimizacija troškova goriva							
		PSO	ABC	BBO	WDO	GSA	BSA	ICA	GWO
Q_{C12} [MVar]	0.0000	5.0000	5.0000	0.8455	3.0744	4.2714	3.3365	5.0000	0.9511
Q_{C15} [MVar]	0.0000	0.0000	5.0000	4.4392	3.4299	2.2861	3.3902	0.0000	2.5395
Q_{C17} [MVar]	0.0000	0.0000	5.0000	4.5901	3.0667	2.9901	1.2187	5.0000	1.5559
Q_{C20} [MVar]	0.0000	0.0000	5.0000	3.7776	2.6000	4.7280	2.7424	5.0000	4.6422
Q_{C21} [MVar]	0.0000	5.0000	5.0000	3.8299	2.7484	3.5728	3.3094	1.9177	1.0372
Q_{C23} [MVar]	0.0000	0.0000	4.4331	3.1384	2.3189	3.3162	2.6618	0.1109	0.8930
Q_{C24} [MVar]	0.0000	5.0000	5.0000	3.4077	3.7901	4.9735	4.3126	0.0410	3.7927
Q_{C25} [MVar]	0.0000	5.0000	3.2278	3.5878	1.3424	2.4609	2.2012	1.8232	0.7046
Odst. napona [r.j.]	0.1723	0.6781	0.6760	0.7045	0.7343	0.8789	0.4827	0.4576	0.5242
Gubici [MW]	5.8223	9.2108	9.0667	9.1646	9.0660	9.0620	9.1114	9.0888	9.1434
Troškovi [\$/h]	901.9494	800.9419	800.7077	801.3977	800.7439	800.5511	800.9164	801.5356	801.7795

Rezultati proračuna – 2/5

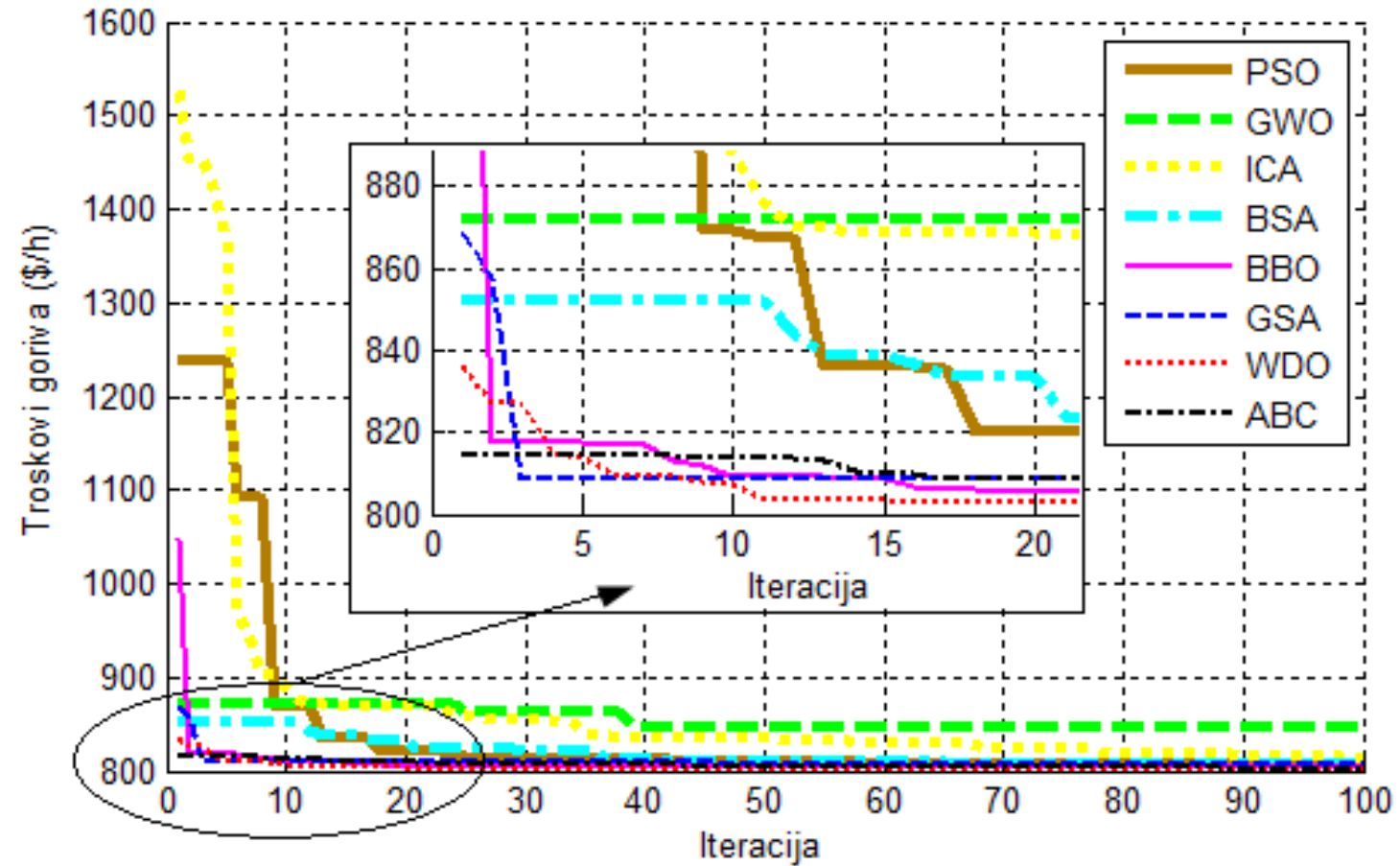
Metoda	Slučaj 1			Slučaj 2			Slučaj 3		
	Troškovi goriva [\$/h]	Gubici snage [MW]	Odst. napona [r.j.]	Troškovi goriva [\$/h]	Gubici snage [MW]	Odst. napona [r.j.]	Troškovi goriva [\$/h]	Gubici snage [MW]	Odst. napona [r.j.]
PSO	800.9419	9.2108	0.6781	967.8051	3.1599	0.8533	927.7950	4.8105	0.1311
ABC	800.7077	9.0667	0.6760	967.6804	3.1075	0.8391	833.3953	12.5206	0.1275
BBO	801.3977	9.1646	0.7045	941.6113	3.4819	0.6154	838.6572	6.9191	0.1390
WDO	800.7439	9.0660	0.7343	962.3947	3.1729	0.5894	840.4374	7.0529	0.1128
GSA	800.5511	9.0620	0.8789	950.0452	3.2898	0.4783	816.5802	8.3639	0.0943
BSA	800.9164	9.1114	0.4827	967.9711	3.2294	0.6983	841.5138	6.5092	0.1177
ICA	801.5356	9.0888	0.4576	967.8365	3.1729	0.8212	892.5856	6.5399	0.1226
GWO	801.7795	9.1434	0.5242	930.3063	3.7413	0.3917	810.8452	9.1776	0.1413

