KOMPARÁCIA VÝKONNOSTI HEURISTICKÝCH METÓD VZHĽADOM KU GLOBÁLNEMU OPTIMU

Zbyněk Bajtek

Annotation: The aim of this study was mutual comparison of three heuristic methods employed in the optimization of pressurized water distribution systems in irrigation. The design of an optimal water distribution network is a complex task. Heuristic methods are used for solving a very general class of computational problems by combining various rules for finding a solution in a hopefully efficient way.

Key words: Heuristic methods, linear programming, optimal design of branched pipe networks

Kľúčové slová: Heuristické metódy, lineárne programovanie, optimalizácia vetvových potrubných sietí

ÚVOD

Z veľkého množstva prvkov vplývajúcich na výnosy poľnohospodárskych plodín, je voda základným biologickým činiteľom (často najdôležitejším). Nedostatok vodnej zásoby v pôde hudobnej na vlahu, je pre rastlinstvo nebezpečný z mnohých príčin.

Závlahové siete sa optimalizovali približne, od začiatku 70-tych rokov nakoľko sú navrhované prevažne ako vetvové a optimalizácia vetvových sietí bola v tomto čase prakticky vyriešeným problémom. Optimalizácia okruhových závlahových systémov je komplexný problém a aj napriek tomu že bolo vykonaného mnoho výskumu v tejto oblasti, bolo vyvinutých nespočetne veľa metód na minimalizáciu ceny siete s využitím rôznych techník nie je stále vyvinutá metóda ktorá by komplexne uspokojila všetky požiadavky na sieť a zároveň by bola efektívna. Tento problém nebol doposiaľ vyriešený. Mnoho prác sa zaoberalo posúdením účinnosti týchto metód na malých a stredných testovacích sieťach uvádzaných v literatúre. Avšak pri väčších systémoch sú výsledky podávané jednotlivými metódami značne rozdielne. Medzi iným boli rozvíjané metódy pre riešenie rozsiahlych sietí zdokonaľovaním algoritmov lineárneho programovania a dynamického programovania (DP). Di Santo, A., a Petrillo (1980) preukázali, že sústava riešená použitím LP a DP vedie k tomu istému optimálnemu riešeniu. Priamo problematike návrhu závlahových sústav bola venovaná práca Labyeho (Labye 1981), ktorý vyvinul odlišný grafický prístup, neskôr prevedený do algoritmickej podoby, riešiteľnej pomocou výpočtovej techniky. Túto metódu odporúča FAO (Food and Agricultural Organization of the United States) a ponúka k nej príslušnú metodiku a software ako Public Domain (Lamaddalena, Sagardoy, 2000). Výsledky, ktoré získal Ait Kadi (1986) pre sústavy riešené pomocou LP a Labyeho tzv. iteračnej nekontinuálnej metódy boli veľmi podobné. Čistý (2001) riešil optimálny návrh veľkej závlahovej sústavy z priehrady Zit Emba v Alžírsku (6575 ha), ktorú v predchádzajúcom stupni projektovej dokumentácie riešila aj francúzska organizácia CEDEX pomocou Labyeho metódy. Porovnanie francúzskych výpočtov s LP potvrdili tézu o podobnosti výsledkov medzi LP a Labyeho metódou, pravda s tým, že Labyeho metóda ako pôvodne grafická metóda má niektoré zvláštnosti, ktoré spôsobujú jej nižšiu efektívnosť a pohodlnosť práce pri jej použití oproti LP. V poslednej dobe stojí za zmienku metóda ktorú predstavili M. Spiliotis and G. Tsakiris (2007), táto je založená na interaktívnom fuzzy celočíselnom programovaní.

Deterministické algoritmy lineárneho alebo nelineárneho programovania poskytujú cennú službu pri optimalizácii niektorých problémov spojených s rekonštrukciou závlahových rúrových sietí. Umožňujú nájsť presné riešenie ekonomickej optimalizácie (globálne minimum) pre vetvové sústavy alebo sústavy s malým počtom okruhov Korsuň (1999) a Korsuň, S., Spitz, P.,(2007) kedy autori predstavili model WNOM založený na metóde zmiešaného diskrétneho programovania a tento testovali na jednej existujúcej staršej vodovodnej sústave ktorá obsahuje tri okruhy. Pri komplexných úlohách, aké sa vyskytujú v praxi, však pri zostavovaní matematických modelov tohto typu narážame na veľmi zložité, prakticky ťažko riešiteľné úlohy.

Na problém optimalizácie okruhových sietí boli v posledných dvadsiatich rokoch úspešne aplikované moderné heuristické metódy. Heuristické metódy (Glover et al. 1993) môžu byť definované ako jednoduché procedúry ktoré poskytujú prijateľné, ale nie nevyhnutne optimálne riešenie komplexného problému rýchlou a jednoduchou cestou. Jednou z najsľubnejších a asi aj najčastejšie používanou metódou sú Genetické Algoritmy (GA) Goldberg (1989), ktoré sú založené na pravidlách prirodzenej evolúcie a selekcie. Možnosti GA nie sú limitované počtom okruhov, znalosťou o umiestnení okruhov (prepojovacích úsekov) a umožňujú optimalizovať aj všetky ďalšie parametre distribučnej sústavy rozvodu vody, ktoré je možné zahrnúť do rámca simulačného výpočtu. Pri určitej skúsenosti metóda umožňuje nájsť riešenia dostatočne blízke globálnemu minimu, postačujúce z hľadiska praktických úloh. V prípade závlahových stavieb nachádzajú tieto heuristické metódy uplatnenie nie len pri návrhu, prípadne rekonštrukcii distribučných sústav ale aj pri mnohých ďalších úlohách ako napríklad optimalizácii prevádzky závlahových čerpacích staníc. Moradi-Jalal M. at al (2004) predstavili vlastný model zoberajúci sa touto problematikou. Tento bol založený na genetických algoritmoch a tiež autori Haddad, O.B. et. al (2007), ktorí publikovali metódu založenú na optimalizácii pomocou roja častíc, konkrétne metódy umelého roja včiel, v prípade ktorej bola použitá dynamická penalizačná funkcia. Ďalej boli predstavené modeli ktorých cieľom bola optimalizácia rozdelenia závlahovej vody (Wardlaw R., Bhaktikul K., 2004) a optimalizácia rozdelenia závlahovej vody v závlahových kanáloch, na čo použili autori Monem M.J. a Namdarian R. (2005) algoritmus simulovaného žíhania. Elferchichi, A. et al., (2008) publikovali model určený na optimalizáciu prevádzky závlahovej sústavy s viacerými nádržami. Tento model aplikovali na reálnu závlahovú sústavu (Foggia, Taliansko) pozostávajúcu z piatich nádrží. V tomto modely boli použité genetické algoritmy.

METÓDY a VÝSLEDKY

Táto komparácia je založená na poznaní globálneho optima (optimálneho riešenia) daného optimalizačného problému. Vychádzame pritom z dvoch predpokladov:
Prvým je že v prípade DSRV je možné zatiaľ spoľahlivo stanoviť globálne optimum (deterministickými metódami) iba u vetvových sústav (typická konfigurácia závlahových sústav), a to za pomoci lineárneho programovania.

