

## MOŽNOSTI POUŽITIA GENETICKÝCH ALGORITMOV VO VÝPOČTOCH CHODU SIETÍ

### POSSIBILITIES OF GENETIC ALGORITHM APPLICATION IN THE CALCULATION OF POWER NETWORKS OPERATION

M. Rapšík<sup>1)</sup>, J. Altus<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a.s., Mlynské nivy 59/A, 824 84 Bratislava 26, Slovensko

<sup>2)</sup> Katedra výkonových elektrotechnických systémov, Elektrotechnická fakulta, ŽU v Žiline, Univerzitná 1, 010 01 Žilina, Slovensko

**Abstrakt** Článok pojednáva o možnostiach aplikácie metódy genetických algoritmov pri optimalizácii tokov jalových výkonov v Elektrizačnej sústave Slovenska. V článku sú naznačené metódy výpočtu tokov jalových výkonov a použitia genetických algoritmov na ich minimalizáciu. V závere sú uvedené výsledky vypočítaných napätí a tokov jalových výkonov v tabuľkovej a grafickej forme.

**Summary** The paper describes the possibilities of genetic algorithm application by the reactive power flows' optimization in Slovak power transmission system. The methods of reactive power flow calculation and the utilization of genetic algorithms for their minimalization are indicated in the paper. There are the results of calculated voltages and reactive power flows presented in chart and graphical format at the end of this paper.

#### 1. ÚVOD

Prevádzkovatelia elektrizačných sústav majú povinnosť dopraviť elektrickú energiu k odberateľom v požadovanom množstve a kvalite. Otázka množstva dodávanej elektrickej energie je otázka dostatočnej prenosovej schopnosti vedení prenosovej sústavy a dostatku zdrojov elektrickej energie. Otázka kvality dodávanej elektrickej energie je súhrn viacerých parametrov, ktoré sú definované v STN 50160. Medzi základné kvalitatívne parametre patrí stabilita napätia. Je známe, že hodnoty napätia priamo súvisia s hodnotami jalového výkonu.

Preto je potrebné aby v jednotlivých oblastiach prenosovej sústavy bola vyrovnaná bilancia jalového výkonu. Pretože prenos jalového výkonu na veľké vzdialenosti znamená zväčšenie jalových strát. Je teda vhodné aby sme jalový výkon neprenášali na väčšie vzdialenosti, ale pokiaľ je to možné „vyrobili“ jalový výkon na mieste spotreby.

#### 2. VÝPOČTY TOKOV ČINNÝCH A JALOVÝCH VÝKONOV

Činný a jalový výkon na ľubovoľnej prípojnici môžeme definovať pomocou rovnice (1).

$$P_p - jQ_p = U_p^* \cdot I_q, \quad (1)$$

Ak uvažujeme prenosovú sústavu s  $n$  uzlami potom rovnicu (1) môžeme upraviť na tvar

$$P_p - jQ_p = U_p^* \sum_{q=1}^n Y_{pq} \cdot U_q. \quad (2)$$

Nech  $U_p = e_p + jf_p$  a  $Y_{pq} = G_{pq} - jB_{pq}$ . Po naznačených úpravách a dosadení do rovnice (2), dostaneme vzťah pre činný a jalový výkon v tvare

$$P_p - jQ_p = (e_p - jf_p) \sum_{q=1}^n (G_{pq} - jB_{pq}) \cdot (e_q + jf_q). \quad (3)$$

Separovaním reálnej a imaginárnej časti dostane

$$P_p = \sum_{q=1}^n \{e_p(e_q \cdot G_{pq} + f_q B_{pq}) + f_p(f_q \cdot G_{pq} - e_q \cdot B_{pq})\}$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n \{f_p(e_q \cdot G_{pq} + f_q \cdot B_{pq}) - e_p(f_q \cdot G_{pq} - e_q \cdot B_{pq})\} \quad (4)$$

Takto dostaneme dve nelineárne rovnice pre každú prípojnicu. Na riešenie týchto rovníc sa používajú iteračné metódy, z ktorých najčastejšie využívanou je Newton-Raphsonova metóda. Pomocou týchto výpočtov dostaneme rozloženie činných a jalových výkonov v sústave, ktorá je nahradená modelom. Výpočty ustáleného chodu sústavy sme robili na modeli sústavy pre letné obdobie 2004. V letnom období je regulácia napätia problematickejšia vzhľadom na odľahčenie sústavy. Po výpočtoch tokov činných a jalových výkonov sme sa pokúsili optimalizovať počet a rozmiestnenie kompenzačných zariadení v sústave tak, aby sme

dostali minimálne toky jalových výkonov a čo najpriaznivejšie hodnoty napätia v jednotlivých uzloch sústavy.

