

## Inteligentné polohové riadenie LMPM 2 - Riadenie polohového servopohonu

Radičová Tatiana · Elektrotechnika

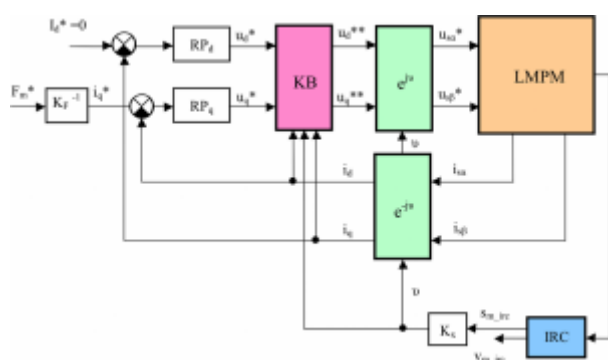
30.12.2011



V druhej časti tohto článku sa bude venovať pozornosť hlavne možnosti riadenia lineárnych motorov a načrtne sa aj štruktúra polohového servopohonu s LMPM, ktorá bude však z väčšej časti uvedená v treťom článku.

### 2. Generátor sily (GF)

Generátor sily (momentu) je veľmi dôležitou súčasťou motorov, či už lineárnych, alebo rotačných. Lineárny motor s permanentnými magnetmi využíva kvalitatívne tie isté štruktúry riadenia ako rotačný SMPM avšak určitá rozdielnosť je v prevodových konštantách. Generátor sily GF bol navrhnutý s využitím princípu vektorovo frekvenčne-prúdového riadenia synchronných motorov s PM a je uvedený na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Generátor sily LMPM s riadením silotvornej  $i_d$  a tokotvornej  $i_q$  zložky prúdu

**Kompenzačný blok** KB je zaradený v blokovej schéme, aby kompenzoval krížové väzby v modeli lineárneho motora. Pri Parkovej transformácii = transformácii pootočením sa vychádza z **priamej** a **spätnej** transformácie a **regulátory prúdu**  $RP_d$  a  $RP_q$  sa navrhli metódou inverznej dynamiky.

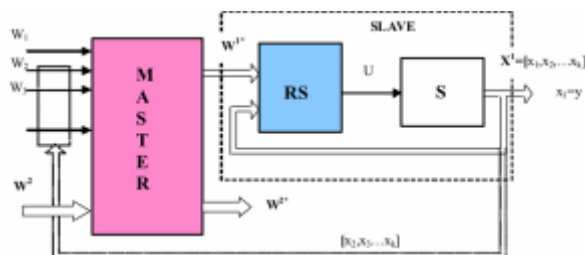
### 3. Master-Slave riadenie polohových servopohonov

V tejto časti sa uvedzajú štruktúry polohových servopohonov, ktoré sa využívajú pre náročné aplikácie s požadovanou vysokou presnosťou polohovania v dynamickom režime pri programovom riadení.

Master-slave riadenie môžeme zaradiť medzi stavové riadenie alebo riadenie pomocou

modelu [3], Obr. 3.1. Významnou prednosťou princípu Master-slave je, že nepotrebuje presný matematický model objektu riadenia S. Postačuje len kvalitatívny model riadenej sústavy s predstavou o veľkosti hlavných parametrov (napr.: čas rozbehu na menovitú rýchlosť s menovitou silou a pod.) Tieto údaje potom slúžia k nastaveniu požadovanej riadiacej stavovej trajektórie Master generátora. Vektor riadenia je nastaviteľný pre zvolené parametre z definovaného rozsahu [4].

Master generátor môže riadiť k- servopohonov s autonómnym riadením, napr. riadenie pohybu v rovine x-y alebo v priestore x-y-z.



Obr. 3.1 Štruktúra systému riadenia MASTER SLAVE

Kde RS je riadiaca sústava a S predstavuje riadený systém.