Druhý predpoklad je založený na poznaní že pri aplikácii heuristických algoritmov pri optimalizácii DSRV nehrá typ sústavy rolu, teda že tieto algoritmy optimalizujú rovnako dobre ako vetvové tak aj okruhové sústavy.

Z uvedených dôvodov je efektívnosť (odchýlka od globálneho optima) heuristického algoritmu rovnaká pre vetvové aj okruhové sústavy, takže porovnávacie výpočty stačí vykonať pre vetvovú sieť, pri ktorej je globálne optimum známe. Preto bola zvolená vetvová sústava, ktorá bude bližšie popísaná v ďalšom texte. Hlavným cieľom bolo poukázať na odchýlku týchto metód od globálneho optima rovnako ako aj pravdepodobnosť s akou sú tieto metódy schopné nachádzať riešenia v relatívnej blízkosti

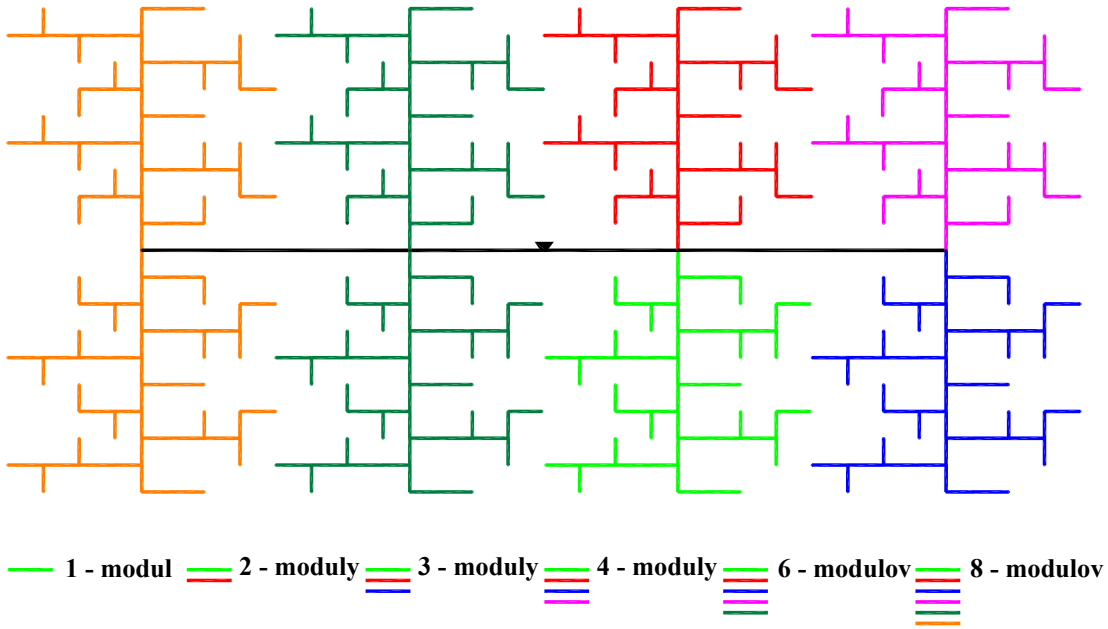
priestoru optimálneho riešenia. Výsledky získané touto komparáciou bude následne možné extrapolovať pre určenie odchýlky výsledkov pri optimalizácii okruhových sústav.
Boli zvolené tri rozdielne heuristické metódy a to genetické algoritmy, harmonické prehľadávanie a optimalizácia pomocou roja častíc. Každý z týchto algoritmov predstavuje osobitnú podskupinu heuristických metód z vlastným prístupom k riešeniu daného problému. Všetky tri algoritmy boli testované vo svojej základnej forme. Na výpočet referenčného optimálneho návrhu (globálneho optima) bol použitý software SCIP (Achterberg, T., 2007), ktorý sa preukázal ako najvhodnejší aj vzhľadom k formulácii problému. Pri tejto komparácii bol použitý variant lineárneho programovania kódovaného celočíselnými (integer) premennými (tzv. celočíselné lineárne programovanie - Integer Linear Programming (ILP)). Táto formulácia umožňuje návrh iba jedného profilu pre konkrétny úsek ako v prípade heuristických metód. Takto sa dosiahli rovnaké podmienky návrhu sústavy, keďže v prípade heuristických metód nie je možné kombinovať dva rôzne priemery pre jeden úsek. Toto je možné iba v prípade využitia LP, ktorého hľadané premenné sú kódované reálnymi číslami, čo bolo použité napríklad aj v modeloch GALP a HALP, ktoré budú testované v nasledujúcej kapitole. V prípade heuristických metód bolo rovnako ako je tomu v prípade LP aplikované obmedzenie prípustných rýchlostí v sústave. Toto spočíva v obmedzení povolenej maximálnej a minimálnej rýchlosti v optimalizovanej sústave. Na základe známeho dimenzačného prietoku na príslušnom úseku (prietoky sú vstupné údaje) a maximálnej povolenej rýchlosti v sústave je určený minimálny prípustný priemer potrubia. Po určení minimálneho priemeru sú k nemu vybrané ďalšie tri nasledujúce väčšie priemery potrubia z cenníku. Toto značne redukuje prehľadávaný priestor a tým aj zjednodušuje optimalizáciu heuristickým metódam. Pri samotnom výpočte bol zvolený postup kedy každý variant sústavy (1 až 8 modulov) bol testovaný v troch cykloch, pričom v každom cykle prebehlo tridsať šesť optimalizačných výpočtov. Táto schéma bola aplikovaná pre všetky tri heuristické metódy, t.j. 108 spustení pre každý variant sústavy každou z heuristických metód. Heuristické metódy boli naprogramované v programovacom prostredí Visual Basic 6 ich autormi, a jednalo sa o všeobecnú formuláciu daných algoritmov. Tieto boli upravené pre potreby optimalizácie DSRV v rámci tejto práce, pričom jednotlivé iterácie výpočtu sústav podliehali hydraulickému výpočtu, na ktorý bola použitá programátorská DLL knižnica simulačného softwaru EPANET – EPANET Toolkit. Jednotlivé heuristické optimalizačné modely boli spustené s rôznym nastavením optimalizačných parametrov. V prípade GA bola veľkosť populácie zvolená s hodnotami 1000, 1500, 2340 a 2500 pričom počet chromozómov bol zvolený tak aby celkový počet iterácii pri každom spustení bol od 250 000 do 350 000 (250, 200, 150 a 100). Parameter kríženia bol zvolený ako p_c= (0.8; 0.9; 0.95), a parameter mutácie p_m= (0.05; 0.1; 0.15) pričom bola testovaná každá kombinácia týchto parametrov. Z toho dostávame 36 spustení výpočtu a tento cyklus bol pre každú testovanú sústavu spustený trikrát. Tento počet spustení bol dodržaný aj pri zvyšných dvoch metódach. Podobne boli volené aj optimalizačné parametre ďalších heuristických metód, pričom pre HS bola zvolená veľkosť pamäte (HM) 30, 50 a 100; pre parameter uváženia pamäte (HMCR) boli zvolené hodnoty 0.85, 0.9, 0.95, 0.99 a pre parameter úpravy tónu (PAR) 0.05, 0.1, 0.15. Pri PSO boli zvolené veľkosti populácie riešení 210, 230 a 250; veľkosť okolia aktuálneho riešenia 15, 30 a 45 a počiatočná váha na hodnotách 0.85, 0.9, 0.95 a 0.99. V prípade všetkých troch metód bola použitá rovnaká forma penalizácie v prípade nedodržania požadovaných tlakov. Táto sa pripočítava k cene sústavy vypočítanej na základe danej konfigurácie priemerov potrubia na úsekoch a je vypočítaná na základe nedodržania požadovaného tlaku v odberných uzloch.

