

Aplikace evolučních algoritmů v problematice směrových vlastností pneumatik

Bc Radovan Chmelík

Diplomová práce
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav aplikované informatiky
akademický rok: 2005/2006

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radovan CHMELÍK**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační technologie**

Téma práce: **Aplikace evolučních algoritmů v problematice směrových vlastností pneumatik.**

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je použít metody evolučních algoritmů a symbolické regrese na optimalizaci a návrh struktury modelu směrových vlastností pneumatik. Obsahem práce bude syntéza a optimalizace modelu směrových vlastností pneumatik na základě poskytnutých naměřených reálných dat. Jako metoda symbolické regrese bude použito analytické programování.

- 1. Vypracujte literární rešerši na téma evoluce a design pneumatik.**
- 3. Navrhňte způsob optimalizace těchto návrhů , s využitím metod evolučních algoritmů.**
- 4. Způsob optimalizace aplikujte na reálné zadání a výsledky podrobte srovnávací analýze.**
- 5. Připravte navržený způsob optimalizace pro využití v praxi.**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] ZELINKA, Ivan. Umělá inteligence I. Volume 1. Zlín : Vutium, Brno, 1998. 126 p. ISBN 80-214-1163-5.

[2] ZELINKA, Ivan , Umělá inteligence / kap.6 Diferenciální evoluce, Academia, 33 p.

[3] Kvasnička V., Pospíchal J., Tiňo P. 2000, Evoluční algoritmy, STU Bratislava, ISBN 85-246-2000, 2000

[4] ZELINKA, Ivan , New Optimization Techniques in Engineering / kap.7 SOMA - Self Organizing Migrating Algorithm, Springer-Verlag

Koza J.R. 1998, Genetic Programming, MIT Press, ISBN 0-262-11189-6, 1998

Koza J.R., Bennet F.H., Andre D., Keane M. 1999, Genetic Programming III, Morgan Kaufmann pub., ISBN 1-55860-543-6, 1999

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Ivan Zelinka, Ph.D.

Ústav aplikované informatiky


Datum zadání diplomové práce:

14. února 2006

Termín odevzdání diplomové práce:

26. května 2006

Ve Zlíně dne 14. února 2006


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
pověřený děkan




doc. Ing. Ivan Zelinka, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá měřením dynamických vlastností pneumatik a jejich následným vyjádřením vhodnou funkcí. Pro hledání takové funkce byl použit empirický model pneumatiky, který je zčásti založen na fyzikálním popisu generování sil v pneumatice. Pro hledání vhodného tvaru takového modelu byly použity evoluční algoritmy, a to konkrétně diferenciální evoluce a algoritmus SOMA.

Pro hledání takové rovnice metodou symbolické regrese byla použita metoda analytického programování.

Klíčová slova: magický vzorec, optimalizace, diferenciální evoluce, SOMA, analytické programování

ABSTRACT

The thesis concerns with measuring the dynamic characteristics of tires and their subsequent formulation by a suitable function. An empirical model of tire, which is partially based on the physical description of power generation in a tire, has been used for searching such a function. For searching a suitable shape of such a model I have used the evolutionary algorithms, concretely differential evolution and algorithm SOMA.

The analytical programming method has been utilized for searching such an equation by the method of symbolic regression.

Keywords: magic formula, optimalization, differential evolution, SOMA, analytical programming

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Ivanovi Zelinkovi Ph.D, vedoucímu diplomové práce, za odborné vedení, poskytnuté rady a pozornost, kterou mi věnoval při vypracování této diplomové práce. Všem ostatním děkuji za pochopení a podporu, kterou mi projevovali při zpracování této diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD.....	8
I TEORETICKÁ ČÁST.....	9
1 FYZIKÁLNÍ MODEL PNEUMATIKY.....	10
1.1 SMĚROVÉ VLASTNOSTI PNEUMATIK.....	10
1.2 SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY PNEUMATIK.....	11
1.3 MODEL PNEUMATIKY PRO MAGICKÝ VZOREC.....	12
1.4 MĚŘENÍ A VYHODNOCOVÁNÍ DYNAMICKÝCH SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK PNEUMATIK.....	14
1.4.1 Podmínky měření	14
1.4.2 Zpracování výsledků.....	14
2 EVOLUČNÍ ALGORITMY.....	16
2.1 SIMULOVANÉ ŽIHÁNÍ.....	16
2.2 GENETICKÉ ALGORITMY.....	20
2.2.1 Princip genetického algoritmu.....	20
2.2.2 Navržení genetické struktury.....	21
2.2.3 Inicializace.....	21
2.2.4 Ohodnocení.....	21
2.2.5 Volba rodičů.....	22
2.2.6 Reprodukce.....	22
2.2.7 Mutace	22
2.3 DIFERENCIÁLNÍ EVOLUCE.....	23
2.4 SOMA.....	25
2.4.1 Princip:.....	25
2.4.2 Nastavení jednotlivých parametrů.....	26
2.4.3 Populace.....	26
2.4.4 Mutace.....	27
2.4.5 Strategie.....	27
2.5 GENETICKÉ PROGRAMOVÁNÍ.....	29
2.5.1 Symbolická regrese a Readův kód	29
2.5.2 Gramatická evoluce.....	31
2.5.3 Analytické programování.....	33
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	36
2.6 ŘEŠENÍ „EVOLUČNÍMI ALGORITMY“.....	37
2.7 PLÁŠŤ 315/80 R22,5	42
2.7.1 Přítlačná síla 22,5 kN Tlak 660 kPa.....	42
2.7.2 Přítlačná síla 30, kN Tlak 660 kPa.....	46
2.7.3 Přítlačná síla 37,5 kN Tlak 660 kPa.....	50
2.7.4 Přítlačná síla 45 kN Tlak 660 kPa.....	54
2.7.5 Přítlačná síla 52,5 kN Tlak 660 kPa.....	58
2.8 PLÁŠŤ 205/70 TR14	62

2.8.1	Přítlačná síla 3,81 kN Tlak 240 kPa.....	62
2.8.2	Přítlačná síla 5,08 kN Tlak 240 kPa.....	66
2.8.3	Přítlačná síla 6,35 kN Tlak 240 kPa.....	70
2.8.4	Přítlačná síla 7,62 kN Tlak 240 kPa.....	74
2.8.5	Přítlačná síla 8,89 kN Tlak 240 kPa.....	78
2.9	ŘEŠENÍ „ANALYTICKÝM PROGRAMOVÁNÍM“	82
3	ZÁVĚR.....	85
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	86
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	87
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	88
	SEZNAM TABULEK.....	91

ÚVOD

Mechanické vlastnosti pneumatik mají výrazný vliv na bezpečnou jízdu vozidla, a proto výrobci pneumatik věnují spoustu úsilí výzkumu a vývoji nových směsí a složení nových výrobků. Tento vývoj se neobejde bez kvalitního zkušebnictví a zpracování naměřených hodnot v počítačových systémech a aplikacích jako jsou například MARK nebo ANSYS a následná aplikace zjištěných výsledků v nových výrobcích.

V této práci jsem se zabýval zpracováním naměřených hodnot boční síly a vratného momentu a aproximací naměřených grafů takovou funkcí, která umožní odečítání hodnot i mezi měřenými místy a kterou by bylo možné použít i pro definování dynamických vlastností dané pneumatiky v simulačním programu MARK, který používají vývojáři firmy MITAS. Pro nalezení vhodné funkce jsem vyšel z práce Hanse Pacejky a Erberta Bakera a jejich „Magického vzorce“, kterým se jim podařilo aproximovat měřená data boční síly a vratného momentu. Tato rovnice je řízena čtyřmi parametry, které jsem se snažil najít. K nalezení těchto parametrů jsem použil metody evolučních algoritmů a to konkrétně „diferenciální evoluci“ a algoritmus „SOMA“. Diferenciální evoluci jsem použil v sedmi variantách výpočtu šumového vektoru a algoritmus SOMA byl použit ve čtyřech strategiích. Získané hodnoty jsem uspořádal v tabulce a vyhodnotil nejlepší a nejhorší dosaženou hodnotu. Pro ověření vhodnosti použité metody jsem ji aplikoval na naměřená data dvou naprosto rozdílných pneumatik. U obou pneumatik se mi podařilo najít vhodné koeficienty „magického vzorce“ s tím, že výsledná rovnice aproximovala naměřená data s dostatečnou přesností.

Pro nalezení vlastní rovnice, kterou by bylo možno nahradit „magický vzorec“, jsem použil metodu symbolické regrese, a to konkrétně „analytické programování“. Touto metodou se mi podařilo najít několik vhodných rovnic, které by bylo možno použít pro aproximaci naměřených dat. Celá práce je doplněna grafy, které demonstrují úspěšnost použitých metod.

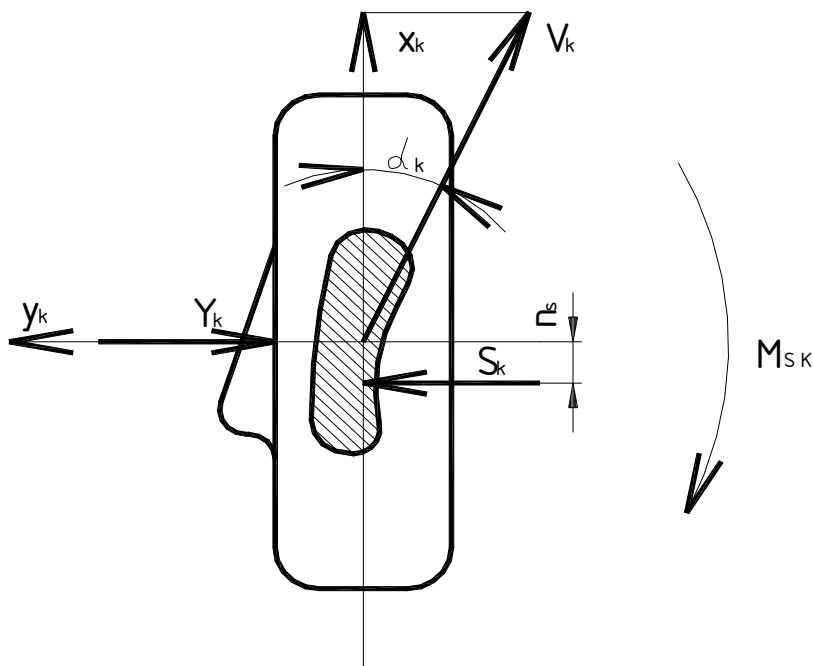
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 FYZIKÁLNÍ MODEL PNEUMATIKY

1.1 Směrové vlastnosti pneumatik

Vlastnosti pneumatik výrazně ovlivňují jízdní vlastnosti vozidel. Mezi nejdůležitější vlastnosti pneumatik patří jejich směrové vlastnosti. Směrové vlastnosti pneumatik vyjadřují boční síla, vratný moment, závlek pneumatiky a úhel směrové úchytky. V této práci bych se chtěl zabývat dvěma z nich, a to boční silou a vratným momentem a jejich následným vyjádřením pomocí „Magického vzorce“, který formuloval Hans Pacejka a Egbert Bakker. [9]

Jestliže se kolo pohybuje bez boční síly, směrové úchytky a vratný moment jsou nulové. Při působení boční síly Y_k v ose otáčení kola vzniká ve stopě pneumatiky vodorovné boční reakce S_k – boční vodící síla kola. Pneumatika se v bočním směru deformuje, stopa se bočně vychýlí. Při otáčení pneumatiky pak vzájemný posuv a deformace elementů běhounu způsobuje odchylku směru pohybu pneumatiky od směru podélné osy kola. Tento úhel α_k mezi vektorem rychlosti kola V_k a podélnou osou kola x_k se nazývá úhel směrové úchytky. Ve stopě pneumatiky pak vznikají elementární síly, které narůstají směrem k zadnímu konci stopy. Jejich výslednice – boční vodící síla S_k -neleží tedy v ose otáčení kola y_k , ale je posunutá dozadu o tzv. závlek pneumatiky n_s , viz obr. 1.



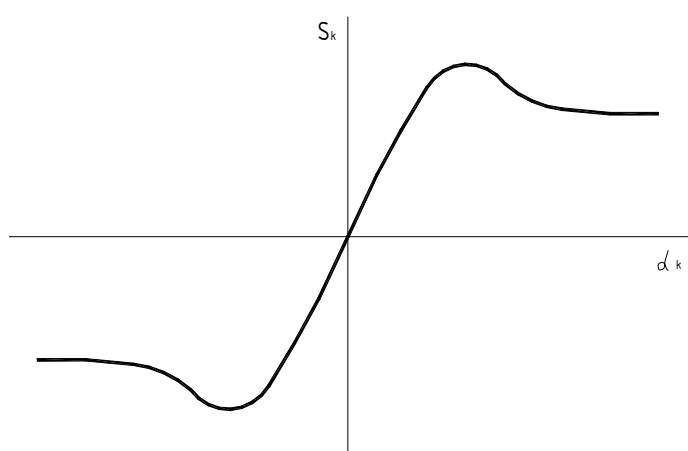
Obr1. Silové poměry na pneumatice

Na kolo pak působí vratný moment pneumatiky M_k podle rovnice 1. [10,11]

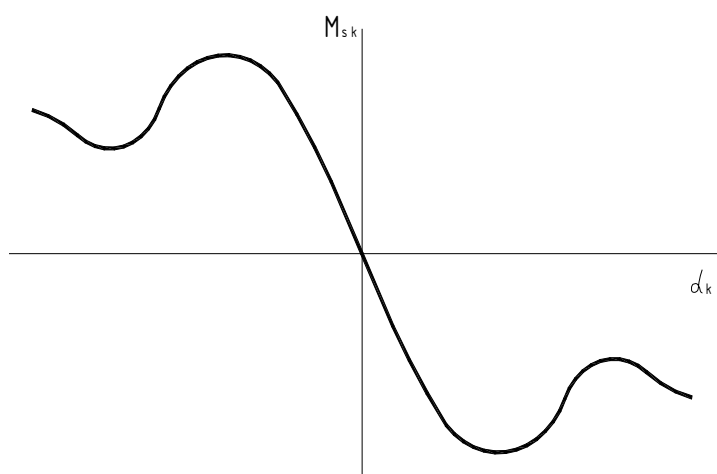
$$M_{sk} = S_k * n_s \quad (1)$$

1.2 Směrové charakteristiky pneumatik

Závislosti boční vodící síly S_k a vratného momentu M_{sk} na úhlu směrové úchylky kola α_k se vynášejí do diagramů, a proto tyto diagramy vyjadřují vlastnosti pneumatiky z hlediska dynamiky. Typické tvary těchto charakteristik jsou znázorněny v grafu na obr. 2 a obr. 3. [8,9]



Obr 2. Závislost boční síly na směrové úchylce



Obr 3. Závislost vratného momentu na směrové úchylce

Tyto charakteristiky jsou získávány na základě měření na zkušební pneumatik.

1.3 Model pneumatiky pro magický vzorec

V literatuře lze najít řadu modelů popisujících vznik sil a momentů v pneumatice. Tyto modely byly vyvinuty pro použití v dynamice vozidel. Některé jsou založeny na fyzikálním popisu pneumatiky, jiné jsou v podstatě empirické. Skoro všechny modely snaží se o větší, či menší přesnost popisu naměřených charakteristik mají alespoň částečný empirický základ.

Poměrně nedávno byl vytvořen empirický model pneumatiky, který je zčásti založen na fyzikálním popisu generování sil v pneumatice, a ten se dále zdokonaloval a zlepšoval. Práce na modelu probíhaly v kooperaci Technologické university v Delftu a automobilové společnosti Volvo. Model je schopen přesného popisu závislosti sil a momentů v ustáleném režimu a je použitelný při simulaci dynamiky vozidel. Jádrem modelu je vzorec, který se stal známým jako „magický vzorec“ nebo také „magická formule“. Tento vzorec vyjadřuje silové a momentové charakteristiky v podmínkách čistého skluzu, tj. buď při samotném zatáčení (s možným zahrnutím odklonu kola), nebo v samostatném záběru či brzdění.

Pro vyjádření sil a momentů ve složených podmínkách (např. při brzdění v zatáčce) tento model umožňuje svoje rozšíření a to tím, že se vhodně kombinují vztahy platné pro čistý skluz.

„Magické formule“ se dá požívat v jednoduchém případě samotného bočního nebo obvodového skluzu. Rovnice vyjadřují axiální sílu F_y , vratný moment M_x a obvodovou sílu F_x jako funkci úhlu směrové úchyly α_k , popř. obvodového skluzu κ . Obecný tvar vzorce, který platí pro zadanou hodnotu vertikálního zatížení a daný úhel odklonu kola, vypadá takto:

$$y(x) = D * \sin[C * \arctan \{Bx - E(Bx - \arctan(Bx))\}] \quad (2)$$

kde

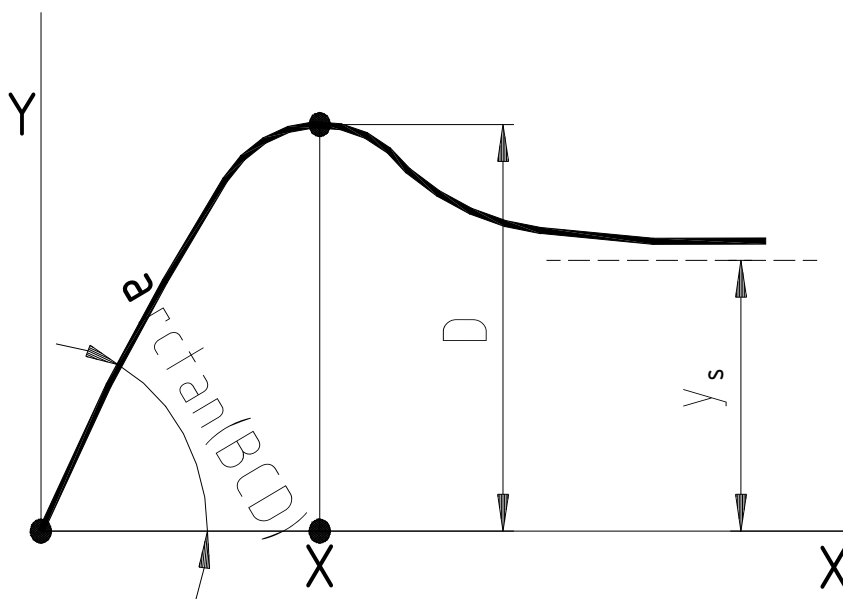
$$Y(X) = y(x) + Sv \quad (3)$$

$$x = X + Sh \quad (4)$$

Magický vzorec popisuje křivku, která prochází počátkem $x=y=0$, dosahuje maxima

a pak se blíží horizontální asymptotě. Pro konstantní koeficienty B,C,D a E je funkce lichá. Rovnice umožňuje vytvářet křivky, které těsně aproximují naměřené charakteristiky, boční síly S_k , vratného momentu M_k a obvodové síly F_x v závislosti na charakteristikách skluzu, tj. úhlu směrové úchylky α a podélného skluzu κ . Výstupní veličinou Y může být F_y , M_z nebo F_x a vstupní veličinou X může být α nebo κ .

Na obrázku je znázorněn význam některých koeficientů na typické charakteristice boční síly při zatáčení. Posunutí S_h a S_k jsou důsledkem konicity a úhlového účinku, jejichž vlivem závislosti F_y a M_z neprocházejí počátkem. Podobně se valivý odpor může projevit posunem počátku u obvodové síly F_x . Také odklon roviny kola a úhel γ od vertikálního směru může způsobit značný posun počátku v grafu funkce $F_y(\alpha)$, tedy poruchou lichosti. Adaptovaná verze vzorce umožňuje dosáhnout lepší shody výpočtu s měřením při nenulovém odklonu. Rovněž se dá vystihnout rozdíl tvaru grafu obvodových sil F_x při brzdění či záběru.



Obr4. Typická charakteristika se znázorněním některých parametrů v magickém vzorci

Koeficient D zřejmě znamená maximální hodnotu (na kladné poloose x) a součin BCD odpovídá směrnicí v počátku ($x=y=0$). Parametr C řídí rozpětí argumentu sinové funkce a tím určuje tvar výsledné křivky. Obvyklé hodnoty tvarového faktoru C jsou $C=1,3$ pro boční sílu, $C=2,4$ u vratného momentu a $C=1.654$ u obvodových sil. Parametr B nastavuje směrnicí počátku, a proto se mu říká faktor tuhosti. Poslední parametr E slouží změně křivosti křivky y v okolí vrcholu. E současně určuje skluz x_m , při kterém dosahuje maxima. [9]

1.4 Měření a vyhodnocování dynamických směrových charakteristik pneumatik

1.4.1 Podmínky měření

Měření musí probíhat za ustálených dynamických podmínek, tedy za podmínek, které jsou neproměnné s časem nebo které se mění tak pomalu, že dynamické vlivy jsou zanedbatelné. Tyto podmínky se nazývají kvazi-statické. Použitá metodika zahrnuje měření při konstantní rychlosti bubnu s definovaným povrchem při pěti radiálních zatíženích nepravidelně se měnících od 60% do 140% maximálního dovoleného zatížení. Úhel směrové úchyly je plynule měněn s časem v intervalu (0° až $+\alpha$), ($+\alpha$ až $-\alpha$), ($-\alpha$ až 0°). Úhel odklonu a huštění zůstávají po dobu měření konstantní. V metodice je doporučeno provést měření při tlacích 80%, 100% a 120% huštění odpovídajícím maximálnímu dovolenému zatížení. Pro účely modelování je vhodné provést i měření při úhlech odklonu $0^\circ, \pm 1^\circ, \pm 3^\circ, \pm 5^\circ$. Potom je možné interpolovat v celém experimentálním prostoru. Při měření se pneumatika odvaluje po ocelovém bubnu o průměru 2000 mm opatřeném povrchem typu „Safety walk“ 3M, který se drsností blíží asfalto - betonové vozovce. Rychlost bubnu při zkoušce je 50 km/h. Po tepelné stabilizaci (minimálně 45 minut) je měřena boční síla a vratný moment při měnícím se směrovém úhlu. Maximální rychlost změny směrového úhlu je $0.5^\circ/\text{s}$. Měření je provedeno v pěti zatěžovacích cyklech se stabilizací 15 minut po každé změně zatížení.

1.4.2 Zpracování výsledků

Pro vyhodnocování zkoušek sil a momentů je důležité respektovat souřadný systém zavedený komisí SAE. Systém obsahuje tři vzájemně kolmé síly a tři momenty. Tyto složky sil a momentů jsou ovlivňovány hlavně kinematickými proměnnými - radiální deformací, úhlem směrové úchyly a úhlem odklonu. Protože existuje úzký vztah mezi radiální silou a deformací, bývá radiální síla uvažována jako nezávisle proměnná namísto radiální deformace. Při měření jsou do archivačního souboru ukládány hodnoty rychlosti bubnu, radiální síly, boční síly, vratného momentu, směrového úhlu a klopného momentu. V průběhu měření je pro každé zatížení zobrazen na obrazovce počítače graf, ve kterém je závislost boční síly i vratného momentu na úhlu směrové úchyly. Teoreticky by obě závislosti měly být pro směrový úhel $\alpha = 0^\circ$ nulové. Výrobní nepřesnosti a

konstrukce pneumatik ale způsobují posunutí obou křivek a asymetrii podle vertikální osy.

Měření a vyhodnocení výsledků v automatizovaném režimu nesporně přináší úsporu lidské práce a zrychluje výzkum a vývoj nových typů pneumatik. Je známo, že laboratorní měření určuje vlastnosti v řízené a idealizované situaci, která obvykle neodpovídá podmínkám při provozu vozidla. Zkušenosti s měřením však ukazují, že tyto zkoušky poskytují velmi užitečné materiály pro hodnocení a modelování vlastností pneumatiky. Připojení PC k pětikomponentní měřící hlavě Hofmann umožnilo její rutinní využití. Archivace souborů v průběhu měření umožňuje kdykoliv vytisknout protokoly a statisticky porovnávat výsledky měření.

2 EVOLUČNÍ ALGORITMY

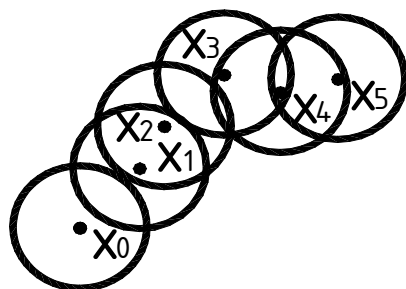
Princip evolučních algoritmů je založen na cyklické tvorbě generací nových jedinců, u nichž se posuzuje vhodnost na základě hodnot účelové funkce. Účelová funkce je funkce, kterou chceme optimalizovat a nalézt příslušný extrém. Vhodnější jedinci vítězí v konkurenci a nahrazují jedince méně vhodné. Tím dochází k tomu, že kvalita jedinců má vzestupný charakter, přičemž dostáváme jedince, jejichž hodnota účelové funkce se blíží k optimu. Mezi vhodné algoritmy, které by bylo možné použít pro vyhledání parametrů „magického vzorce“, patří Simulované žihání, Genetický algoritmus, Diferenciální evoluce a SOMA. V této práci jsem použil dva poslední, a to Diferenciální evoluci a algoritmus SOMA. [5,6]

2.1 Simulované žihání

Simulované žihání je jednou z heuristických metod používaných k nalezení globálně optimálního, případně suboptimálního řešení složitých kombinatorických úloh. Tyto úlohy jsou většinou NP-úplné. To znamená, že mají velmi rozsáhlý prostor přípustných řešení a není možné v rozumném čase všechna řešení otestovat a najít nejlepší řešení (globálně optimální). Metoda simulovaného žihání má fyzikální základ a inspirováno je tzv. horolezeckým algoritmem, který systematicky prohledává stavový prostor všech řešení a snaží se najít řešení optimální. Jde vlastně o variantu gradientové metody “bez gradientu”, kdy se směr nejprudšího spádu určí prohledáním okolí. Aby bylo možné posoudit, jak je určité řešení dobré je potřeba funkce, která je schopna ohodnotit jakékoliv řešení patřící do prostoru všech řešení. Tato funkce se nazývá účelová funkce nebo též cenová funkce. Tato funkce je zobrazením z množiny všech řešení \mathbf{X} do množiny reálných čísel $f(\mathbf{x}): \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{R}$

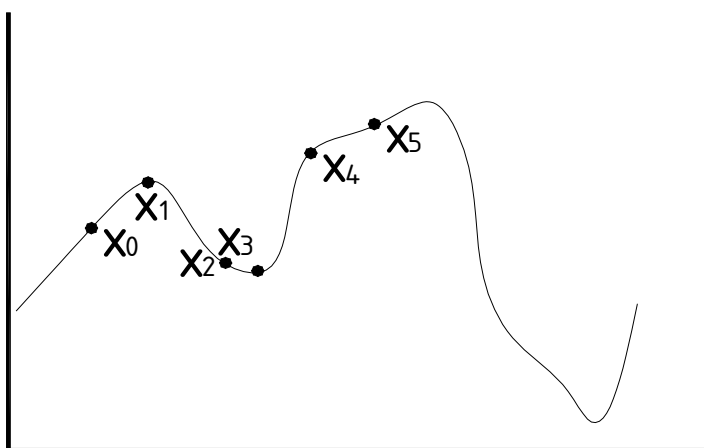
(1) Z potřeby této funkce však vyplývá, že připadají v úvahu pouze problémy, pro které lze účelovou funkci sestavit. Princip horolezeckého algoritmu lze popsat následujícími kroky. Na počátku se náhodně vygeneruje počáteční řešení $\mathbf{x}_0 \in \mathbf{X}$ a položí se rovno výchozímu řešení $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$. V dalších krocích se postupně generuje použitím konečného souboru transformací k řešení ležících v určitém okolí výchozího řešení \mathbf{x} : $\mathbf{x}_i \in U(\mathbf{x})$, $i = 1 \dots k$. Z těchto řešení se vybere to, které má z hlediska účelové funkce nejvyšší ohodnocení, tedy nejmenší hodnotu účelové funkce, a prohlásí se za nový střed okolí. ($\mathbf{x}_{k+1} = \arg \min_{\mathbf{x}_i \in U(\mathbf{x})} f(\mathbf{x}_i)$)

(2). Počet kroků je předem daný a algoritmus po jejich dosažení končí. Během výpočtu se zaznamenává nejlepší nalezené řešení a to je výsledkem celé simulace.



Obr 5. Princip Horolezeckého algoritmu

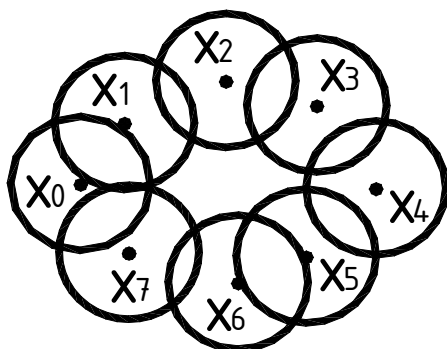
Nevýhodou tohoto přístupu je, že během celého výpočtu se akceptují buď stejně dobrá nebo lepší řešení než bylo řešení výchozí. Díky tomu se většinou stává, že se metoda dostane k nevýraznému lokálnímu minimu blízko od počátečního náhodně vygenerovaného řešení a již nikdy nedosáhne řešení optimálního. Tento nedostatek je možné odstranit tak, že se algoritmus spouští opakovaně, a tím náhodně volí počáteční řešení úlohy. Za výsledné řešení se vezme nejlepší nalezený výsledek. Stochastičnost této metody spočívá pouze v náhodném výběru počátečního řešení, neboť následně použitý optimalizační algoritmus postupuje systematicky bez jakékoliv náhodnosti.