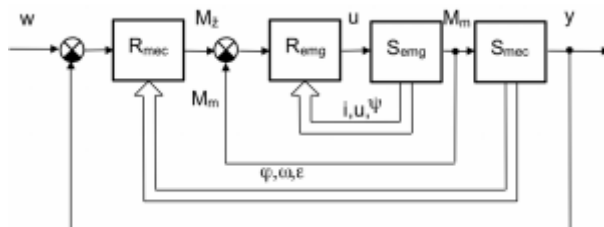
### 3.1 Generátor vektora riadenia

Úlohou Master generátora Obr. 3.1 je generovať priebehy želaných stavových veličín - vektor riadenia. V prípade polohového servosystému sa generujú stavové veličiny želanej polohy, rýchlosti, zrýchlenie a trhu pri dodržaní ich maximálnych povolených hodnôt. Vo všeobecnosti vektor riadenia môže mať väčší počet zložiek ako je počet merateľných veličín systému. V praxi sú aplikované trojrozmerné a štvorrozmerné vektory riadenia s obdĺžnikovým, lichobežníkovým alebo sinusoidálnym priebehom zrýchlenia.

Master generátor stavových veličín s dobre zvolenou a naladenou štruktúrou riadenia prináša vysokú kvalitu riadenia pohybu [10], [11].

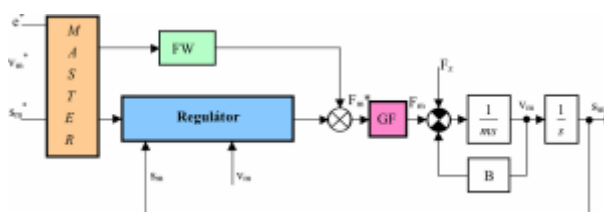
### 3.2 Polohový servopohon

Väčšina súčasných štruktúr polohových servopohonov vychádza zo všeobecnej štruktúry regulačných obvodov Obr. 3.2, ktorá rešpektuje prirodzený fyzikálny princíp riadenia [3]. V tomto prístupe má jednoznačne najvyššiu prioritu riadenie elektromagnetického subsystému -  $S_{emg}$  s regulačným obvodom elektromagnetického momentu motora -  $R_{emg}$ . Regulačný obvod sily vytvára generátor sily GF, ktorý v servopohonoch tvorí základný funkčný blok riadenia. Pokiaľ prenosové vlastnosti GF sú navrhnuté na maximálnu možnú hodnotu pásma priepustnosti  $f_o \geq 1KHz$ , tak potom pri návrhu napr. parametrov regulátorov polohového servopohonu je možné dynamiku GF zanedbať. Nadradený systém riadenia je určený na riadenie mechanických veličín -  $R_{mec}$  mechanického subsystému -  $S_{mec}$ .



Obr. 3.2 Všeobecná štruktúra regulačných obvodov servopohonu

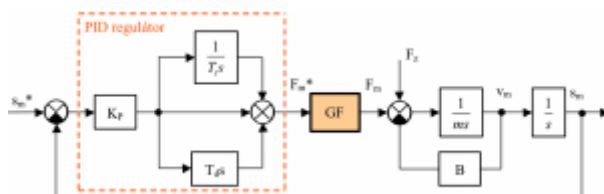
Obr. 3.3 predstavuje blokovú schému polohového servopohonu, ktorá sa skladá z niekoľkých dôležitých blokov. Master generátor predstavuje štruktúru pre programové riadenie a umožňuje realizovať jednoducho predkorekcie blokom FW. Jadrom štruktúry polohového servopohonu je generátor sily GF. Polohový regulátor môže byť vyjadrený rôznymi algoritmi. Konkrétne štruktúry sú uvedené ďalej.



Obr. 3.3 Bloková schéma polohového servopohonu

Výber vhodného regulátora môže byť rôznorodý. Existuje niekoľko radiacích štruktúr, ktoré môžu byť aplikované na tento typ motora. Počnúc najznámejším PID regulátorom končiac P+PI regulátorom. Ďalej uvádzame niekoľko štruktúr riadenia polohového servopohonu.