### 3. GENETICKÉ ALGORITMY

Genetické algoritmy (GA) sú univerzálnym stochastickým prehľadávacím prístupom, ktorý je v ohraničenom priestore prípustných riešení daného problému schopný priblížiť sa ku globálnemu optimu. Uplatňuje sa pritom z prírody vypozerovaný princíp prežitia najsilnejších resp. najprispôsobivejších jedincov a nevyhnutnosť zániku najslabších, neživotaschopných resp. neprispôsobivých. Veľmi zjednodušene možno povedať, že GA simulujú evolúciu, pri ktorej v populácii viacerých riešení vznikajú úspešnejšie riešenia - jedince, ktoré postupujú do ďalších generácií a neúspešné jedince zanikajú. Ohodnotenie úspešnosti týchto jedincov je uskutočňované na základe vhodnej účelovej funkcie, ktorá vlastne reprezentuje jadro optimalizovaného problému. Výpočty používajú modely základných genetických operácií, ktorými sú "kríženie", "mutácia" a "výber". Genetické algoritmy sa od väčšiny "konvenčných" optimalizačných metód líšia niektorými znakmi:

- ◆ sú schopné vyviaznúť z okolia lokálneho extrému a približovať sa ku globálnemu extrému,
- ◆ uskutočňujú paralelné prehľadávanie vo viacerých smeroch súčasne,
- ◆ nevyžadujú pomocné informácie o vývoji riešenia, ako je napr. gradient účelovej funkcie a pod., požadujú len možnosť vyhodnotiť účelovú funkciu v ľubovoľnom bode prehľadávaného priestoru,
- ◆ intenzívne využívajú stochastické procesy,
- ◆ sú schopné riešiť optimalizačné problémy s desiatkami až stovkami premenných,
- ◆ sú pomerne jednoducho aplikovateľné na široké spektrum optimalizačných problémov,
- ◆ patria k časovo resp. výpočtovo najnáročnejším riešeniam.

Medzi problémy, ktoré sú použitím konvenčných optimalizačných prístupov riešiteľné len ťažko, patria napríklad hľadanie globálnych extrémov multimodálnych funkcií mnohých premenných, ťažké kombinatorické alebo grafovo orientované problémy, mnohoparametrové problémy, pri ktorých zložitost' narastá exponenciálne alebo faktoriálne, úlohy s mnohými obmedzujúcimi podmienkami a podobne. Na vysvetlenie základného mechanizmu genetických algoritmov si najskôr opíšeme základné genetické operácie, ktorými sú kríženie, mutácia a výber.

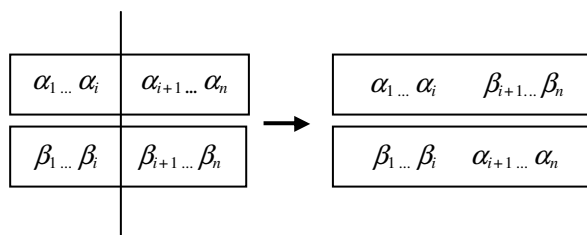
Kríženie je taká operácia, pri ktorej sa dva rodičovské reťazce rozdelia v rovnakej pozícii

(alebo vo viacerých rovnakých pozíciách) a navzájom si vymenia jednu z dvoch častí (striedavo každú druhú časť) reťazca. Krížením teda vznikajú dva nové odlišné jedince, ktoré nesú niektoré znaky oboch rodičov.

Majme dva chromozómy  $\alpha, \beta \in \{0,1\}^k$ , operácia kríženia sa bude formálne interpretovať ako operátor zobrazenie, tejto dvojici chromozómov priradí dva nové chromozómy s rovnakou dĺžkou ako pôvodné

$$(\alpha', \beta') = O_{cross}(\alpha, \beta), \quad (5)$$

kde sú rôzne spôsoby realizácie operátora  $O_{cross}$  znázornené na obrázku č. 1.