Testovacia vetvová sústava

Vetvové sústavy boli do nedávna a sú aj v súčasnosti najčastejšie používaným

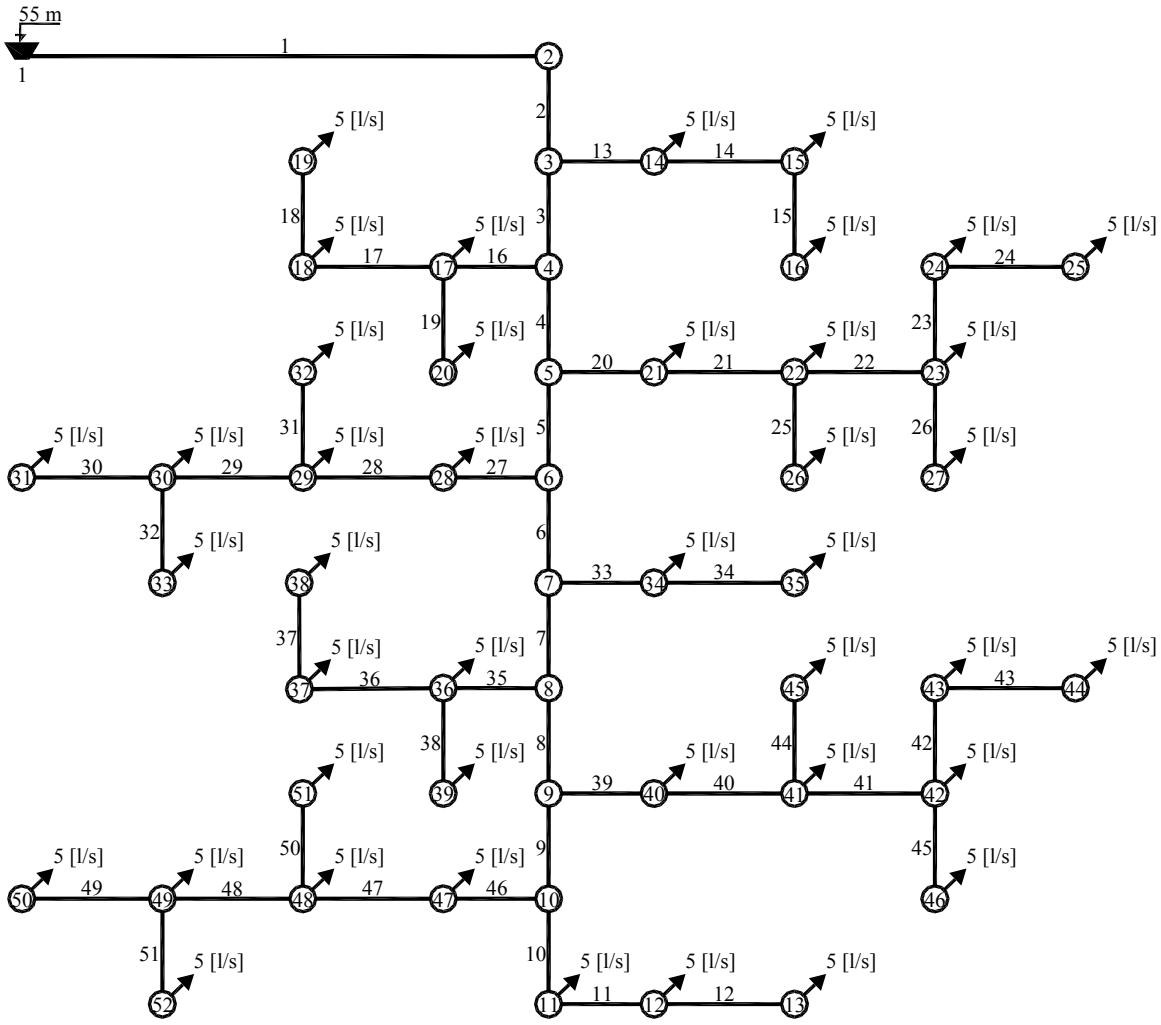
typom v závlahách vzhľadom na nižšiu finančnú náročnosť ako aj pre jednoduchšie určenie potrebných návrhových parametrov. Použitá sústava je umelo vytvorená a je v porovnaní s reálnymi závlahovými sústavami schematizovaná a zjednodušená pre účel testovania optimalizačných metód. Jedným s týchto zjednodušení je napríklad konštantná nadmorská výška odberných uzlov v rámci celej sústavy, rovnako aj určité zjednodušenie samotnej schémy tejto sústavy z dĺžkami jednotlivých úsekov a odbermi, kedy je daný konštantný odber v odberných uzloch (5 $l.s^{-1}$). Hlavným dôvodom vytvorenia tejto sústavy je komparácia troch heuristických metód a ich odchýlky od globálneho optima pri rôznych veľkostiach sústavy. Preto bola vytvorená sústava, ktorej veľkosť je možné meniť podľa potreby pridávaním sub - modulov. Každý z týchto modulov pozostáva z päťdesiatich úsekov a päťdesiat jedna uzlov (obr. 2). Aby bolo možné lepšie stanoviť vývoj odchýlky daných metód od globálneho optima bolo testovaných 6 variant veľkosti sústavy, a to 1, 2, 3, 4, 6, 8 modulov na obr. 2, čo nám umožnilo testovanie sústav o veľkosti 50 až 400 úsekov. K týmto je nutné pripočítať aj potrubia slúžiace na pripojenie daných modulov ku spoločnému zdroju. Ich počet je závislý od počtu pripojených modulov (maximálne štyri úseky). Sústava je gravitačne plnená z rezervoáru s tlakovou výškou 55m. Celkový odber vody jedného modulu je 210 $l.s^{-1}$. Pri optimalizácii je na výber 9 priemerov potrubia s absolútnou drsnosťou 0.4. Minimálny požadovaný tlak vo všetkých uzloch sústavy bol stanovený na 30 m.

V tabuľke 1 sú uvedené výsledky pre jednotlivé konfigurácie sústav, ktoré boli dosiahnuté danými metódami. Je potrebné povedať, že tieto hodnoty reprezentujú najlepšie dosiahnuté riešenie pre danú konfiguráciu sústavy konkrétnou metódou z celkového počtu 108 spustení. Ďalej je v tejto tabuľke uvedená aj odchýlka ceny konkrétneho riešenia od ceny optimálnej konfigurácie. Pre lepšiu ilustráciu boli pre jednotlivé konfigurácie sústavy vytvorené histogramy (obr. 3 až 8) v ktorých horizontálna os predstavuje odchýlku dosiahnutého výsledku od globálneho optima pre danú sústavu a zvislá predstavuje počet riešení v danej odchýlke.



