

Ľuboš Holka, Michal Kolcun

Optimalizácia zapojenia distribučnej sústavy

Predložený príspevok sa zaoberá optimalizáciou zapojenia plánovanej distribučnej sústavy na napäťovej hladine vn využitím metódy simulovaného žihania. Prostredníctvom nej sa optimalizuje zapojenie súčasnej a budúcej distribučnej sústavy vn za účelom správneho vyhodnotenia a porovnania alternatív v procese schvaľovania investícií z technického hľadiska.

Kľúčové slová: optimalizácia, metóda simulovaného žihania, distribučná sústava

I. ÚVOD

Energetika na Slovensku za posledných niekoľko rokov prešla výraznými zmenami, ktoré umožnili najmä liberalizovať trh s elektrinou a výstavbu obnoviteľných zdrojov elektriny. Jednotliví prevádzkovatelia distribučných sústav boli nútení sa týmto zmenám prispôbiť. Po vstupe Slovenska do európskeho spoločenstva došlo k oživeniu ekonomiky príchodom nových zahraničných investorov a k prílivu zahraničného kapitálu v podobe eurofondov. Rast ekonomiky korešponduje aj s nárastom požiadaviek na energiu. Najväčší „boom“ nastal v podobe výstavby priemyselných parkov, priemyselných zón a v poslednom období, od prijatia zákona o podpore obnoviteľných zdrojov elektriny a kombinovanej výroby elektriny a tepla, aj v podobe výstavby nových zdrojov. Jednotlivé požiadavky na pripojenie k distribučnej sústave je potrebné v rámci distribučných spoločností spracovať a navrhnuť technické podmienky na pripojenie.

Tento príspevok sa venuje návrhu metódy optimalizácie zapojenia distribučnej sústavy (DS), ktorá sa môže aplikovať v rámci definovania technických podmienok na pripojenie nových odberov a výrobných zariadení výrobcu elektriny využitím sieťovo-technických výpočtov. Hlavnou časťou optimalizačného nástroja je metóda simulovaného žihania. Nakoľko veľkosť analyzovanej distribučnej sústavy determinuje počet možných kombinácií zapojenia distribučnej sústavy, hlavným cieľom práce bolo skúmanie a návrh algoritmu pre generovanie konfigurácií zapojenia sústavy a zápis pravidiel pre určenie spínacích prvkov vstupujúcich do optimalizácie. Výsledný algoritmus optimalizácie zapojenia DS bol následne overený na konkrétnej DS.

II. MATEMATICKÁ FORMULÁCIA OPTIMALIZÁCIE ZAPOJENIA DS

Daná je radiálna DS vn s n uzlami a známou topológiou bez uvažovania nadradenej sústavy vvn a transformátorov vvn/vn. Kombinačná optimalizačná úloha je minimalizačná, a týka sa nájdenia najlepšieho riešenia z množiny všetkých možných riešení zapojenia sústavy.

V matematicky formulovanej úlohe minimalizácie činných strát pre distribučnú sústavu vn sa vyskytuje premenná, ktorej hodnota sa modifikuje za účelom minimalizácie cieľovej funkcie pri rešpektovaní daných obmedzení. Je reprezentovaná vektorom \mathbf{x} a pozostáva z jednotlivých stavov spínacích prvkov.

Prieskumný priestor X je konečný alebo počítateľne nekonečný určujúci možné riešenie \mathbf{x} . Cieľová funkcia $f(\mathbf{x})$, pričom tato funkcia je zobrazením z množiny všetkých riešení X do množiny reálnych čísel

$X \rightarrow R$, je schopná ohodnotiť každé riešenie patriace do priestoru všetkých riešení. Pri minimalizačnej úlohe očakávame nájdenie optimálneho riešenia \mathbf{x}_{opt} .

Prieskumný priestor

Prieskumný priestor X v tomto prípade je množina všetkých možných zapojení časti DS vn. Zapínanie a vypínanie každého spínacieho prvku celkovo charakterizuje topológiu zapojenia sústavy. Ak celkový počet spínacích prvkov v sústave je m , tak súčasná konfigurácia môže byť reprezentovaná ako vektor $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ z jednotlivých stavov spínacieho prvku $x_i \in \{0, 1\}$, $1 \leq i \leq m$, kde $x_i = 1$ indikuje spínací prvok v zapnutom stave a $x_i = 0$ vo vypnutom stave.