### 3.2.1 Štruktúra PID

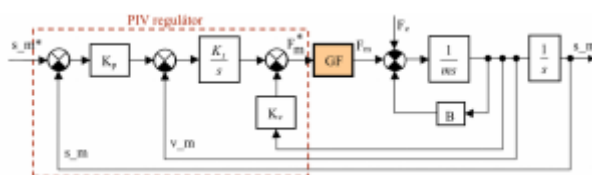


Obr. 3.4 Bloková schéma polohového servopohonu s PID regulátorom

Prenosová funkcia uzavretého obvodu pri zanedbaní dynamiky generátora sily je

$$G(s) = \frac{s_m(s)}{s_m^*(s)} = \frac{K_p T_i T_d s^2 + K_p T_i s + K_p}{s^3 + \left( \frac{K_p T_d + B}{m} \right) s^2 + \frac{K_p}{m} s + \frac{K_p}{T_i m}} \quad (3.1)$$

### 3.2.2 Štruktúra PIV

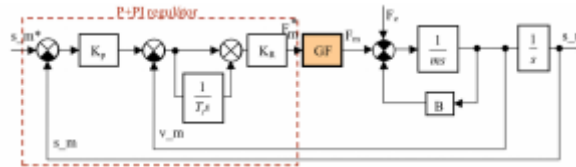


Obr. 3.5 Bloková schéma polohového servopohonu s PIV regulátorom

Prenosová funkcia uzavretého obvodu pri zanedbaní dynamiky generátora sily je

$$G(s) = \frac{s_m(s)}{s_m^*(s)} = \frac{\frac{K_p K_i}{m}}{s^3 + \frac{K_v + B}{m} s^2 + \frac{K_i}{m} s + \frac{K_p K_i}{m}} \quad (3.2)$$

### 3.2.3 Štruktúra P+PI



Obr. 3.6 Bloková schéma polohového servopohonu s P+PI regulátorom

Prenosová funkcia uzavretého obvodu pri zanedbaní dynamiky generátora sily je

$$G(s) = \frac{s_m(s)}{s_m^*(s)} = \frac{\frac{K_p K_r}{T_i m} + \frac{1}{m} s}{s^3 + \frac{K_R + B}{m} s^2 + \frac{K_R (1 + K_p T_i)}{T_i m} s + \frac{K_p K_R}{T_i m}} \quad (3.3)$$

## 3.3 Metódy návrhu regulátora polohového servopohonu

Metódy návrhu regulátorov môžeme rozdeliť do nasledovných kategórií:

- analytické
- inžinierske
- s využitím prostriedkov UI

Ďalej uvedieme len dve metódy dôležité pre návrh polohového regulátora.

### 3.3.1 Metóda pole placement (m. rozmiestňovania pólov)

Metóda pole placement patrí medzi súčasné analytické metódy návrhu parametrov servosystémov. Vychádza z predpokladu, že je možné voliť póly charakteristického polynómu uzavretého systému. Prenosová funkcia uzatvoreného obvodu je vyjadrená vzťahom

$$G(s) = \frac{M(s)}{N(s)} \quad (3.4)$$

Nech platí  $N(s) = N_z(s)$  kde  $n$  je stupeň polynómu. Stupeň polynómu predstavuje počet voliteľných parametrov, ktoré je možné získať riešením algebrických rovníc. Príklad: nech  $n=3$  potom

$$\begin{aligned} N(s) &= s^3 + B_2 s^2 + B_1 s + B_0 \\ N_z(s) &= s^3 + B_{20} s^2 + B_{10} s + B_{00} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Riešením uvedených rovníc získame nasledovné vzťahy:

$$\begin{aligned} B_2 &= B_{20} \\ B_1 &= B_{10} \\ B_0 &= B_{00} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Na základe analýzy vybratých štruktúr riadenia, v regulačných štruktúrach polohových a rýchlostných servopohonoch, môže byť menovateľ prenosovej funkcie uzatvoreného obvodu polynóm  $N(s) = N_z(s)$ :

- druhého rádu (dvojica komplexne združených pólov)

$$s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2 \quad (3.7)$$

- tretieho rádu, (dvojica komplexne združených pólov + jednoduchý pól)

$$(s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2)(s + k\omega_0) \quad (3.8)$$

- štvrtého rádu (dvojica komplexne združených pólov + dvojnásobný jednoduchý pól)