Obr. 1 Schéma pripojenie ôsmich modulov z vyznačenými ďalšími alternatívami

Cieľom týchto grafov je poukázať na to, že napriek relatívne dobrým výsledkom prezentovaným v tabuľke 1 sa väčšina riešení pre dané sústavy nachádza vo väčšej vzdialenosti od globálneho optima (v zmysle percentuálnej odchýlky). Čo ukazuje na výpočtovú a časovú náročnosť nutnú na dosiahnutie prezentovaných najlepších výsledkov.



Obr. 2 Schéma pripojenia jedného modulu ku zdroju z vyznačenými uzlovými odbermi

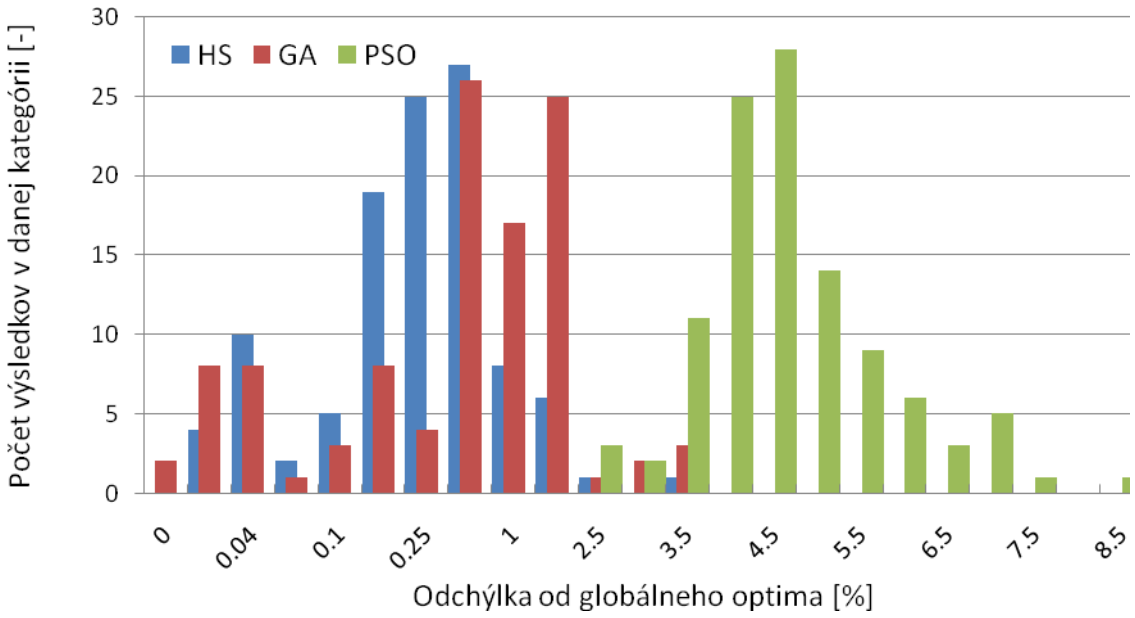
Na grafe (obr.3) vidíme histogram pre jedno modulovú sústavu. Veľkosť tejto sústavy (50 úsekov) je podobná resp. o málo väčšia ako väčšina takzvaných „benchmarkových“ problémov uvádzaných v odbornej literatúre slúžiacich na testovanie moderných optimalizačných metód. Tomu zodpovedajú aj výsledky kedy dve z troch testovaných metód dosiahli resp. takmer dosiahli (odchýlka do 0.04 %) optimálneho riešenia pre danú sústavu. Zároveň však treba podotknúť že sa jedná iba o dva výsledky získané pomocou GA (výsledok je zhodný s optimálnym návrhom dosiahnutým LP) a 12 výsledkov do 0.04 % získaných GA (8) a HS (4), z celkového počtu 108 výpočtov každou z metód pre danú sústavu. Najväčšia časť výsledkov získaných metódami GA a HS sa nachádza v intervale od 0.15 po 1.0 % pre HS a 0.5 až 2.5 % pri GA. V prípade HS sa v tomto intervale nachádza 76.68 %, a u GA 73.44 % všetkých výsledkov. V prípade metódy PSO sa odchýlka pohybuje od 2.5 po 8.5 %. Výsledky získané touto metódou sa pri tejto veľkosti sústavy najviac vzďaľujú od optimálneho návrhu.

Pri grafe pre dvojmodulovú sústavu (obr. 4) môžeme vidieť posun odchýlky pre dané riešenia. V tomto prípade poskytuje najlepšie riešenie HS ktorým bolo dosiahnutých 23 výsledkov do 1 % čo predstavuje 21.16 % z celkového počtu spustení výpočtu.

Tab. 1 Prehľad najlepších dosiahnutých výsledkov pre jednotlivé konfigurácie sústavy a odchýlky výsledkov od globálneho optima danej sústavy

Cena [-]	1 Modul	2 Moduly	3 Moduly	4 Moduly	6 Modulov	8 Modulov
LP	10 626 750	19 706 500	32 651 250	48 127 500	67 834 000	96 255 000
HS	10 629 750	19 759 000	32 782 750	48 438 500	68 992 000	98 484 000
GA	10 626 750	19 804 500	33 971 750	49 737 000	72 976 000	105 874 000
PSO	10 864 750	21 105 500	35 604 250	53 366 500	77 638 500	110 265 000
Minimálna odchýlka %						
HS	0.03	0.27	0.4	0.65	1.71	2.32
GA	0	0.5	4.04	3.34	7.58	9.99
PSO	2.24	7.1	9.04	10.89	14.45	14.56
Priemerná odchýlka %						
HS	0.53	2.90	4.98	3.30	4.86	3.91
GA	1.07	5.23	9.38	11.50	17.25	27.76
PSO	4.42	9.64	11.95	13.04	18.05	18.23
Maximálna odchýlka %						
HS	3.00	7.98	11.67	7.53	10.79	6.80
GA	4.03	10.94	14.87	38.17	46.21	46.21
PSO	8.01	15.11	17.03	16.54	21.94	21.94