Obr 6. Problém uváznutí v lokálním minimu, řešení se ustálí v okolí x_2 a x_3

Dalším nebezpečím je opakovaný návrat k lokálně optimálnímu řešení, ze kterého se již vycházelo čímž dochází k zacyklení. Tento problém celkem úspěšně řeší metoda Tabu Search, která si uchovává historii již vyzkoušených řešení (přesněji řečeno si uchovává použité transformace z výchozího řešení k novému). Pokud by pak měla být použita

některá z transformací inverzních k uchovaným transformacím v zakázaném seznamu, jednoduše se ignoruje. Velikost historie je kapacitně omezena a nastavení hloubky velmi značně ovlivňuje schopnost metody necyklit.



Obr. 7. Problém zacyklení a oscilace řešení

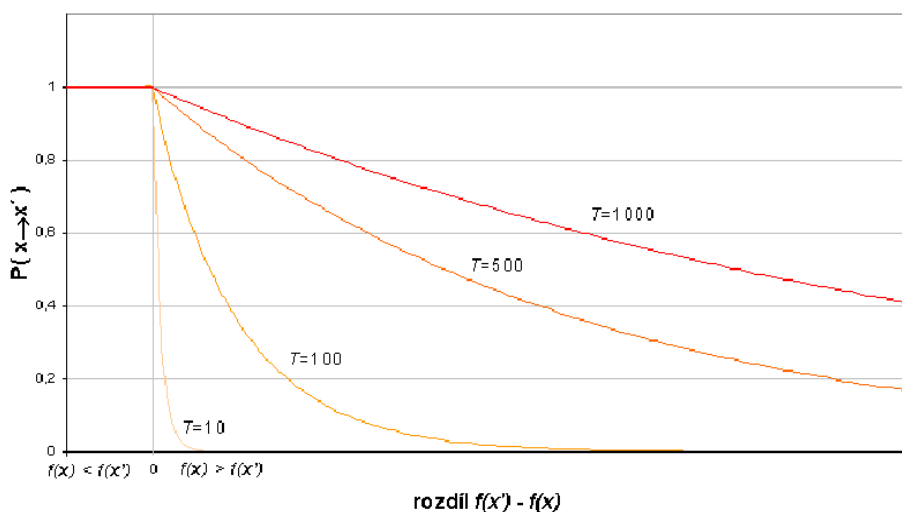
Uvážnutí v lokálním minimu úspěšně řeší metoda simulované žíhání, která využívá stochastické operátory a na rozdíl od horolezeckého algoritmu přijímá s jistou pravděpodobností (danou Metropolisovým kritériem) i řešení horší, než bylo výchozí řešení x . Tuto metodu již lze právem nazývat stochastickou, neboť vzorkuje po celém prostoru řešení. Dalším rozdílem je, že se negeneruje okolí a nevybírání se nejlepší řešení, ale určitým operátorem se stochasticky transformuje výchozí řešení x na nové x' . Tím se zajistí rozptýlení po celém prostoru a nikoliv pouze v jeho malé části.

Inspirační metodou je fyzikální děj probíhající při žíhání tuhého tělesa, které se používá k odstranění vnitřních defektů. Odtud pochází i název metody. Těleso se zahřeje na vysokou teplotu, která se postupně snižuje. Tím se umožní jeho atomům překonávat energetické bariéry a dostat se do rovnovážných poloh. Postupné snižování má za následek, že rovnovážné polohy atomu se stabilizují, takže při konečné teplotě žíhání, která je podstatně nižší než počáteční, jsou všechny atomy v rovnovážných polohách a těleso neobsahuje žádné vnitřní defekty. Na myšlenku, že by se jevu probíhajícího při žíhání tuhého tělesa mohlo využít hledání globálního minima, přišli začátkem osmdesátých let Kirkpatrick, Gelatt a Vecchiz výzkumného centra IBM (Watson Research Center of the IBM, USA). Tento nový přístup k hledání **globálního minima** byl nazván *simulované žíhání*. Nejdříve bylo zapotřebí nahradit fyzikální realizaci žíhání numerickou simulací. Inspiraci našli v algoritmu z padesátých let, kdy použil Metropolis a jeho spolupracovníci numerickou simulační metodu Monte Carlo pro výpočet termodynamických konstant plynu. Simulovali

vývoj fyzikálního systému směrem k tepelné rovnováze pro určitou konstantní teplotu T . V souvislosti s tímto uvažujeme o nějakém stavu systému \mathbf{x} , tento stav se poruší na nový stav $\mathbf{x}' = O_{\text{pert}}(\mathbf{x})$, kde O_{pert} je stochastický operátor poruchy. To, zda bude nový stav \mathbf{x}' akceptován se řeší pomocí tzv. **Metropolisova kritéria**, které určuje pravděpodobnost nahrazení starého stavu novým.

$$P(\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}') = \begin{cases} 1 & \text{pro } f(\mathbf{x}') \leq f(\mathbf{x}) \\ e^{-\frac{f(\mathbf{x}') - f(\mathbf{x})}{T}} & \text{pro } f(\mathbf{x}') > f(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (5)$$

Parametr T je teplota systému. V případě, že nový stav \mathbf{x}' má menší nebo stejnou funkční hodnotu jako původní stav \mathbf{x} , potom se stav \mathbf{x} změní na \mathbf{x}' . V opačném případě je nový stav akceptován s pravděpodobností v rozmezí $0 < P(\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}') \leq 1$



Obr 8. Průběh Metropolisova kritéria v záv. na rozdíl $f(\mathbf{x}') > f(\mathbf{x})$ a nastavené teplotě

Hodnota parametru teploty T podstatně ovlivňuje hodnotu pravděpodobnosti přijetí nového stavu pro případ $f(\mathbf{x}') > f(\mathbf{x})$. Pro velké hodnoty T je tato pravděpodobnost blízká jedné, tzn. akceptují se téměř všechny nové stavy. Pokud se T blíží k nule, potom pravděpodobnost přijetí se blíží nule, tzn. jen výjimečně se akceptuje nový stav s vyšší funkční hodnotou (obr. 4). Tento fakt lze interpretovat následovně: na počátku se přijímají s jistou nenulovou pravděpodobností řešení, které jsou ohodnocena horší hodnotou účelové funkce než řešení výchozí. Tím se dovolí velké skoky v prohledávaném prostoru řešení. S postupným snižováním teploty se tato pravděpodobnost zmenšuje, což lze vyložit tak, že se pouze doladuje nalezený výsledek. To, jakým způsobem se bude snižovat teplota, záleží na

řešeném problému. Toto určuje tzv. plán chlazení. Jednou možností je měnit teplotu skokově a to po diskretních hladinách, jinou jednodušší a častěji používanou metodou je násobení koeficientem $0 \ll \alpha < 1$, tzn. $T \leftarrow \alpha T$. V praxi se ukazují jako nejvhodnější hodnoty koeficientu α mezi 0.8 a 0.99. Jinou sofistikovanější metodou je řídit teplotu pomocí genetického algoritmu. Ukazuje se, že tato modifikace vede k lepším výsledkům, neboť genetický algoritmus ihned reaguje na stav systému a může teplotu řídit podle potřeb. Metoda simulovaného žíhání je velmi výkonnou heuristickou metodou pro řešení složitých optimalizačních úloh. Modifikace této metody našla uplatnění zejména v počítačové chemii při hledání optimální geometrie molekul, obsahujících desítky až stovky atomů, v závislosti na jejich poloze. Tím se podařilo překonat velký numerický problém, neboť tato úloha je klasickými optimalizačními metodami velmi obtížně řešitelná. Nevýhodou simulovaného žíhání je mnoho nastavitelných parametrů a tedy mnoho stupňů volnosti. To vyžaduje expertní znalost problému při jejich nastavování. Bylo ukázáno, že lepších výsledků je možné dosáhnout ve spojení s genetickými algoritmy, které určité parametry řídí sami. [12]

2.2 Genetické algoritmy

2.2.1 Princip genetického algoritmu

Genetické algoritmy jsou odvozeny na základě biologické genetiky a dvojpohlavního rozmnožování. Tak jako v biologii je základem živých organizmů DNA – kyselina deoxyribonukleová, ve které je zakódován kompletní popis daného jedince, je u genetického algoritmu popis jedince charakterizován binárním vyjádřením pozice jedince na jednotlivých osách. Převodem numerické hodnoty pozice na jednotlivých osách do binárního kódu a jeho seskládáním za sebe získáme tzv. chromozom daného jedince, se kterým můžeme dále pracovat.

První generaci rodičů získáváme náhodným vygenerováním pomocí generátoru náhodných čísel. Sestavíme chromozom takto vzniklých rodičů a následuje vytvoření potomků. Potomky získáváme křížením dvou rodičů a to tak, že „přestříhneme“ chromozomy vybraných rodičů na náhodně velké části, ale tak, aby u obou rodičů byly části stejně velké. Potom se části chromozomu mezi sebou vymění, čímž vznikne chromozom dvou nových jedinců.

Dalším důležitým krokem je mutace jedince. U takto vzniklých jedinců spočítáme funkční

hodnoty a porovnáme s funkčními hodnotami rodičů. Pokud se jejich hodnota víc blíží k hledanému extrému zařadíme takto vzniklé jedince „do chovu“ a odstraníme rodiče. Tímto postupem dochází k postupnému šlechtění jedinců a přibližujeme se postupně ke globálnímu extrému. U genetického algoritmu se jeden cyklus nazývá generace. Vlastní cyklus genetického algoritmu je následující:

1. Navržení genetické struktury
2. Inicializace
3. Ohodnocení
 - 3,1. Konverze genotypu na fenotyp
 - 3,2. Ohodnocení objektivní funkce
 - 3,3. Konverze objektivní funkce na vhodnost
4. Volba rodičů
5. Reprodukce
6. Mutace
7. Zpět na 3 nebo konec.

2.2.2 Navržení genetické struktury

Při navrhování genetické struktury je důležité, jak budou reprezentovány jednotlivé alely a jak budou v jednotlivých chromozomech rozmístěny. To ovlivňuje výkonost algoritmu. Při volbě toho, jak budou v genu reprezentovány jednotlivé alely, se vychází ze dvou možností. První je reprezentace pomocí binárních hodnot, což je dost rozšířený přístup. V takovém případě je chromozom tvořen řetězem alel a výpočet fenotypu je počítán jako dekadická hodnota binárního genu. Druhou možností je použití dekadických hodnot.

Dalším nezanedbatelným faktorem je i pozice genů v chromozomu. Standardní metoda je dělení chromozomu na dvě poloviny. Každá polovina se daruje jednomu potomku.

2.2.3 Inicializace

Je to jednoduchý proces, při němž se pomocí generátoru náhodných čísel vygeneruje populace prvních rodičů.

2.2.4 Ohodnocení

Tento krok se skládá ze čtyř etap, a to:

1) Konverze genotypu na fenotyp - provede se přepočítání binárních genů na dekadickou hodnotu.

2) Ohodnocení objektivní funkce - v tomto kroku se počítá funkční hodnota sledované funkce.

3) Konverze objektivní funkce na vhodnost - je krok, který se skládá ze dvou operací. Když získáme objektivní funkci, pak ji musíme zkonvergovat na tzv. hrubou vhodnost, která se posléze zkonverguje na tzv. jemnou vhodnost. Pokud bychom použili pouze hrubou vhodnost, došlo by k tomu, že z první vygenerované populace bychom dostali jako vítěze pouze velmi silné jedince. To by znamenalo konec přirozeného výběru, protože by nebylo z čeho vybírat. Úpravou hrubé vhodnosti na jemnou dosáhneme toho, že jedincům s příliš vysokou vhodností je tato snížena, zatímco průměrné hodnoty zůstávají nedotčeny.

S počtem jedinců v populaci souvisí ještě jeden problém, a to tzv. „vadní jedinci“. Pokud vygenerujeme počáteční množinu jedinců, pak je pravděpodobné, že se v této množině vyskytnou i jedinci, kteří budou naprosto nevhodní z hlediska další reprodukce, a proto je potřeba je odstranit. Toho dosáhneme tak, že pokud pro běh algoritmu potřebujeme např. 200 jedinců, tak jich v prvním kroku vygenerujeme 250-300. Tyto jedince zkřížíme a z nich vybereme 200 nejlepších jedinců.

4) Konverze vhodnosti na selekci rodičů - je operace, při které se určí, který jedinec a kolikrát bude použit na vytvoření potomka.

2.2.5 Volba rodičů

V počátcích genetických algoritmů byli rodiče vybíráni náhodně. Tato metoda se ukázala jako nevhodná, protože zde docházelo k degradaci účinnosti vlastního genetického algoritmu. Vhodnější je vybrat rodiče na základě vhodnosti k selekci.

2.2.6 Reprodukce

Při reprodukci dochází k dělení chromozomů a vytváření potomků, jak bylo popsáno v 2.2.1.

2.2.7 Mutace

Mutace se provádí tak, že se generátorem náhodných čísel vygeneruje číslo a to se porovná s číslem vyjadřujícím požadovanou četnost mutace. Pokud je vygenerované číslo menší, dojde k mutaci genu. Gen zmutuje tak, že se provede součin již vygenerovaného náhodného čísla a dalšího náhodného čísla a tento součin se přičte k existujícímu genu, čímž gen mutuje.

Nevýhodou genetického algoritmu je, že se musí dekadické číslo převést na číslobinární, u kterého hrozí nebezpečí, že mutace může způsobit skokovou změnu. Tento problém se sice dá odstranit Greyovým kódováním, u kterého se dvě sousední čísla liší právě v jednom bitu, přesto je výhodnější pracovat s reálnými čísly. [1,5,6]

2.3 Diferenciální evoluce

Diferenciální evoluce je další typ evolučního algoritmu. I když je jeho schéma podobné algoritmu genetickému, má několik výhod.

1. Jednoduchost- diferenciální evoluce je tak jednoduchá, že se dá naprogramovat i v tabulkových editorech.
2. Hybridnost čísel, se kterými diferenciální evoluce pracuje. Lze dohromady kombinovat čísla typu Integer, Real nebo i jen vybranou množinu čísel, například $\{-5,-2,3,9\}$.
3. Používání dekadických čísel. Daná dekadická čísla není nutno převádět do binárního kódu, tudíž nenastává zkreslení čísla převodem. Navíc mutace nezpůsobí skokovou změnu, která by mohla mít negativní vliv na průběh evoluce.
4. Rychlost. Díky své jednoduchosti a použití dekadických čísel je algoritmus velmi rychlý.
5. Nezávislost křížení na kvalitě rodičů. Rodiče jsou vybíráni náhodně, což vede takřka vždy k nalezení globálního extrému.
6. Schopnost nalézt extrém u plochých funkcí typu díra v rovině.
7. Schopnost dát vícenásobná řešení.
8. Je účinná pro řešení nelineárních problémů s ohraničením.

Princip algoritmu diferenciální evoluce je následující. Celý algoritmus se cyklicky opakuje v tzv. generacích a pracuje s tzv. populacemi. Populaci si lze představit jako matici $N \times M$, kde každý sloupcový vektor je jedinec. Každý jedinec se skládá z konečného počtu prvků, které s účelovou funkcí udávají dimenzi, ve které probíhá evoluce. Cílem diferenciální evoluce je nalezení extrému účelové funkce.

Celá generace pracující s populací a jejími jedinci se člení do následujících aktivit.

1. Stanovení parametrů. Jde o parametry, které určují chod celé evoluce. Jde o parametry:

F - váhová konstanta (0-2)

CR - práh křížení (0-1,)

NP - počet jedinců v populaci

D-rozměr a prototyp jedince (Integer Real).

2. Tvorba populace. Populace se tvoří vygenerováním množiny jedinců podle prototypového vektoru.
3. Započítí cyklu generace. Během každé generace se ještě provádí cyklus, který zabezpečuje postupné šlechtění každého jedince z populace.
4. Evoluční cyklus. V tomto cyklu se náhodně zvolí tři další různí jedinci z populace. První dva se od sebe odečtou, čímž vznikne tzv. diferenční vektor. Ten se vynásobí mutační konstantou a tím vznikne tzv. váhový diferenční vektor a ten se přičte k třetímu náhodně vybranému vektoru a získá se tzv. „šumový vektor“. Poté se připraví tzv. „zkušební vektor“ a z cílového a „šumového vektoru“ se bere postupně jeden prvek za druhým a pro takto vybranou každou dvojici se generuje náhodné číslo v rozsahu 0 - 1 a porovnává se s konstantou CR. Pokud je toto číslo menší než CR pak se do příslušné pozice v tzv. „zkušebním vektoru“ umístí prvek z vektoru šumového a v opačném případě z vektoru cílového. Tak získáme zkušební vektor, jehož hodnotu účelové funkce porovnáme hodnotou účelové funkce cílového vektoru. Na pozici cílového vektoru v nové populaci je vybrán ten vektor-jedinec, který má hodnotu účelové funkce lepší. Tím je zajištěno, že se do nové generace dostanou jedinci s lepšími vlastnostmi. Vybere se druhý jedinec – cílový vektor a celý evoluční cyklus se opakuje až do vyčerpání populace. Tak vznikne nová generace potomků.
5. Vyhodnocení. Celý proces generací se opakuje, dokud není vyčerpán zadaný počet generací nebo dokud hodnota účelové funkce nedosáhne zadané hodnoty. Během každé generace se uschová hodnota účelové funkce nejlepšího jedince do vektoru historie, který po ukončení znázorňuje průběh evolučního procesu.

Při vyhodnocování hodnoty účelové funkce po každé generaci je možné přidat algoritmy, které evoluci ukončí, pokud se hodnota účelové funkce nejlepšího jedince po dobu posledních např. deseti generací nezlepšila. Rovněž je možné při takové stagnaci proces evoluce neukončovat, ale pouze změnit parametry evolučního procesu (F a CR), což by mohlo vést opět ke zlepšování hodnoty účelové funkce.

Kvalitu a průběh šlechtění lze ovlivnit mnoha faktory. Jsou to:

1. Nastavením konstant. Kombinace konstant může mít vliv na průběh evoluce. Např.

nízká hodnota CR může evoluci zbrzdit (bude vznikat méně nových jedinců).

2. Velikostí populace. Při malé populaci bude horší výběr, při velké populaci bude potřeba více času na její postupný průchod.
3. Počtem generací. Při zadaném malém počtu generací může evoluce skončit dříve, než nalezne extrém. Obecně platí, že čím více, tím lépe.
4. Definicí hodnoty účelové funkce. Pokud je nevhodně či špatně definována hodnota účelové funkce, může evoluce probíhat pomalu nebo vůbec ne.
5. Definicí intervalu. Při evoluci je vždy definován interval, ve kterém se má evoluce držet.[5,6]

2.4 SOMA

Simuluje jednání inteligentních jedinců, kteří kooperují při řešení společného problému, například hledání potravy.

Pracuje s populací jedinců stejně jako předchozí, ale nedochází ke vzniku nových jedinců křížením jako u genetického algoritmu nebo u diferenciální evoluce, ale je založena na kooperativním prohledávání prostoru možných řešení. Proto nemluvíme o „generaci“, ale o „Migračních kolech“. Proto se nejedná o algoritmus „genetický“, ale „memetický“ .

Jedinci se snaží najít nové, lepší řešení v prohledávané hyperploše, skupiny jedinců se rozpadají nebo naopak slučují a putují přes prohledávaný prostor. Proto mluvíme o tom, že se jedinci samoorganizují.

2.4.1 Princip:

1) Do prohledávané plochy se vygenerují jedinci na základě „specimenu“, ve kterém je definováno, jakých hodnot mohou jedinci dosahovat, a spočítají se hodnoty účelové funkce. Množství jedinců je určeno parametrem **D**.

2) Vybere se jedinec, který dosahuje nejlepší hodnotu účelové funkce (pokud hledáme minimum funkce, tak jedince s nejnižší hodnotou účelové funkce) . Tento jedinec je Leader.

3) Všichni jedinci se vydají směrem k Leaderovi po určitých krocích. Délka kroku je dána parametrem **STEP**. Na každé pozici, které jedinec dosáhne, se znovu spočítá hodnota účelové funkce. Nejlepší dosažená hodnota na celé trase se uloží do paměti. Tím dochází k mapování hyperplochy.

4) Jedinec postupuje, až projde kolem Leadera na určitou vzdálenost, která je dána

parametrem MASS.

5) Po skončení migračního kola se jedinci vrátí na pozice, kde našli nejlepší hodnoty.

6) Podle nových hodnot účelové funkce jednotlivých jedinců se určí nový Leader a spustí se další migrační kolo.

2.4.2 Nastavení jednotlivých parametrů

1. Parametr Mass. Určuje, jak daleko od Leadera se aktivní jedinec zastaví. Při $Mass=1$ by se migrující jedinec zastavil právě u Leadera. Nastavení tohoto parametru se pohybuje v rozsahu 1,1 - 3, pokud by tento parametr byl menší než 1, vedlo by to k degeneraci celého procesu.
2. Parametr Step. Určuje, jak hustě bude hyperplocha mapována pohybujícím s jedincem. V případě, že se jedná o jednoduchou unimodální funkci, je možno z důvodu urychlení algoritmu použít větší hodnotu parametru Step, v případě, že nevíme, jaká geometrie reprezentuje účelovou funkci, je vhodné použít menší hodnotu. Rovněž je důležité, aby parametr Step nebyl násobkem vzdálenosti jedince od Leadera.
3. Parametr PRT. Určuje, zdali se jedinec bude pohybovat přímo k Leaderovi nebo ne. Tento parametr zavádí do algoritmu stochastickou složku. Pokud by tento parametr byl 1, choval by se celý algoritmus pouze podle deterministických pravidel a při použití u multimodální funkce by dokázal nalézt pouze lokální extrémy. Optimální hodnota je 0.1.
4. Parametr D. Udává počet optimalizovaných proměnných daného problému a jeho změna je možná pouze předefinováním samotného problému.
5. Parametr NP určuje, kolik jedinců bude tvořit populaci. Obvykle by počet jedinců neměl být nižší než 10.
6. Parametr Migrace. Určuje, kolika migračními koly algoritmus projde. Je to jeden z možných ukončovacích parametrů SOMY.
7. AcceptError je ukončovací parametr, který udává maximální povolený rozdíl mezi nejlepším a nejhorším jedincem aktuální populace. Pokud je v aktuální populaci tento rozdíl menší než nastavená hodnota, je algoritmus ukončen.

2.4.3 Populace

Tvorba počáteční populace se provádí stejně jako pro diferenciální evoluci.

2.4.4 Mutace

U algoritmu Soma nejde o mutaci v pravém slova smyslu, ale jedná se o tzv. perturbaci. Při pohybu přes prohledávaný prostor je pohyb jedince náhodně rušen (tzn. perturbován). To, jak často v algoritmu perturbace proběhne, závisí na nastavení parametru PRT, který je jedním z parametrů nastavených uživatelem. Pomocí tohoto parametru se vygeneruje tzv. perturbační vektor, který se generuje pro každého jedince zvlášť a je platný pro aktuální migrační kolo. Generování perturbačního vektoru probíhá tak, že se vygeneruje náhodné číslo v intervalu $\langle 0,1 \rangle$ a porovná se s parametrem PRT. Jestliže je menší než PRT parametr, přiřadí se k danému prvku perturbačního vektoru 1, pokud je větší, přiřadí se 0. Výsledkem perturbačního vektoru je, že se pozastaví pohyb jedince v některém směru, což zvyšuje naději na nalezení globálního extrému.

2.4.5 Strategie

V současné době existuje několik variací základního algoritmu SOMA. Tyto variace nazýváme strategie. Všechny tyto strategie jsou vzájemně porovnatelné, pokud jde o schopnost nalezení globálního extrému.

1. Všichni k jednomu- (All To One) Tato strategie byla podrobně popsána v kapitole **2.3.1**. Znamená to, že všichni jedinci putují k Leadrovi .
2. Všichni ke všem - (All To All). V této strategii není Leader. Všichni jedinci se přemísťují ke všem ostatním s tím rozdílem, že po skončení migračního kola se vrátí na pozici, kde našli nejlepší hodnotu účelové funkce během všech migračních cest. Tato strategie je početně náročnější, je zde však větší pravděpodobnost nalezení globálního extrému, protože každý jedinec prohledává větší část prostoru možných řešení.
3. Adaptivně všichni ke všem –(All To All Adaptive). Jedná se o stejnou strategii jako všichni ke všem, s tím rozdílem, že se migrující jedinec nepřesouvá do nové pozice až po všech migracích ke všem ostatním, ale po každé aktuálně dokončené migraci ke každému z jedinců. Z této pozice provádí migraci ke zbývajícím jedincům.
4. Všichni k jednomu náhodně- (All To One Rand). Strategie, ve které se všichni pohybují k Leadrovi stejně jako ve strategii všichni k jednomu, s tím rozdílem, že se Leader nevybírání na základě hodnoty účelové funkce, ale vybírá se náhodně.
5. „Svazky“ (Cluster). SOMA s vytvářením svazků se dá použít pro jakoukoliv z popsaných strategií. Princip této strategie spočívá v tom, že jedinci účastníci se SOMY jsou rozděleni do jednotlivých svazků. V každém svazku pak probíhá

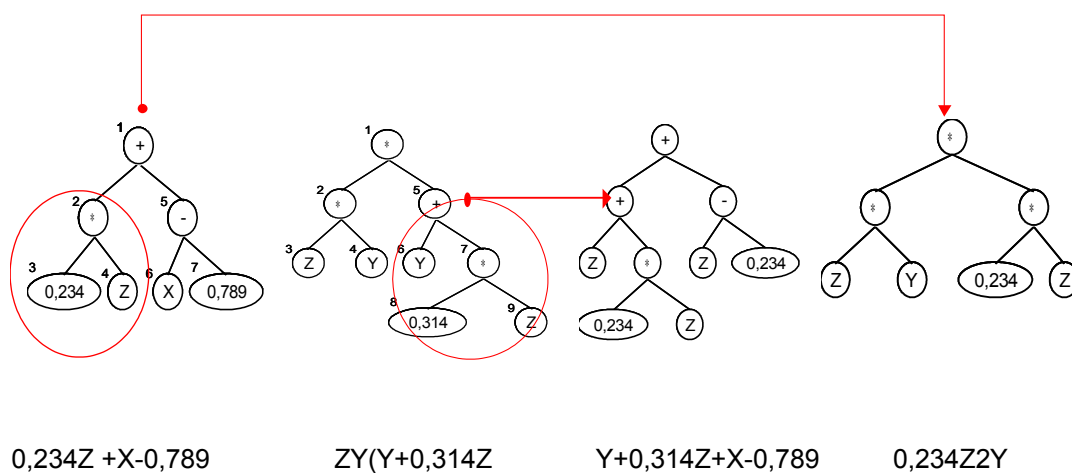
samostatný SOMA. Vzhledem k tomu, že jedinci se po hyperploše pohybují, mohou se jednotlivé svazky rozpadat a vytvářet svazky nové.

Jednotlivé strategie se liší v množství výpočtu funkčních hodnot, které se musí spočítat v průběhu migrace jedince. Zatím co u strategie „All To One“ a „All To One“ Rand musí migrující jedinci během jednoho migračního kola „urazit“ pouze jednu trasu, u strategie „All To All“ a „All To All Adaptive“ musí migrující jedinci „urazit“ tolik tras kolik je jedinců v populaci minus 1. Proto je vhodné nastavit parametry vlastní evoluce tak, aby počet ohodnocení účelové funkce byl přibližně stejný. Jako nejvhodnější parametry pro tuto změnu se jeví počet „migračních kol“ a „velikost kroku“. [6]

2.5 Genetické Programování

2.5.1 Symbolická regrese a Readův kód

Na přelomu 80. a 90. let navrhl americký informatik John Koza originální metodu genetického algoritmu, kterou nazval genetické programování. V tomto přístupu jsou chromozomy - znakové řetězce nahrazeny složitějšími funkcemi. Tyto funkce jsou reprezentovány pomocí syntaktického stromu (parse tree). V průběhu evoluce dochází k dělení syntaktického stromu a přeskupování jednotlivých částí tak, jak je znázorněno na obr.9.

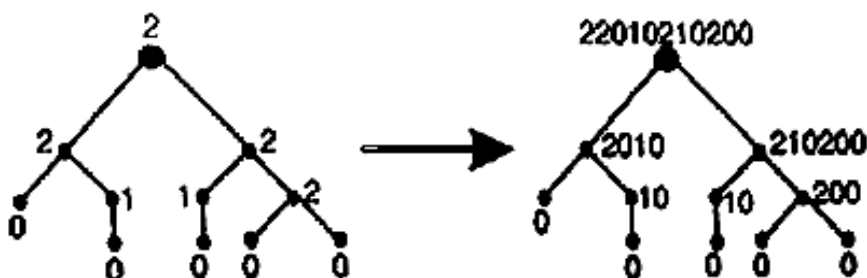


Obr 9. Princip symbolické regrese

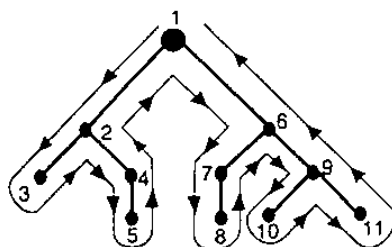
Cílem je najít takovou funkci reprezentovanou syntaktickým stromem, která minimalizuje rozdíl vypočítaných a zadaných hodnot. John Koza nazval takový přístup symbolická regrese. Pro úspěšnou a efektivní implementaci genetického programování hraje důležitou roli způsob kódování syntaktického stromu a manipulace s nimi. Efektivnost programů napsaných v LISPU je poměrně malá. Proto je výhodnější popis stromu pomocí tzv. Redova kódu, což umožní nepožívat funkcionální jazyk, ale použít standardních procedurálních jazyků jako je Pascal, Fortran, C++ atd. Tím se výsledný kód stane daleko efektivnějším.

Principem Readova kódování je, že se každý uzel syntaktického stromu ohodnotí takovou hodnotou, která reprezentuje počet uzlů, se kterým je daný uzel spojen, a to ve směru dolů. Potom se postupuje ve směru šipky, viz obr.11, a jednotlivé uzly se ohodnocují

číslem, které se sestaví z čísel uzlů, kterými se muselo projít s tím, že každý uzel se započítá pouze jednou, a to při prvním průchodu.