Stavový priestor

Aby bolo možné vypočítať cieľovú funkciu a kontrolovať obmedzenia je potrebné mať informácie o napäťových pomeroch vyšetrovanej sústavy.

Nech U_i a φ_i sú hodnoty napätia a uhla v uzle i . Majme distribučnú sústavu s celkovým počtom uzlov n , pričom uzol 1 je napájacia distribučná stanica vn a uzly 2, 3, ..., n sú odberové. Potom je možné ich vyjadriť ako

$$\bar{\mathbf{u}} = [U_2, \dots, U_n, \varphi_2, \dots, \varphi_n]^T \quad (1)$$

Cieľová funkcia

Nech cieľová funkcia $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ ohodnotí dané zapojenie distribučnej sústavy vn \mathbf{x} , ktoré korešponduje so stavovou premenou \mathbf{u} v reálnych hodnotách. Výsledkom sú činné straty na takúto konfiguráciu. Kritériom ohodnotenia je, či konfigurácia zapojenia \mathbf{x} je najlepšia zo všetkých konfigurácií z množiny X . Napríklad, keď existujú konfigurácie $\mathbf{x}_{opt} \in X$, pri ktorých cieľová funkcia dosiahne také hodnoty, že $f(\mathbf{x}_{opt}, \mathbf{u}_{opt}) \leq f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ pre všetky konfigurácie zapojenia DS $\mathbf{x} \in X$, potom výsledok \mathbf{x}_{opt} reprezentuje globálne minimum danej funkcie.

Celkové činné straty vo vyšetrovanej sústave sa dajú určiť odčítaním celkovej spotreby od celkovej dodávky.

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = P_{dodávka} - P_{spotreba} \quad (2)$$

Hľadaná je taká konfigurácia medzi všetkými možnými radiálnymi konfiguráciami, pri ktorej je minimalizovaná funkcia a rešpektované jednotlivé obmedzenia. V tomto prípade hovoríme o realizovateľnom globálnom minime cieľovej funkcie.

Obmedzenia

Nie každá konfigurácia zapojenia DS z množiny stavov $x \in X$, ktorú získame z optimalizácie, je prijateľná z prevádzkového hľadiska. Napríklad, keby boli všetky spínacie prvky vypnuté a vo všetkých uzloch by bolo nulové napätie, činné straty by boli v sústave tiež nulové. Preto je potrebné špecifikovať, ktoré stavy sú akceptovateľné z hľadiska prevádzkových a legislatívnych podmienok.

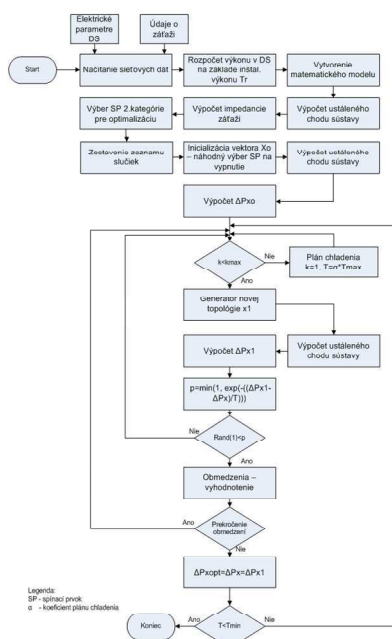
Optimalizácia zapojenia musí rešpektovať nasledujúce obmedzenia:

1. topologické obmedzenia,
2. obmedzenie na veľkosť napätia,
3. obmedzenie na veľkosť prúdov tečúcich cez vedenia medzi uzlami i a j ,
4. obmedzenie na veľkosť kapacitného poruchového prúdu izolovanej časti distribučnej sústavy vo väzbe na napájacie uzly,
5. obmedzenie na veľkosť celkového zdanlivého výkonu napájacieho uzla vo väzbe na inštalovaný výkon transformátora 110/22kV v napájacom uzle,
6. obmedzenie vo väzbe na spoľahlivosť distribúcie elektriny je vyjadrené nasledujúcou rovnicou,
7. obmedzenie vo väzbe na vplyv prevádzky výrobných zariadení výrobcu na kvalitu elektriny

Všetky obmedzenia v tvare nerovností sú funkciou vektoru x a $u(x)$, vyjadrené ako $g(x, u) \leq 0$.