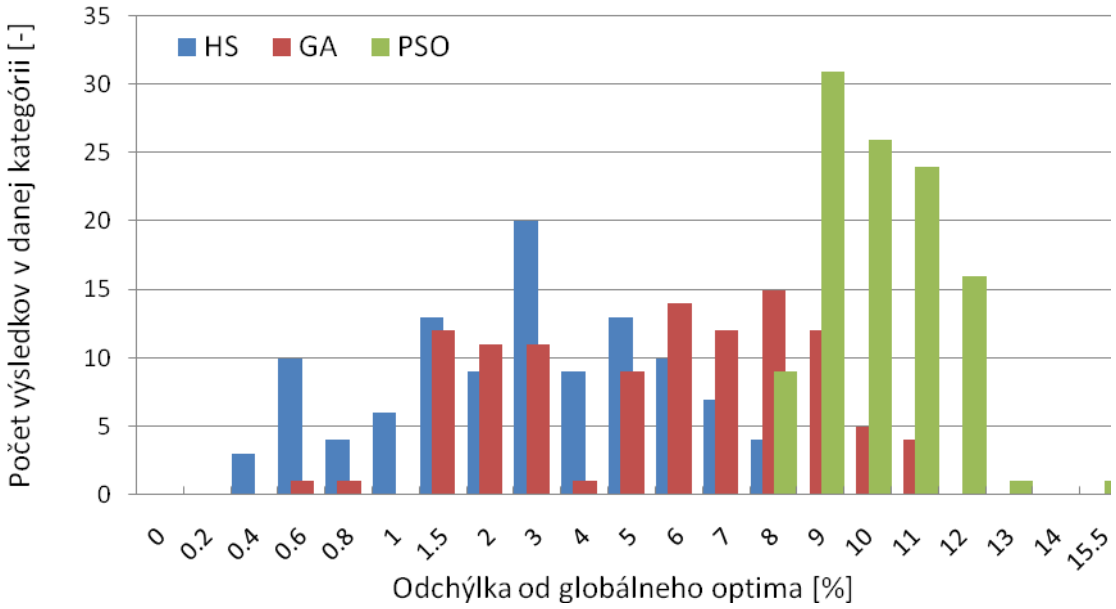
Pri GA vidíme zmenu kedy táto metóda dosiahla iba dva výsledky z hodnotou odchýlky do 1 % pričom zvyšné výsledky sa nachádzajú v rozpätí 1 až 11 %. O metóde PSO platí že aj pri tejto veľkosti sústavy poskytovala výsledky najviac vzdialené od optima.



Obr.3 Histogram dosiahnutých výsledkov pre sústavu pozostávajúcu z jedného modulu

Na hodnotách odchýlky pre trojmodulovú sústavu na obr. 5 vidíme, že sa rozsah dosiahnutých výsledkov pomocou metód GA a HS (v zmysle odchýlky od globálneho optima), začína postupne zväčšovať, keď väčšina riešení HS sa pohybuje v rozmedzí od 0.8 po 12 %. Pri GA je veľkosť tohto rozsahu podobná s tým rozdielom že najlepší výsledok dosiahnutý touto metódou je vzdialený od optima o 3.89 % a najhorší 15 %. Napriek tomu, že najlepšie výsledky získané pomocou PSO vykazujú najväčšiu odchýlku

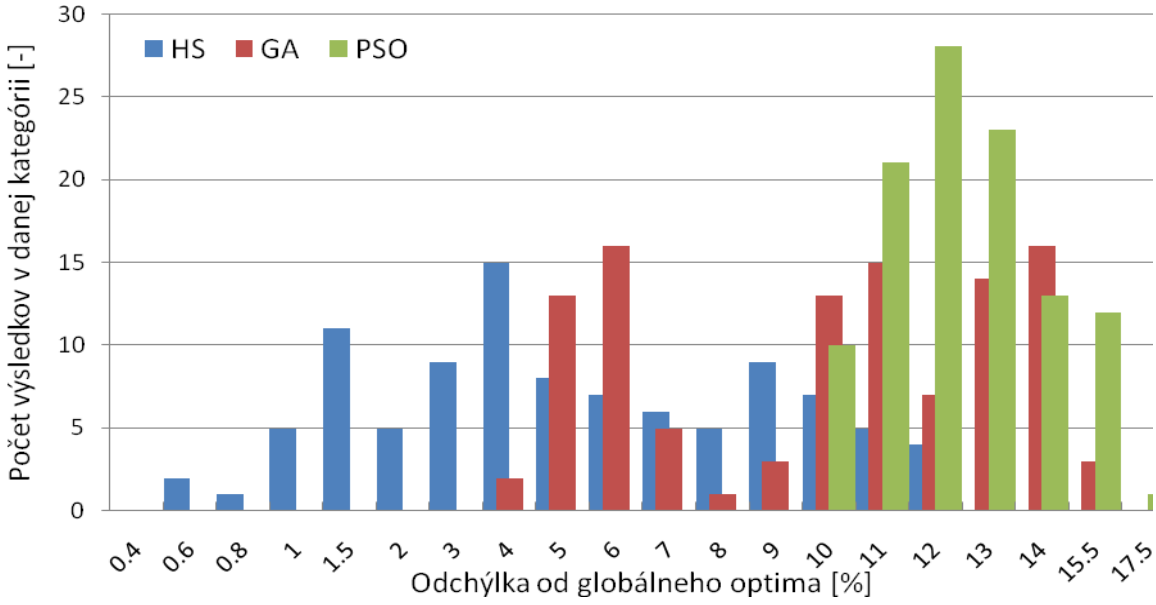
od optima je rozptyl všetkých hodnôt menší ako je tomu napríklad u GA, pričom sa začínajú z väčšej časti prekrývať z výsledkami dosiahnutými GA.



Obr. 4 Histogram dosiahnutých výsledkov pre sústavu pozostávajúcu z dvoch modulov

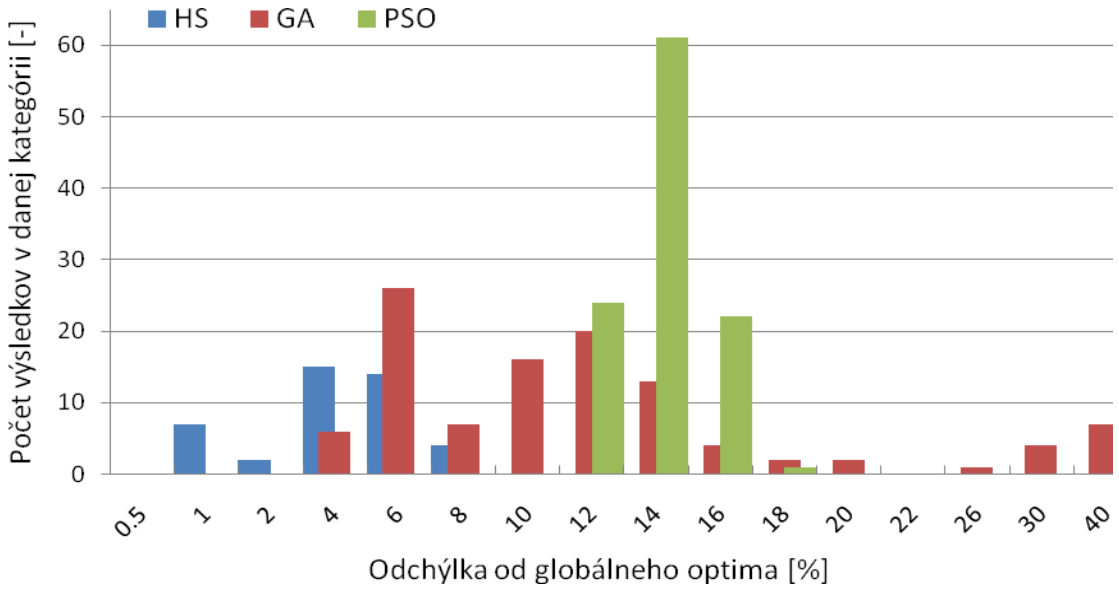
Je potrebné povedať, že u tejto varianty sústavy prvýkrát došlo k uviaznutiu v lokálnom optime t.j. že algoritmus nebol schopný nájsť riešenie, ktoré by vyhovovalo požadovaným tlakom. Konkrétne sa to vyskytlo u HS kedy zo 108 spustení nenašiel v 9 prípadoch riešenie, ktoré by dodržalo požadovaný tlak.

