

Deterministický chaos: Princip a aplikace

Michal Hladík

Bakalářská 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 BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Michal HLADÍK
Studijní program: B 3902 Inženýrská informatika
Studijní obor: Informační technologie
Téma práce: Deterministický chaos: Princip a aplikace

Zásady pro vypracování:

1. Vypracovat studii o principu a aplikaci deterministického chaosu v praxi.
2. Provést matematický popis deterministického chaosu, jeho projevů, včetně grafických ukázek.
3. Provést popis metod řízení deterministického chaosu.
4. Vypracovat jako výstup webovou stránku pro přehlednou vizualizaci problematiky deterministického chaosu.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Hilborn R.C.1994, Chaos and Nonlinear Dynamics, Oxford University Press, ISBN 0-19-508816-8, 1994
2. González-Miranda J. M. 2004, Synchronization and Control of Chaos, Imperial College Press 2004, ISBN 1-86094-488-4
3. Horák J., Krlín L.1996, Deterministický chaos, Academia, ISBN 80-200-0416-5,1996
4. Gleick J.1996, Chaos, Ando publishing, ISBN 80-86047-04-0, 1996

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Roman Šenkeřík**
Ústav aplikované informatiky

Datum zadání bakalářské práce: **14. února 2006**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16. června 2006**

Ve Zlíně dne 14. února 2006

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
pověřený děkan



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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou řízení deterministického chaosu. První část je zaměřena na přehlednou rešerši týkající se především historie a současnosti problematiky teorie chaosu a na jeho fyzikální a matematický popis, který je demonstrován na mnoha příkladech a obrázcích. V další části práce jsou pak popsány metody řízení deterministického chaosu včetně grafických ukázek. Dále je práce zaměřena výhradně na aplikaci deterministického chaosu v praxi, jeho řízení a výskyt v odvětvích lidské činnosti. Posledním bodem práce a zároveň jejím výstupem jsou pak webové stránky, určené pro přehlednou vizualizaci celé problematiky deterministického chaosu, včetně fraktální geometrie. Tato práce je celkově zaměřena spíše na stručný a přehledný grafický popis dané problematiky.

Klíčová slova: Deterministický chaos, metody řízení, aplikace v praxi

ABSTRACT

This work deals with problems of control of deterministic chaos. The first section is focused on transparent retrieval about history and present of problems of chaos theory. This section is also focused on physical and mathematics description, which is demonstrated by several examples and images. The methods of chaos control are described including graphics previews in the next part. Next part is focused on applications of deterministic chaos in practice, and occurrence in human activities. The last point and output of this work are web pages, intended for visualization all of problems of deterministic chaos including fractal geometry. This work is globally focused instead on brief and graphics description of this query.

Keywords: Deterministic chaos, methods of chaos control, applications in practice

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Romanu Šenkeříkovi, vedoucímu bakalářské práce, za odborné vedení a ochotně poskytnuté rady a pomoc během celé tvorby této práce. Také bych rád poděkoval mým rodičům, kteří mě během studia podporovali.

Motto:

Existuje tisíce způsobů, jak zabít čas, ale žádný, jak ho vzkřísit.

Albert Einstein

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího bakalářské práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně dne

.....

podpis

OBSAH

OBSAH	6
ÚVOD.....	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 CHARAKTERISTIKA DETERMINISTICKÉHO CHAOSU	10
1.1 FYZIKÁLNÍ POPIS	10
1.1.1 Turbulence.....	10
1.1.2 Motýlí efekt – Lorenzův systém.....	11
1.2 MATEMATICKÝ POPIS	16
1.2.1 Chaotické systémy.....	16
1.2.2 Nejjednodušší model deterministického chaosu - logistická rovnice	19
2 ŘÍZENÍ DETERMINISTICKÉHO CHAOSU.....	21
2.1 METODY ŘÍZENÍ.....	21
2.1.1 Řízení s otevřenou smyčkou (open loop control – OL control)	22
2.1.2 Lineární a nelineární řízení (open-plus-closed-loop -OPCL control)	23
2.1.3 Adaptivní řízení.....	25
3 APLIKACE DETERMINISTICKÉHO CHAOSU V PRAXI	26
3.1 FYZIKA	26
3.1.1 Řízení chaosu v plasmě	26
3.2 CHEMIE	30
3.3 LÉKAŘSTVÍ.....	31
3.3.1 Elektrická léčba epilepsie aneb teorie chaosu v neurovědách.....	32
3.3.2 Srdce.....	34
3.4 BIOLOGIE.....	35
3.4.1 Pohyb ryb v hejnu.....	35
3.4.2 Kolonie bakterií.....	36
3.5 MECHANICKÉ SYSTÉMY.....	36
3.5.1 Dvojitě kyvadlo	36
3.6 ELEKTRONICKÉ SYSTÉMY	37
3.6.1 Chuť obvod	37
3.7 KOMUNIKAČNÍ SYSTÉMY	39
3.7.1 Modulování chaotického signálu	39
3.7.1.1 Chaotické maskování (chaotic masking)	40
3.7.1.2 Chaotické klíčování (chaotic shift keying, CSK).....	40
3.7.1.3 Diferenční chaotické klíčování (differential chaos shift keying).....	41
3.8 INFORMATIKA.....	42
3.8.1 Fraktální geometrie	42
3.8.2 Fraktálová komprese obrazu	43
3.9 EKONOMIE.....	44
3.9.1 Kapitálové trhy	44