Obr.1. Vyjadrenie operácie kríženia nad dvoma chromozómami

Fig.1. The representation of crisscross operation over two chromosomes

Mutácia je taká operácia, pri ktorej niektorý gén niektorého reťazca v populácii zmení svoju hodnotu na inú náhodnú hodnotu z ohraničeného rozsahu hodnôt z prehľadávaného priestoru. Mutácia umožňuje nachádzať nové riešenia, ktoré sa v populácii ešte zatiaľ nevyskytli. Operácia mutácie stochasticky transformuje binárny vektor  $\alpha$  na nový binárny vektor  $\alpha'$ , pričom stochastičnosť tohoto procesu je určená pravdepodobnosťou  $P_{mut}$

$$\alpha' = O_{mut}(\alpha), \quad (6)$$

kde  $\alpha$  a  $\alpha'$  sú dva binárne vektory rovnakej dĺžky  $kn$

$$\begin{aligned} \alpha &= (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{kn}), \\ \alpha' &= (\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \alpha'_{kn}), \end{aligned} \quad (7)$$

kde jednotlivé komponenty  $\alpha'$  sú určené takto

$$\alpha'_i = \begin{cases} 1 - \alpha_i & (\text{pre } \text{random} < P_{mut}) \\ \alpha_i & (\text{ostatné prípady}) \end{cases}, \quad (8)$$

kde  $\text{random}$  je náhodné číslo z intervalu  $[0,1]$  generované s rovnomernou distribúciou. Pravdepodobnosť  $P_{mut}$  určuje stochastičnosť operátora mutácie, v limitnom prípade ak  $P_{mut} \rightarrow 0$ , potom operátor  $P_{mut}$  nemení binárny vektor

$$\lim_{P_{mut} \rightarrow 0} O_{mut}(\alpha) = \alpha. \quad (9)$$

Výber jedincov do novej generácie je jednou z najzložitejších procedúr v genetických algoritmoch. Pri výbere do novej populácie predpokladáme že veľkosť populácie sa počas riešenia nemení. Spôsobov výberu jedincov do pracovnej skupiny je veľa a ich voľba je závislá od konkrétnej riešenej úlohy a vplyv na rýchlosť konvergenzie k riešeniu.

#### 4. IMPLEMENTÁCIA GENETICKÝCH ALGORITMOV DO SIMULOVANIA ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVY

Pre riešenie problému implementácie genetických algoritmov na riešenie toku činných a jalových výkonov v ES Slovenska sme ako základ použili program PSLF (Positive Sequence Load Flow), čo je rozsiahly simulačný program pre riešenie rôznych prevádzkových stavov v elektrizačnej sústave. Tento program sme využili na vyhodnocovanie jednotlivých návrhov, t.j. pomocou tohto programu sme ohodnocovali a stanovovali fitness jednotlivých návrhov. Cieľom výpočtov bolo overenie nasadenia vhodných kompenzačných zariadení v jednotlivých elektrických staniách. Na vykonávanie základných genetických operácií, ktorými sú "kríženie", "mutácia" a "výber" sme vytvorili program v jazyku C++. Pri operácii "kríženie" sme zvolil variant dvojbodového kríženia, ktorý sa pre danú problematiku javil ako najvhodnejší. Po rôznych pokusoch s mutáciou nám vyšla ako najvhodnejšia 6% mutácia. Pri výbere novej populácie musíme

zabezpečiť aby výsledok novej generácie nebol horší ako výsledok predchádzajúcej generácie. To sme zabezpečili tak že dvoch najlepších jedincov z predchádzajúcej generácie sme prekópiovali bez zmeny do novej generácie. Zvyšný počet jedincov vyberieme spôsobom tzv. „Pracovnej skupiny“. Je to skupina, do ktorej je skopírovaná polovica najúspešnejších jedincov a druhá polovica budú jedinci náhodne vybraný z celej populácie. Dosahtuté výsledky sú uvedené v nasledujúcej kapitole.