Obr 10. Ohodnocení stromu



Obr 11. Postup při ohodnocení uzlů

Hlavním přínosem Readova kódu je, že každý uzel syntaktického stromu je jednoznačně identifikován.

Podobně jako u genetických algoritmů, aby symbolická regrese fungovala, musí být na ní definována:

- množina funkcí
- množina terminálů
- základní množina elementů (na nich se vygeneruje daný výraz, mohou být matematického, nebo jiného charakteru)

Při programování můžeme použít jakýkoliv algoritmus, který nám vyhovuje. [3]

2.5.2 Gramatická evoluce

Jednou z nejnovějších metod spadajících do evoluční výpočetní techniky, je gramatická evoluce. Jde o metodu, která má mnohé společné jak s genetickými algoritmy, tak s genetickým programováním. Ve skutečnosti je to vlastně kombinace obou těchto

metod. S genetickým programováním má společný cíl a tím také oblasti použití-je to totiž nástroj pro automatické generování počítačových programů. Oproti genetickému programování je gramatická evoluce obecnější v tom, že je navržena tak, aby byla použitelná pro hledání programů v jakémkoliv počítačovém jazyce. S tím je úzce spojena i reprezentace jedinců. Na rozdíl od stromu používaném v genetickém programování používá gramatická evoluce binární reprezentaci jedinců. A jako hlavní genetické operace používá jednoduché jednobodové křížení a jednoduchou bodovou mutaci, což je obojí vlastní klasickým genetickým algoritmům. Gramatika BNF (Backusovy-Naurovy formy) popisuje jazyk formou produkčních pravidel, ve kterých vstupují terminály a jiné atomické symboly a neterminály, které jsou dále rozvinuty v jeden nebo více neterminálů a terminálů. Pravidla mají pevnou strukturu, kdy na levé straně vstupují jednotlivé neterminály a na pravé straně je rozvoj příslušného neterminálu pomocí neterminálů a terminálů. Každý neterminál může mít více alternativních pravidel pro expandování. Uvažujeme-li výraz, ve kterém se mohou vyskytovat operace $\{+, -, *, /\}$ a proměnné X a Y . Potom terminály jsou $T = \{+, -, *, /, X, Y\}$ a neterminály obsahují $F = \{expr, op, var\}$ Gramatika vygeneruje výraz, který vypadá takto:

Nonterminals		Unfolding	Index
expr	::= o	p expr expr	(0)
		var	(1)
op	::= +		(0')
		-	(1')
		*	(2')
		/	(3')
var	::	X	(0'')
		Y	(1'')

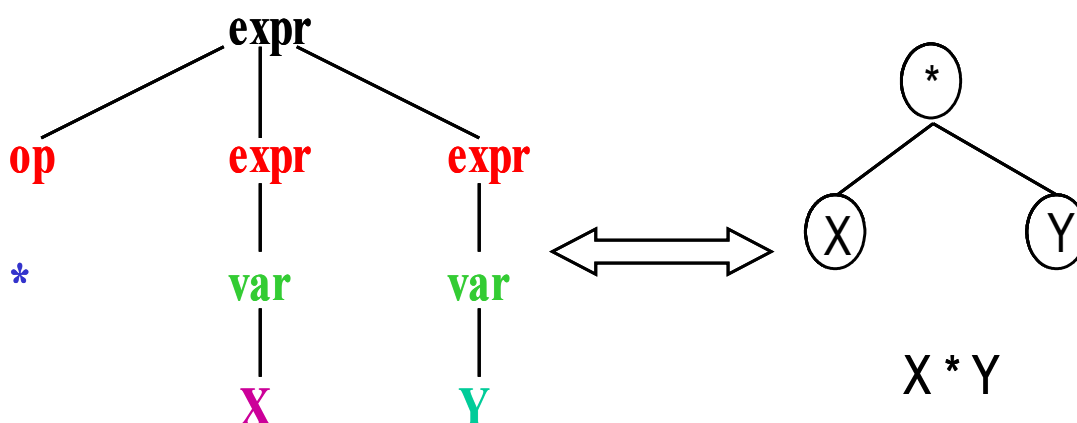
Tuto gramatiku použijeme pro dekodování lineárního chromozomu. Ten má v gramatické evoluci takovou funkci, že reprezentuje posloupnost pravidel tak, že budou postupně aplikována během generování programu. V gramatické evoluci mají chromozomy proměnnou délku. Chromozom je proto formálně členěn na osmibitové podřetězce, které se nazývají kodony. Tyto kodony jsou postupně čteny od začátku chromozomu a na základě jejich hodnoty je použito odpovídající pravidlo pro rozvinutí aktuálního nejlevnějšího neterminálu. Vzhledem k tomu, že hodnota kodonu je ve většině případů větší než počet pravidel použitelných pro jednotlivé neterminály, je číslo pravidla, které se pro rozvinutí neterminálu použije stanoveno pomocí výrazu 6.

$$\text{pravidlo} = \text{kodon} \bmod \text{počet pravidel pro daný neterminál} \quad (6)$$

Celý proces je ukázán na následujícím chromozomu:

Tab-1. Dělení chromozomu na kodony

	<i>kodon 1</i>	<i>kodon 1</i>	<i>kodon 1</i>	<i>kodon 1</i>	<i>kodon 1</i>	<i>kodon 1</i>	<i>kodon 1</i>	<i>kodon 1</i>
Bin	00101000	10100010	01000011	00001100	01010101	10011001	1100110	10001011
Dec	40	162	67	12	125	231	146	139
č. pravidla	(0)	(2)	(1)	(0')	(1')	(1'')		

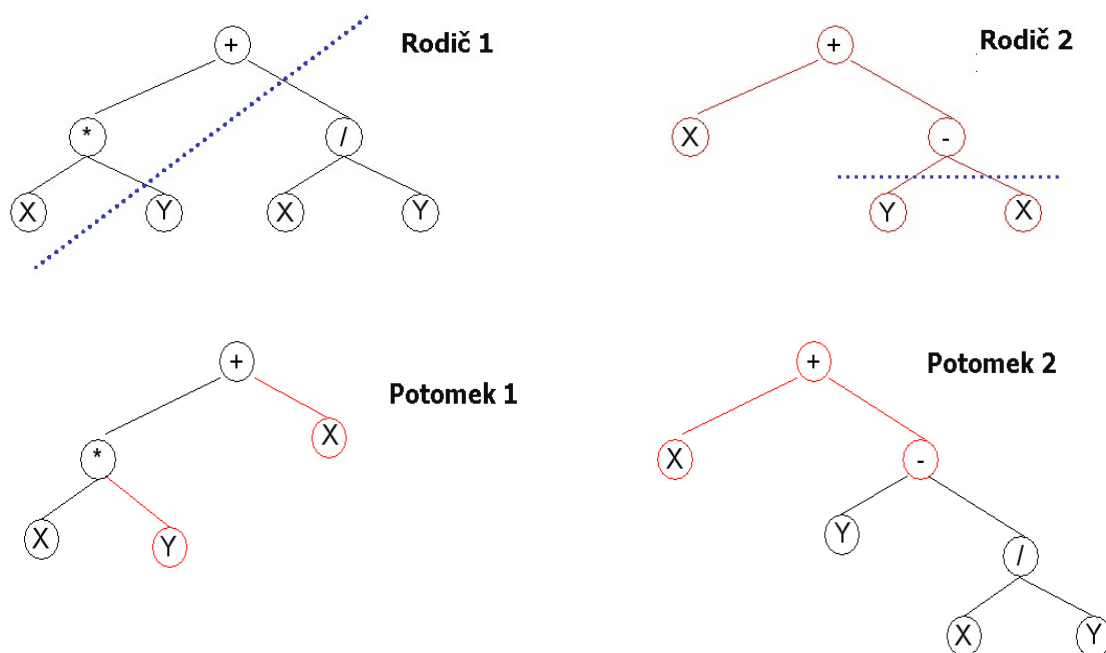


Obr 12. Syntéza programu

Standartně se na gramatickou evoluci používá jednobodové křížení, které je aplikováno na chromozomy. Křížení funguje tak, že se vzájemně zamění chromozomy za náhodně zvoleným bodem křížení.

Tab-2. Dělení chromozomů

48	16	120	38	51	230	79	17	84	63	49	122	165
56	80	71	168	214	147	31	3	91	112	67		



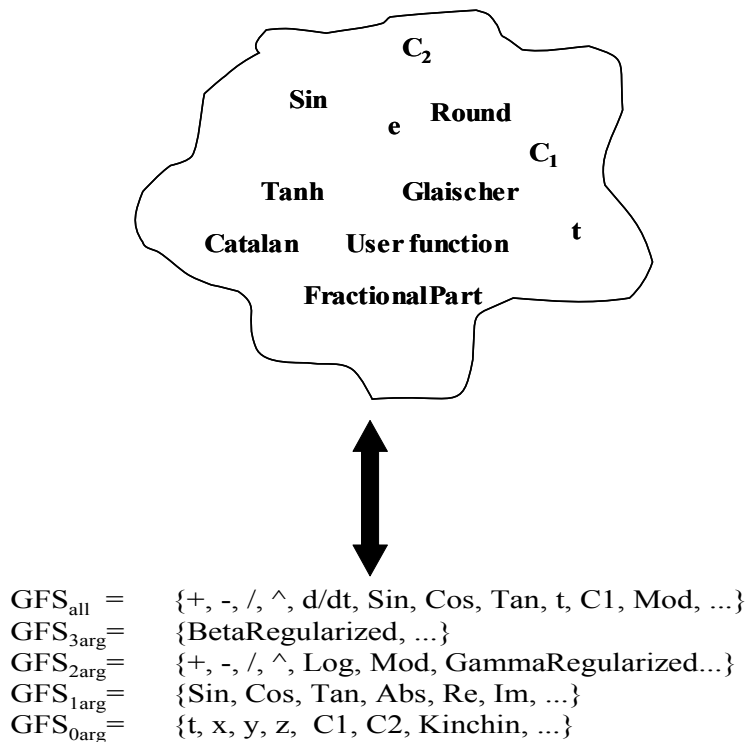
Obr 13. Dělení chromozomů

Tímto způsobem dochází k tvorbě nových jedinců, u kterých se porovnává jejich schopnost minimalizovat rozdíl vypočítaných a zadaných hodnot. [15]

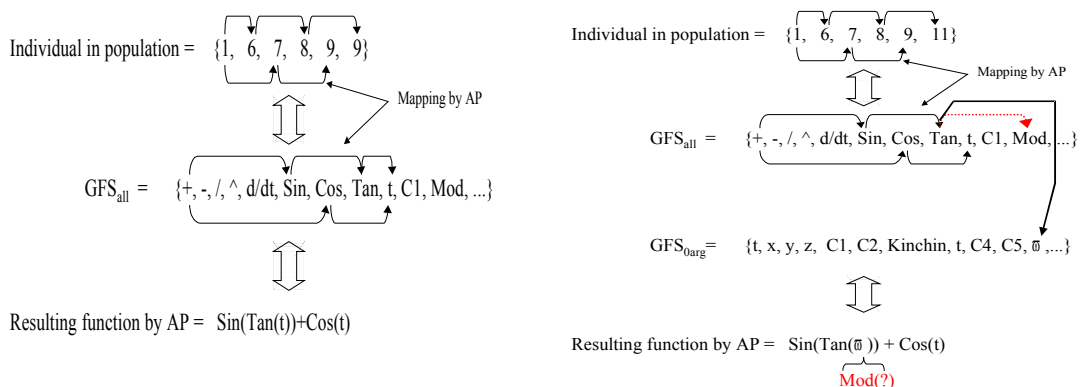
2.5.3 Analytické programování

To, co je podstatné pro analytické programování, a co je jedna z věcí, kterou se odlišuje od ostatních metod, je, že množina je tvořena sloučením několika podmnožin. Množina se rozpadá do množin funkcí, které mají různé počty argumentů...3,2,1 a konstanty, terminály a nezávislé proměnné, které mají 0 argumentů, jak je znázorněno obr.14. Při syntéze symbolického výrazu se zároveň kontroluje v které části výrazu se nacházíme. Přiblíží-li se evoluce ke konci výrazu, algoritmus přesměruje syntézu elementů do takové podmnožiny, aby bylo možno výraz uzavřít. To znamená, že všechny funkce výrazu jsou obsazeny nějakými čísly, jinými slovy se generuje struktura, která není patologická, neboli zjišťujeme, že vzdálenost konce je rovna nebo menší, než je maximální počet argumentů pak je provedeno přesměrování z množiny všech funkcí do podmnožin funkcí s menším počtem argumentů tak, aby bylo provedeno uzavření dříve než dorazíme ke konci. Celý proces je znázorněn na obr.15. Může se stát, že se struktura uzavře dříve než dorazíme ke konci jedince, což není na závadu. Dále jsou obsaženy bezpečnostní procedury, které musí být přítomny v každé struktuře syntetické regrese:

1. Kontrola výskytu patologického jedince
2. Kontrola reálnosti řešení (řešení nesmí být v komplexní oblasti).
3. Ošetření nekonečna
4. Vyšetření „zamrzlé“ funkce, tedy funkce, jejíž výpočet trvá dlouho. Algoritmus jedince ohodnotí jako špatného a vyřadí ho z evoluce ven.

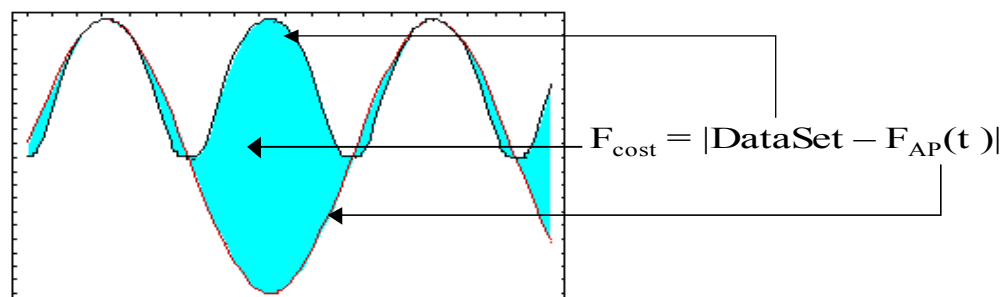


Obr 14. Dělení množiny funkcí podle množství argumentů



Obr 15. Přidělování funkcí podle vygenerovaného chromozomu

Jako hodnotu účelové funkce, kterou se snažíme minimalizovat je v tomto případě plocha, kterou tvoří rozdíl mezi nalezenou funkcí a křivkou, která prochází naměřenými hodnotami [13,14]



Obr 16. Výpočet hodnoty účelové funkce

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2.6 Řešení „evolučními algoritmy“

Na vyhledání parametrů pro magický vzorec jsem použil kombinaci metody nejmenších čtverců se dvěma výše popsanými algoritmy. Jako první jsem použil algoritmus „SOMA,,“, tento Algoritmus jsem na daný problém aplikoval ve čtyřech strategiích, a to:

- 1) (All To One) Všichni k jednomu
- 2) (All To One Rand) Všichni k jednomu náhodně
- 3) (All To All) Všichni ke všem
- 4) (All To All Adaptive) Adaptivně všichni ke všem

Algoritmus SOMA byl aplikován na populaci 20 jedinců. Strategie „All To One“ a „All To One Rand“ probíhala v 60 migračních kolech s krokem 0,11. Během jedné simulace proběhlo 31 090 ohodnocení účelové funkce. Počet ohodnocení účelové funkce je vyjádřen rovnicí 7. [6]

$$CFE = \frac{PATHL_LENGHT}{STEP} * (POP_SIZE - 1) * MIGRATIONS \quad (7)$$

Strategie „All to All“ a „All To All Adaptive“ byla provedena v 35 migračních kolech s krokem 0,81. Během každé simulace proběhlo 49 259 ohodnocení účelové funkce. Počet ohodnocení účelové funkce je vyjádřen rovnicí 8. [6]

$$CFE = POP_SIZE * \frac{PATHL_LENGHT}{STEP} * (POP_SIZE - 1) * MIGRATIONS \quad (8)$$

Jako druhý jsem aplikoval algoritmus „diferenciální evoluce“, a to v sedmi variantách výpočtu šumového vektoru:

- 1) DE Rand1bin
- 2) DE Rand2bin
- 3) DE Best1Exp
- 4) DE Rand1Diter
- 5) DE LocatoBest
- 6) DE Best2Bin
- 7) DE Rand1Gen.Diter

Diferenciální evoluce probíhala v 1000 populacích. Počáteční populaci tvořilo 40 jedinců s nastaveným prahem křížení na 0,8 a váhovou konstantou také na 0,8. Během jedné simulace proběhlo 40000 ohodnocení účelové funkce. Počet ohodnocení účelové funkce je vyjádřen rovnicí 9. [6]

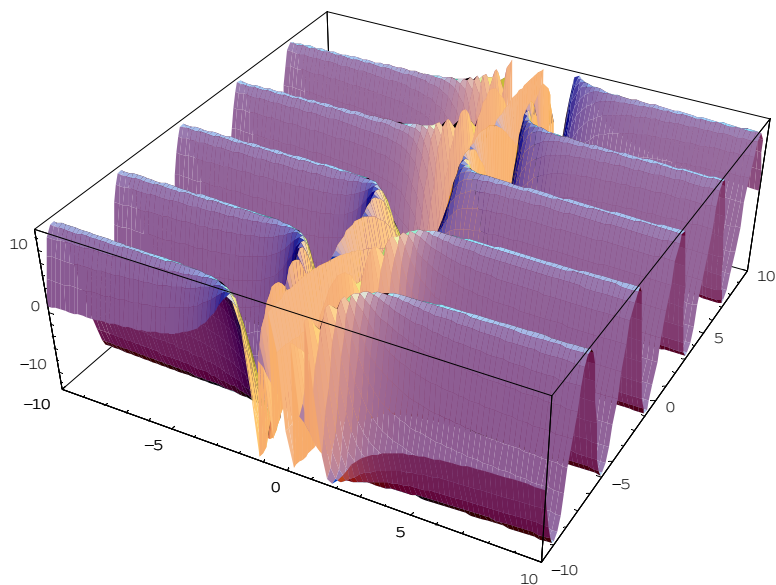
$$CFE = POP_SIZE * GENERATIONS \quad (9)$$

Každá z uvedených simulací proběhla 100x s tím, že celý průběh byl vyhodnocen a byl vybrán nejlepší výsledek, ten jsem zanesl do tabulky jako hodnotu účelové funkce, která je vyjádřena jako součet kvadratických odchylek. Ke každé hodnotě účelové funkce jsou přiřazeny i parametry B,C,D,E, které tuto hodnotu reprezentují, takže pro každá naměřená data tabulka obsahuje 11 skupin parametrů. Nejlepší dosažená hodnota je zvýrazněna silně a nejhorší dosažená hodnota je vyznačena červeně. Pro tyto dvě hodnoty jsou zobrazeny i porovnávací grafy.

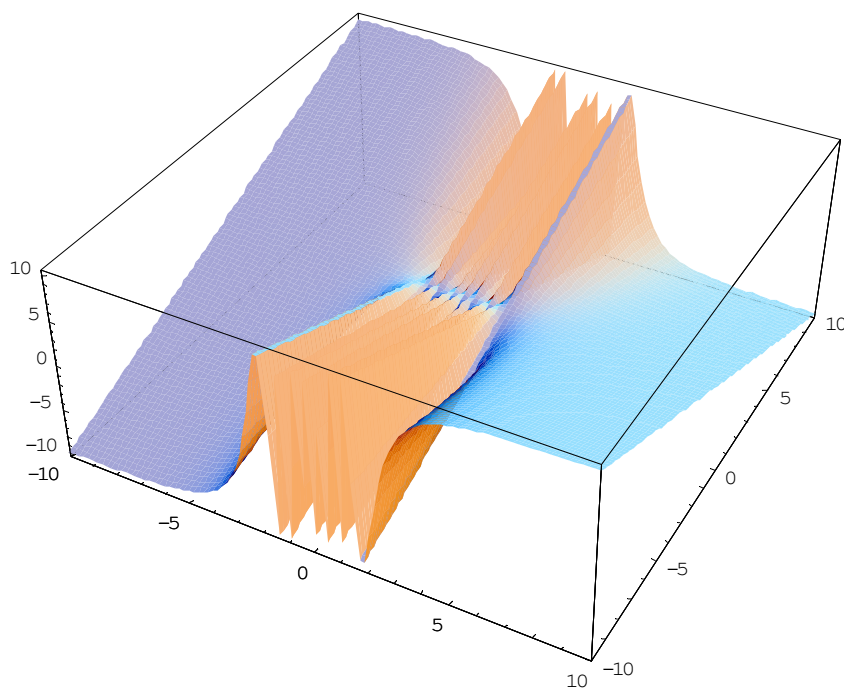
Protože vyhodnocovaná data měla řádově rozdílnou amplitudu, provedl jsem ještě vyhodnocení pomocí průměrné procentuální chyby na jeden měřený bod.

$$d = \frac{\sqrt{\sum a^2}}{m} / A * 100 \quad (10)$$

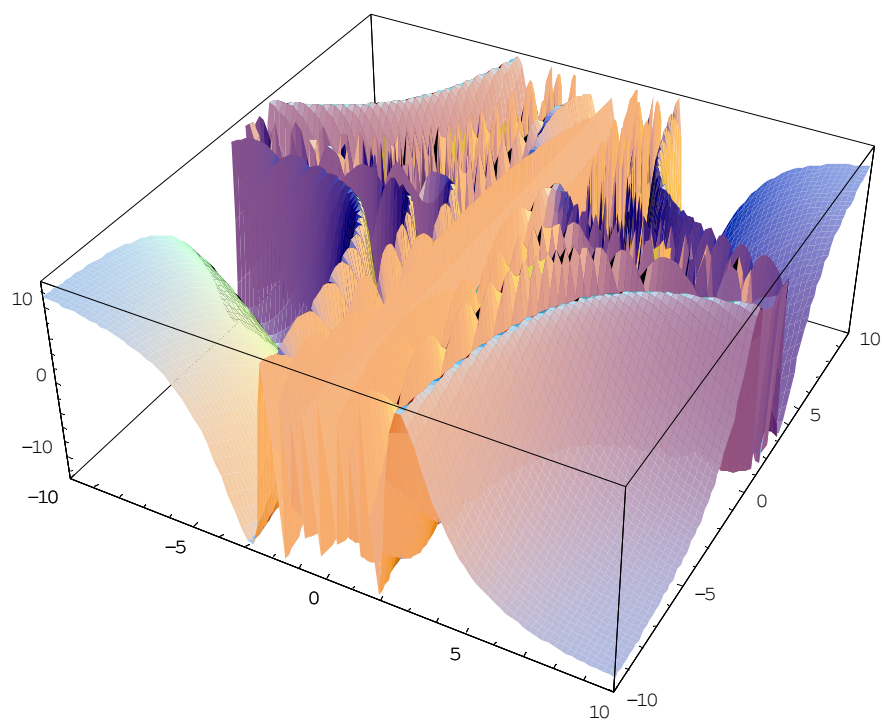
Pro dokreslení celého řešeného problému jsem provedl řezu pětidimenzionálního prostoru, a to tak, že jsem postupně dosazoval za dva parametry nalezené konstanty a další dva parametry jsem ponechal jako proměnné.



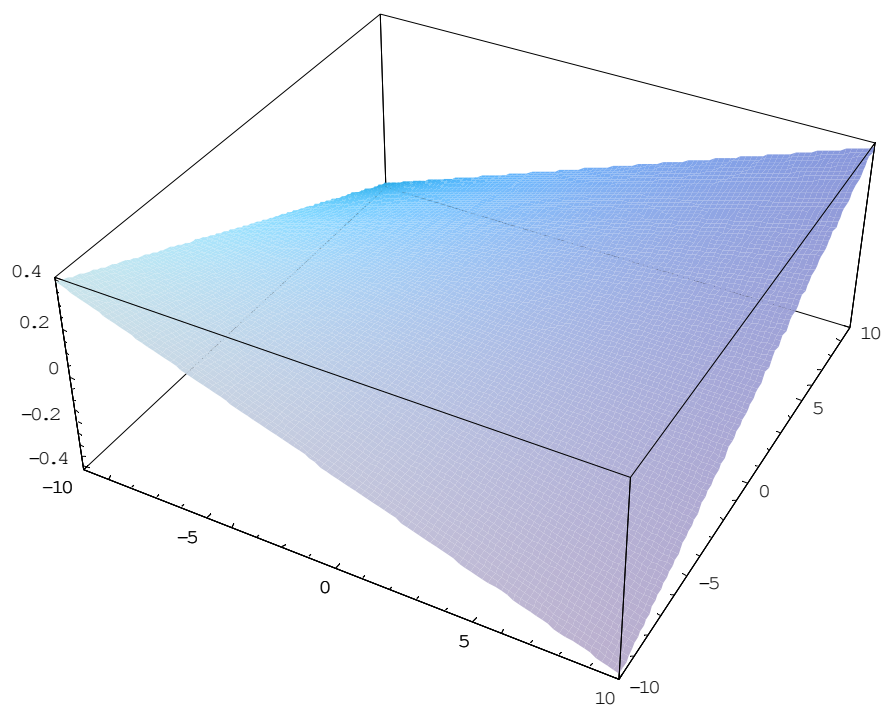
Obr 17. Řez hyperprostorem $f(d,e)$ $b=\text{konst. } c=\text{konst.}$



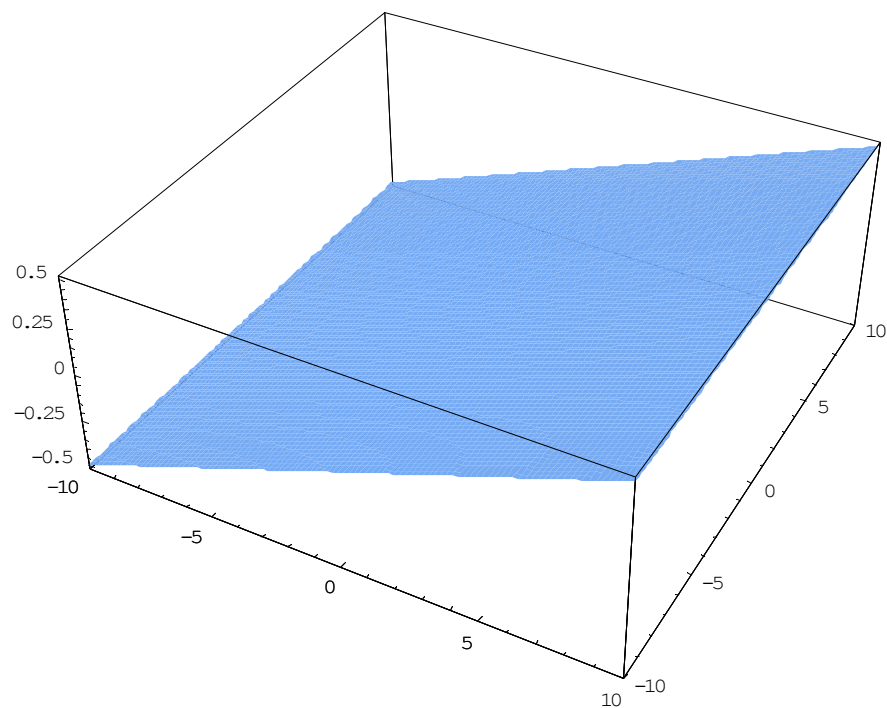
Obr 18. Řez hyperprostorem $f(c,e)$ $b=\text{konst. } d=\text{konst.}$



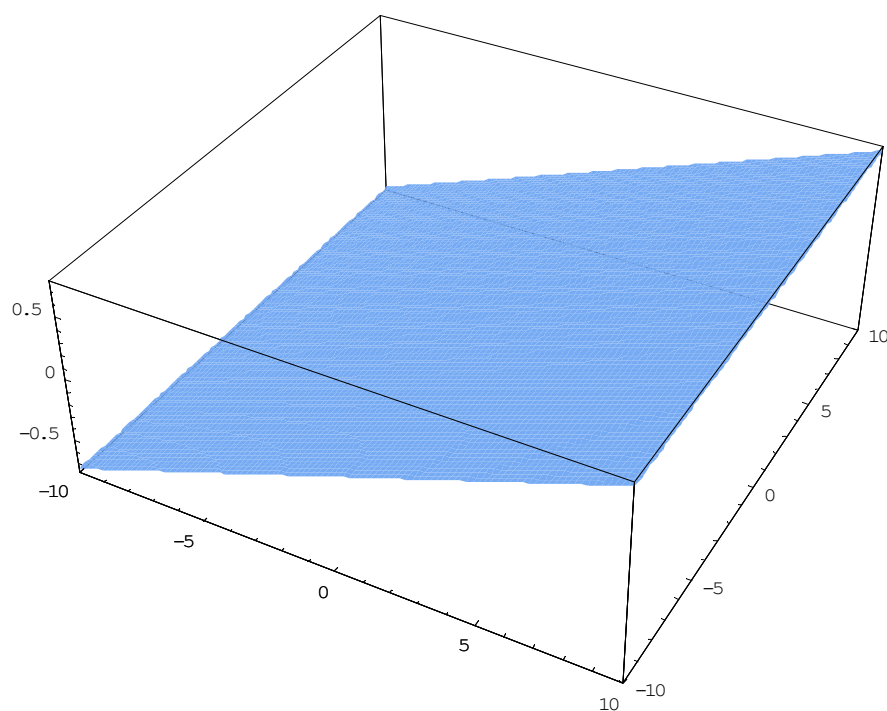
Obr 19. Řez hyperprostorem $f(c,d)$ $b=\text{konst.}$ $e=\text{konst.}$