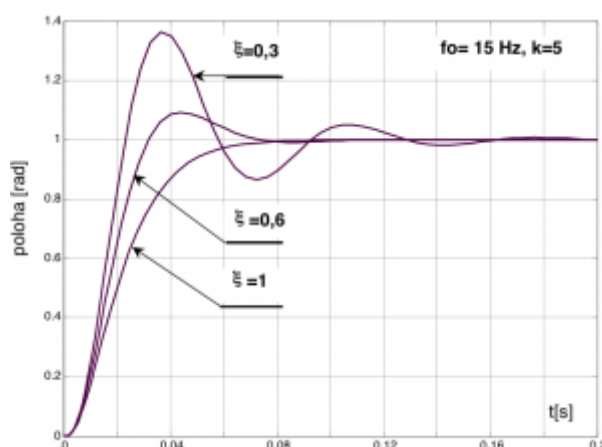
$$(s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2)(s + k\omega_0)^2 \quad (3.9)$$

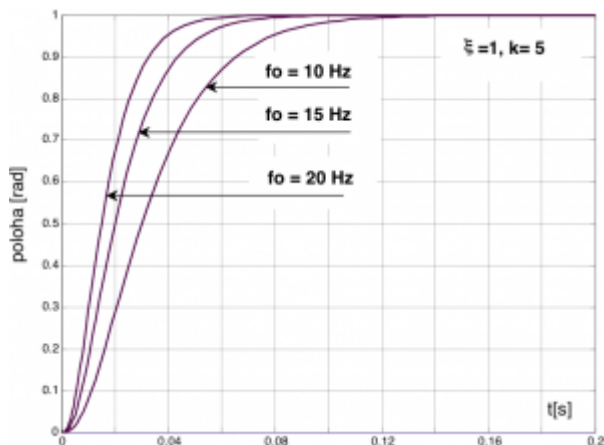
Pre výpočet parametrov regulátora sú vo všeobecnosti nastaviteľné tri riadiace parametre:

- vlastná frekvencia - pásmo priepustnosti -  $\omega_0 = 2\pi f_0$
- koeficient tlmenia -  $\xi$
- koeficient posunutia pólu -  $k$

Pásmo priepustnosti vplýva na dynamiku sústavy, prerogulovanie a čas regulácie. Čím volíme väčšie pásmo priepustnosti, tým má pri konštantnom tlmení systém vyššiu dynamiku. Na druhej strane koeficient tlmenia vplýva najmä na veľkosť prerogulovania a v menšej miere aj na dynamiku systému. Čím menší je koeficient tlmenia, tým je pri konštantnom pásme priepustnosti väčšie prerogulovanie a mierne rýchlejšia doba nábehu. Veľkosť koeficienta posunutia „ $k$ “ určuje vplyv jednoduchého pólu na kvalitu riadenia v porovnaní s komplexne združeným pólom. Ak  $k < 1$ , potom dominantným pólom je jednoduchý pól. Pre  $k \gg 1$  sú dominantné komplexne združené póly.

Ako príklad uvidíme aplikáciu metódy pole placement vyjadrenú polynómom tretieho rádu, rovnica  $(s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2)(s + k\omega_0)$  (3.8) - viď článok č.3.





Obr. 3.7 Prechodové charakteristiky polohového servopohonu s PIV algoritmom riadenia v závislosti od nastaviteľných parametrov  $\xi$  a  $f_0$

### 3.3.2 Genetický algoritmus GA

Hlavná myšlienka navrhovania parametrov pre regulátory pomocou genetických algoritmov sa dostala do povedomia už okolo roku 1990 a zostala známou až do teraz, čo potvrdzujú niektoré články [8], [9]. Zaujímavým je takisto Khaterov a ostatných [7] pokus o navrhnutie PI polohového regulátora SMPM pohonu.

GA je jedným zo základných stochastických optimalizačných algoritmov, a preto tak isto ako iné optimalizačné postupy, si vyžaduje formuláciu účelovej funkcie (tzv. fitness), ktorá reprezentuje samotný optimalizovaný problém. Reprodukciou dvoch jedincov s vysokým fitness dostávame potomkov, ktorí budú s vysokou pravdepodobnosťou dobre prispôbení na úspešné prežitie.