#### 5. MODELOVANIE NAPÄŤOVÝCH POMEROV V ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVE SLOVENSKA

Naším cieľom bolo zistiť napäťové pomery, toky činných a jalových výkonov vo vedeniach ES Slovenska. Po základných výpočtoch ustáleného chodu sietí, sme zisťovali možnosti nasadenia ďalších vhodných kompenzačných prostriedkov v našej sústave. Základom pre výpočty je vytvorenie modelu ES Slovenska v programe PSLF. Zdrojom vstupných údajov boli podklady dodané zo SEPS, a.s. Žilina. Výpočtový model ES Slovenska bol vytvorený na SEPS a.s. Model pre obdobie letného minima sme použili z dôvodu vysokých hodnôt napätia v sústave počas nízkeho zaťaženia sústavy. Hodnoty napätia v období okolo zimného maxima zaťaženia boli vyhovujúce.

Pri výpočtoch boli uvažované rôzne varianty nasadenia kompenzačných prostriedkov:

- Variant 1: výpočet pri uvažovaní kompenzačných prostriedkov, ktoré sú na Slovensku k dispozícii v súčasnosti. Výsledky sú uvedené v tab. 1 až 4 a na obr. 2.

Tab.1. Použité kompenzačné prostriedky - var. 1

Tab.1. Used compensating devices - var. 1

El. stanica	VKAP	LEME	SUCA
Q (Mvar)	134	90	120

Tab.2. Napätia na prípojnicích rozvodní 220 kV - var. 1

Tab.2. Busbar voltages in 220 kV substations -var. 1

El. stanica	U (kV)	El. stanica	U (kV)
Bystričany	241,95	P. Bystrica	237,14
E.Vojany A	239,58	Lemešany	239,08
E.Vojany B	239,54	Lemešany	239,08
Križovany	239,80	Senica	237,45
USS	237,87	Sučany	241,57
Medzibrod	240,71	Voľa	234,01

Tab.3. Napätia na prípojniciach rozvodní 400 kV - var. 1

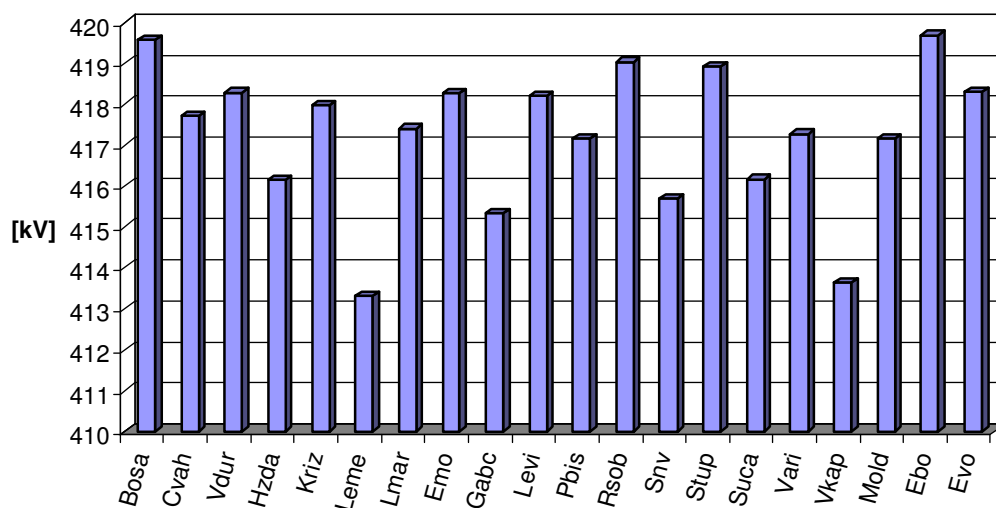
Tab.3. Busbar voltages in 400 kV substations - var. 1

El. stanica	U (kV)	El. stanica	U (kV)	El. stanica	U (kV)
Bošáca	419,57	L. Mara	417,40	Stupava	418,91
Č. Váh	417,71	E. Mochovce	418,27	Sučany	416,16
V. Ďur A	418,28	Gabčíkovo	415,34	Varín	417,28
V. Ďur B	418,28	Levice	418,20	V. Kapušany	413,63
H. Ždaňa	416,14	P. Biskupice	417,17	Moldava	417,16
Križovany	417,98	R. Sobota	419,04	E. Bohunice	419,69
Lemešany	413,30	SNV	415,69	E. Vojany	418,30