Obr 20. Řez hyperprostorem $f(b,e)$ $c=\text{konst.}$ $d=\text{konst.}$



Obr 21. Řez hyperprostorem $f(c,d)$ $c=\text{konst.}$ $e=\text{konst.}$



Obr 22. Řez hyperprostorem $f(b,c)$ $d=\text{konst.}$ $e=\text{konst.}$

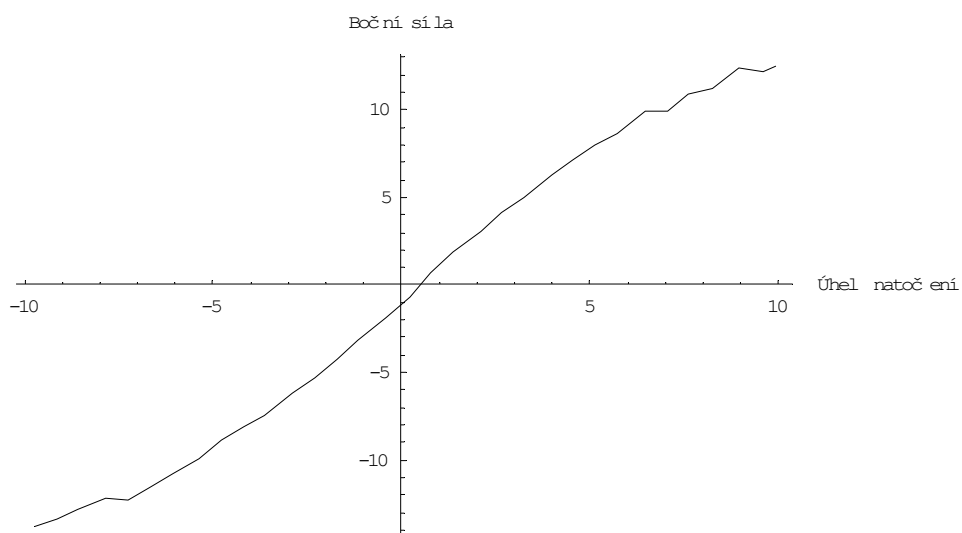
Celá simulace byla provedena v programovém prostředí Mathematica 5.2

2.7 Plášť 315/80 R22,5

2.7.1 Přítlačná síla 22,5 kN Tlak 660 kPa

Naměřená data boční síly

$y = \{ \{9.915, 12.495\}, \{9.586, 12.171\}, \{8.951, 12.346\}, \{8.242, 11.198\}, \{7.632, 10.899\},$
 $\{7.058, 9.876\}, \{6.459, 9.901\}, \{5.751, 8.653\}, \{5.153, 7.955\}, \{4.542, 7.082\}, \{3.993, 6.308\},$
 $\{3.260, 5.011\}, \{2.674, 4.113\}, \{2.100, 3.065\}, \{1.367, 1.892\}, \{0.781, 0.670\},$
 $\{0.207, -0.652\}, \{-0.416, -1.925\}, \{-1.136, -3.172\}, \{-1.710, -4.270\}, \{-2.308, -5.268\},$
 $\{-2.882, -6.191\}, \{-3.627, -7.513\}, \{-4.201, -8.112\}, \{-4.775, -8.885\}, \{-5.361, -9.908\},$
 $\{-6.082, -10.781\}, \{-6.680, -11.505\}, \{-7.254, -12.278\}, \{-7.840, -12.153\}, \{-8.585, -12.777\},$
 $\{-9.147, -13.326\}, \{-9.721, -13.800\} \}$



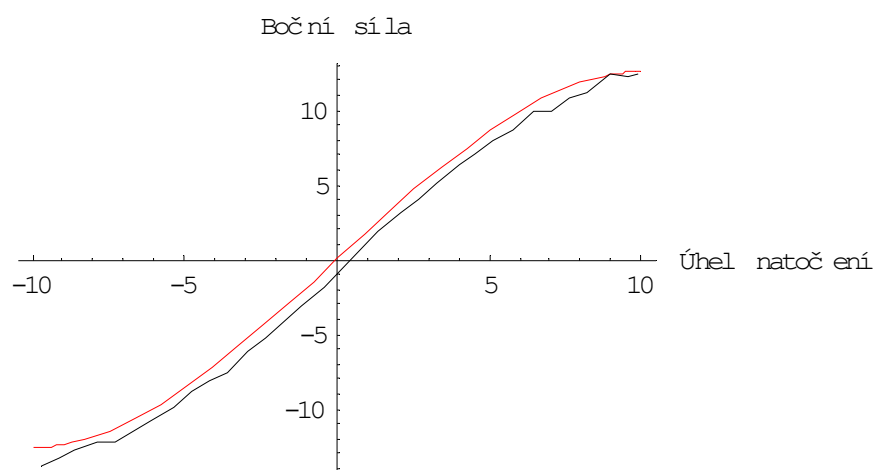
Obr 23. Průběh měření

Tab-3. Tabulka koeficientů

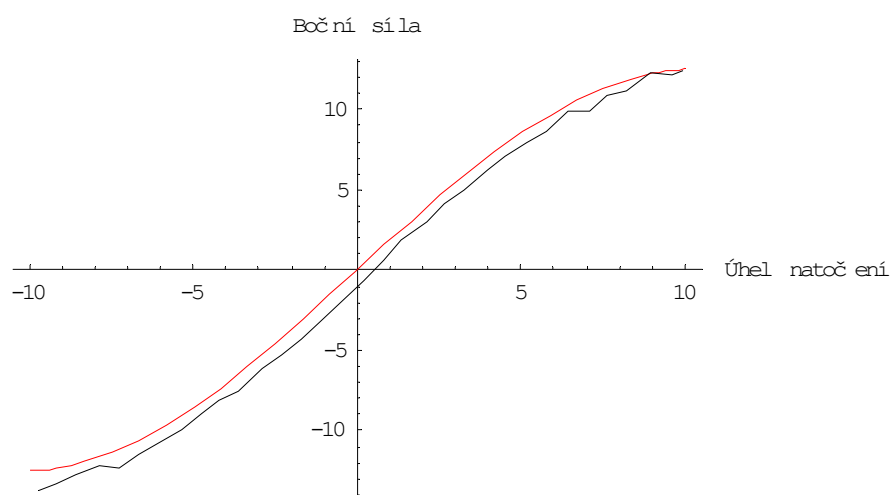
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	23.4556	23.456	23.4572	23.4561	23.5406	23.685
B	0.0078625	-0.0089054	0.007525	-0.0076619	-0.009458	0.00574666
C	19.0071	-16.7734	19.8979	-19.5297	-16.0159	26.2465
D	12.545	12.545	12.545	12.545	12.531	12.5229
E	-29.9948	-24.0184	-29.3732	-29.9865	-10.6192	-14.5212
d	0.558131	0.558136	0.55815	0.558136	0.559141	0.560854

Tab-4. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	23.6224	23.7567	23.5967	23.5813	23.6145
B	-0.0299125	-0.00627716	-0.0118435	-0.0069179	-0.00675208
C	-4.97543	-23.8797	-12.845	-21.9895	-22.4848
D	12.5389	12.5334	12.5345	12.5225	12.5096
E	-4.70815	-12.1253	-3.28383	-18.3519	-17.9448
d	0.560112	0.561702	0.559807	0.559625	0.560018



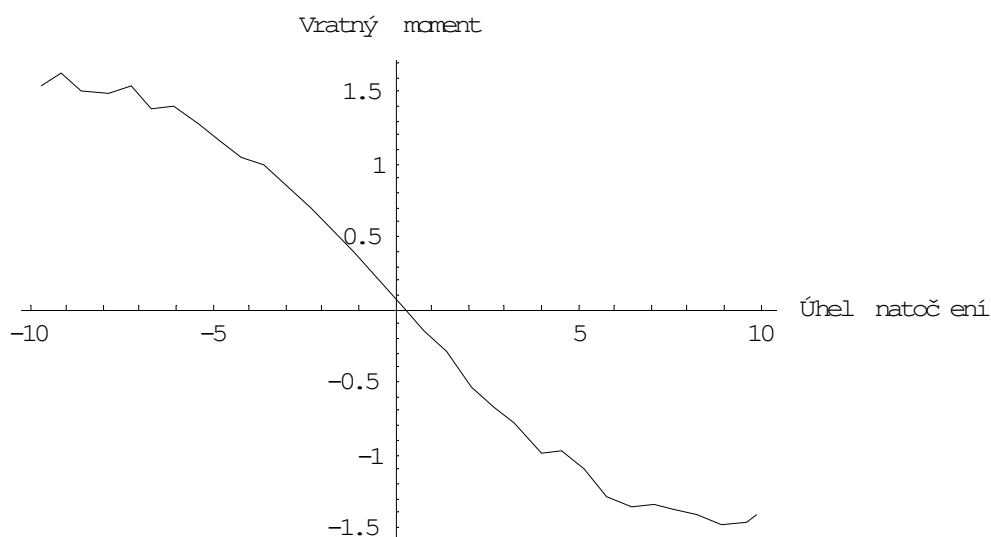
Obr 24. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One



Obr 25. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1DIter

Naměřená data vratného momentu

$y = \{ \{9.915, -1.417\}, \{9.586, -1.465\}, \{8.951, -1.485\}, \{8.242, -1.412\}, \{7.632, -1.370\},$
 $\{7.058, -1.350\}, \{6.459, -1.353\}, \{5.751, -1.288\}, \{5.153, -1.098\}, \{4.542, -0.969\},$
 $\{3.993, -0.996\}, \{3.260, -0.779\}, \{2.674, -0.674\}, \{2.100, -0.532\}, \{1.367, -0.293\},$
 $\{0.781, -0.153\}, \{0.207, 0.014\}, \{-0.416, 0.206\}, \{-1.136, 0.393\}, \{-1.710, 0.533\},$
 $\{-2.308, 0.690\}, \{-2.882, 0.830\}, \{-3.627, 0.987\}, \{-4.201, 1.042\}, \{-4.775, 1.146\},$
 $\{-5.361, 1.273\}, \{-6.082, 1.398\}, \{-6.680, 1.376\}, \{-7.254, 1.533\}, \{-7.840, 1.490\},$
 $\{-8.585, 1.505\}, \{-9.147, 1.630\}, \{-9.721, 1.538\} \}$



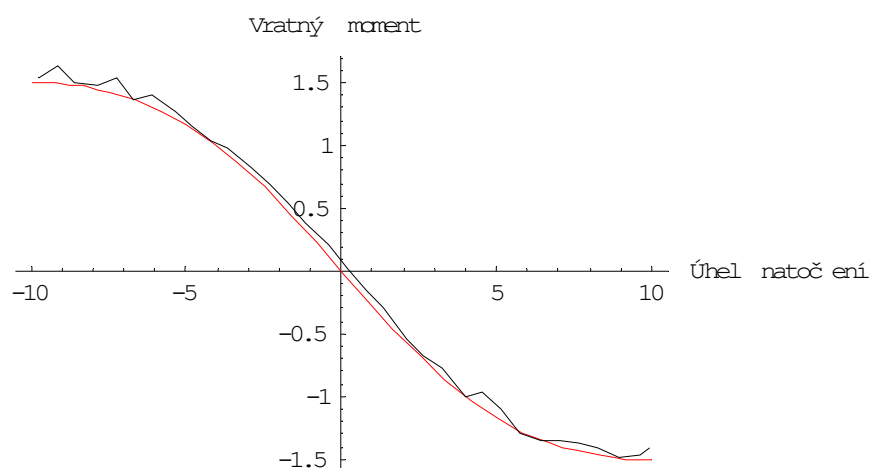
Obr 26. Průběh měření

Tab-5. Tabulka koeficientů

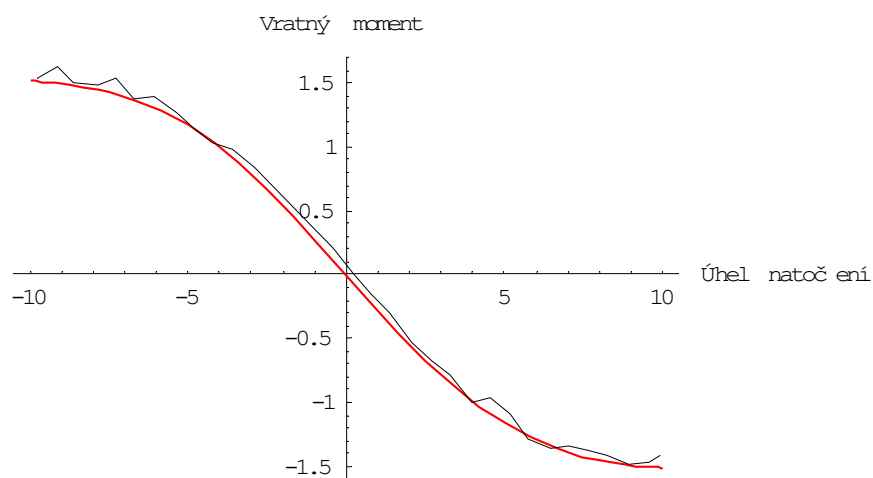
Algoritmus	SOMA				Diferenc. evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	0.145892	0.145915	0.146353	0.146389	0.170843	0.147478
B	0.0201857	0.0201645	0.019089	0.0205664	-0.018333	0.0231461
C	-8.37122	-8.38648	-8.9678	-8.3134	9.02717	-7.2953
D	1.68	1.67916	1.65611	1.65801	1.61488	1.66339
E	25.2703	25.4186	27.0399	23.4007	18.514	18.0158
d	0.371573	0.371602	0.372159	0.372205	0.402094	0.373587

Tab-6. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	0.175674	0.149547	0.149295	0.151402	0.172887
B	-0.0588692	-0.0187033	-0.0238191	0.0189104	0.02742
C	3.19751	8.9941	7.13595	-9.61894	-6.87522
D	1.63181	1.6785	1.67566	1.5805	1.59188
E	3.86674	27.0937	19.2547	27.1929	15.9297
d	0.407738	0.376199	0.375882	0.378525	0.404492



Obr 27. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One

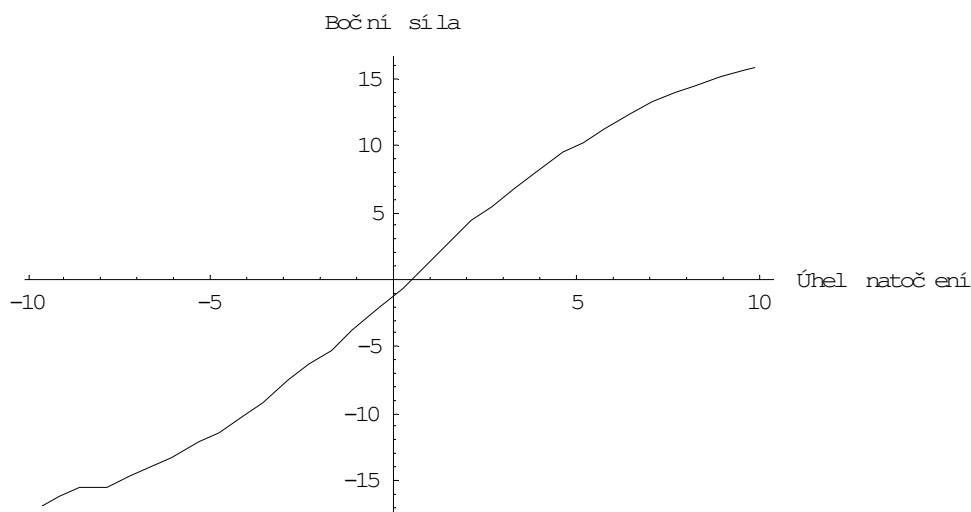


Obr 28. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Best1Exp

2.7.2 Přítlačná síla 30, kN Tlak 660 kPa

Naměřená data boční síly

$y = \{ \{9.903, 15.863\}, \{9.598, 15.738\}, \{8.963, 15.140\}, \{8.230, 14.391\}, \{7.668, 14.042\},$
 $\{7.082, 13.343\}, \{6.484, 12.495\}, \{5.739, 11.148\}, \{5.153, 10.200\}, \{4.591, 9.477\},$
 $\{3.846, 8.055\}, \{3.272, 6.757\}, \{2.698, 5.435\}, \{2.100, 4.387\}, \{1.367, 2.366\}, \{0.769, 0.894\},$
 $\{0.207, -0.677\}, \{-0.403, -2.074\}, \{-1.124, -3.796\}, \{-1.722, -5.218\}, \{-2.308, -6.365\},$
 $\{-2.882, -7.488\}, \{-3.578, -9.184\}, \{-4.177, -10.307\}, \{-4.775, -11.380\}, \{-5.349, -12.028\},$
 $\{-6.106, -13.251\}, \{-6.656, -13.949\}, \{-7.242, -14.598\}, \{-7.852, -15.521\}, \{-8.585, -15.571\},$
 $\{-9.147, -16.120\}, \{-9.586, -16.918\} \}$



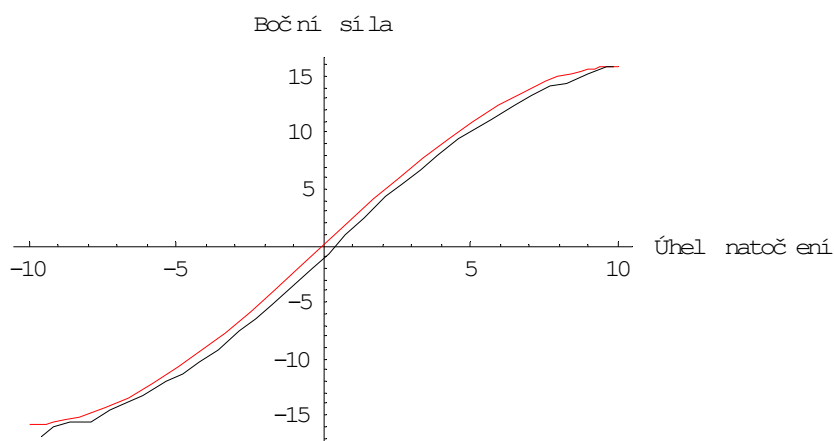
Obr 29. Průběh měření

Tab-7. Tabulka koeficientů

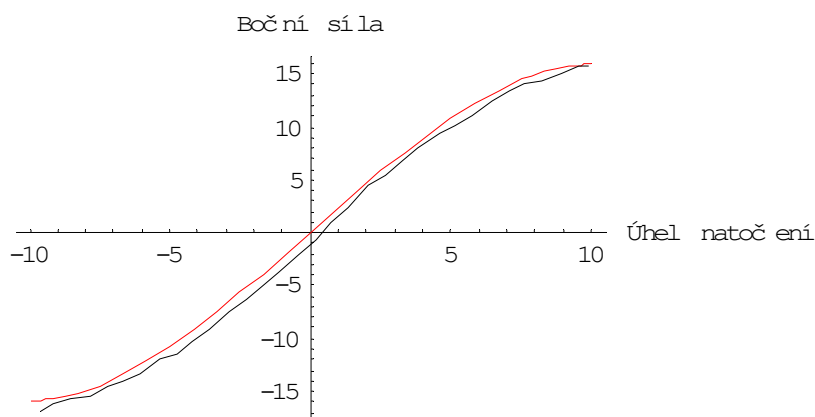
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	20.4734	20.4734	20.4736	20.4735	20.6141	20.6083
B	0.00808	-0.0070566	0.006071	0.0078602	0.0059331	-0.0054358
C	18.7265	-21.4443	24.9333	19.2587	25.7252	-27.9632
D	15.913	15.913	15.913	15.913	15.8431	15.877
E	-0.405025	-0.0584318	0.219078	-0.0710653	-6.69024	-17.2743
d	0.418272	0.418272	0.418274	0.418273	0.419707	0.419648

Tab-8. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	20.632	20.4998	20.7326	20.5413	20.9987
B	-0.036309	0.0103016	0.0093415	-0.0089949	0.0123004
C	-4.21927	14.7859	16.1851	-16.9523	11.8637
D	15.8641	15.9058	15.9006	15.8769	15.9098
E	-0.972223	2.43077	8.39156	1.71908	-15.3177
d	0.419889	0.418542	0.420911	0.418965	0.423604



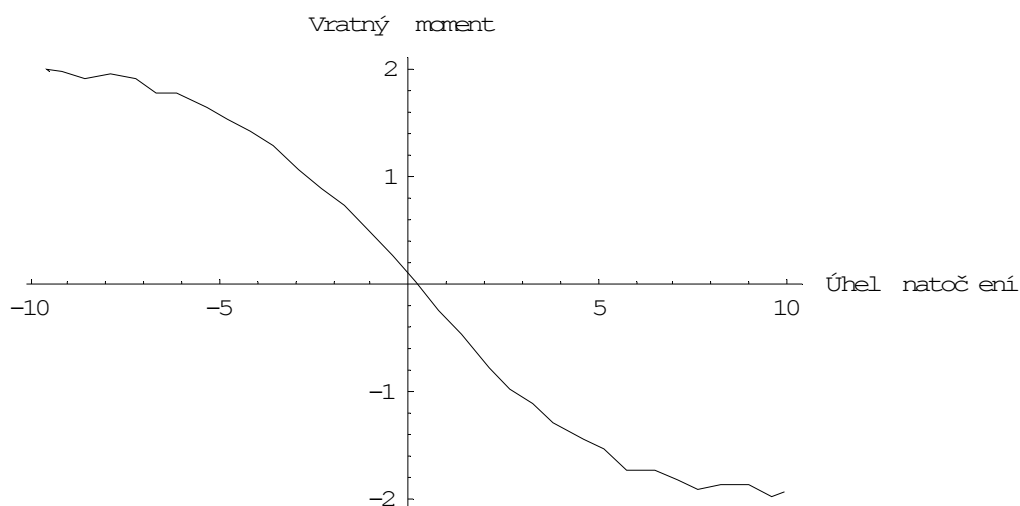
Obr 30. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One



Obr 31. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter

Naměřená data vratného momentu

$y = \{ \{9.903, -1.951\}, \{9.598, -1.989\}, \{8.963, -1.881\}, \{8.230, -1.874\}, \{7.668, -1.921\},$
 $\{7.082, -1.836\}, \{6.484, -1.747\}, \{5.739, -1.737\}, \{5.153, -1.532\}, \{4.591, -1.462\},$
 $\{3.846, -1.295\}, \{3.272, -1.111\}, \{2.698, -0.993\}, \{2.100, -0.774\}, \{1.367, -0.467\},$
 $\{0.769, -0.240\}, \{0.207, 0.019\}, \{-0.403, 0.261\}, \{-1.124, 0.503\}, \{-1.722, 0.742\},$
 $\{-2.308, 0.892\}, \{-2.882, 1.066\}, \{-3.578, 1.298\}, \{-4.177, 1.428\}, \{-4.775, 1.538\},$
 $\{-5.349, 1.648\}, \{-6.106, 1.772\}, \{-6.656, 1.792\}, \{-7.242, 1.912\}, \{-7.852, 1.959\},$
 $\{-8.585, 1.909\}, \{-9.147, 1.994\}, \{-9.586, 2.009\}, \{-9.501, 1.984\} \}$



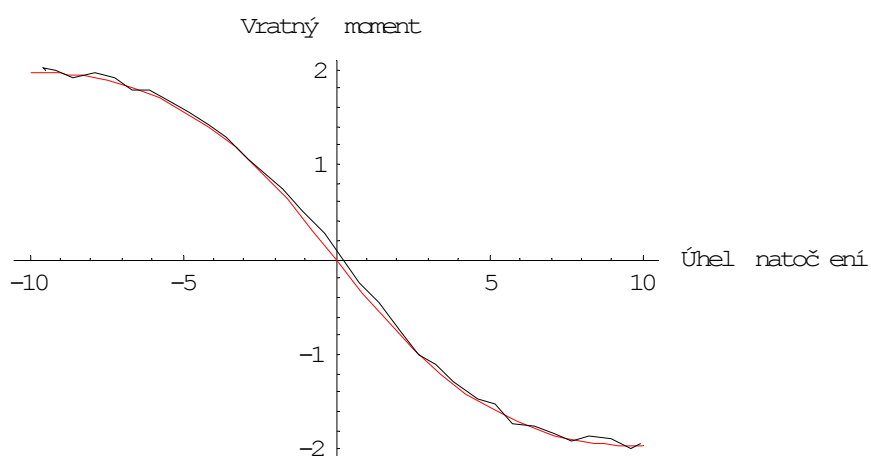
Obr 32. Průběh měření

Tab-9. Tabulka koeficientů

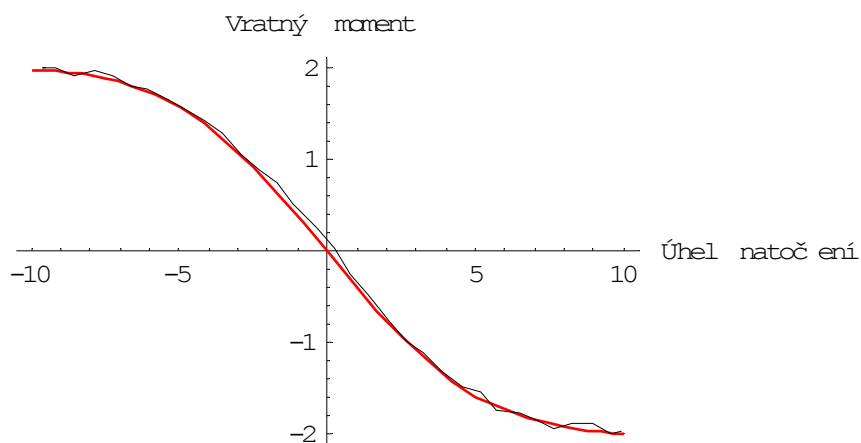
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	0.0766457	0.0766859	0.076732	0.0767537	0.0819921	0.136898
B	0.10409	-0.0777714	0.094153	0.0782193	0.166088	0.00642215
C	-1.93602	2.58205	-2.1419	-2.55812	-1.19479	-28.2279
D	1.98127	1.98464	1.97466	1.98822	2.05329	1.99365
E	0.213755	1.06956	0.398151	1.06042	-0.429885	12.9989
d	0.203668	0.203721	0.203783	0.203811	0.210651	0.272193

Tab-10. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	0.0778104	0.0910241	0.0821493	0.083462	0.127967
B	-0.0217492	-0.0205811	0.0176533	-0.0222035	0.0137029
C	8.97133	9.57623	-11.2473	8.65745	-13.4333
D	2.02069	1.98724	1.96709	2.05856	1.98141
E	19.6094	14.7007	26.1171	19.5444	29.1548
d	0.205209	0.221951	0.210853	0.212531	0.263164



Obr 33. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One

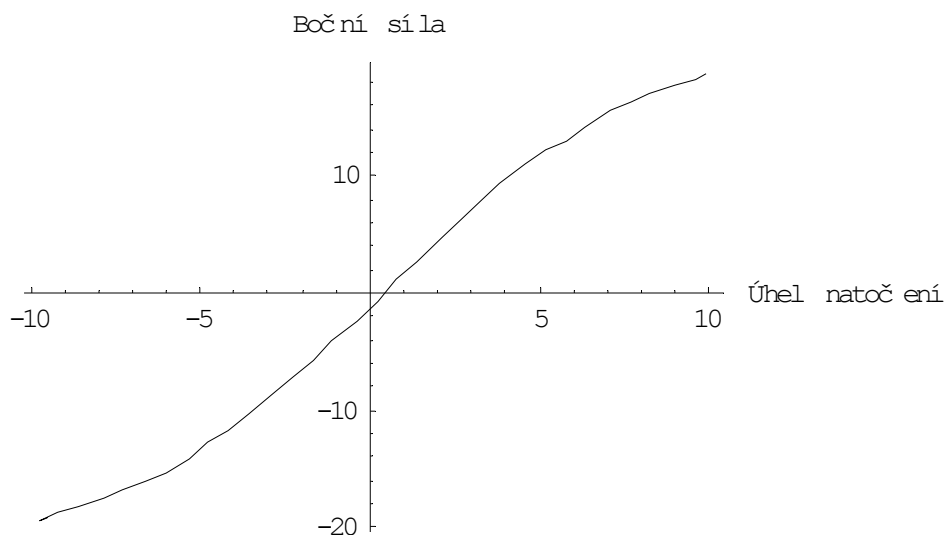


Obr 34. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand2bin

2.7.3 Přítlačná síla 37,5 kN Tlak 660 kPa

Naměřená data boční síly

$y = \{ \{9.927, 18.782\}, \{9.610, 18.258\}, \{8.987, 17.809\}, \{8.242, 16.936\}, \{7.681, 16.437\},$
 $\{7.058, 15.589\}, \{6.349, 14.242\}, \{5.776, 12.969\}, \{5.165, 12.221\}, \{4.603, 10.973\},$
 $\{3.846, 9.352\}, \{3.297, 8.005\}, \{2.698, 6.308\}, \{2.112, 4.761\}, \{1.392, 2.741\}, \{0.793, 1.169\},$
 $\{0.232, -0.602\}, \{-0.403, -2.299\}, \{-1.112, -4.120\}, \{-1.698, -5.866\}, \{-2.284, -7.214\},$
 $\{-2.858, -8.636\}, \{-3.578, -10.282\}, \{-4.165, -11.654\}, \{-4.751, -12.802\}, \{-5.337, -14.149\},$
 $\{-6.033, -15.247\}, \{-6.643, -16.145\}, \{-7.315, -16.719\}, \{-7.828, -17.492\}, \{-8.609, -18.166\},$
 $\{-9.171, -18.690\}, \{-9.708, -19.488\}, \{-9.513, -19.288\} \}$