III. VYUŽITIE METÓDY SIMULOVANÉHO ŽIHANIA NA RIŠENIE OPTIMALIZÁCIE ZAPOJENIA VN DS

V tejto časti sa príspevok zaoberá návrhom algoritmu optimalizácie zapojenia DS s využitím metódy simulovaného žihania. V práci sú vysvetlené jednotlivé kroky daného algoritmu. Medzi najdôležitejšie časti algoritmu, podľa nižšie uvedeného vývojového diagramu, pozri Obr.1, patrí samotné jadro metódy simulovaného žihania, pravidlá pre určenie spínacích prvkov a generátor topológií zapojenia DS.



Obr. 1. Algoritmus optimalizácie zapojenia DS

Pri inicializácii optimalizačného výpočtu sa náhodne vygeneruje počítačová topológia zapojenia $x_0 \in X$, ktorá zároveň reprezentuje výsledné riešenie resp. stav $x = x_0$. Následne sa vygeneruje porušenie na nový stav $x_1 \in X$. Algoritmus generovania topológií zapojenia DS môžeme nazvať aj stochastickým operátorom poruchy Opert.[1] Ďalej je potrebné ohodnotiť oba stavy x_1 a x cieľovou funkciou a Metropolisovým kritériom, určujúci pravdepodobnosť nahradenia výsledného stavu novým.

$$P(\bar{x} \rightarrow \bar{x}_1) = \begin{cases} 1, & \text{ak } f(\bar{x}_1, \bar{u}_1) - f(\bar{x}, \bar{u}) \leq 0, \\ e^{-(f(\bar{x}_1, \bar{u}_1) - f(\bar{x}, \bar{u})) / T}, & \text{ak } f(\bar{x}_1, \bar{u}_1) - f(\bar{x}, \bar{u}) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Parameter T je teplota systému. V prípade, že nový stav x_1 má menšiu alebo rovnakú funkčnú hodnotu ako pôvodný stav, potom sa stav x zmení na x_1 . V opačnom prípade je nový stav x_1 akceptovaný s pravdepodobnosťou v rozmedzí $0 < P(x \rightarrow x_1) \leq 1$.

Hodnota parametra teploty T výrazne ovplyvňuje hodnotu pravdepodobnosti prijatia nového stavu pre prípad $f(x_1) > f(x)$. Pre veľké hodnoty T je pravdepodobnosť blízka jednej, akceptované sú všetky nové stavy. Ak sa T blíži k nule, potom pravdepodobnosť prijatia sa blíži k nule. Len občasne sa akceptuje nový stav s vyššou resp. nižšou funkčnou hodnotou. Táto vlastnosť algoritmu dovoľí prijať aj horšie riešenia, čím optimalizácia neuviazne v lokálnom minime. Metropolisov algoritmus sa opakuje pre danú teplotu k_{max} krát. V prípade, ak by sa k_{max} rovnalo nekonečnu, potom stavy, ktorých rozloženie výskytu je totožné s Boltzmannovým rozložením - simulácia skutočného žihania. [1]

Dôležitou úlohou je riadenie znižovania teploty tzv. plán chladenia. V tomto algoritme sa bude meniť hodnota teploty diskretne, použitím koeficientu α z intervalu $0 < \alpha < 1$, $T_{nove} = \alpha \cdot T$. Najvhodnejšou hodnotou koeficientu α je medzi 0,8 až 0,99. Ďalšími riadiacimi parametrami sú T_{max} a T_{min} . Inicializovaná teplota T_{max} sa postupne znižuje na hodnotu T_{min} . Správne zvolenie týchto parametrov je potrebné analyzovať pri konkrétnej úlohe. Pre optimalizáciu zapojenia DS je postačujúca hodnota $T_{max} < 2500$ a $T_{min} > 100$. Konštanty k_{max} , T_{max} , T_{min} a α patria medzi riadiace parametre simulovaného žihania.

Pravidlá pre určenie počtu spínacích prvkov

Nech vyšetřovaná distribučná sústava vn pozostáva z n počtu spínacích prvkov. Potom vektor x reprezentujúci dané zapojenie sústavy pozostáva z celkového počtu spínacích prvkov, a to:

$$\bar{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (4)$$

Nech spínacie prvky distribučnej sústavy vn je možné rozdeliť do kategórií:

1. vývody vn v elektrických staniách (výkonový vypínač a prvý úsekový odpínač vedenia pred ES),
2. kmeňové vedenie (väzobné úsekové odpínače, reclosery, miestne trafostanice),
3. skupinové distribučné prípojky (úsekové odpínače a reclosery),
4. elektrické prípojky vn (odpínače).