Tab.4. Prenášané výkony a straty vo vedeniach 400 kV pri minimálnom zaťažení elektrizačnej sústavy Slovenska

Tab.4. Transmitted outputs and losses in 400 kV lines by the minimal load of Slovak power transmission system

Vedenie	Začiatok	Koniec	P (MW)	Q (Mvar)	$\Delta P$ (MW)
V 404	Nošovice	Varín	376,5	-29,6	1,876
V 448	Győr	Gabčíkovo	-421,9	-5,60	1,195
V 449	Göd	Levice	-374,1	-31,0	2,036
V 424	Križovany	Sokolnice	-37,4	-31,3	0,034
V497	Stupava	Sokolnice	-1 06,5	71,30	0,170
V477	Lemešany	Krosno	132	58,60	0,346
V478	Lemešany	Krosno	132	58,60	0,346
V440	V. Kapušany	Mukačevo	51,0	29,80	0,037



Obr.2. Veľkosť napätia pri výpočtoch letného minima v ES Slovenska

Obr.2. Voltage values by the calculations of summer minimum in Slovak power system

- Variant 2: Výpočet bol uskutočnený pri uvažovaní nových kompenzačných prostriedkov, umiestnených v uvedených elektrických staniach po preverení citlivosti sústavy na rôzne kombinácie kompenzačných

prostriedkov v rôznych elektrických staniach. Z veľkého množstva vykonaných simulačných experimentov sú výsledky pre najlepšiu kombináciu kompenzačných prostriedkov uvedené v tab. 5 až 8 a na obr.3.

Tab.5. Použité kompenzačné prostriedky- var. 2

Tab.5. Used compensating devices - var. 2

El. stanica	VKAP	LEME	SUCA	STUP	MOLD	BOSA	RSOB	SNV	VARI	LEVI
Q (Mvar)	70	20	108	38	20	60	43	27	17	21

Tab.6. Napätia na prípojniciach rozvodní 220 kV - var. 2

Tab.6. Busbar voltages in 220 kV substations - var. 2

El. stanica	U (kV)	El. stanica	U (kV)
Bystričany	241,15	P. Bysrtica	236,59
Križovany	239,80	Senica	237,38
Lemešany	235,92	E.Bohunice A	239,83
Lemešany	235,92	Sučany	240,01
USS	234,70	E.Bohunice B	239,81
Medzibrod	238,73	Voľa	232,58

Tab.7. Napätia na prípojniciach rozvodní 400 kV - var. 2

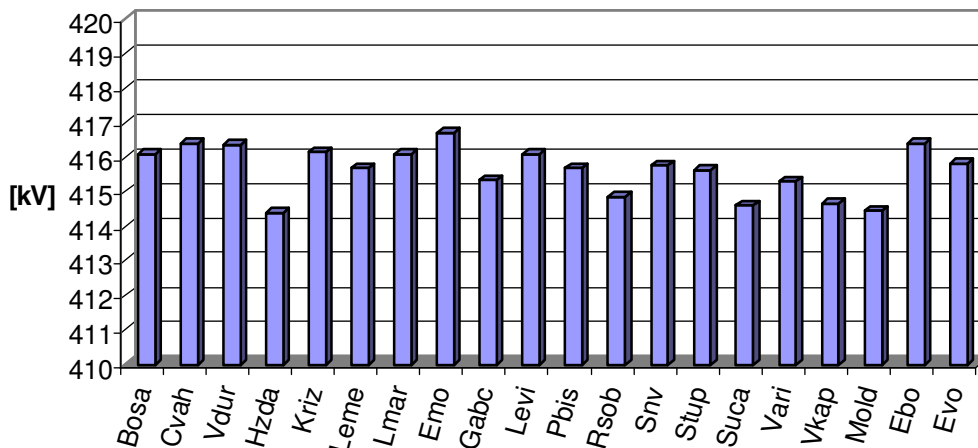
Tab.7. Busbar voltages in 400 kV substations - var. 2