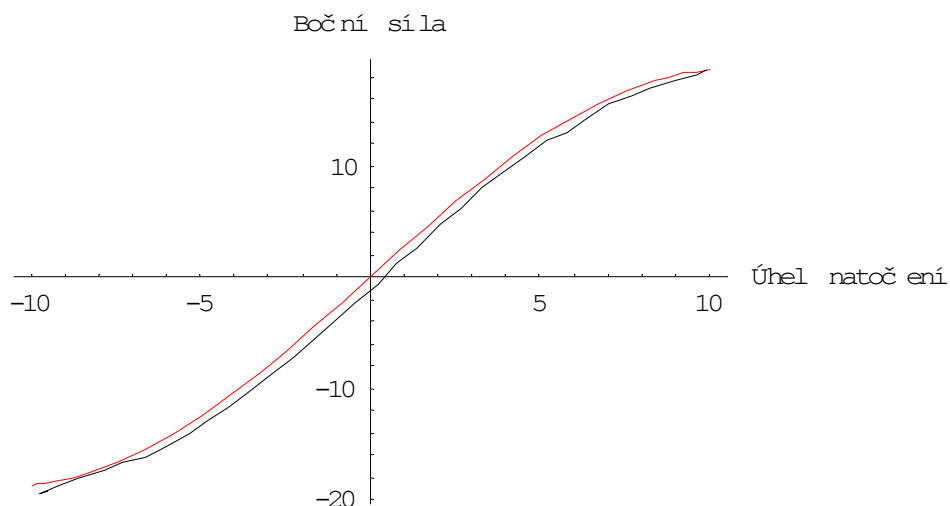
Obr 35. Průběh měření

Tab-11. Tabulka koeficientů

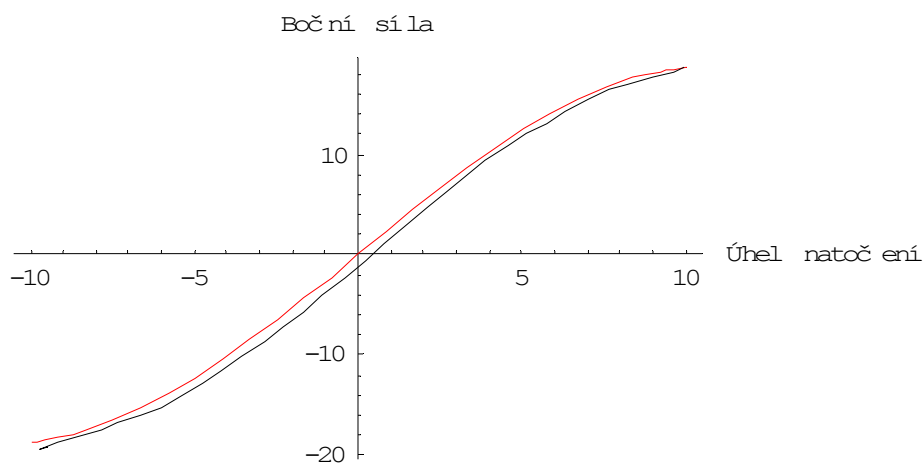
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	22.4063	22.4065	22.4064	22.4063	22.6875	22.5572
B	0.0060718	-0.0063873	-0.007057	-0.0070856	0.0114521	-0.0156898
C	24.0826	-22.8933	-20.7196	-20.6338	12.55	-9.36263
D	18.832	18.832	18.832	18.832	18.7859	18.7666
E	-1.04449	-1.44735	-0.920815	-1.12355	-11.5871	-0.0232466
d	0.363787	0.363789	0.363788	0.363788	0.366063	0.365011

Tab-12. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	22.5741	22.7531	22.4492	22.5209	22.8178
B	-0.0103801	0.00701259	-0.0178967	0.0191179	0.0176341
C	-13.9217	21.226	-8.15546	7.6808	8.12973
D	18.8019	18.8158	18.8104	18.7984	18.8173
E	-11.3146	27.7278	-2.13227	0.159449	-3.09108
d	0.365147	0.366592	0.364135	0.364716	0.367113



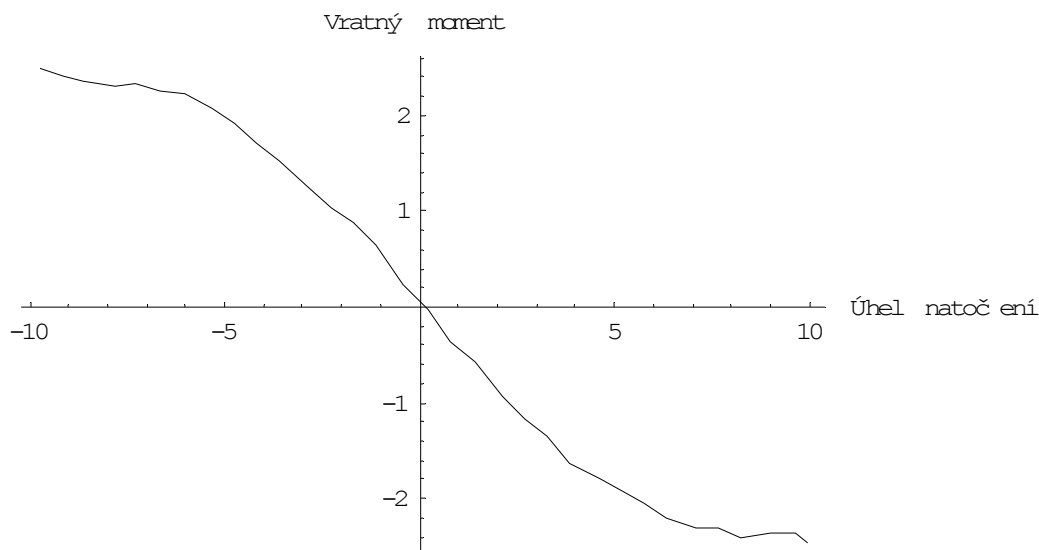
Obr 36. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One



Obr 37. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter

Naměřená data vratného momentu

$y = \{ \{9.927, -2.457\}, \{9.610, -2.360\}, \{8.987, -2.365\}, \{8.242, -2.398\}, \{7.681, -2.313\},$
 $\{7.058, -2.308\}, \{6.349, -2.193\}, \{5.776, -2.043\}, \{5.165, -1.911\}, \{4.603, -1.789\},$
 $\{3.846, -1.627\}, \{3.297, -1.355\}, \{2.698, -1.178\}, \{2.112, -0.926\}, \{1.392, -0.572\},$
 $\{0.793, -0.372\}, \{0.232, -0.021\}, \{-0.403, 0.221\}, \{-1.112, 0.640\}, \{-1.698, 0.877\},$
 $\{-2.284, 1.039\}, \{-2.858, 1.251\}, \{-3.578, 1.533\}, \{-4.165, 1.710\}, \{-4.751, 1.917\},$
 $\{-5.337, 2.064\}, \{-6.033, 2.221\}, \{-6.643, 2.259\}, \{-7.315, 2.338\}, \{-7.828, 2.306\},$
 $\{-8.609, 2.348\}, \{-9.171, 2.401\}, \{-9.708, 2.483\} \}$



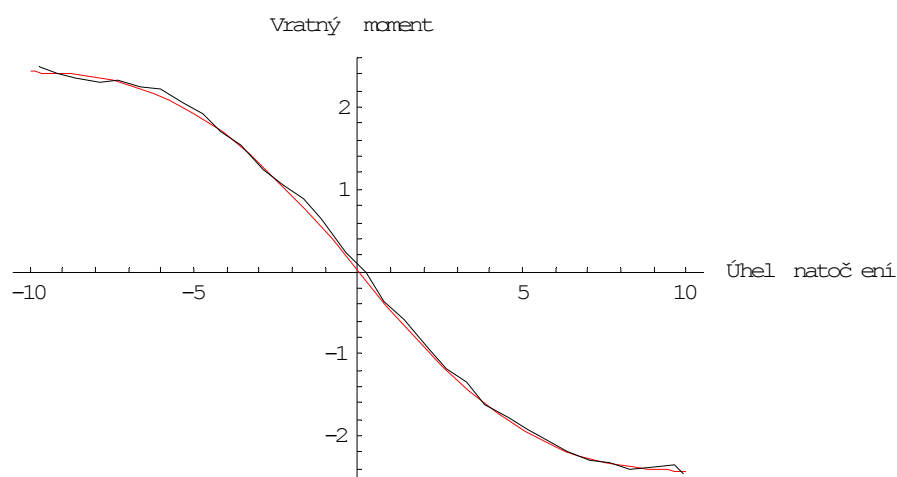
Obr 38 Průběh měření

Tab-13. Tabulka koeficientů

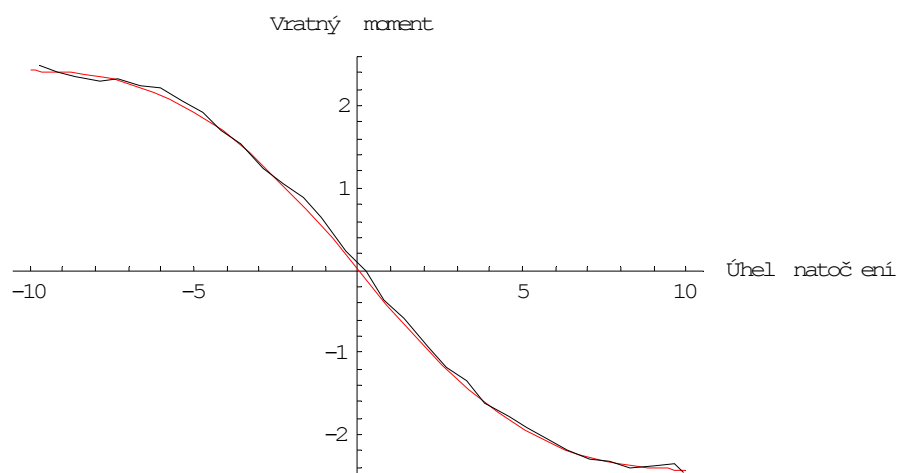
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	0.082277	0.0827886	0.082399	0.0825683	0.0966025	0.142068
B	-0.0152613	-0.0182338	0.017969	-0.0269828	0.0116615	0.0167818
C	12.7787	10.629	-10.8799	7.24411	-16.7141	-12.1018
D	2.433	2.43845	2.4332	2.433	1.9661	2.45744
E	29.9874	20.6893	21.8717	9.55633	26.6673	29.5772
d	0.175954	0.1765	0.176085	0.176265	0.228651	0.231211

Tab-14. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	0.110966	0.147397	0.121858	0.0902295	0.0913806
B	0.0303266	0.0122703	-0.0216716	-0.0195777	-0.0221903
C	-6.4631	-14.7132	8.54766	9.65002	8.47215
D	2.50763	2.44486	2.47921	2.47364	2.48072
E	9.97353	-3.54117	9.18338	18.0761	14.832
d	0.204341	0.235507	0.214134	0.184261	0.185433



Obr 39. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One

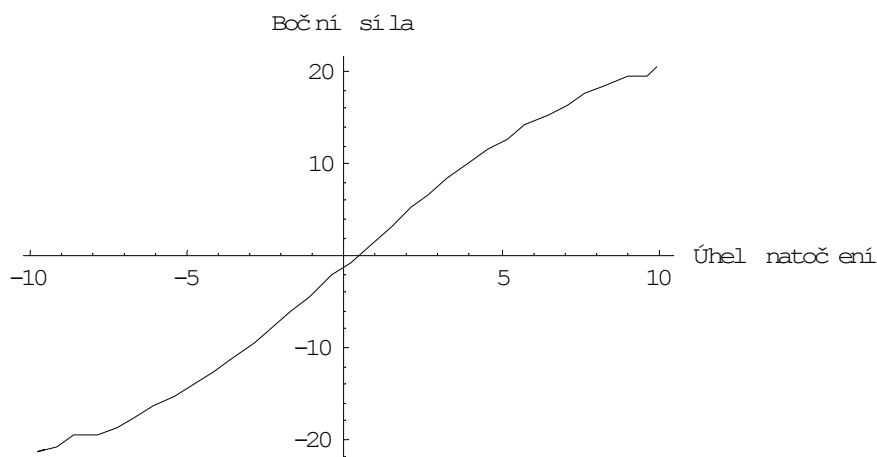


Obr 40. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand2bin

2.7.4 Přítlačná síla 45 kN Tlak 660 kPa

Naměřená data boční síly

$y = \{ \{9.952, 20.603\}, \{9.610, 19.630\}, \{8.999, 19.531\}, \{8.218, 18.433\}, \{7.668, 17.585\},$
 $\{7.070, 16.387\}, \{6.472, 15.414\}, \{5.763, 14.316\}, \{5.165, 12.820\}, \{4.591, 11.597\},$
 $\{4.017, 10.450\}, \{3.284, 8.578\}, \{2.698, 6.757\}, \{2.112, 5.186\}, \{1.526, 3.314\}, \{0.793, 1.119\},$
 $\{0.207, -0.727\}, \{-0.391, -2.099\}, \{-1.112, -4.394\}, \{-1.710, -5.991\}, \{-2.308, -7.962\},$
 $\{-2.870, -9.434\}, \{-3.603, -11.255\}, \{-4.128, -12.677\}, \{-4.775, -14.074\}, \{-5.361, -15.322\},$
 $\{-6.082, -16.220\}, \{-6.656, -17.592\}, \{-7.230, -18.590\}, \{-7.828, -19.538\}, \{-8.573, -19.513\},$
 $\{-9.122, -20.960\}, \{-9.708, -21.309\}, \{-9.513, -21.159\} \}$



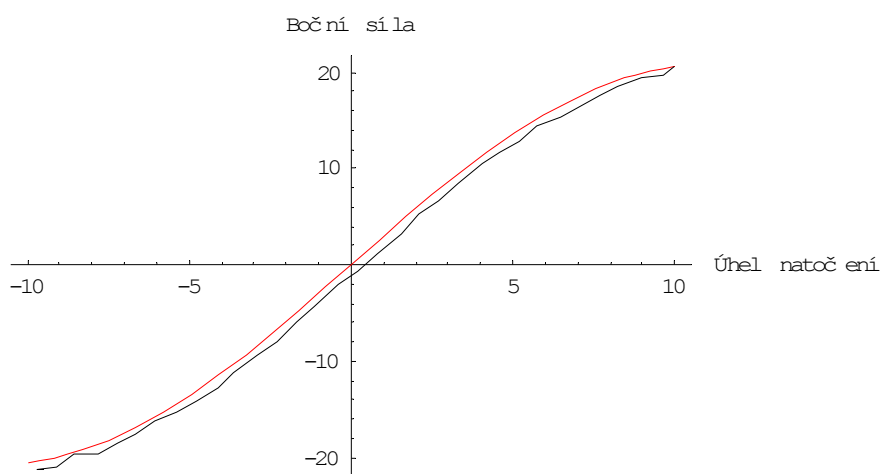
Obr 41. Průběh měření

Tab-15. Tabulka koeficientů

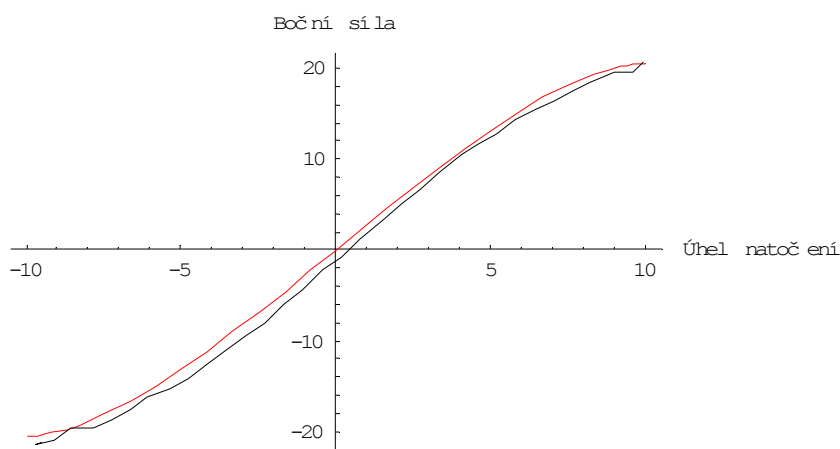
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	30.6836	30.6843	30.685	30.6848	30.9165	30.8354
B	0.0051872	0.0075499	-0.008501	0.0087397	0.0368967	0.0196171
C	27.4429	18.8526	-16.7314	16.2798	3.90066	7.27114
D	20.653	20.653	20.653	20.653	20.6065	20.6207
E	-25.9656	-12.8164	-11.0431	-10.2497	-1.06388	-4.0714
d	0.388719	0.388723	0.388728	0.388727	0.390192	0.38968

Tab-16. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	30.7946	30.8317	31.3881	30.8785	32.9526
B	-0.00725286	0.00658301	-0.0548728	-0.0126264	0.0168575
C	-19.6022	21.7233	-2.59137	-11.1559	8.01118
D	20.5916	20.5838	20.5579	20.5998	20.5641
E	-18.6703	-12.5196	-2.05882	-11.5758	-14.4631
d	0.389422	0.389656	0.393156	0.389952	0.402835



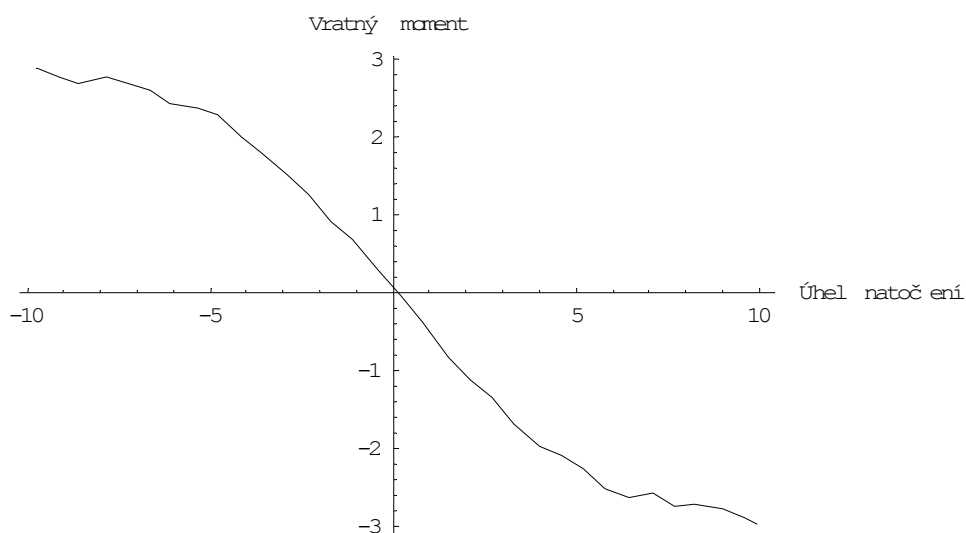
Obr 42. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One



Obr 43. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter

Naměřená data vratného momentu

$y = \{ \{9.952, -2.946\}, \{9.610, -2.879\}, \{8.999, -2.764\}, \{8.218, -2.694\}, \{7.668, -2.719\},$
 $\{7.070, -2.555\}, \{6.472, -2.617\}, \{5.763, -2.515\}, \{5.165, -2.243\}, \{4.591, -2.081\},$
 $\{4.017, -1.949\}, \{3.284, -1.677\}, \{2.698, -1.343\}, \{2.112, -1.113\}, \{1.526, -0.826\},$
 $\{0.793, -0.370\}, \{0.207, -0.016\}, \{-0.391, 0.278\}, \{-1.112, 0.690\}, \{-1.710, 0.907\},$
 $\{-2.308, 1.269\}, \{-2.870, 1.500\}, \{-3.603, 1.805\}, \{-4.128, 1.997\}, \{-4.775, 2.274\},$
 $\{-5.361, 2.378\}, \{-6.082, 2.423\}, \{-6.656, 2.585\}, \{-7.230, 2.680\}, \{-7.828, 2.767\},$
 $\{-8.573, 2.675\}, \{-9.122, 2.762\}, \{-9.708, 2.875\} \}$



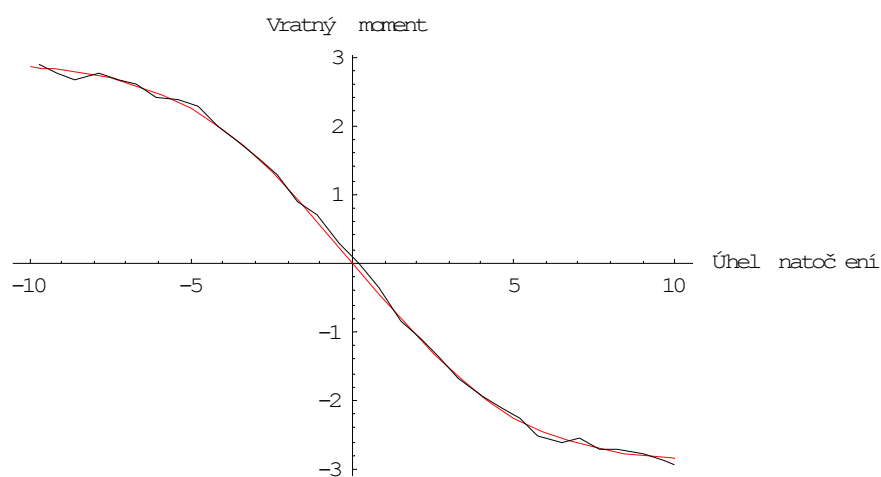
Obr 44. Průběh měření

Tab-17. Tabulka koeficientů

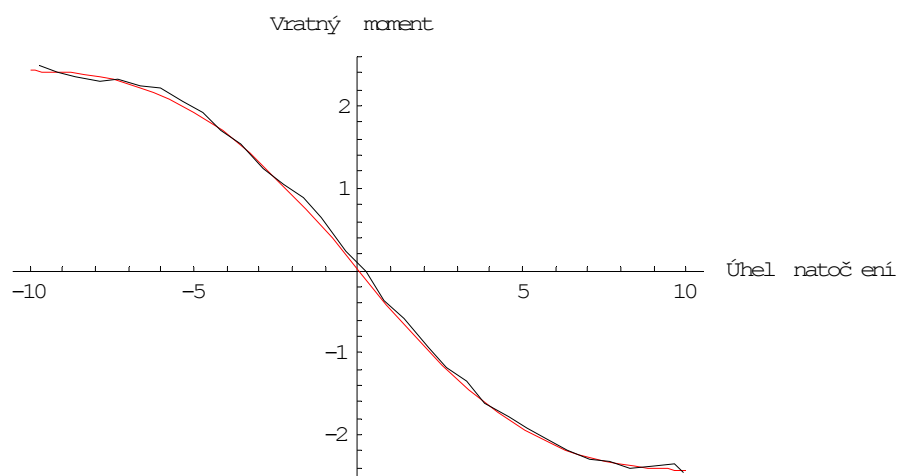
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek²	0.102403	0.102639	0.104379	0.107746	0.115602	0.216235
B	-0.161746	0.1642	0.16005	-0.055198	-0.014144	-0.185791
C	1.16208	-1.1448	-1.17929	3.48676	13.0595	1.1529
D	2.925	2.925	2.925	2.91698	2.87383	2.88381
E	-1.06123	-1.11425	-0.908893	2.92349	8.65985	-0.364409
d	0.166589	0.16678	0.168188	0.170879	0.208565	0.242076

Tab-18. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	0.199638	0.134911	0.114956	0.139583	0.209403
B	0.0192322	-0.0233425	0.0297063	-0.0368093	0.0262345
C	-9.93038	8.03277	-6.70078	5.0723	-7.81769
D	2.85711	2.87001	2.8459	2.88212	2.83611
E	8.86481	12.5594	9.47415	4.36155	10.1457
d	0.2326	0.19121	0.176504	0.194493	0.238221



Obr 45. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One

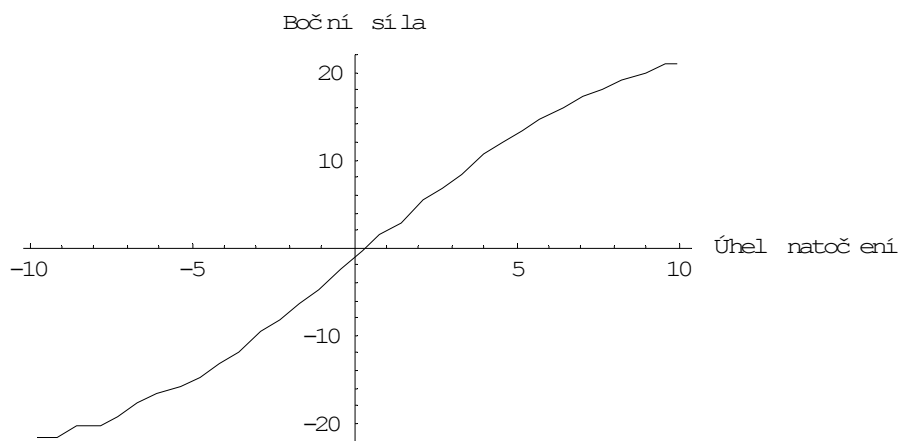


Obr 46. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter

2.7.5 Přítlačná síla 52,5 kN Tlak 660 kPa

Naměřená data boční síly

$y = \{ \{9.927, 21.027\}, \{9.598, 20.853\}, \{8.999, 19.955\}, \{8.242, 18.982\}, \{7.656, 17.934\},$
 $\{7.082, 17.285\}, \{6.484, 15.938\}, \{5.739, 14.666\}, \{5.153, 13.244\}, \{4.591, 11.921\},$
 $\{3.993, 10.599\}, \{3.284, 8.454\}, \{2.686, 6.782\}, \{2.124, 5.335\}, \{1.465, 2.915\}, \{0.793, 1.393\},$
 $\{0.232, -0.453\}, \{-0.379, -2.299\}, \{-1.112, -4.719\}, \{-1.698, -6.290\}, \{-2.284, -8.087\},$
 $\{-2.870, -9.584\}, \{-3.578, -11.929\}, \{-4.165, -13.301\}, \{-4.751, -14.648\}, \{-5.325, -15.796\},$
 $\{-6.057, -16.644\}, \{-6.656, -17.592\}, \{-7.242, -19.164\}, \{-7.828, -20.186\},$
 $\{-8.561, -20.186\}, \{-9.135, -21.658\}, \{-9.708, -21.559\} \}$



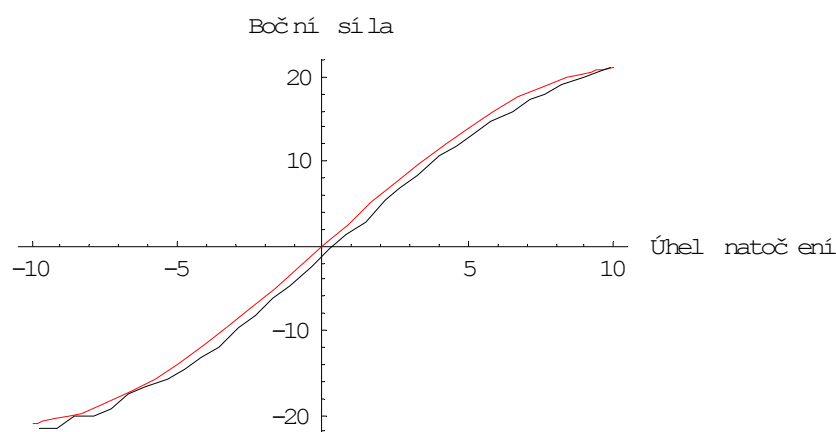
Obr 47. Průběh měření

Tab-19. Tabulka koeficientů

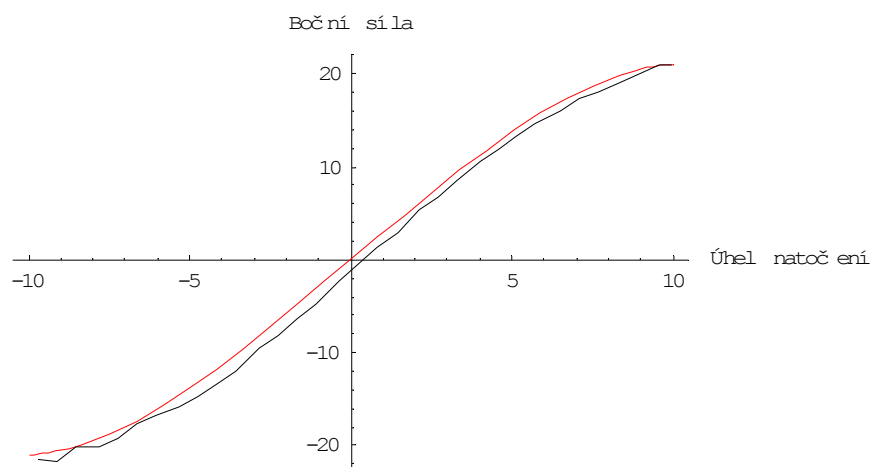
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	34.0782	34.0793	34.0788	34.079	34.1555	34.2252
B	0.0051938	-0.0049281	-0.005273	0.0078013	-0.005329	-0.0121139
C	27.7445	-29.2619	-27.3477	18.4789	-27.247	-11.8896
D	21.0769	21.077	21.077	21.077	21.0461	21.0317
E	-26.2448	-26.0392	-24.2132	-12.1381	-17.6314	-4.85666
d	0.414428	0.414435	0.414432	0.414433	0.414898	0.415321

Tab-20. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	34.5902	34.1893	34.3768	35.1224	34.7184
B	0.00683188	0.00535252	0.0050158	0.0127475	0.0109822
C	21.6504	26.9628	29.2838	10.9075	12.7562
D	21.0257	21.0524	21.0709	21.0133	21.058
E	13.624	-12.9744	22.6582	-20.5196	-19.0348
d	0.41753	0.415103	0.41624	0.420729	0.418303



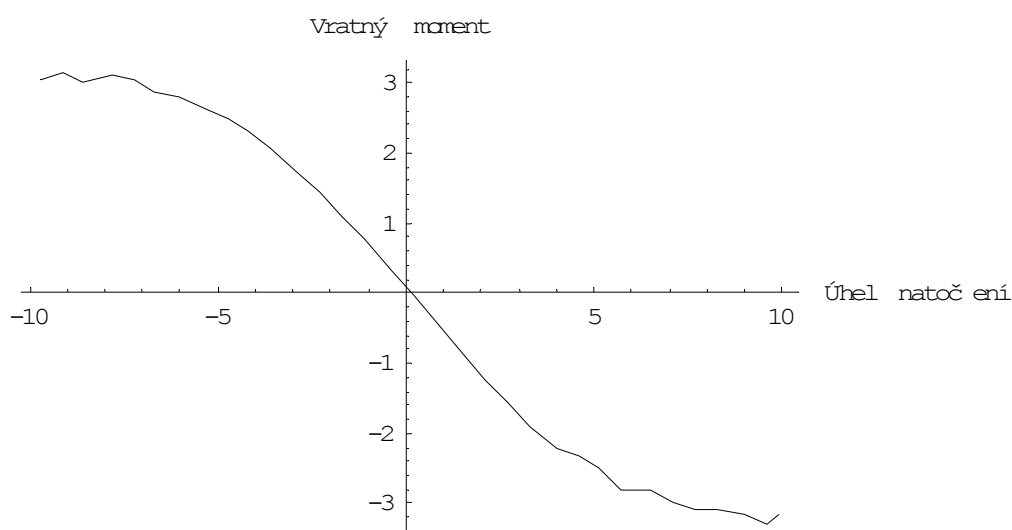
Obr 48. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One