#### 3.3.2.1 Základné pojmy genetického algoritmu

Základnou jednotkou informácie v živých organizmoch je **gén**, ktorý je definovaný ako časť chromozómu a tá určuje alebo ovplyvňuje jednoduchú vlastnosť – fenotyp, napr. farbu vlasov. GA predpokladá, že možné riešenie nejakého problému je individuálne a môže byť reprezentované skupinou parametrov – génmi chromozómu. **Chromozóm** je biologický jedinec, ktorý reprezentuje lineárne usporiadaným spôsobom informačný obsah jedinca (fenotyp). Reprezenačnú vzorku predstavujú reťazce, ktoré môžu byť binárne, celočíselné, reálnečíselné, symbolové a taktiež môžu predstavovať aj ich kombinácie.

Skupinu chromozómov (reťazcov) nazývame **populácia**. Matematicky ju môžeme chápať ako dvojrozmerné pole. Keďže je GA optimalizačným algoritmom, tak potrebuje účelovú funkciu, ktorú v terminológii evolučných výpočtov reprezentuje **fitness** funkcia. Fitness značí úspešnosť jedincov, t.j. najlepšou fitness v prípade maximalizačnej úlohy je čo najväčšia hodnota účelovej funkcie, v prípade minimalizačnej je to naopak [1], [2].

**Mutácia** je operácia kde náhodne zvolený gén v populácii zmení svoju hodnotu na inú hodnotu z prehľadávaného priestoru. V závislosti od riešeného problému je možné mutáciu uskutočňovať viacerými spôsobmi:

- **Všeobecná mutácia** – hodnota vybraného génu sa zmení na náhodnú hodnotu jemu

zodpovedného reťazca. Pri binárnom kódovaní reťazcov sa hodnota jedného bitu zmení na jeho doplnkovú hodnotu

- **Aditívna mutácia** - k hodnote vybraného génu sa pripočíta / odpočíta náhodné číslo z definovaného rozsahu. Dá sa ale použiť len pri celočíselnom alebo reálnečíselnom kódovaní.
- **Multiplikatívna mutácia** - hodnota vybraného génu sa vynásobí náhodným číslom z definovaného rozsahu. Dá sa tiež použiť len pri celočíselnom alebo reálnečíselnom kódovaní.

**Kríženie** je operácia, pri ktorej sa 2 rodičovské reťazce rozdelia na 2 alebo viac častí v náhodne zvolených miestach, ale na rovnakých pozíciách. Okrem spomínaných krížení existuje aj medziľahlé, maskované a diskkrétne kríženie.



Obr. 3.8 Jednobodové kríženie reálnečíselného reťazca



Obr. 3.9 Viacbodové kríženie reálnečíselného reťazca

**Výber** (selekcia) je operácia, pri ktorej sa z rodičovskej populácie zvoleným spôsobom vyberie skupina jedincov - reťazcov a vytvorí sa nová populácia spravidla rovnakej veľkosti. Existuje viacero možností výberu:

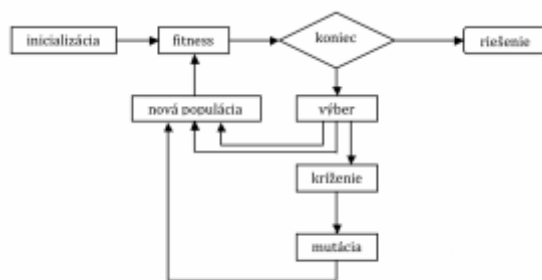
- Deterministický výber, napr.: podľa úspešnosti, priamo úmerne ich hodnotám fitness
- Náhodný výber
- Kombinácie a modifikácie prípadov - najčastejšie používané

### 3.3.2.2 Princíp GA

Skôr ako sa samotný GA začne realizovať treba zabezpečiť tieto body:

1. Určiť spôsob zakódovania parametrov, optimalizovaných objektov do lineárneho reťazca.
2. Ohraničiť prehľadávaný priestor riešení.
3. Formulovať účelovú funkciu.
4. Zvoliť veľkosť populácie (10 až 100).