Bazni slučaj		
Troškovi goriva [\$/h]	Gubici snage [MW]	Odst. napona [r.j.]
901.9494	5.8223	0.1723

Rezultati proračuna – 3/5

Metoda	Slučaj 1: Troškovi goriva [\$/h]			Slučaj 2: Gubici snage [MW]			Slučaj 3: Odstupanja napona [r.j.]		
	Min	Max	Std.	Min	Max	Std.	Min	Max	Std.
	PSO	800.9419	805.6173	1.6656	3.1599	4.9838	0.5917	0.1311	0.3814
ABC	800.7077	801.5080	0.2045	3.1075	3.2976	0.0461	0.1003	0.1439	0.0109
BBO	801.3977	815.7214	3.2800	3.4819	4.3186	0.2119	0.1390	0.2654	0.0332
WDO	800.7439	801.2813	0.1268	3.2545	3.4579	0.0650	0.1128	0.1505	0.0111
GSA	800.5511	800.6350	0.0257	3.2898	3.6130	0.0787	0.0943	0.1072	0.0027
BSA	800.9164	802.3182	0.3395	3.2294	3.4991	0.0737	0.1177	0.1575	0.0104
ICA	801.5356	804.8443	0.9371	3.1729	3.8450	0.1898	0.1226	0.1721	0.0144
GWO	801.7795	815.3456	3.8455	3.7413	8.9719	1.2434	0.1413	0.1834	0.0132

Rezultati proračuna - 4/5



Rezultati proračuna – 5/5

Metoda	Srednje vreme trajanja proračuna [s]		
	Slučaj 1	Slučaj 2	Slučaj 3
PSO	126.648	129.203	125.509
ABC	155.254	161.258	151.930
BBO	134.365	140.306	132.282
WDO	127.331	134.073	126.388
GSA	131.892	136.592	132.226
BSA	130.456	133.981	130.109
ICA	120.876	125.375	115.750
GWO	141.810	143.909	139.379



Zaključak

- › Sve metaheurističke metode omogućavaju brzo, jednostavno i tačno izračunavanje OTS za bilo koju varijantu funkcije cilja, uz istovremeno zadovoljenje svih postavljenih ograničenja
- › Dobijeni rezultati se međusobno dobro slažu i u skladu su sa postojećim rezultatima iz literature
- › Ustanovljeno je da GSA postiže najbolje optimalno rešenje kada se vrši minimizacija gubitaka snage i minimizacija odstupanja napona u potrošačkim čvorovima. Najbolje rešenje i najbolje statističke pokazatelje kada je funkcija cilja minimizacija gubitaka snage daje ABC
- › Pokazano je da GSA poseduje bolju konvergenciju u odnosu na ostale algoritme, a da do optimalnog rešenja najbrže dolazi ICA
- › Poređenje metoda prema prethodnim statističkim pokazateljima, po opadajućem redosledu (prva metoda ima najbolje performanse, a svaka naredna slabije) je sledeće: GSA, WDO, ABC, ICA, BSA, PSO, BBO i GWO



KRAJ PREZENTACIJE
HVALA NA PAŽNJI!