Obr 49. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Best2Bin

Naměřená data vratného momentu

$y = \{ \{9.927, -3.148\}, \{9.598, -3.290\}, \{8.999, -3.173\}, \{8.242, -3.098\}, \{7.656, -3.093\},$
 $\{7.082, -2.991\}, \{6.484, -2.794\}, \{5.739, -2.797\}, \{5.153, -2.490\}, \{4.591, -2.323\},$
 $\{3.993, -2.220\}, \{3.284, -1.916\}, \{2.686, -1.552\}, \{2.124, -1.243\}, \{1.465, -0.831\},$
 $\{0.793, -0.407\}, \{0.232, -0.038\}, \{-0.379, 0.311\}, \{-1.112, 0.777\}, \{-1.698, 1.099\},$
 $\{-2.284, 1.428\}, \{-2.870, 1.715\}, \{-3.578, 2.057\}, \{-4.165, 2.306\}, \{-4.751, 2.498\},$
 $\{-5.325, 2.618\}, \{-6.057, 2.787\}, \{-6.656, 2.867\}, \{-7.242, 3.034\}, \{-7.828, 3.102\},$
 $\{-8.561, 3.027\}, \{-9.135, 3.154\}, \{-9.708, 3.054\} \}$



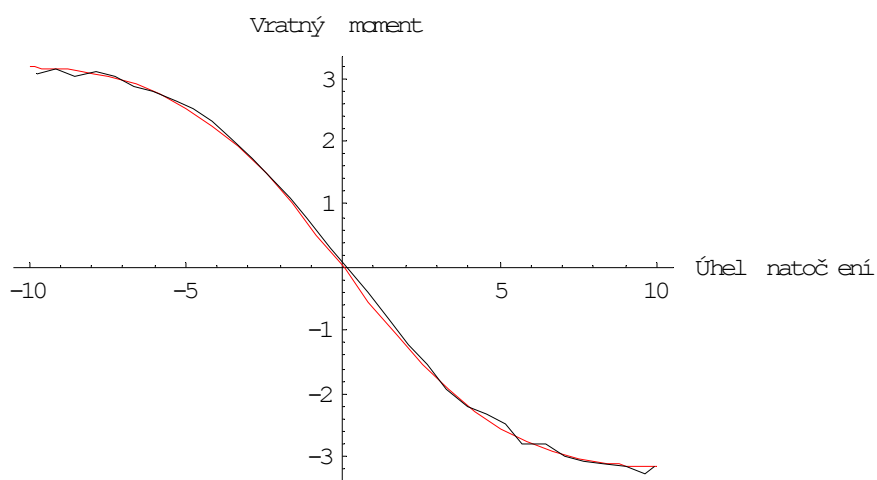
Obr 50 Průběh měření

Tab-21. Tabulka koeficientů

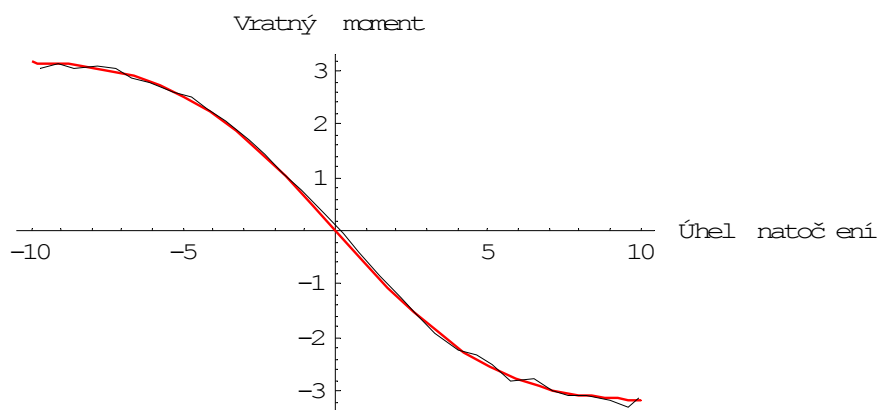
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	0.129348	0.129492	0.130863	0.129823	0.172108	0.246932
B	-0.0894514	-0.0906041	-0.076449	-0.122785	-0.010742	0.0230451
C	2.26393	2.22891	2.66354	1.64819	18.2238	-9.31336
D	3.1679	3.17365	3.14797	3.16529	3.13789	3.14864
E	0.519403	0.505005	0.869029	-0.297035	28.6948	21.4518
d	0.169126	0.16922	0.170113	0.169436	0.195088	0.233679

Tab-22. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	0.202413	0.182961	0.154637	0.168687	0.188439
B	0.0113793	0.0102828	0.124589	-0.0197441	-0.019905
C	-16.8302	-18.6359	-1.60044	9.83209	9.63648
D	3.14458	3.1623	3.12425	3.19014	3.18873
E	13.911	27.973	-1.03521	13.0829	9.38538
d	0.211568	0.201145	0.184921	0.193139	0.204134



Obr 51. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One



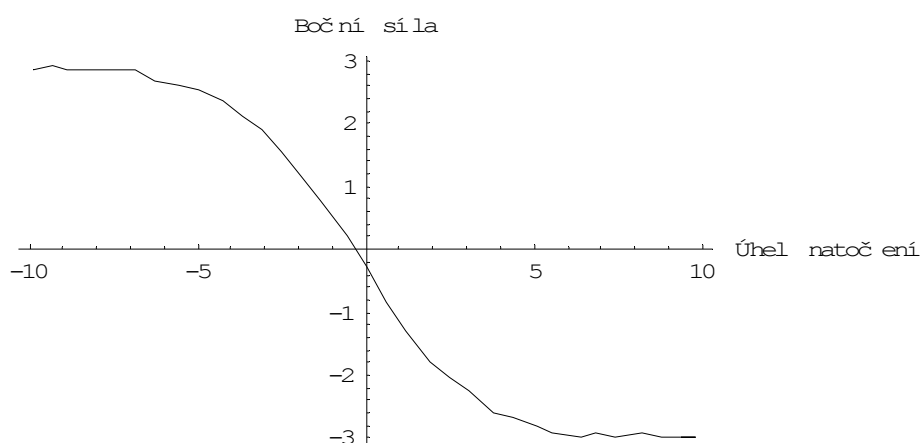
Obr 52. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter

2.8 Plášť 205/70 TR14

2.8.1 Přítlačná síla 3,81 kN Tlak 240 kPa

Naměřená data boční síly

$y = \{ \{9.383, -2.986\}, \{9.814, -2.986\}, \{9.383, -2.986\}, \{8.808, -2.986\}, \{8.234, -2.906\},$
 $\{7.372, -2.986\}, \{6.798, -2.906\}, \{6.367, -2.986\}, \{5.506, -2.906\}, \{5.075, -2.826\},$
 $\{4.357, -2.666\}, \{3.782, -2.586\}, \{3.064, -2.266\}, \{2.490, -2.026\}, \{1.916, -1.786\},$
 $\{1.198, -1.307\}, \{0.623, -0.827\}, \{0.049, -0.267\}, \{-0.526, 0.213\}, \{-1.387, 0.773\},$
 $\{-1.962, 1.173\}, \{-2.536, 1.573\}, \{-3.110, 1.893\}, \{-3.685, 2.133\}, \{-4.259, 2.373\},$
 $\{-4.977, 2.533\}, \{-5.552, 2.613\}, \{-6.270, 2.693\}, \{-6.844, 2.853\}, \{-7.562, 2.853\},$
 $\{-8.136, 2.853\}, \{-8.854, 2.853\}, \{-9.285, 2.933\}, \{-9.860, 2.853\} \}$



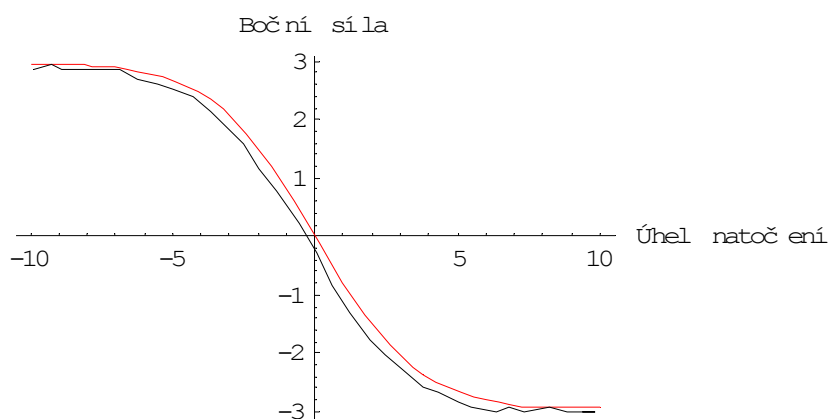
Obr 53. Průběh měření

Tab-23. Tabulka koeficientů

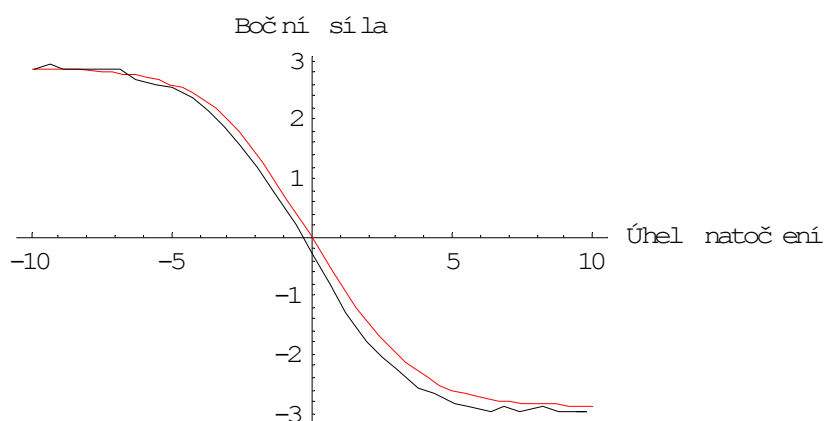
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	1.11293	1.11316	1.11293	1.11305	1.17727	1.28799
B	-0.180182	0.144376	-0.179456	-0.179669	-0.063115	-0.239196
C	1.58399	-1.97243	1.59131	1.59191	4.10748	1.055
D	2.9356	2.93641	2.93587	2.93287	2.9463	2.90974
E	0.155248	0.732977	0.172808	0.174216	3.53649	-1.72383
d	0.524211	0.524265	0.524212	0.52424	0.53915	0.563936

Tab-24. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	1.19362	1.14328	1.22744	1.26371	1.20894
B	-0.0210713	0.242894	-0.0225703	0.227718	-0.0331955
C	12.3807	-1.12983	12.8065	-1.30241	7.59378
D	2.89486	2.96461	2.89952	2.95813	2.9755
E	25.9844	-0.685094	28.5287	0.351863	12.1463
d	0.542883	0.531312	0.55052	0.558593	0.546355



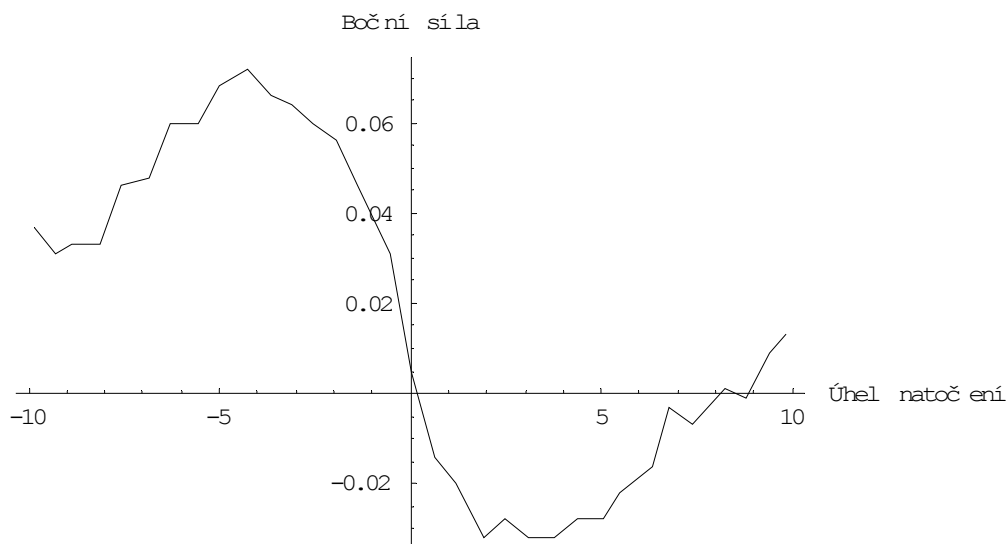
Obr 54. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One



Obr 55. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand2bin

Naměřená data vratného momentu

$y = \{ \{9.814, 0.013\}, \{9.383, 0.009\}, \{8.808, -0.001\}, \{8.234, 0.001\}, \{7.372, -0.007\},$
 $\{6.798, -0.003\}, \{6.367, -0.016\}, \{5.506, -0.022\}, \{5.075, -0.028\}, \{4.357, -0.028\},$
 $\{3.782, -0.032\}, \{3.064, -0.032\}, \{2.490, -0.028\}, \{1.916, -0.032\}, \{1.198, -0.020\},$
 $\{0.623, -0.014\}, \{0.049, 0.005\}, \{-0.526, 0.031\}, \{-1.387, 0.046\}, \{-1.962, 0.056\},$
 $\{-2.536, 0.060\}, \{-3.110, 0.064\}, \{-3.685, 0.066\}, \{-4.259, 0.072\}, \{-4.977, 0.068\},$
 $\{-5.552, 0.060\}, \{-6.270, 0.060\}, \{-6.844, 0.048\}, \{-7.562, 0.046\}, \{-8.136, 0.033\},$
 $\{-8.854, 0.033\}, \{-9.285, 0.031\}, \{-9.860, 0.037\} \}$



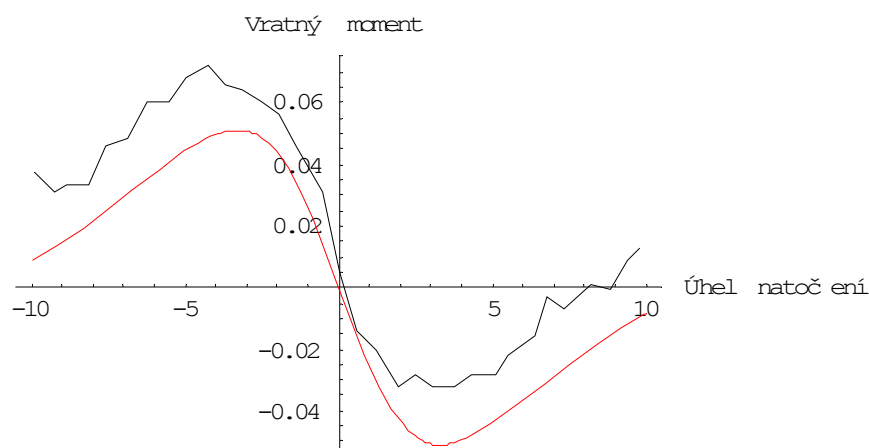
Obr 56. Průběh měření

Tab-25. Tabulka koeficientů

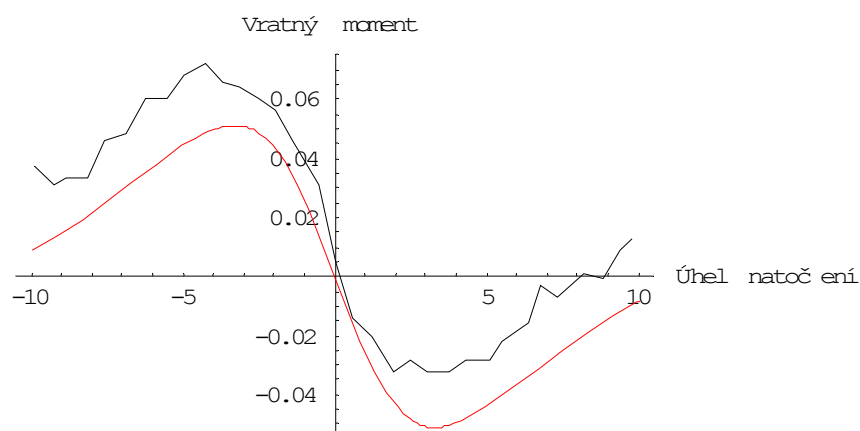
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	0.0110175	0.0110259	0.011050	0.0110409	0.0132148	0.0111639
B	-0.191016	-0.109199	0.21259	0.14481	0.503261	0.0406284
C	2.8298	4.64042	-2.42545	-3.82346	-1.31028	-11.0302
D	0.0511021	0.0514812	0.052459	0.0516677	0.0528574	0.0532116
E	0.200724	1.35568	-0.628289	0.978955	1.28241	6.23596
d	3.0584	3.05957	3.06293	3.06165	3.34952	3.07866

Tab-26. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	0.0126776	0.0122097	0.0115841	0.0116731	0.0110594
B	0.185799	-0.0508135	-19.7895	0.150385	-0.129725
C	-2.05052	9.43584	-9.87516	-2.60887	4.12254
D	0.0485451	0.0444109	0.0510284	0.0563862	0.0504943
E	-2.36901	4.90951	0.992868	-1.64128	1.09282
d	3.28073	3.21962	3.13605	3.14808	3.0642



Obr 57. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One

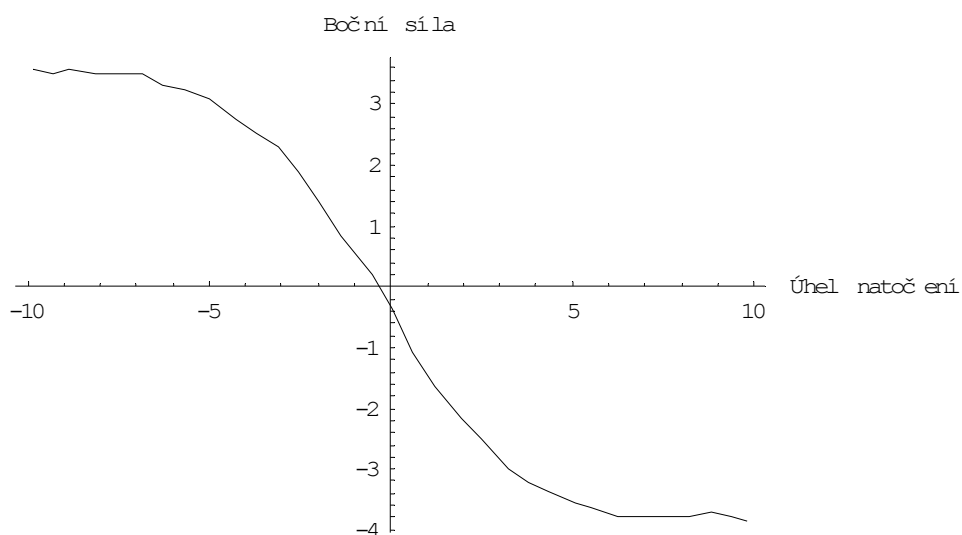


Obr 58. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Best1Exp

2.8.2 Přítlačná síla 5,08 kN Tlak 240 kPa

Naměřená data boční síly

$y = \{ \{9.814, -3.866\}, \{9.383, -3.786\}, \{8.808, -3.706\}, \{8.234, -3.786\}, \{7.372, -3.786\},$
 $\{6.798, -3.786\}, \{6.224, -3.786\}, \{5.506, -3.626\}, \{5.075, -3.546\}, \{4.357, -3.386\},$
 $\{3.782, -3.226\}, \{3.208, -2.986\}, \{2.490, -2.506\}, \{1.916, -2.186\}, \{1.198, -1.626\},$
 $\{0.623, -1.067\}, \{0.049, -0.347\}, \{-0.526, 0.213\}, \{-1.387, 0.853\}, \{-1.962, 1.413\},$
 $\{-2.536, 1.893\}, \{-3.110, 2.293\}, \{-3.685, 2.533\}, \{-4.259, 2.773\}, \{-4.977, 3.093\},$
 $\{-5.695, 3.253\}, \{-6.270, 3.333\}, \{-6.844, 3.493\}, \{-7.562, 3.493\}, \{-8.136, 3.493\},$
 $\{-8.854, 3.573\}, \{-9.285, 3.493\}, \{-9.860, 3.573\} \}$



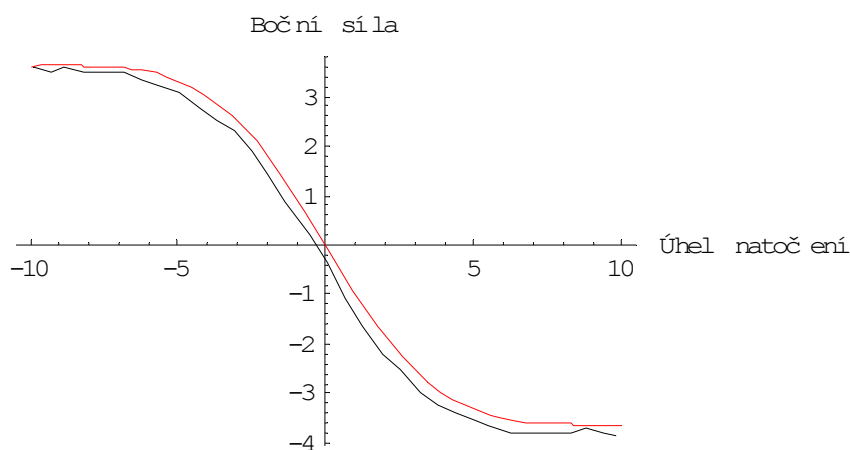
Obr 59. Průběh měření

Tab-27. Tabulka koeficientů

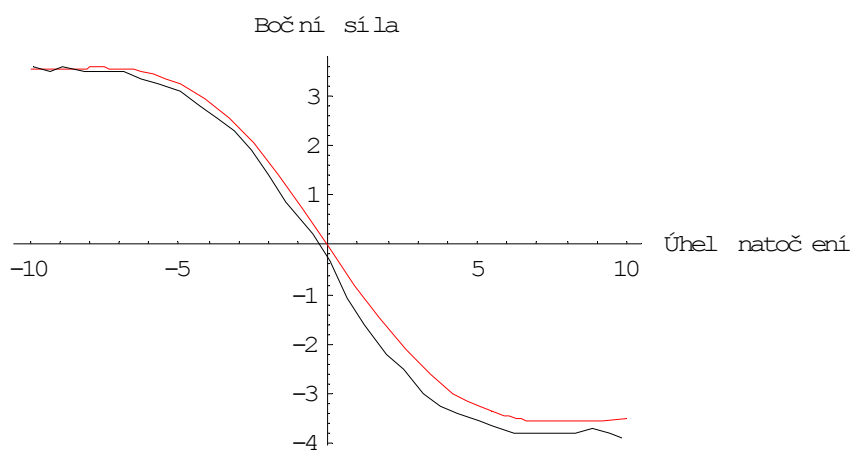
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	2.49717	2.49796	2.49895	2.49874	2.84164	2.86156
B	-0.0735547	-0.0657365	0.065665	-0.0917309	0.0190041	0.0260772
C	3.69561	4.10117	-4.14244	2.99448	-13.0811	-9.67523
D	3.623	3.623	3.623	3.623	3.57877	3.55478
E	2.68962	3.26261	3.47264	1.77773	23.6357	14.0898
d	0.643718	0.64382	0.643947	0.643921	0.686683	0.689086

Tab-28. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	2.66141	2.55431	2.65761	2.7074	2.6641
B	-0.0318266	-0.0466765	-0.0305587	-0.0363206	0.0431257
C	9.02496	5.61696	9.34173	7.3417	-6.69504
D	3.57488	3.62187	3.60769	3.57736	3.58227
E	14.7736	4.77867	15.9627	7.47188	8.7682
d	0.664549	0.651041	0.664075	0.670266	0.664886



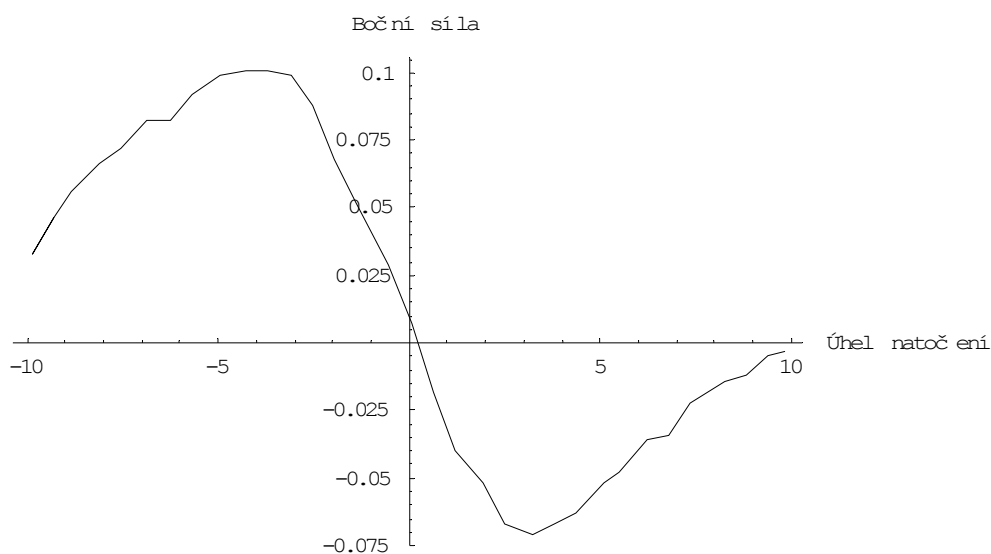
Obr 60. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One



Obr 61. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand2bin

Naměřená data vratného momentu

$y = \{ \{9.814, -0.003\}, \{9.383, -0.005\}, \{8.808, -0.012\}, \{8.234, -0.014\}, \{7.372, -0.022\},$
 $\{6.798, -0.034\}, \{6.224, -0.036\}, \{5.506, -0.048\}, \{5.075, -0.052\}, \{4.357, -0.063\},$
 $\{3.782, -0.067\}, \{3.208, -0.071\}, \{2.490, -0.067\}, \{1.916, -0.052\}, \{1.198, -0.040\},$
 $\{0.623, -0.018\}, \{0.049, 0.007\}, \{-0.526, 0.029\}, \{-1.387, 0.052\}, \{-1.962, 0.068\},$
 $\{-2.536, 0.088\}, \{-3.110, 0.099\}, \{-3.685, 0.101\}, \{-4.259, 0.101\}, \{-4.977, 0.099\},$
 $\{-5.695, 0.092\}, \{-6.270, 0.082\}, \{-6.844, 0.082\}, \{-7.562, 0.072\}, \{-8.136, 0.066\},$
 $\{-8.854, 0.056\}, \{-9.285, 0.046\}, \{-9.860, 0.033\}, \{-9.285, 0.046\} \}$



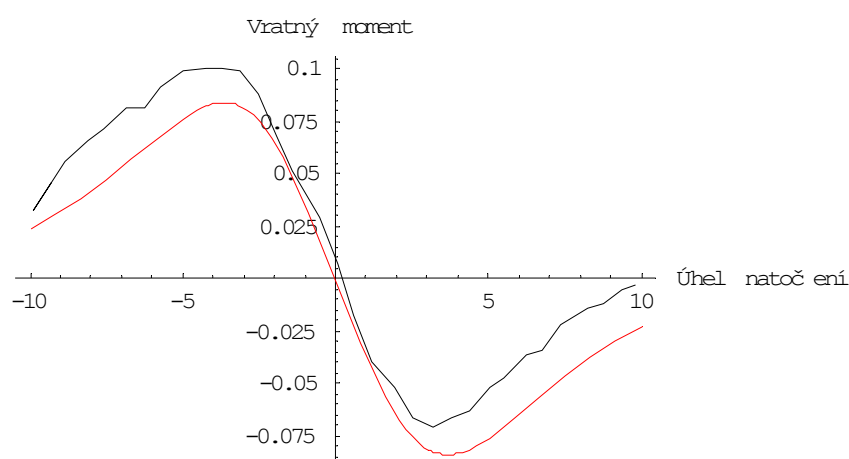
Obr 62. Průběh měření

Tab-29. Tabulka koeficientů

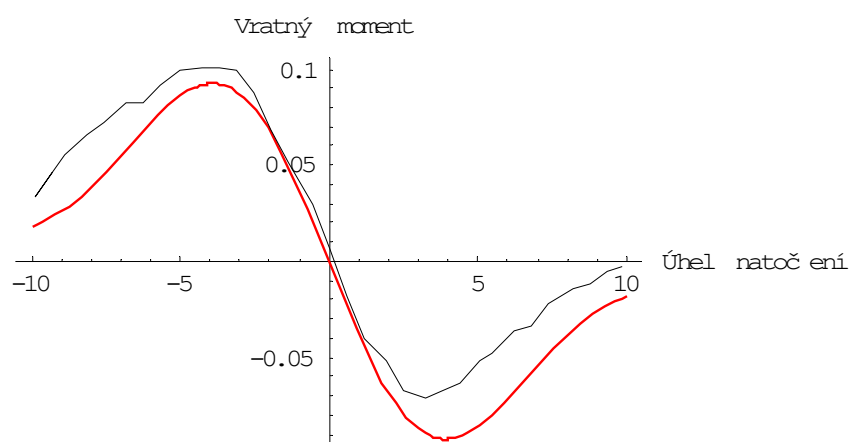
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek²	0.0120006	0.0120321	0.012043	0.0120323	0.0132415	0.0152904
B	0.191716	0.183118	0.178624	-0.188668	-0.017543	0.0243582
C	-2.35606	-2.40951	-2.43119	2.18457	24.0421	-13.829
D	0.0841881	0.0843268	0.084237	0.0857721	0.0924908	0.0803983
E	-0.932799	-0.966173	-0.944869	-2.19692	29.7079	7.23996
d	1.87324	1.8757	1.87661	1.87572	1.96771	2.11448