Potom kategórie spínacích prvkov 1, 3 a 4 nie je potrebné uvažovať v optimalizácii zapojenia DS. Pri kategórii číslo 1 by vypnutie spínacieho prvku viedlo k zvýšeniu činných výkonových strát daného vývodu alebo pri výbežku vn vedenia k prerušeniu

distribúcie. U kategórie číslo 3 a 4 vzhľadom na výbežky vn vedení a prípojok by ich vypnutie viedlo k prerušeniu distribúcie elektriny.

Na základe vyššie uvedeného, vektor x pozostáva zo spínacích prvkov kategórie číslo 2, pričom $m < n$.

Majme definované spínacie prvky vektorom $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_m]$ skúmanej distribučnej sústavy vn. Nech všetky spínacie prvky sú v zapnutom stave. Úloha spočíva v nájdení počtu spínacích prvkov, ktoré je potrebné vypnúť, aby sa dosiahlo radiálne zapojenie DS a zároveň vylúčiť kombinácie zapojenia vn DS, ktoré nie sú prípustné na posúdenie optimalizačnou metódou.

Nech kmeňové vedenie vn obsahujúce spínacie prvky druhej kategórie sú v rámci distribučnej sústavy rozdelené na:

- kruhové (oba vývody kmeňového vedenia sa nachádzajú v jednej elektrickej stanici),
- spojovacie vedenia spájajúce dve elektrické stanice (každý z dvojice vývodov sa nachádza v inej elektrickej stanici),
- priečne vedenia (spájajúce dve alebo viaceré kruhové alebo spojovacie vedenia).

Potom pre splnenie podmienky radiálnej prevádzky vn vedení platí, že minimálne jeden spínací prvok kruhového a spojovacieho vedenia musí byť v stave vypnutom.

Z uvedeného je možné usúdiť, že pre každú elektrickú slučku, ktorá vznikne pri zapnutí všetkých spínacích prvkov vektora x , musí byť jeden spínací prvok zmenený na stav vypnutý z množiny spínacích prvkov galvanicky zapojených v príslušnej slučke.

Majme distribučnú sústavu vn so zopnutými všetkými spínacími prvkami tvorenú konečným počtom i elektrických slučiek. Nech každá slučka i obsahuje p počet spínacích prvkov, z ktorého jeden spínací prvok bude vypnutý, potom platí nasledujúca rovnica pre výpočet kombinácií zapojenia DS v množine X :

$$K_n = \binom{p_1}{1} \times \binom{p_2}{1} \times \dots \times \binom{p_i}{1} \quad (5)$$

Algoritmus generovania topológií zapojenia DS

V tejto časti bude popísaný algoritmus, ktorý bude na základe pravdepodobnosti generovať stavy spínacích prvkov reprezentované vektorom x . Základná filozofia je nasledovná:

1. metóda simulovaného žihania je iteračná metóda s radiaciami parametrami,
2. nech zvyšujúcim počtom iterácií metódy simulovaného žihania sa zjemňuje generovanie nových topológií,

potom môžeme popísať nasledujúci postup:

1. všetky spínacie prvky sú v stave zapnutom,
2. majme rozhodovací člen, ktorý je vyjadrený nasledujúcou rovnicou,

$$P < P_{vyp} \quad (6)$$

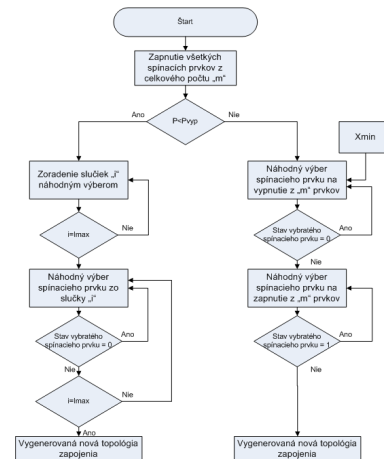
$$P_{vyp} = 0,1^{k \cdot T_{max}} \quad (7)$$

kde P nadobúda hodnoty v intervale (0 až 1) na základe generátora náhodného čísla. Parameter k je počet iterácií pri konštantnom parametre T a nadobúda hodnotu v rozmedzí (1 až k_{max}). Parameter T_{max} , k_{max} sú konštanty a parameter T nech sa znižuje, ak sa $k = k_{max}$.