El. stanica	U (kV)	El. stanica	U (kV)	El. stanica	U (kV)
Bošáca	416,08	Levice	416,08	Stupava	415,61
Č. Váh	416,38	Gabčikovo	415,34	Sučany	414,60
V. Ďur	416,36	E. Mochovce	416,71	Varín	415,3
V. Ďur	416,36	L. Mara	416,08	V. Kapušany	414,66
H. Ždaňa	414,38	R. Sobota	414,84	Moldava	414,44
Križovany	416,13	SNV	415,75	E. Bohunice	416,38
Lemešany	415,68	E. Vojany	415,82	P. Biskupice	415,68

Tab.8. Prenášané výkony a straty vo vedeniach 400 kV pri minimálnom zaťažení elektrizačnej sústavy Slovenska po nasadení kompenzačných prvkoch

Tab.8. Transmitted outputs and losses in 400 kV lines by the minimal load of Slovak power transmission system after the utilization of compensating devices

Vedenie	Začiatok	Koniec	P (MW)	Q (Mvar)	$\Delta P$ (MW)
V 404	Nošovice	Varín	375,4	-29,7	1,854
V448	Győr	Gabčikovo	-421,60	-5,6	1,194
V 449	Göd	Levice	-373,50	-18,4	2,034
V 424	Križovany	Sokolnice	37,00	-10,7	0,029
V497	Stupava	Sokolnice	106,80	1,7	0,153
V477	Lemešany	Krosno	-131,60	-3,3	0,327
V478	Lemešany	Krosno	-131,60	-3,3	0,327
V440	V. Kapušany	Mukačevo	51,8	-22,9	0,027



Obr.3. Veľkosť napätia v ES Slovenska po rozmiestnení kompenzačných prostriedkov podľa najvhodnejšieho variantu

Obr.3. Voltage values in Slovak power system after the location of compensating devices according to the most suitable variant

## 6. ZÁVER

Z výpočtov vyplýva, že metóda použitia genetických algoritmov je vhodná na minimalizáciu tokov jalových výkonov v jednotlivých vedeniach. Tab. 4 a 8 ukazujú ako sa menili toky jalových výkonov v hraničných vedeniach pred a po optimalizácii. Z tabuliek je vidieť, že toky jalových výkonov klesli prakticky vo všetkých hraničných vedeniach. Na obr. 2 a 3 sú graficky zobrazené veľkosti napätí v elektrických staniách ES Slovenska. Je zrejmé, že pri nasadení vypočítaných kompenzačných prostriedkov sa upravujú aj napäťové pomery v elektrických staniách na hodnoty, ktoré sú z hľadiska dispečerského riadenia a medzinárodných prenosov veľmi prijateľné.

Pri hodnotení výsledkov je potrebné povedať, že pre uvedenú kompenzáciu by boli najvhodnejšie zariadenia FACTS, ktoré dokážu plynulo regulovať jak hodnoty napätia, tak aj hodnoty tokov jalových výkonov. Pri použití týchto zariadení by bola zabezpečená rýchla a presná kompenzácia tokov jalových výkonov vo všetkých vedeniach ES Slovenska.

## LITERATÚRA

- [1] ALTUS, J.; NOVÁK, M.: Riadenie elektrizačných sústav, skriptá, VŠDS Žilina, 1995
- [2] ARRILAGA, J. and ARNOLD C.P.: Computer Analysis of Power System, John Wiley & Sons Ltd, 1990
- [3] BOJDA, P.: Výpočty ustáleného chodu siete, Diplomová práca, ŽU v Žiline, 2001
- [4] GRIGER, V.; GRAMBLIČKA, M.; NOVÁK, M.; POKORNÝ M.: Prevádzka, riadenie a kontrola prepojenej elektrizačnej sústavy, Monografia, ŽU v Žiline EDIS, 2001, 236 str.
- [5] SEKAJ, I.: Návrh genetických algoritmov pre riešenie optimalizačných problémov, Bratislava, FEI STU 2001.
- [6] PSLF/SCSC/PSDS program: „PSLF Program Manual“, General Electric Company, 1995
- [7] SEKAJ, I.: Použitie genetických algoritmov na riešenie optimalizačných úloh, AT&P Journal 12/2001
- [8] KOUDELA, P.; NOVÁK, M.; POKORNÝ, M.: Optimization of Compensating Facilities Implementation in Power System, 4. Medzinárodná konferencia Riadenie v energetike, 15.-16.6.2000, Bratislava