Tab-30. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	0.0148756	0.0153051	0.0137796	0.0142784	0.0122926
B	-0.015265	0.0439095	0.027873	-0.0296973	-0.213097
C	22.8058	-11.8975	-16.6711	16.0909	2.44959
D	0.0886432	0.0866226	0.0779845	0.0959063	0.0849795
E	16.7169	8.6779	17.6882	14.4692	-0.123022
d	2.08559	2.11549	2.00729	2.0433	1.89589



Obr 63. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One

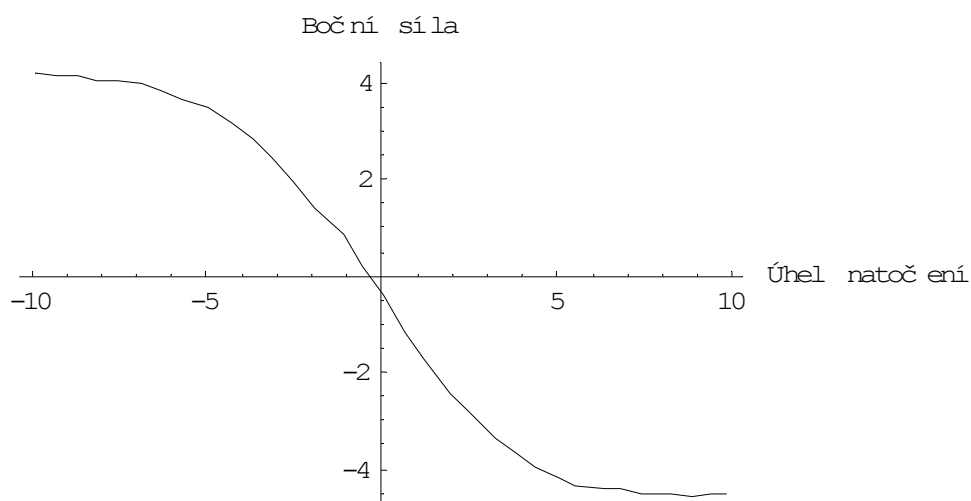


Obr 64. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1DIter

2.8.3 Přítlačná síla 6,35 kN Tlak 240 kPa

Naměřená data boční síly

$y = \{ \{9.814, -4.506\}, \{9.383, -4.506\}, \{8.808, -4.586\}, \{8.234, -4.506\}, \{7.372, -4.506\},$
 $\{6.798, -4.426\}, \{6.367, -4.426\}, \{5.506, -4.346\}, \{5.075, -4.186\}, \{4.357, -3.946\},$
 $\{3.782, -3.626\}, \{3.208, -3.386\}, \{2.490, -2.826\}, \{1.916, -2.426\}, \{1.198, -1.706\},$
 $\{0.623, -1.147\}, \{0.049, -0.427\}, \{-0.526, 0.213\}, \{-1.100, 0.853\}, \{-1.962, 1.413\},$
 $\{-2.536, 1.973\}, \{-3.110, 2.453\}, \{-3.685, 2.853\}, \{-4.259, 3.173\}, \{-4.977, 3.493\},$
 $\{-5.695, 3.653\}, \{-6.270, 3.813\}, \{-6.844, 3.973\}, \{-7.562, 4.053\}, \{-8.136, 4.053\},$
 $\{-8.711, 4.133\}, \{-9.285, 4.133\}, \{-9.860, 4.213\} \}$



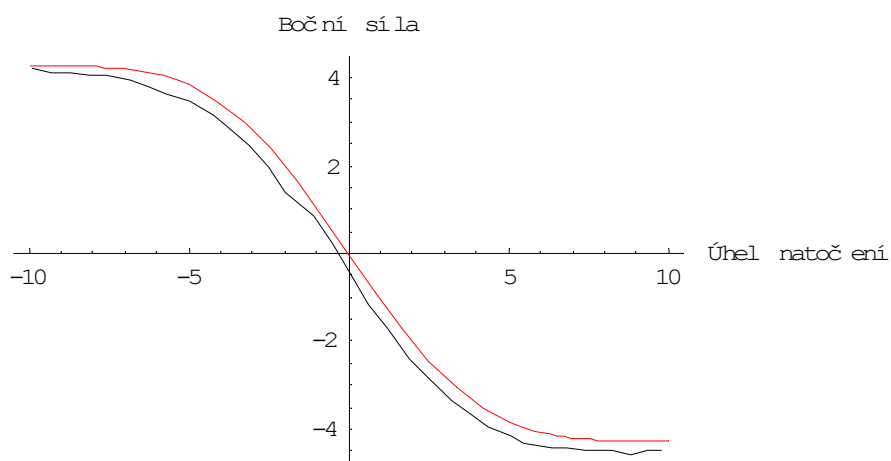
Obr 65. Průběh měření

Tab-31. Tabulka koeficientů

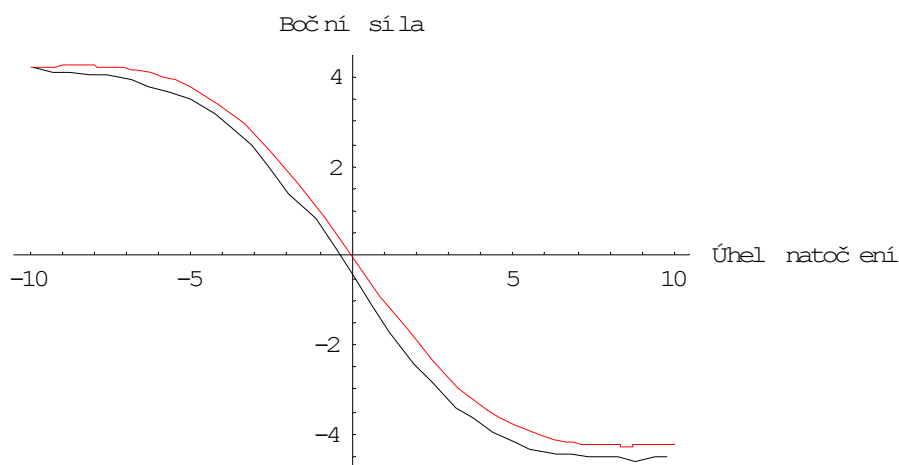
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	3.90192	3.90247	3.9026	3.90285	3.97858	4.4702
B	0.0390385	-0.0251717	-0.052657	0.0247143	-0.029910	-0.0176418
C	-6.3732	9.84225	4.75032	-10.053	7.99511	12.7211
D	4.263	4.263	4.263	4.263	4.25646	4.23764
E	7.45414	17.4839	4.17705	18.5684	10.4606	19.0717
d	0.680286	0.680335	0.680346	0.680368	0.686937	0.728142

Tab-32. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	4.09871	4.05245	4.07788	3.95105	4.41401
B	0.202011	0.0191561	-0.0277341	-0.0332036	-0.0270817
C	-1.13351	-13.4142	9.2774	7.34294	10.2527
D	4.22961	4.21391	4.24076	4.25078	4.17181
E	-2.49666	28.6242	13.0912	9.93268	20.6534
d	0.697231	0.693285	0.695456	0.684556	0.723552



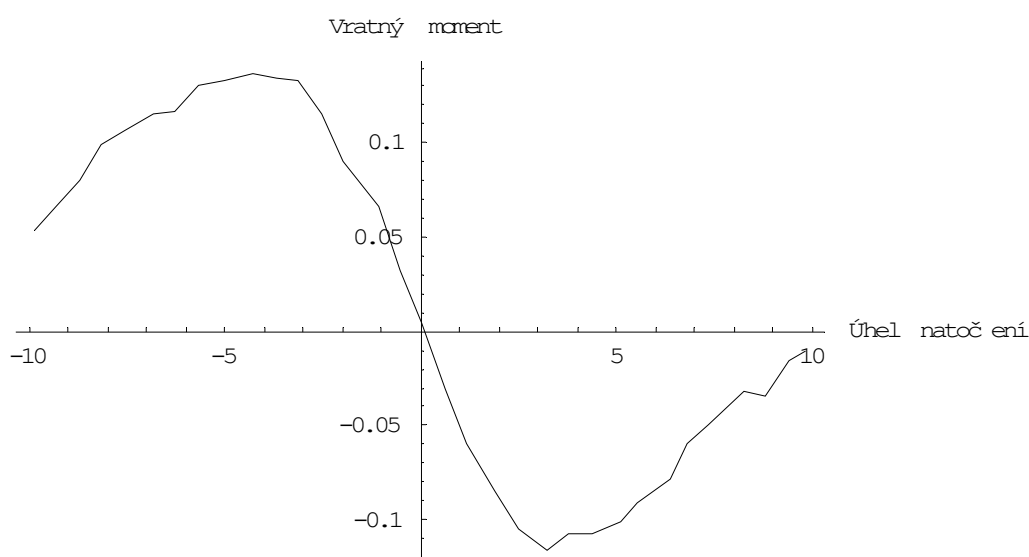
Obr 66. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One



Obr 67. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter

Naměřená data vratného momentu

$y = \{ \{9.814, -0.010\}, \{9.383, -0.016\}, \{8.808, -0.034\}, \{8.234, -0.032\}, \{7.372, -0.050\},$
 $\{6.798, -0.060\}, \{6.367, -0.079\}, \{5.506, -0.091\}, \{5.075, -0.101\}, \{4.357, -0.107\},$
 $\{3.782, -0.107\}, \{3.208, -0.116\}, \{2.490, -0.105\}, \{1.916, -0.085\}, \{1.198, -0.060\},$
 $\{0.623, -0.030\}, \{0.049, 0.005\}, \{-0.526, 0.033\}, \{-1.100, 0.066\}, \{-1.962, 0.090\},$
 $\{-2.536, 0.115\}, \{-3.110, 0.133\}, \{-3.685, 0.135\}, \{-4.259, 0.137\}, \{-4.977, 0.133\},$
 $\{-5.695, 0.131\}, \{-6.270, 0.117\}, \{-6.844, 0.115\}, \{-7.562, 0.107\}, \{-8.136, 0.099\},$
 $\{-8.711, 0.080\}, \{-9.285, 0.066\}, \{-9.860, 0.054\} \}$



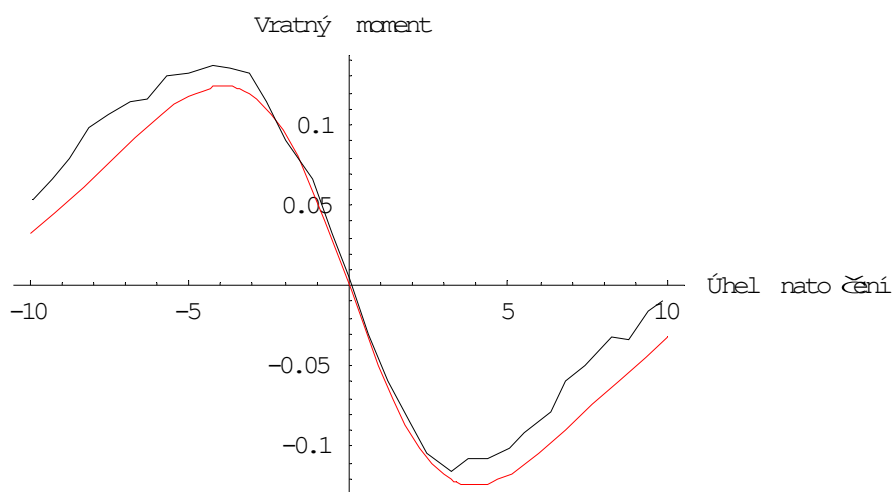
Obr 68. Průběh měření

Tab-33. Tabulka koeficientů

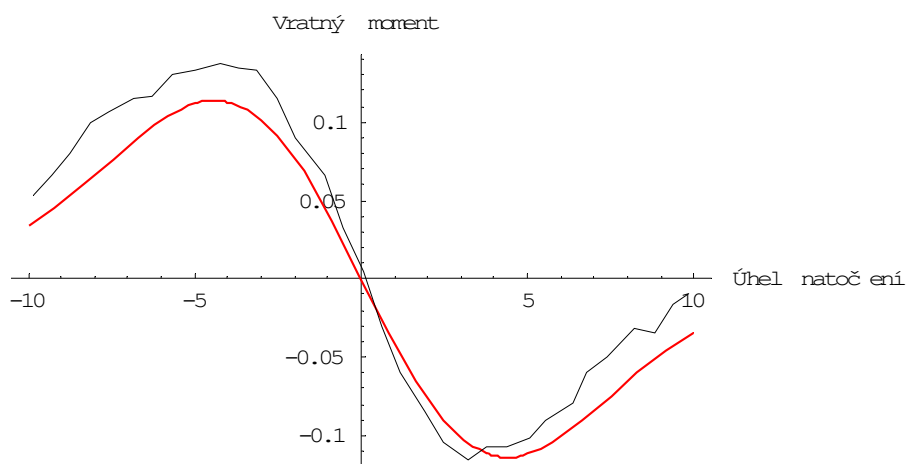
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek²	0.0121045	0.0122064	0.012165	0.0121603	0.0170096	0.0156453
B	-0.138769	0.108557	0.142548	0.114609	-0.013804	0.018228
C	3.22855	-4.15779	-2.99855	-3.74936	27.1841	-18.6813
D	0.124176	0.12627	0.12401	0.12456	0.129027	0.119771
E	0.330224	0.986757	-0.045651	0.563906	25.219	13.2331
d	1.31777	1.32331	1.32109	1.3208	1.56212	1.49816

Tab-34. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	0.0162011	0.015996	0.0145822	0.0132618	0.0200707
B	0.0247704	-0.0665488	-0.121442	-0.0191416	-0.0176876
C	-13.2977	6.6387	3.41462	21.3702	17.5564
D	0.124263	0.13798	0.137023	0.134032	0.116335
E	3.833	2.25304	0.119259	24.5014	7.44998
d	1.52454	1.51486	1.44636	1.37932	1.69686



Obr 69. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One

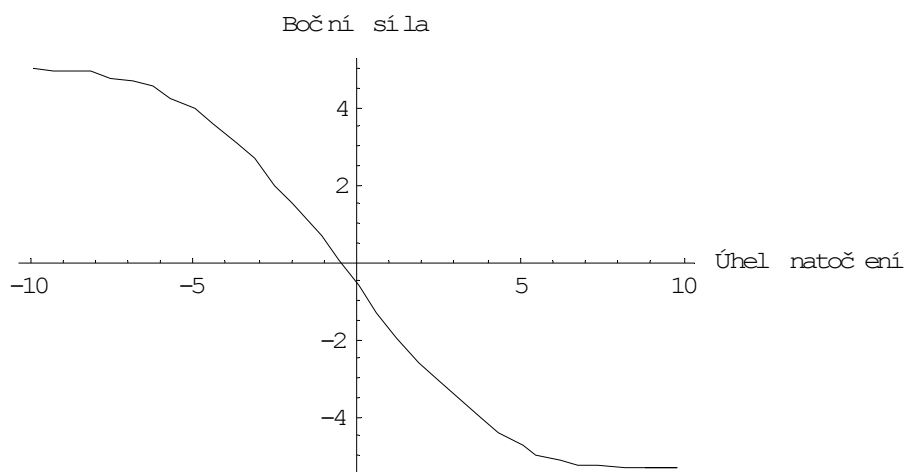


Obr 70 Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter

2.8.4 Přítlačná síla 7,62 kN Tlak 240 kPa

Naměřená data boční síly

$y = \{ \{8.808, -5.306\}, \{9.239, -5.306\}, \{9.814, -5.306\}, \{9.383, -5.306\}, \{8.808, -5.306\},$
 $\{8.234, -5.306\}, \{7.372, -5.226\}, \{6.798, -5.226\}, \{6.224, -5.146\}, \{5.506, -4.986\},$
 $\{5.075, -4.746\}, \{4.357, -4.426\}, \{3.782, -4.026\}, \{3.208, -3.546\}, \{2.490, -3.066\},$
 $\{1.916, -2.586\}, \{1.198, -1.946\}, \{0.623, -1.307\}, \{0.049, -0.587\}, \{-0.526, 0.053\},$
 $\{-1.100, 0.693\}, \{-1.962, 1.493\}, \{-2.536, 1.973\}, \{-3.110, 2.693\}, \{-3.685, 3.093\},$
 $\{-4.403, 3.573\}, \{-4.977, 3.973\}, \{-5.695, 4.213\}, \{-6.270, 4.533\}, \{-6.844, 4.693\},$
 $\{-7.562, 4.773\}, \{-8.136, 4.933\}, \{-8.711, 4.933\}, \{-9.285, 4.933\}, \{-9.860, 5.013\} \}$



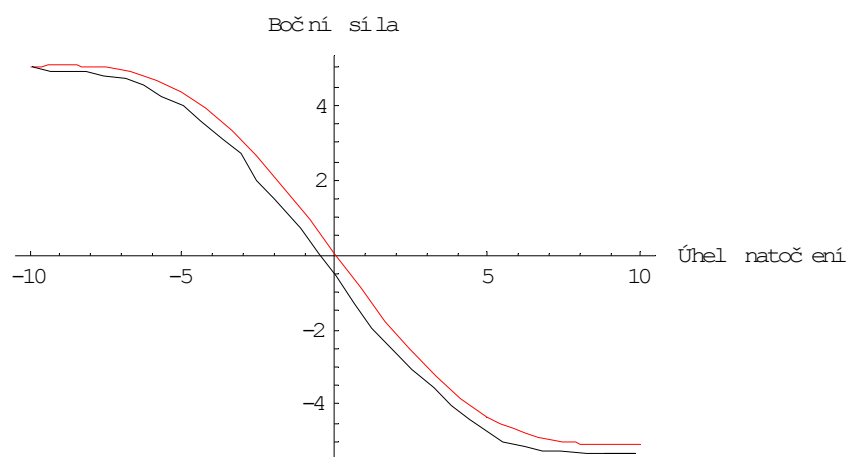
Obr 71. Průběh měření

Tab-35. Tabulka koeficientů

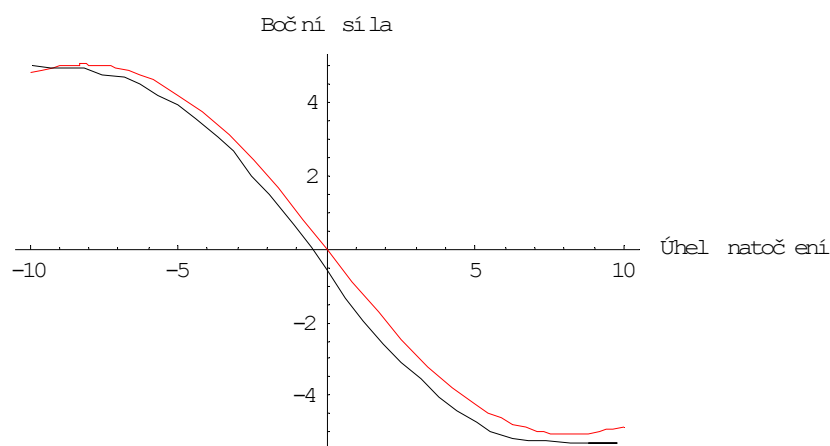
Algoritmus	SOMA				Diferenc. evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	5.4941	5.49475	5.49506	5.49526	5.62806	5.75766
B	-0.0155809	0.0173849	-0.019569	-0.0195578	0.0263692	0.0446801
C	14.0373	-12.5636	11.1818	11.1744	-8.40785	-5.04619
D	5.063	5.063	5.063	5.063	5.03318	5.02512
E	29.9989	23.6466	18.9698	18.6759	9.15354	5.05072
d	0.648997	0.649035	0.649054	0.649066	0.656861	0.664381

Tab-36. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	5.59023	6.019	5.80828	5.70298	5.92618
B	0.0198674	0.0199413	0.0217631	-0.017027	0.0312366
C	-10.7441	-11.0919	-10.7545	13.1485	-6.5255
D	5.05018	5.04982	5.02364	5.0329	5.05915
E	16.3684	10.2733	19.7838	21.6996	1.82161
d	0.65465	0.679292	0.667296	0.661219	0.674034



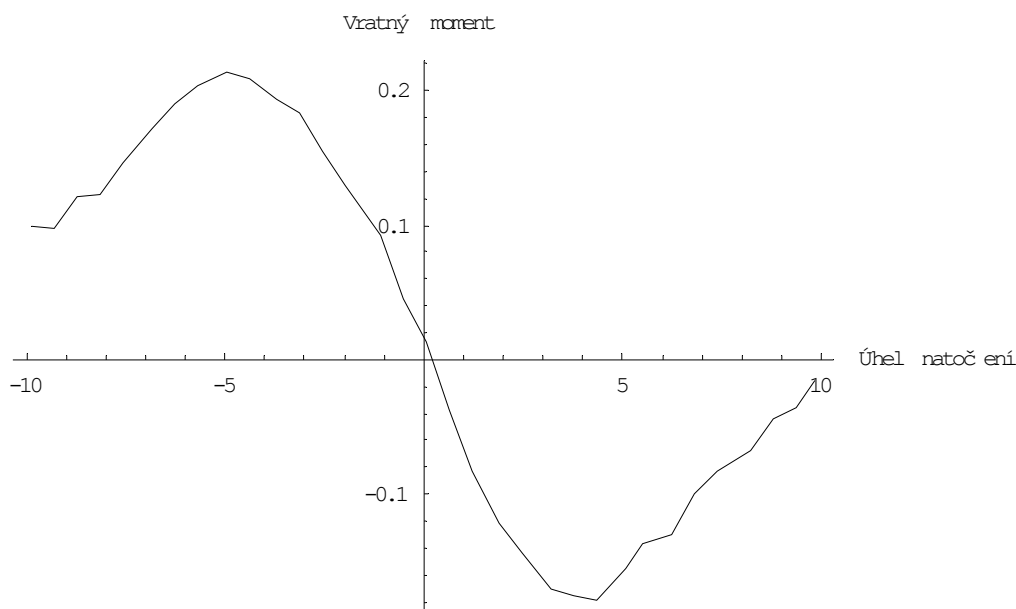
Obr 72. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One



Obr 73. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter

Naměřená data vratného momentu

$y = \{ \{9.814, -0.016\}, \{9.383, -0.036\}, \{8.808, -0.044\}, \{8.234, -0.067\}, \{7.372, -0.083\},$
 $\{6.798, -0.099\}, \{6.224, -0.130\}, \{5.506, -0.136\}, \{5.075, -0.156\}, \{4.357, -0.179\},$
 $\{3.782, -0.175\}, \{3.208, -0.171\}, \{2.490, -0.144\}, \{1.916, -0.122\}, \{1.198, -0.083\},$
 $\{0.623, -0.038\}, \{0.049, 0.013\}, \{-0.526, 0.046\}, \{-1.100, 0.092\}, \{-1.962, 0.129\},$
 $\{-2.536, 0.154\}, \{-3.110, 0.184\}, \{-3.685, 0.194\}, \{-4.403, 0.209\}, \{-4.977, 0.213\},$
 $\{-5.695, 0.203\}, \{-6.270, 0.190\}, \{-6.844, 0.172\}, \{-7.562, 0.147\}, \{-8.136, 0.123\},$
 $\{-8.711, 0.121\}, \{-9.285, 0.097\}, \{-9.860, 0.099\} \}$



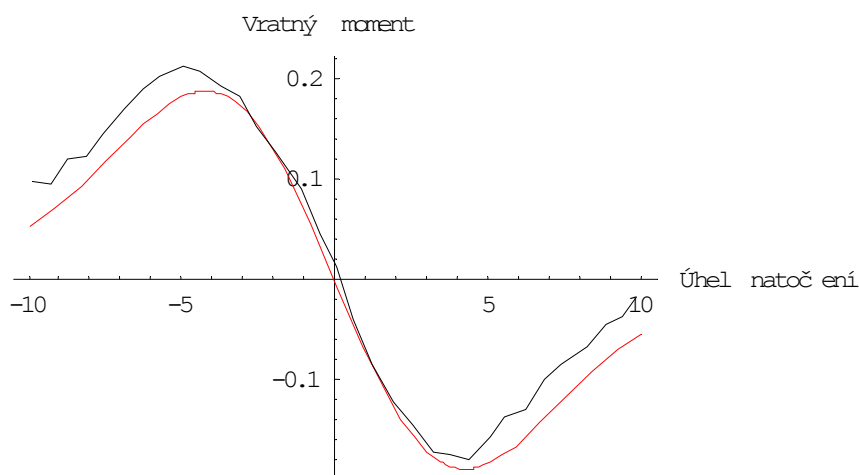
Obr 74. Průběh měření

Tab-37. Tabulka koeficientů

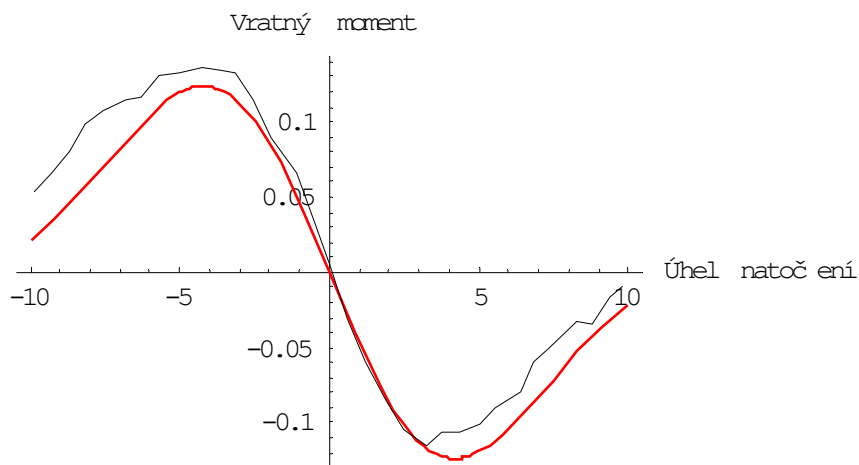
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	0.0222683	0.0222875	0.022283	0.0222816	0.0267055	0.0244572
B	-0.019875	-0.0220498	0.019209	-0.0252773	-0.050042	0.0168799
C	19.573	17.5821	-20.3678	15.49	6.79388	-23.3093
D	0.188628	0.187516	0.18853	0.188025	0.185774	0.195833
E	20.373	16.4135	22.4146	12.8472	0.756511	26.1776
d	1.15357	1.15407	1.15395	1.15391	1.26328	1.20894

Tab-38. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	0.03353	0.0224907	0.0261708	0.0298069	0.025807
B	-0.130257	-0.0510928	0.0358913	-0.181854	0.0382324
C	2.03052	7.55383	-10.4798	2.47476	-10.261
D	0.228157	0.186347	0.177931	0.182853	0.196306
E	-11.8015	2.8328	6.51249	-0.0278191	6.1828
d	1.41552	1.15931	1.25057	1.33462	1.24185



Obr 75. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One

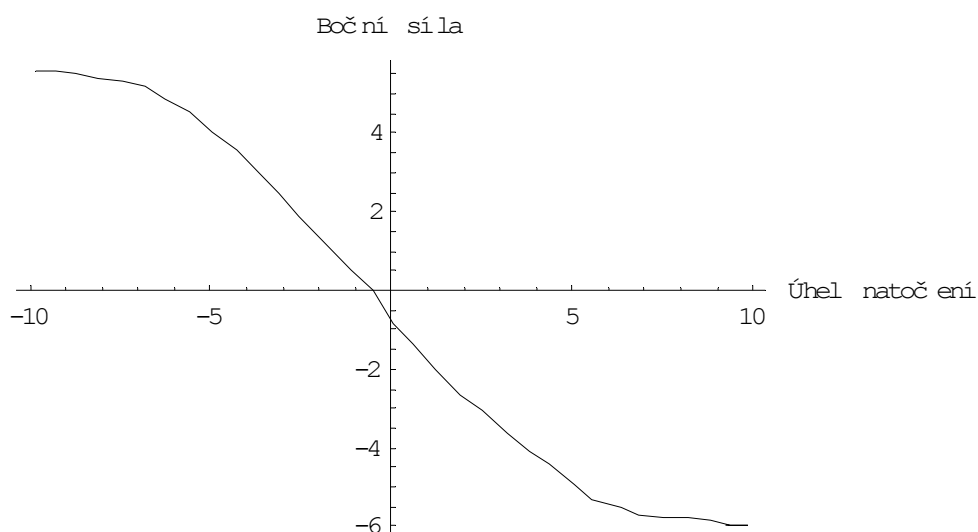


Obr 76. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Best1Exp

2.8.5 Přítlačná síla 8,89 kN Tlak 240 kPa

Naměřená data boční síly

$y = \{ \{9.239, -5.946\}, \{9.814, -5.946\}, \{9.383, -5.946\}, \{8.808, -5.866\}, \{8.234, -5.786\},$
 $\{7.516, -5.786\}, \{6.798, -5.706\}, \{6.367, -5.546\}, \{5.506, -5.306\}, \{5.075, -4.906\},$
 $\{4.357, -4.426\}, \{3.782, -4.106\}, \{3.208, -3.626\}, \{2.490, -3.066\}, \{1.916, -2.666\},$
 $\{1.198, -2.026\}, \{0.623, -1.386\}, \{0.049, -0.827\}, \{-0.526, -0.027\}, \{-1.100, 0.533\},$
 $\{-1.962, 1.333\}, \{-2.536, 1.893\}, \{-3.110, 2.453\}, \{-3.685, 3.013\}, \{-4.259, 3.573\},$
 $\{-4.977, 4.053\}, \{-5.552, 4.533\}, \{-6.270, 4.853\}, \{-6.844, 5.173\}, \{-7.418, 5.333\},$
 $\{-8.136, 5.413\}, \{-8.711, 5.493\}, \{-9.285, 5.573\}, \{-9.860, 5.573\} \}$