Ak bola splnená podmienka definovaná rovnicou vyššie, v prvom kroku sa náhodným výberom zoradia do poradia jednotlivé slučky pre ďalšie použitie. V druhom kroku sa náhodným výberom v každej slučke vyberie jeden spínací prvok na vypnutie. V prípade, ak náhodne vybraný spínací prvok v danej slučke je už v stave vypnutom, pre danú slučku sa náhodný výber opakuje dovtedy, pokiaľ nedôjde k vypnutiu. Tento prípad nastáva vtedy, ak konkrétny spínací prvok sa nachádza vo viacerých slučkách. Vypínanie spínacích prvkov je

ukončené vtedy, ak v každej slučke bol vypnutý jeden spínací prvok. Výsledkom je vektor x_I , ktorý reprezentuje novú topológiu zapojenia DS a vstupuje do algoritmu simulovaného žihania na ohodnotenie.

Ak nebola splnená podmienka definovaná rovnicou vyššie, na generovanie novej topológie zapojenia DS - vektor x_I sa využije výsledná topológia zapojenia DS - vektor x_{min} , ktorá bola prijatá metódou simulovaného žihania a reprezentuje v danom čase nájdené minimum. Náhodným spôsobom je vybraný jeden spínací prvok z vektora x_{min} na vypnutie a jeden spínací prvok na zapnutie. Výsledkom je vektor x_I , ktorý reprezentuje novú topológiu zapojenia DS a vstupuje do algoritmu simulovaného žihania na ohodnotenie, pozri Obr.2.

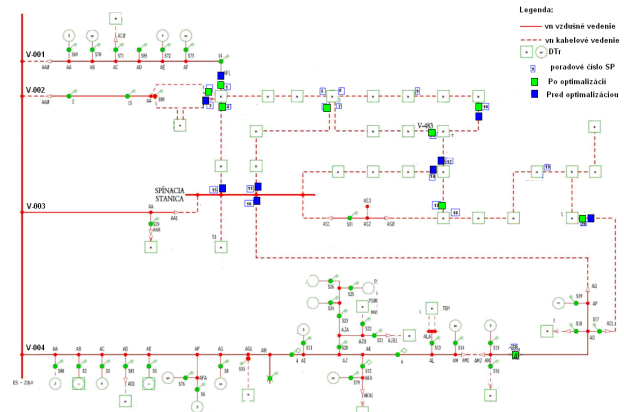


Obr. 2. Algoritmus pre generovanie topológií zapojenia DS

IV. REALIZÁCIA SIEŤOVO-TECHNICKÝCH VÝPOČTOV NA KONKRETNEJ DS

Pred realizáciou konkrétnych sieťových výpočtov je potrebné si zadefinovať znenie úlohy. Majme distribučnú sústavu vn, v ktorej je elektricky zapojená spínacia stanica vn/vn, ktorá vykazuje zlý fyzický stav a morálne opotrebenie, čo vedie k zlým prevádzkovým parametrom, najmä vo väzbe na spoľahlivosť distribúcie elektriny. Na optimalizáciu zapojenia DS bol využitý program Matlab.

Existujúca DS je znázornená na obrázku Obr.3, ktorá pozostáva z 53 distribučných transformačných staníc vn/nn s celkovým inštalovaným výkonom 23 400 kVA, z vn vedení v celkovej dĺžke 30,7 km a zo spínacej stanice vn/vn s jedným systémom pripojníc a siedmymi vn vývodmi. Daná zásobovacia oblasť je napájaná z elektrickej stanice 110/22kV štyrmi vn vývodmi V-001, V-002, V-003 a V-004.