U ďalších modulov sa v prípade HS ďalej zväčšuje podiel výsledkov, ktoré nespĺňajú požadované tlaky, preto tieto výsledky neboli ďalej uvádzané v predstavených grafoch. Počet takýchto riešení, ktoré nespĺňali podmienky sa pohyboval od už spomínaných 9 pri trojmodulovej sústave cez 66 pri štvormodulovej až po 85 pre šesť modulovú a 99 pre osem modulovú sústavu. V prípade poslednej menovanej to predstavuje viac ako 91 % všetkých výpočtov.



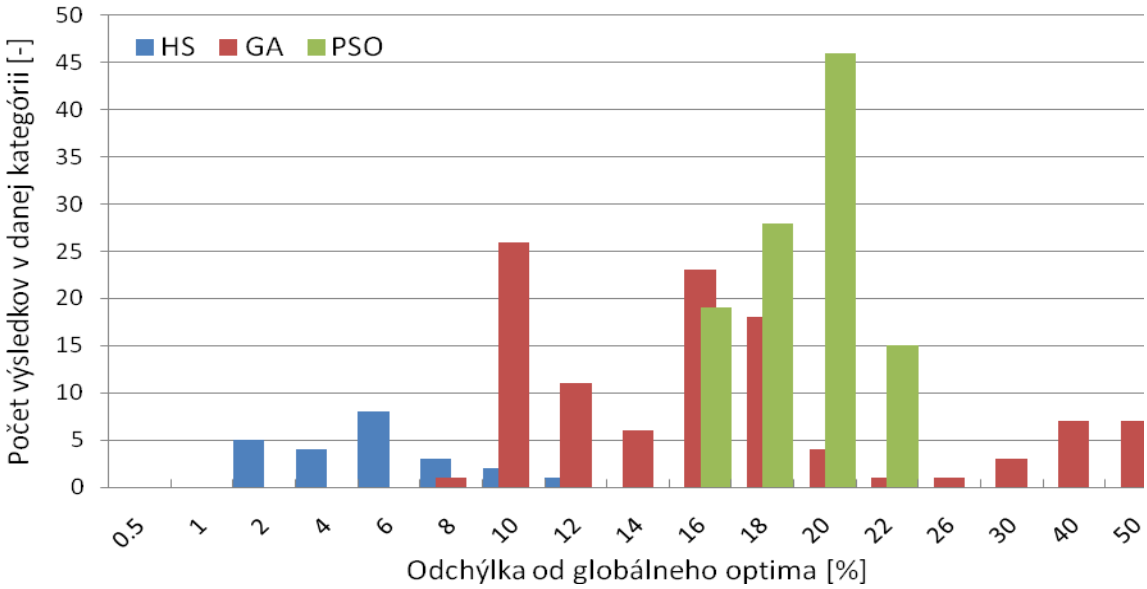
Obr.5 Histogram dosiahnutých výsledkov pre sústavu pozostávajúcu z troch modulov

Napriek tomu riešenia dosiahnuté pomocou HS u ktorých boli splnené podmienky sú z predstavených troch metód najbližšie k optimálnej cene prakticky pre všetky konfigurácie sústavy z výnimkou jednomodulovej. Pre GA platí, že zo zväčšením sústavy pokračuje nárast rozptylu výslednej odchýlky pričom najlepšie riešenie pre štvormodulovú má podobnú hodnotu odchýlky ako tomu je u trojmodulovej sústavy. Väčšia zmena sa objavila až u dvoch najväčších alternatív kedy pri prvej je odchýlka najlepšieho riešenia 7.5 % a u druhej osem modulovej 9.99 %. Rovnako s nárastom minimálnej narastá aj maximálna odchýlka, ktorá dosahuje hodnôt 38.17 % (4 moduly), 46.20 % (6 modulov) a 38.17 % od optima. U metódy PSO môžeme povedať že si zachováva daný rozptyl odchýlky (cca10%) ale odchýlka najlepšieho riešenia sa posúva na 10 % od optima pre 4 moduly a na 14.45 resp. 14.55 % pre šesť a osem modulovú sústavu.



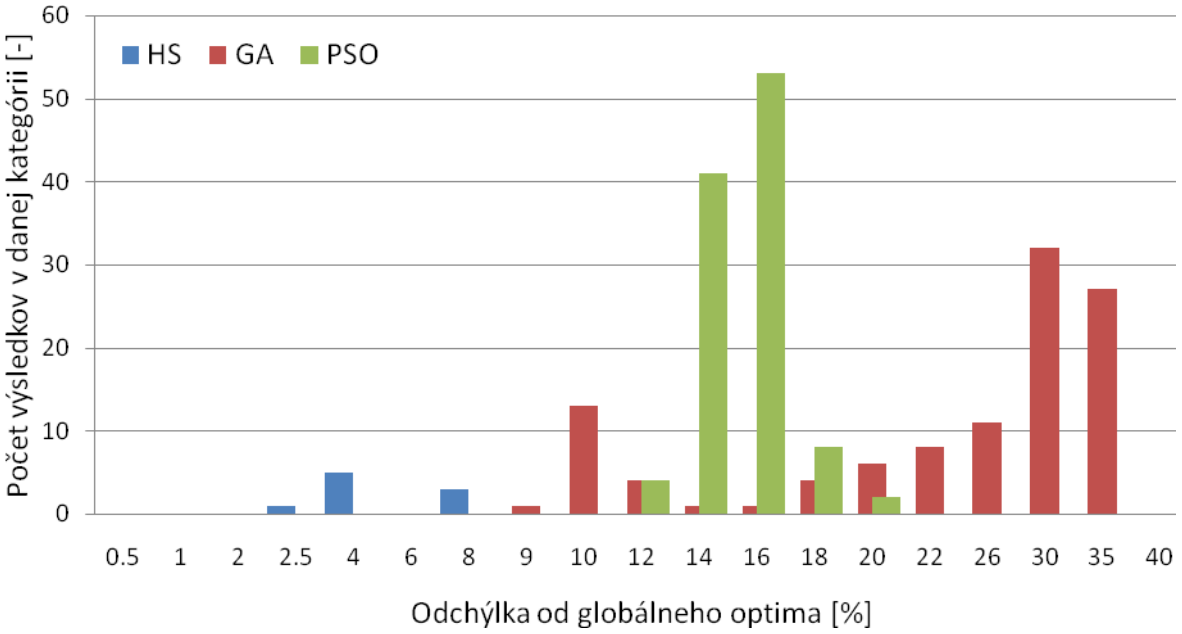
Obr. 6 Histogram dosiahnutých výsledkov pre sústavu pozostávajúcu zo štyroch modulov

V prípade GA a PSO sa tiež ukazuje že tieto populačne založené optimalizačné algoritmy netrpia problémom uviaznutia v lokálnom optime, ako je tomu pri HS, avšak naopak s rastúcou veľkosťou sústavy majú problém dosiahnuť globálne optimum daného optimalizovanému problému.