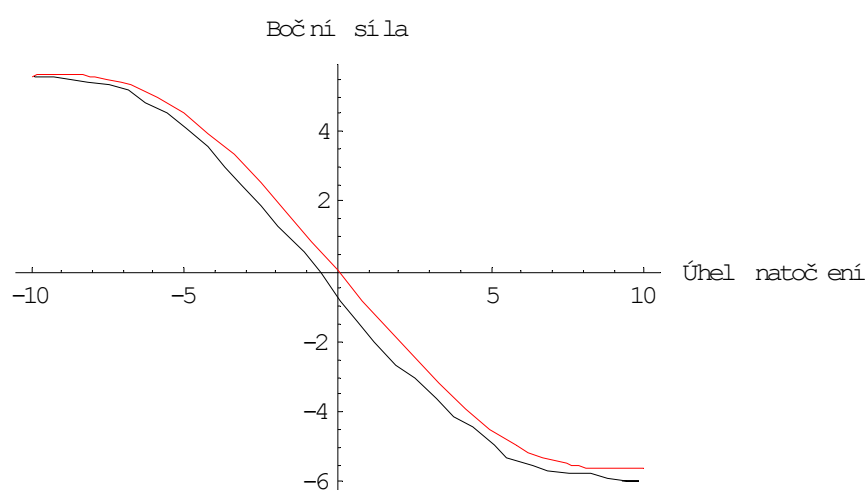
Obr 77. Průběh měření

Tab-39. Tabulka koeficientů

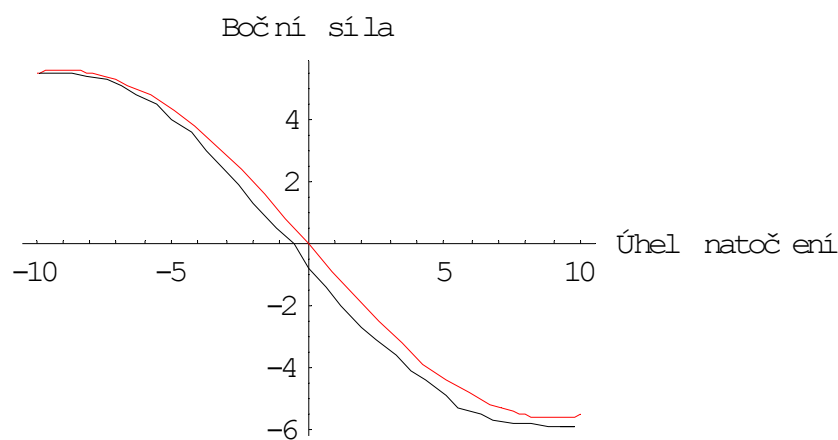
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	7.22701	7.22725	7.22721	7.23781	7.75997	7.40152
B	0.108074	0.10688	0.108643	0.101904	0.0093403	0.0131506
C	-1.6731	-1.6976	-1.65925	-1.81712	-21.1278	-14.4753
D	5.623	5.623	5.623	5.623	5.5555	5.58918
E	-1.90879	-1.83136	-1.97822	-1.38357	26.4135	16.2691
d	0.686413	0.686424	0.686423	0.686926	0.711273	0.694651

Tab-40. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evoluce				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	7.4579	7.52888	7.37854	7.42878	7.4551
B	-0.00627	0.00779913	0.0096338	0.0081703	0.0104337
C	28.978	-23.085	-19.796	-22.3724	-17.6932
D	5.61181	5.61783	5.60318	5.61024	5.60116
E	8.41109	19.2246	21.8651	13.1621	4.16422
d	0.697292	0.700602	0.693572	0.695929	0.697161



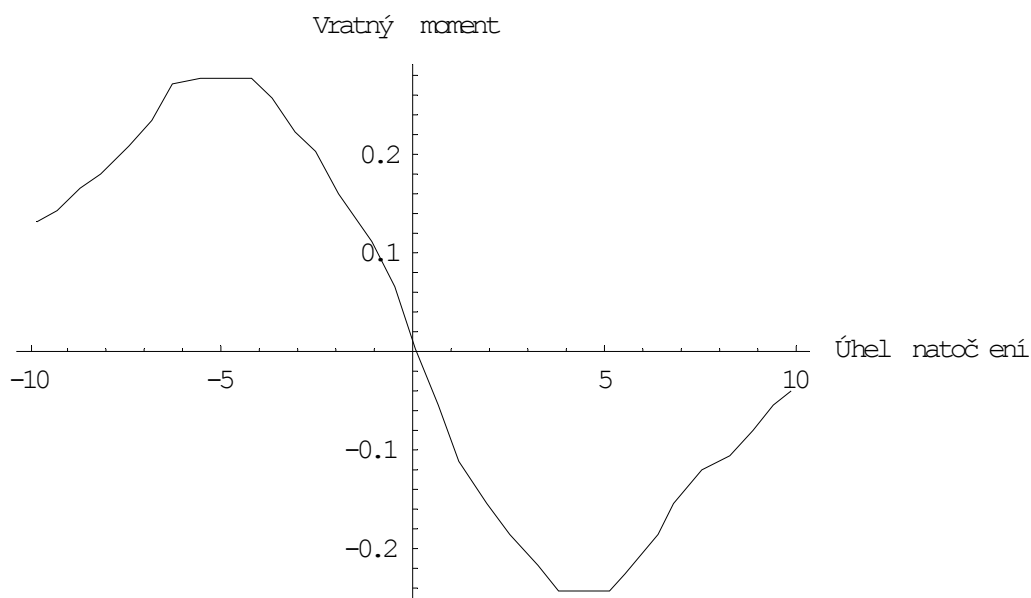
Obr 78. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One



Obr 79. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1DIter

Naměřená data vratného momentu

$y = \{ \{9.814, -0.042\}, \{9.383, -0.054\}, \{8.808, -0.081\}, \{8.234, -0.107\}, \{7.516, -0.120\},$
 $\{6.798, -0.156\}, \{6.367, -0.187\}, \{5.506, -0.226\}, \{5.075, -0.242\}, \{4.357, -0.244\},$
 $\{3.782, -0.244\}, \{3.208, -0.217\}, \{2.490, -0.185\}, \{1.916, -0.154\}, \{1.198, -0.111\},$
 $\{0.623, -0.056\}, \{0.049, 0.001\}, \{-0.526, 0.066\}, \{-1.100, 0.111\}, \{-1.962, 0.160\},$
 $\{-2.536, 0.203\}, \{-3.110, 0.221\}, \{-3.685, 0.256\}, \{-4.259, 0.276\}, \{-4.977, 0.276\},$
 $\{-5.552, 0.276\}, \{-6.270, 0.270\}, \{-6.844, 0.233\}, \{-7.418, 0.207\}, \{-8.136, 0.180\},$
 $\{-8.711, 0.166\}, \{-9.285, 0.141\}, \{-9.860, 0.131\} \}$



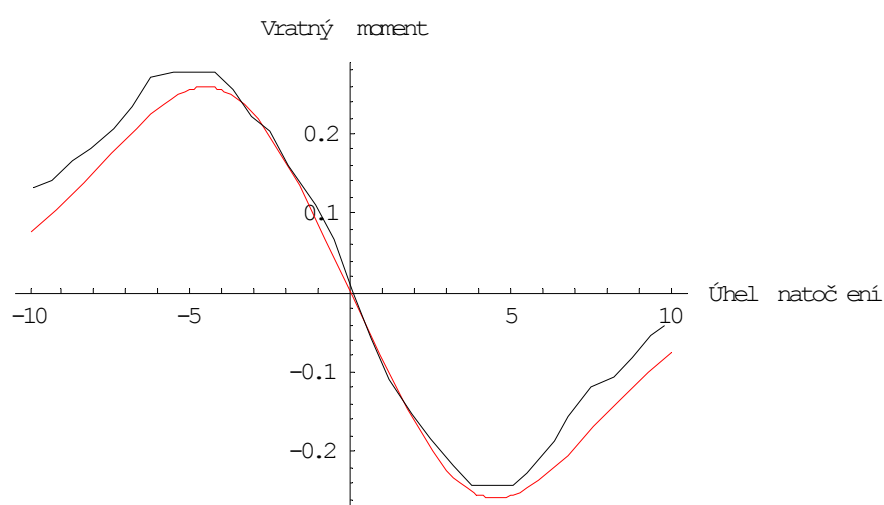
Obr 80. Průběh měření

Tab-41. Tabulka koeficientů

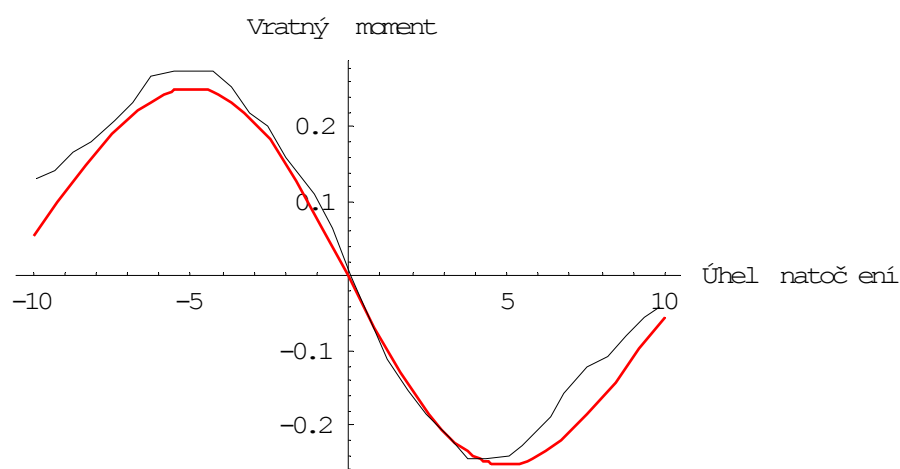
Algoritmus	SOMA				Diferenc.evoluce	
	All to One	All To One Rand	All To All	All To All Adapt.	DE Rand1bin	DE Rand2bin
Σ odchylek ²	0.0273158	0.0274096	0.027422	0.0275313	0.0319226	0.0360285
B	-0.133514	-0.019049	-0.13122	0.140969	-0.012778	0.0169585
C	2.52147	19.0854	2.45253	-2.46265	25.3987	-21.8551
D	0.259035	0.255189	0.260361	0.258212	0.252332	0.239048
E	-1.92199	17.9347	-2.56474	-1.8062	17.3623	22.2877
d	0.963141	0.964792	0.965016	0.966932	1.04119	1.10613

Tab-42. Tabulka koeficientů

Algoritmus	Diferenc.evolute				
	DE Best1Exp	DE Rand1DIter	DE LocatoBest	DE Best2Bin	DE Rand1Gen.DIter
Σ odchylek	0.0343537	0.0321819	0.0295074	0.040371	0.0344325
B	0.0214043	-0.0177107	0.0160109	0.0105534	0.0336197
C	-16.556	20.3288	-21.4292	-28.5066	-12.2929
D	0.23377	0.272457	0.254224	0.26484	0.261571
E	13.7458	17.4316	20.3722	-1.78489	9.32397
d	1.08011	1.04541	1.00103	1.17089	1.08135



Obr 81. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One



Obr. 82. Srovnávací graf nejhorsích nalezených hodnot- DE Best2Bin

2.9 Řešení „analytickým programováním“

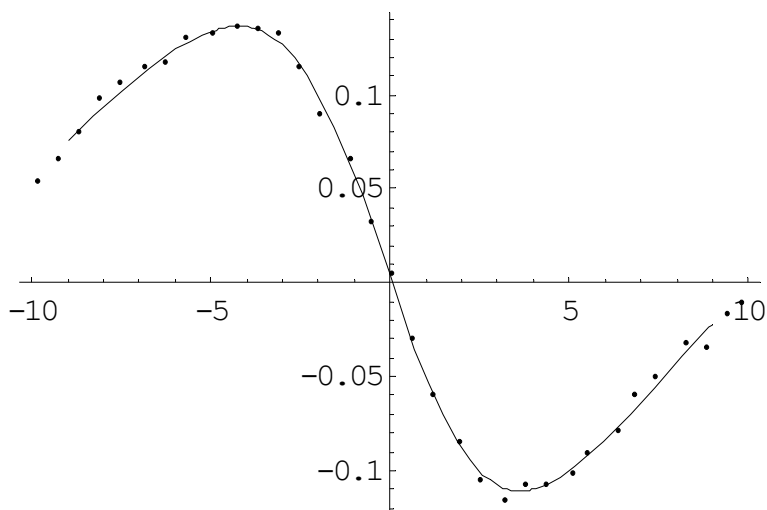
Metodu analytického programování jsem použil k nalezení takové funkce, která by co nejlépe vyjádřila průběh naměřených hodnot. Pro hledání takové funkce jsem použil jednu množinu naměřených dat vratného momentu pneumatiky 205/70 TR14 zatížené přítláčnou silou 7,62 kN a nahuštěné tlakem 240 kPa. Podařilo se najít několik funkcí, které poměrně velmi dobře aproximovaly nalezené hodnoty.

Rovnice řízená 10 parametry

$$y = K_1 + K_2 \left(-K_3 * (x + K_4 - K_5^2) - \frac{(x - K_6) * (x + K_7)}{-x - x^2 + K_8 + \frac{K_9 * (x + K_{10})}{x}} \right) \quad (11)$$

Po dosazení parametrů:

$$y = 0.052784 + 0.0354144 * \left(0.309866(-4.55627 + x) - \frac{(-49.8515 + x)(1.1868 + x)}{-27.8879 + \frac{1.87117(-16.5645 + x)}{x} - x - x^2} \right) \quad (12)$$



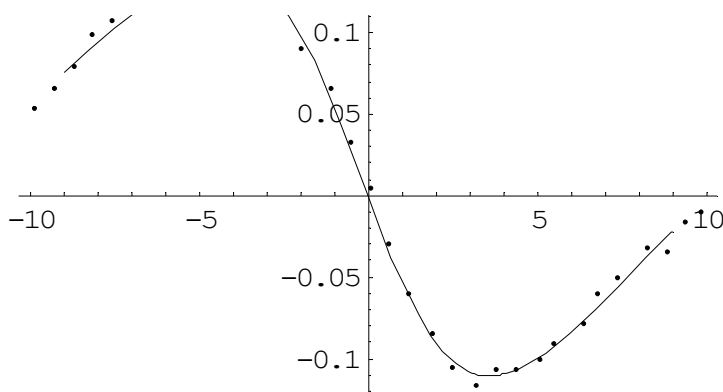
Obr. 83. Srovnávací graf - $\Sigma \text{odchylek}^2 = 0,0144836411$

Rovnice řízená 6 parametry

$$y = \left(\frac{x * (-x + 2 * K_2 - x * K_3 - x * K_4 * (K_5 + x * K_6^2))}{-x^2 - 2 * K_1} \right) \quad (13)$$

Po dosazení parametrů:

$$y = \left(\frac{x * (1.46494 - 15.4807 * x - 2.78577 * (-5.54434 + 0.003912 * x) * x)}{-25.9076 - x^2} \right) \quad (14)$$



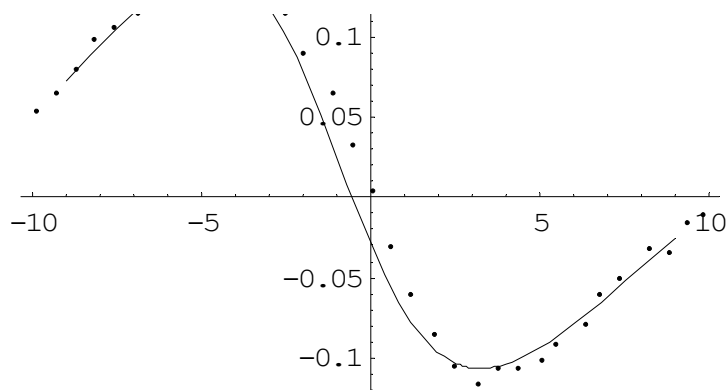
Obr. 84. Srovnávací graf - Σ odchylek² = 0,01699920516

Rovnice řízená 7 parametry s použitím goniometrických funkcí

$$y = \left(- \frac{K_1^2 * \sin(\sin(K_6 * (x + K_7)))}{\cos\left(K_3 + \frac{K_4}{x + \cos K_5}\right) - x * K_2} \right) \quad (15)$$

Po dosazení parametrů:

$$y = \left(- \frac{0,000632841 * \sin[\sin[0,136921(-10,4891 + x)]]}{-0,00037283 * x + \cos[1,57144 + \frac{0,00965036}{0,526154 + x}]} \right) \quad (16)$$



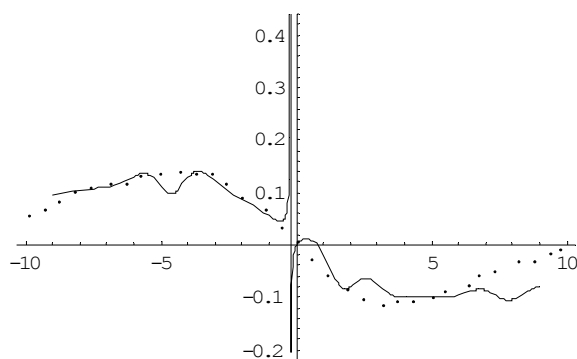
Obr. 85. Srovnávací graf - Σ odchylek² = 0,07097482092

Rovnice řízená 5 parametry s použitím goniometrických funkcí

$$y = \frac{x * (x + \sin(x + \cos(K_4 - \cos x * \sec K_5)))}{-x^3 + K_1 * (-x + \sin(x - K_2)) + \sin(x + K_3)} \quad (17)$$

Po dosazení parametrů:

$$y = \frac{x * (x + \sin(0,88851 - x + 2,04368 * \cos x))}{-x^3 - \sin(9,01193 - x) + 19,5957 * (-x + \sin(9,83762 + x))} \quad (18)$$



Obr. 86. Srovnávací graf - Σ odchylek² = 0,1729811281

3 ZÁVĚR

Při hledání koeficientů do „Magického vzorce“ jsem použil dva evoluční algoritmy a to algoritmus SOMA a Diferenciální evoluci. Algoritmus SOMA jsem aplikoval ve čtyřech strategiích. Diferenciální evoluci jsem aplikoval v sedmi variantách výpočtu šumového vektoru. Každý z těchto algoritmů, jsem na každou množinu naměřených dat aplikoval 100x s tím že jsem vybral vždy nejlepší vypočtenou hodnotu účelové funkce a hodnoty jejich koeficientů zapsal do tabulky. Nejlepší hodnotu jsem v tabulce zvýraznil tučně a nejhorší nalezenou hodnotu jsem označil červeně. Obě nalezené hodnoty jsem doplnil srovnávacími grafy, které jednoznačně ukazují, že mezi nejlepším a nejhorším nalezeným řešením je malý rozdíl, jinými slovy i nejhorší nalezené řešení je poměrně dobré a je použitelné pro další užití. Nejlepší výsledky poskytoval algoritmus SOMA, a to při použití strategie „All to One“. Ve všech případech byla nalezena nejlepší hodnota účelové funkce právě při použití strategie „All to One“, i když při použití strategie „All to All“ a „All to All Rand“ bylo provedeno více jak dvakrát tolik ohodnocení účelové funkce. Oproti tomu všechna nejhorší řešení byla nalezena „Diferenciální evolucí“. Protože ale i tato nalezená řešení byla dost dobrá, je možné tuto metodu považovat jako vhodnou k vyhledání koeficientů „Magického vzorce“.

Při hledání vlastní rovnice, kterou by bylo možno použít pro aproximaci naměřených hodnot, jsem použil metodu „analytického programování“. Touto metodou se mi podařilo najít vhodné rovnice, které dokázaly aproximovat naměřené hodnoty, a to dokonce s větší přesností, než při použití magického vzorce. Nevýhodou ale těchto rovnic oproti „magickému vzorci“ je to, že tvar těchto funkcí je řízen více parametry. Zatím co „magický vzorec“ je řízen čtyřmi parametry, nalezené rovnice, které poskytovaly uspokojivý výsledek, bylo nutno řídit šesti až deseti parametry.

Protože přesnost rovnic získaných pomocí „magického vzorce“ je dostatečná, doporučoval bych pro další použití v technické praxi používat právě tyto rovnice, s tím že jejich koeficienty se budou vyhledávat algoritmem SOMA za použití všech čtyřech strategií.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZELINKA, Ivan. Umělá inteligence I. Volume 1. Zlín : Vutium, Brno, 1998. 126 p. ISBN 80-214-1163-5.
- [2] ZELINKA, Ivan , Umělá inteligence / Academia, 33 p.
- [3] Kvasnička V., Pospíchal J., Tiňo P. 2000, Evolučné algoritmy, STU Bratislava, ISBN 85-246-2000, 2000
- [4] ZELINKA, Ivan , New Optimization Techniques in Engineering / kap.7 „SOMA – Self Organizing Migrating Algorithm, Springer-Verlag
- [5] ZELINKA, Ivan , Aplikovaná informatika, ISBN80-214-1423-5
- [6] ZELINKA, Ivan , Umělá inteligence v problémech globální optimalizace, ISBN 80-7300-069-5
- [7] Koza J.R. 1998, Genetic Programming, MIT Press, ISBN 0-262-11189-6, 1998
- [8] Koza J.R., Bennet F.H., Andre D., Keane M. 1999, Genetic Programming III, Morgan Kaufmann pub., ISBN 1-55860-543-6, 1999
- [9] Technické informace Barum Otrokovice č.7-8 Ročník XXXIV
- [10] MARCÍN J., ZÍTEK P., Pneumatiky, SNTL PRAHA 1985
- [11] BERKA Marcel, Vývoj zkušebních metod pneumatik I,
Technická zpráva 1837/3 VUGPT Zlín
- [12] VAŠÍČEK Zdeněk, Simulované žíhání
- [13] Zelinka I., Oplatkova Z. Nolle L., "Analytic Programming – Symbolic Regression by Means of Arbitrary Evolutionary Algorithms" In: Special Issue on Intelligent Systems, International Journal of Simulation, Systems, Science and Technology, Volume 6, Issue 9, August 2005, pp 44 – 56, ISSN 1473-8031
- [14] Zuzana Oplatkova, Ivan Zelinka: Investigation on Artificial Ant using Analytic Programming, GECCO 2006, Seattle, WA, USA, 8-12.7.2006, 11th conference
- [15] Mařík, Štěpánková, Lažanský: Umělá inteligence IV., Academia 2004

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Y_k	Boční síla
S_k	Boční vodící síla
α_k	Úhel směrové úchylky
x_k	Podélná osa kola
y_k	Osa otáčení kola
n_s	Závlek pneumatiky
M_k	Vratný moment pneumatiky
T	Teplota systému
d	Procentuální chyba na jeden měřený bod
a	Odchylka naměřené hodnoty od hodnoty funkční
m	Počet měřených hodnot
A	Amplituda procentuální chyby na jeden měřený bod
CFE	Počet ohodnocení účelové funkce

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr1. Silové poměry na pneumatice.....	10
Obr 2. Závislost boční síly na směrové úchylce.....	11
Obr 3. Závislost vratného momentu na směrové úchylce.....	11
Obr4. Typická charakteristika se znázorněním některých parametrů v magickém vzorci...	13
Obr 5. Princip Horolezeckého algoritmu.....	17
Obr. 6. Problém uváznutí v lokálním minimu, řešení se ustálí v okolí x_2 a x_3	17
Obr. 7. Problém zacyklení a oscilace řešení.....	18
Obr 8. Průběh Metropolisova kritéria v záv. na rozdílu $f(x') > f(x)$ a nastavené teplotě.....	19
Obr 9. Princip symbolické regrese.....	29
Obr 10. Ohodnocení stromu.....	30
Obr 11. Postup při ohodnocení uzlů.....	30
Obr 12. Syntéza programu.....	32
Obr 13. Dělení chromozomů.....	33
Obr 14. Dělení množiny funkcí podle množství argumentů.....	34
Obr 15. Přidělování funkcí podle vygenerovaného chromozomu.....	34
Obr 16. Výpočet hodnoty účelové funkce.....	35
Obr 17. Řez hyperprostorem $f(d,e)$ $b=\text{konst.}$ $c=\text{konst.}$	39
Obr 18. Řez hyperprostorem $f(c,e)$ $b=\text{konst.}$ $d=\text{konst.}$	39
Obr 19. Řez hyperprostorem $f(c,d)$ $b=\text{konst.}$ $e=\text{konst.}$	40
Obr 20. Řez hyperprostorem $f(b,e)$ $c=\text{konst.}$ $d=\text{konst.}$	40
Obr 21. Řez hyperprostorem $f(c,d)$ $c=\text{konst.}$ $e=\text{konst.}$	41
Obr 22. Řez hyperprostorem $f(b,c)$ $d=\text{konst.}$ $e=\text{konst.}$	41
Obr 23. Průběh měření.....	42
Obr 24. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	43
Obr 25. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1DIter.....	43
Obr 26. Průběh měření.....	44
Obr 27. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	45
Obr 28. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Best1Exp.....	45
Obr 29. Průběh měření.....	46
Obr 30. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	47
Obr 31. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter.....	47
Obr 32. Průběh měření.....	48
Obr 33. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	49

Obr 34. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand2bin.....	49
Obr 35. Průběh měření.....	50
Obr 36. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	51
Obr 37. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter.....	51
Obr 38 Průběh měření.....	52
Obr 39. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	53
Obr 40. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand2bin.....	53
Obr 41. Průběh měření.....	54
Obr 42. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	55
Obr 43. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter.....	55
Obr 44. Průběh měření.....	56
Obr 45. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	57
Obr 46. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter.....	57
Obr 47. Průběh měření.....	58
Obr 48. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	59
Obr 49. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Best2Bin.....	59
Obr 50 Průběh měření.....	60
Obr 51. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	61
Obr 52. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter.....	61
Obr 53. Průběh měření.....	62
Obr 54. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One	63
Obr 55. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand2bin.....	63
Obr 56. Průběh měření.....	64
Obr 57. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	65
Obr 58. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Best1Exp.....	65
Obr 59. Průběh měření.....	66
Obr 60. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	67
Obr 61. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand2bin.....	67
Obr 62. Průběh měření.....	68
Obr 63. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	69
Obr 64. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1DIter.....	69
Obr 65. Průběh měření.....	70
Obr 66. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	71
Obr 67. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter.....	71

Obr 68. Průběh měření.....	72
Obr 69. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	73
Obr 70 Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter.....	73
Obr 71. Průběh měření.....	74
Obr 72. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	75
Obr 73. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1Gen.DIter.....	75
Obr 74. Průběh měření.....	76
Obr 75. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	77
Obr 76. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Best1Exp.....	77
Obr 77. Průběh měření.....	78
Obr 78, Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	79
Obr 79. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Rand1DIter.....	79
Obr 80. Průběh měření.....	80
Obr 81. Srovnávací graf nejlepších nalezených hodnot- SOMA All to One.....	81
Obr. 82. Srovnávací graf nejhorších nalezených hodnot- DE Best2Bin.....	81
Obr. 83.Srovnávací graf - Σ odchylek 2 =0,0144836411.....	82
Obr. 84. Srovnávací graf - Σ odchylek 2 =0,01699920516.....	83
Obr. 85. Srovnávací graf - Σ odchylek 2 =0,07097482092.....	84
Obr. 86. Srovnávací graf - Σ odchylek 2 =0,1729811281.....	84

SEZNAM TABULEK

Tab-1. Dělení chromozomu na kodony.....	32
Tab-2. Dělení chromozomů.....	32
Tab-3. Tabulka koeficientů.....	42
Tab-4. Tabulka koeficientů.....	43
Tab-5. Tabulka koeficientů.....	44
Tab-6. Tabulka koeficientů.....	45
Tab-7. Tabulka koeficientů.....	46
Tab-8. Tabulka koeficientů.....	47
Tab-9. Tabulka koeficientů.....	48
Tab-10. Tabulka koeficientů.....	49
Tab-11. Tabulka koeficientů.....	50
Tab-12. Tabulka koeficientů.....	51
Tab-13. Tabulka koeficientů.....	52
Tab-14. Tabulka koeficientů.....	53
Tab-15. Tabulka koeficientů.....	54
Tab-16. Tabulka koeficientů.....	55
Tab-17. Tabulka koeficientů.....	56
Tab-18. Tabulka koeficientů.....	57
Tab-19. Tabulka koeficientů.....	58
Tab-20. Tabulka koeficientů.....	59
Tab-21. Tabulka koeficientů.....	60
Tab-22. Tabulka koeficientů.....	61
Tab-23. Tabulka koeficientů.....	62
Tab-24. Tabulka koeficientů.....	63
Tab-25. Tabulka koeficientů.....	64
Tab-26. Tabulka koeficientů.....	65
Tab-27. Tabulka koeficientů.....	66
Tab-28. Tabulka koeficientů.....	67
Tab-29. Tabulka koeficientů.....	68
Tab-30. Tabulka koeficientů.....	69
Tab-31. Tabulka koeficientů.....	70
Tab-32. Tabulka koeficientů.....	71
Tab-33. Tabulka koeficientů.....	72

Tab-34. Tabulka koeficientů.....	73
Tab-35. Tabulka koeficientů.....	74
Tab-36. Tabulka koeficientů.....	75
Tab-37. Tabulka koeficientů.....	76
Tab-38. Tabulka koeficientů.....	77
Tab-39. Tabulka koeficientů.....	78
Tab-40. Tabulka koeficientů.....	79
Tab-41. Tabulka koeficientů.....	80
Tab-42. Tabulka koeficientů.....	81