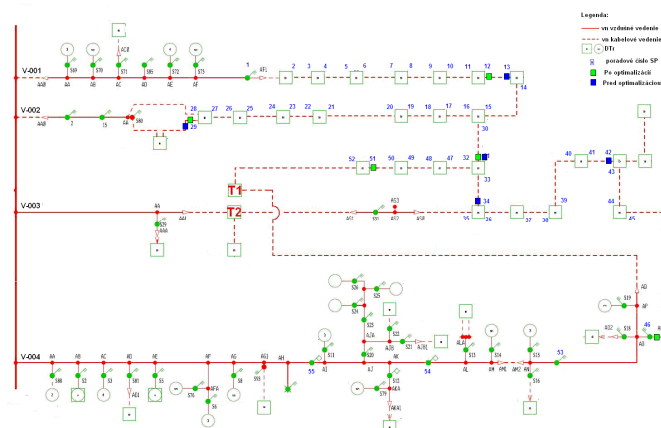
Obr. 3. Existujúca DS

TABUĽKA I

	dPx0	dPxvys	V-001 P	V-002 P	V-003 P	V-004 P
	kW	kW	kW	kW	kW	kW
		145,2	707	4584	2336	1720
Alt. 1	137,4	103,8	707	3337	3556	1702
Alt. 2	148,1	103,8	707	3337	3556	1702
Alt. 3	144,1	103,8	707	3337	3556	1702

Na základe výsledkov uvedených vyššie bolo dosiahnuté rovnaké riešenie optimalizácie zapojenia existujúcej DS pri rôznych alternatívach plánu chladenia, z ktorých vyplýva, že zmenou zapojenia DS došlo k zníženiu činných strát z 145,2 kW na 103,8 kW, čo predstavuje zníženie o 41,4 kW. Základné a optimálne zapojenie DS je znázornené na obrázku Obr.3.

Na obrázku Obr.4 je znázornená cieľová DS, ktorá sa líši od existujúcej DS v tom, že spínacia stanica vn/vn bola nahradená štandardnými transformačnými stanicami vn/nn umiestnenými na jej súčasnom stanovišti a v redukovaní priečných prepojov medzi kmeňovými vedeniami vn. V tomto prípade predstavuje vektor x stav 55 spínacích prvkov.



Obr. 4. Cieľová DS

TABUĽKA II

	dPx0	dPxvys	V-001 P	V-002 P	V-003 P	V-004 P
	kW	kW	kW	kW	kW	kW
Alt. 1	189,8	117,1	3175	2191	2038	1927
Alt. 2	214	116,5	2936	2431	2014	1951
Alt.3	237,9	116,5	2936	2431	1991	1974

Na základe výsledkov uvedených vyššie bolo dosiahnuté približne rovnaké riešenie optimalizácie zapojenia cieľovej DS pri rôznych alternatívach plánu chladenia, z ktorých vyplýva, že po realizovaní úprav v DS, činné výkonové straty budú na úrovni 116,5 kW, čo je o 28,7 kW menej ako pri existujúcej DS v základnom zapojení DS. Zvolené a optimálne zapojenie cieľovej DS je znázornené na obrázku Obr.4, pričom optimalizované zapojenie je reprezentované vektorom x z alternatívy č.3.

ZÁVER

Predložený príspevok sa venoval optimalizácii zapojenia DS na napäťovej hladine vn s využitím metódy simulovaného žihania. Matematicky bola sformulovaná úloha minimalizácie činných strát pre DS vn. Cieľom pri formulovaní úlohy bolo matematicky popísať jednotlivé vzťahy, ktoré umožnia nájsť optimálne riešenie zapojenia distribučnej sústavy vn s rešpektovaním prevádzkovo-ekonomických a legislatívnych požiadaviek na distribúciu elektriny ku koncovým zákazníkom. Dôležitou súčasťou návrhu daného algoritmu bolo vyvinúť spôsob pre zníženie počtu kombinácií zapojenia DS, čo je hlavný prínos tejto práce. Na základe osobných skúseností s prevádzkovaním DS som usúdil, že je možné použiť pravidlo, ktorým je možné výrazne znížiť prieskumný priestor X , čím sa zabezpečí zníženie výpočtového času optimalizácie a zvýši sa pravdepodobnosť nájdenia globálneho minima cieľovej funkcie. V závere boli realizované sieťovo-technické výpočty na konkrétnej DS.

POĎAKOVANIE

Článok bol vypracovaný v rámci projektu VEGA - Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied č. 1/0166/10 a Agentúry na podporu výskumu a vývoja č. APVV-0385-07.

LITERATÚRA

- [1] VAŠIČEK, Z, Simulované žihanie, VUT v Brne, Dostupné na internete: < www.stud.fit.vutbr.cz>.

ADRESY AUTOROV

Luboš Holka, Východoslovenská distribučná, a. s., Staničné námestie 1, Košice, SK 042 10, Slovak Republic, holka_lubos@vse.sk
 Michal Kolcun, Technická univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovak Republic, michal.kolcun@tuke.sk