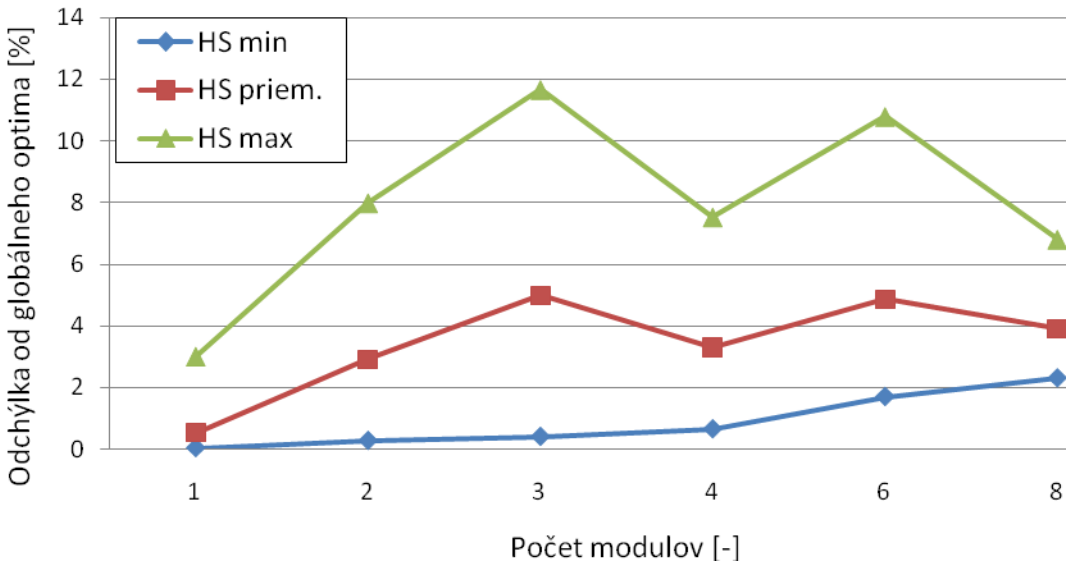
Obr. 7 Histogram dosiahnutých výsledkov pre sústavu pozostávajúcu zo šiestich modulov

Pre PSO platí, že najlepšie dosiahnuté výsledky touto metódou sa najviac vzďaľujú od globálneho optima. Zároveň však treba podotknúť, že pre tri najväčšie konfigurácie sústavy je rozptyl výsledkov výrazne menší ako je tomu u GA, kedy táto metóda dosahuje odchýlok blížiacich sa 50 % od globálne optimálneho riešenia.



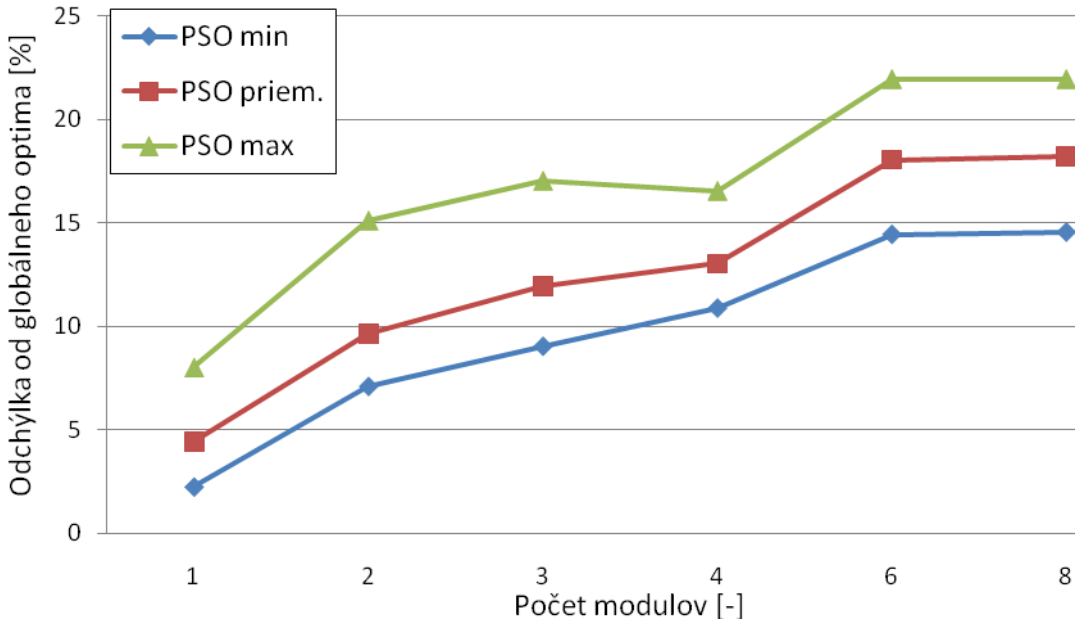
Obr. 8 Histogram dosiahnutých výsledkov pre sústavu pozostávajúcu z ôsmich modulov

Prezentované výsledky poukazujú na fakt, že existujú heuristické metódy ktoré dokážu aj pre relatívne veľkú sústavu (400 úsekov) nájsť výsledky blízke optimu pre dané riešenie (HS 2.3 %), avšak získanie týchto výsledkov je nesmierne náročné po stránke počtu výpočtov ako aj z pohľadu optimálneho nastavenie operátorov jednotlivých metód.V prípade metódy HS ktorá dosiahla pre najväčšiu sústavu riešenia najbližšie ku optimu platí, že prevažná časť výpočtov pri tejto sústave nedosiahla riešenie, ktoré by spĺňalo požiadavky dodržania minimálnych tlakov (jedná sa o iné behy výpočtov než tie, ktoré prezentujeme ako optimálne výsledky – pri týchto sme vždy požadovali dodržanie tlakov).



Obr. 9 Priebeh vývoja odchýlok u metódy HS v závislosti od počtu modulov

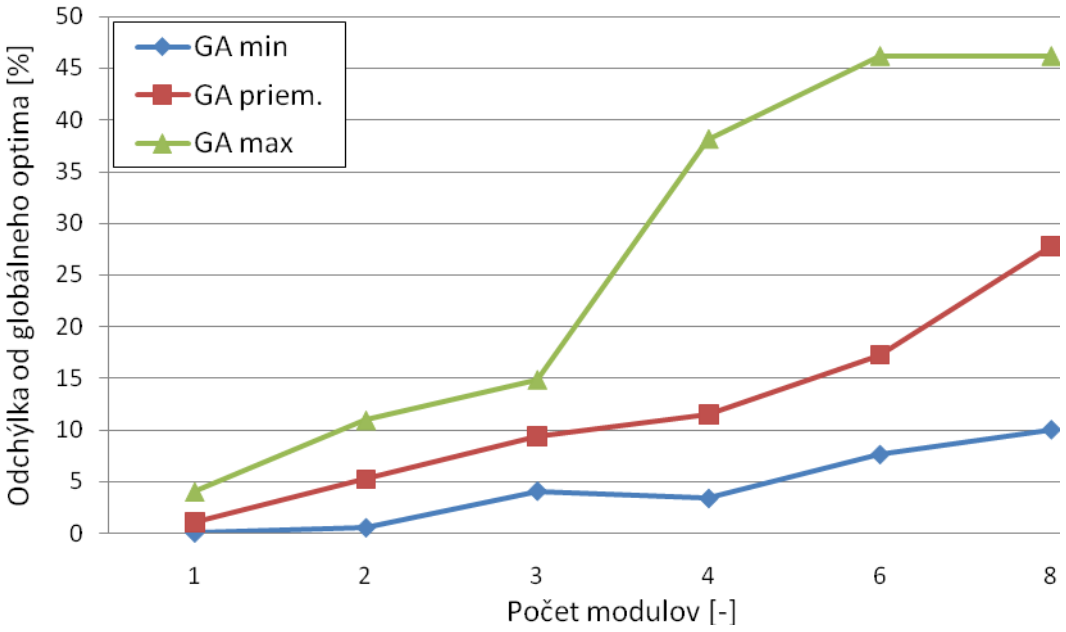
Rovnako aj pri GA sa ukazuje správna voľba operátorov optimalizácie (kríženie, mutácia, veľkosť populácie a pod.) ako najpodstatnejším prvkom, ktorý pri tomto algoritme najviac ovplyvňuje výsledné riešenia, ako to je možné vidieť napr. u osemmodulovej sústavy, kedy sa rozptyl výsledkov pohybuje v intervale 9 až 40 %.