Genetický algoritmus môže byť zostavený rôzne, ale podstavu majú všetky rovnakú. My sme si vybrali nasledovný algoritmus



Obr. 3.10 Štruktúra GA

Prvým krokom je vygenerovanie počiatkovej populácie. Môže sa vygenerovať buď úplne náhodne, alebo ak máme k dispozícii „zmysluplné“ riešenia, môže byť zostavená aj z nich. Potom sa vyhodnotí účelová funkcia – fitness každého reťazca v populácii. Ak sú splnené ukončovacie podmienky GA, vyberie sa najúspešnejší jedinec aktuálnej populácie ako výsledné riešenie. Ale pokiaľ nie sú splnené ukončovacie podmienky, nasleduje výber 2 skupín reťazcov. Najskôr sa vyberie jedna skupina najúspešnejších reťazcov aktuálnej populácie.

Tie sa bezo zmeny skopírujú do novej populácie. Skopírovaním najlepšieho reťazca sa zabezpečila monotónna konvergencia úlohy – najlepšie riešenie v nasledujúcej generácii nemôže byť horšie. Ďalšia skupina sa bezo zmeny posunie do novej populácie. Zostávajúca skupina prejde zmenami kríženia a mutácie. Kompletná populácia vznikne zjednotením všetkých 3 skupín a pokračuje sa vyhodnotením, či boli splnené ukončovacie podmienky. Medzi ukončovacie podmienky môže patriť:

- Splnenie vopred definovaných podmienok
- Skončenie predpísaného počtu generácií riešenia
- Podoba jednotlivých reťazcov v populácii
- Nemennosť hodnoty účelovej funkcie

## Podakovanie

Tento článok vznikol s podporou APVV VMSP-II-0015-09.

## Literatúra

1. Žalman M., Jovankovič J., Inteligentné Servosystémy, Slovenská e-akadémia, n.o. 2007, Bratislava
2. Sekaj I., Evolučné výpočty a ich využitie v praxi. Iris, Bratislava 2005.
3. Žalman M., prednášky Servosystémy, dostupné na:  
[http://servo.urpi.fei.stuba.sk/index.php?option=com\\_content&task=view&id=14&Itemid=26](http://servo.urpi.fei.stuba.sk/index.php?option=com_content&task=view&id=14&Itemid=26)
4. Žalman M., Jovankovič J., Uriček M.: Master-Slave riadenie polohových servopohonov, AT&P journal č. 2, 3, 4/2005
5. <http://www.posterus.sk/?p=7993>
6. [http://www.compumotor.com/catalog/c75\\_78.pdf](http://www.compumotor.com/catalog/c75_78.pdf)
7. Khater, F.; Shaltout, A.; Hendawi, E.; Abu El-Sebah, M.; , “PI controller based on genetic algorithm for PMSM drive system,” Industrial Electronics, 2009. ISIE 2009. IEEE International Symposium on , vol., no., pp.250-255, 5-8 July 2009 doi: 10.1109/ISIE.2009.5217925 URL:



<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5217925&isnumber=5213059>

8. [8] Solano, J.; Jones, D.I.; "Parameter determination for a genetic algorithm applied to robot control," Control, 1994. Control '94. International Conference on , vol.1, no., pp.765-770 vol.1, 21-24 March 1994 doi: 10.1049/cp:19940229 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=327048&isnumber=7757>
9. [9] Wang, Y.P.; Hur, D.R.; Chung, H.H.; Watson, N.R.; Arrillaga, J.; Matair, S.S.; , "A genetic algorithms approach to design an optimal PI controller for static VAR compensator," Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on , vol.3, no., pp.1557-1562 vol.3, 2000 doi: 10.1109/ICPST.2000.898203 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=898203&isnumber=19429>
10. Anderle, V.: Využití principu MASTER\_SLAVE pro řízení elektrických pohonů, Elektrotechnický obzor 72 ,1983 číslo 8
11. George Ellis ,Robert D. Lorenz- Comparison of Motion Control Loops for Industrial Applications,copyright 1999, Darnel Group, Inc. <http://www.darnell.com>

#### Zdroje k citovaným obrázkom

- Obr. 3.8 Sekaj I., Evolučné výpočty a ich využitie v praxi. Iris, Bratislava 2005
- Obr. 3.9 Sekaj I., Evolučné výpočty a ich využitie v praxi. Iris, Bratislava 2005
- Obr. 3.10 Sekaj I., Evolučné výpočty a ich využitie v praxi. Iris, Bratislava 2005