Obr. 10 Priebeh vývoja odchýlok u metódy GA v závislosti od počtu modulov

Na obrázkoch 9, 10, 11 je zobrazený vývoj minimálnej, priemernej a maximálnej odchýlky dosiahnutých výsledkov od globálne optimálneho riešenia. Táto odchýlka je uvedená v percentách pre konkrétnu veľkosť sústavy zvlášť pre každú použitú metódu.

Je potrebné povedať že v prípade metódy HS (obr. 9) je tento vývoj čiastočne skreslený nakoľko u tejto metódy došlo k vylúčeniu výsledkov pre nedodržanie požadovaného tlaku v sústave.



Obr. 11 Priebeh vývoja odchýlok u metódy PSO v závislosti od počtu modulov

Táto skutočnosť ovplyvnila vývoj maximálnej a priemernej odchýlky u štyroch konfigurácií sústavy (3, 4, 6 a 8 modulov). U metódy GA môžeme vidieť že vývoj pri

prvých troch veľkostiach sústavy je viac-menej kontinuálny. Významnejšia zmena nastáva u sústavy zloženej zo štyroch modulov, kedy dochádza k významnému nárastu maximálnej odchýlky. Tento trend pokračuje aj u ďalších dvoch väčších variantov. Naopak pri PSO je tento vývoj jednotlivých odchýlok kontinuálny pričom sa ani ich rozsah významne nemení, čo poukazuje na potenciál tejto metódy, kedy by táto metóda po prípadnom vylepšení mohla podávať stabilnejšie výsledky.

ZÁVER

Z prezentovaných výsledkov môžeme konštatovať, že výsledky dostatočne blízke globálnemu optimu je možné pomocou existujúcich metód dosiahnuť prevažne len pri menších sústavách do celkového počtu približne 100 úsekov, keď bola odchýlka u dvoch z troch testovaných metód do 1 % pričom aj dosiahnutie tohto výsledku si vyžiadalo extenzívne testovanie (veľké množstvo pokusných behov výpočtov). U väčších sústav je dosiahnutie optimálnych výsledkov podmienené dobrou znalosťou vhodného nastavenia operátorov príslušnej metódy. Avšak ani toto nezaručí dosiahnutie globálneho optima, z dôvodu samotnej podstaty heuristických metód, ktoré aj pri viacnásobnom spustení s rovnakými parametrami optimalizácie môžu viesť k rozdielnym výsledkom vzhľadom na svoj stochastický charakter. Prezentované výsledky môžu byť ako už bolo uvedené extrapolované pre sústavy obsahujúce okruhy, nakoľko pre heuristické metódy je celkom jedno, či počítajú okruhovú alebo vetvovú sústavu. U okruhových sietí doposiaľ nie je možné spoľahlivo určiť globálne optimum a preto bolo toto testovanie vykonané na vetvových sústavách. Z týchto výsledkov možno odvodiť potrebu ďalšieho vývoja metódy, ktorá by bola spoľahlivejšia v zmysle dosiahnutia globálneho optima pre okruhové sústavy, nakoľko pri vetvových také metódy už existujú.

POĎAKOVANIE

Autori ďakujú za podporu tejto štúdie získanú z grantu 1/0585/08 a z projektov LPP-0319-09 a APVV-0443-07.

LITERATÚRA

1. Achterberg, T., (2007), Constraint Integer Programming, PhD thesis, Berlin.
2. Ait Kadi, M., (1986), Optimization of Irrigation Pipe Network Layout and Design, PhD Dissertation, Utah State University, Logan, USA.
3. Čistý, M., Bajtek, Z., (2009), Hybridná metóda pre návrh distribučných systémov, Journal of hydrology and hydromechanics - Vodohospodársky časopis, Vol. 57, No. 2 (2009), Bratislava, ISSN 0042-790X.
4. Di Santo, A., Petrillo, A., (1980), I modelli matematici per il calcolo delle reti irrigue - confronto fra i vari metod. In: Proceeding of Giornate di cooperazione italo-ungherese su scienza e tecnica, 2-3 December. Bari, Italy, 1980, pp. 1-17.
5. Goldberg, D.E., (1989), Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, New York, Addison-Wesley.
6. Korsuň, S., (1983), Matematický model jednoúčelového komplexného závlahového systému. Výskumný ústav závlahového hospodárstva, 1983.

7. Korsuň, S., Spitz P., (1999), The Optimization Solutions of Irrigation Combined Branching And Ring Networks, New Approaches in Irrigation, Drainage and Flood Control Management, ICID International Symposium, Bratislava, 1999.
8. Labye, Y., (1981), Iterative Discontinuous method for networks with one or more flow regimes. In: Proceedings of the International Workshop on Systems Analysis of Problems in Irrigation, Drainage and Flood Control. New Delhi. 30 November – 14 December 1981, pp. 31-40.
9. Lamaddalena, N., Sagardoy, J.A., (2000), Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. FAO Irrigation and Drainage Paper 59.
10. Moradi-Jalal, M., Rodin, SI., Marino, MA., (2004), Use of genetic algorithm in optimization of irrigation pumping stations, Journal Of Irrigation And Drainage Engineering-ASCE, Volume 130, Issue 5, Pages 357-365, Reston, USA.
11. Savic, D.A., Walters, G.A., (1997), Genetic Algorithms for the Least-cost Design of Water Distribution Networks, ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 123, No. 2, 1997, pp. 67-77.
12. Spiliotis, M., Tsakiris, G., (2007), Minimum cost irrigation network design using interactive fuzzy integer programming, J Irrigat Drain Eng-ASCE 133(3):242–248.
13. Vairavamoorthy, K., Ali, M., and Lin, Z. (2000).“ An Appropriate Design Tool For Intermittent Water Supply Systems” Proceedings of the International Conference on Intermittent Drinking Water Supply system Management, Mumbai.
14. Wardlaw R, Bhaktikul K.,(2004), Application of genetic algorithms for irrigation water scheduling, Irrigation and Drainage, Volume 53, Issue 4, Pages 397-414, Sussex, England.

Zbyněk Bajtek
Department of Land and Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering
Slovak University of Technology Bratislava
Radlinského 11, 813 68 Bratislava, Slovak Republic
zbynek.bajtek@stuba.sk