3.9.1.1	Chaotický model akciového trhu	44
3.9.1.2	Praktické použití	47
3.9.2	Elliotovy vlny	48
3.10	METEOROLOGIE.....	49
3.10.1	Příklady a možnosti využití v praxi:	51
II	PRAKTICKÁ ČÁST	54
4	TVORBA WEBOVÝCH STRÁNEK	55
	ZÁVĚR	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	61
	SEZNAM OBRÁZKŮ	62
	SEZNAM TABULEK.....	64
	SEZNAM PŘÍLOH.....	65

ÚVOD

Když se vysloví slovo „chaos“, obvykle se u lidí, kteří se touto disciplínou nezabývají, vybaví proces který je čistě nahodilý a bez vnitřních zákonitostí. Málokdo si uvědomuje, že „být chaotický“, znamená striktně se řídit přesně danými pravidly, v nichž mnohdy není pro náhodu místo. Chaos je disciplínou, která dostala své jméno až ve dvacátém století, nicméně jeho kořeny sahají až do 19.století, kdy bylo zjištěno, že už jednoduché problémy generují velmi složité a nepředpověditelné chování[5].

V poslední době vznikl v souvislosti s deterministickým chaosem směr zvaný řízení deterministického chaosu. Je to relativně nový vědecký interdisciplinární směr, v němž dochází k symbióze více oborů jako je např. fyzika, chemie, biologie či elektronika. To vše pak zastřešuje kybernetika, která využívá poznatků přispívajících oborů k syntéze toho, čemu se říká "řízení deterministického chaosu"[1]. Navzdory faktu, že v samotném názvu se vyskytují dvě vzájemně odporující si pojmy (řízení a chaos), je pravdou, že se jedná o rigorózní vědu řídicí se striktními pravidly[5].

Hlavním úkolem této práce je popis deterministického chaosu jak z fyzikálního, tak matematického pohledu, uvedení základních metod řízení a v neposlední řadě nástin využití teorie chaosu v odvětvích lidské činnosti jako např. (biologie, chemie, ekonomie, meteorologie, sociologie aj.).

V praktické části je pak práce zaměřena na tvorbu webových stránek s uceleným vizuálním obsahem týkajícím se teorie chaosu, včetně fraktální geometrie.

Vzhledem k tomu, že popisu základních pojmů a teorie na toto téma už bylo dříve věnováno dostatek prostoru a vznikla tak spousta publikací a odborných článků, tak je tato práce zaměřena spíše na výskyt a aplikaci chaosu v praxi. Cílem práce je tedy podat tematiku chaosu co nejbarvitěji tzn. ne jen ve vzorcích a definicích, ale hlavně na příkladech a obrázcích.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 CHARAKTERISTIKA DETERMINISTICKÉHO CHAOSU

Pod pojmem chaos se všeobecně rozumí takové chování, které je projevem absolutní a čisté náhody, není v něm tedy místo pro působení zákonitostí [9]. Takovéto chování by bylo možno nazvat absolutně nekoherentní, kdy neexistují zákonité vazby mezi sousedními stavy (jak v prostoru tak v čase). Chaotické chování skutečných systémů v přírodě však charakterizuje termín "deterministický chaos". Jedná se o proces samoorganizace [5] složitých systémů, kdy vznikají soustavy koherentních struktur chovajících se v souladu s přírodními zákony. Z hlediska jedné určité struktury má vývoj systému prvky náhodnosti, systém jako celek se však vyvíjí zcela zákonitě a tedy deterministicky. Tento jev lze nalézt v přírodních systémech všech možných forem - od fyzikálních, chemických (např. chemické reakce), ekonomických (např. Elliotova vlna na kapitálových trzích [12]), tak i v biologických systémech (např. chování kolonie mravenců).

V exaktních vědách, které zkoumají izolované a značně zjednodušené modely skutečných objektů, ještě dlouho přetrvával mechanicko-deterministický přístup. První trhlinka přišla z oblasti fyziky částic objevem slavného Heisenbergova principu neurčitosti, který říká, že principiálně nelze určit libovolně přesně všechny parametry pohybu dané elementární částice a to i v případě, že ji zkoumáme izolovaně. Dále se jednalo o projevy chaotického chování i ve velmi zjednodušených systémech popsaných deterministickými rovnicemi a to jak při řešení matematických modelů, tak při fyzikálních pokusech.

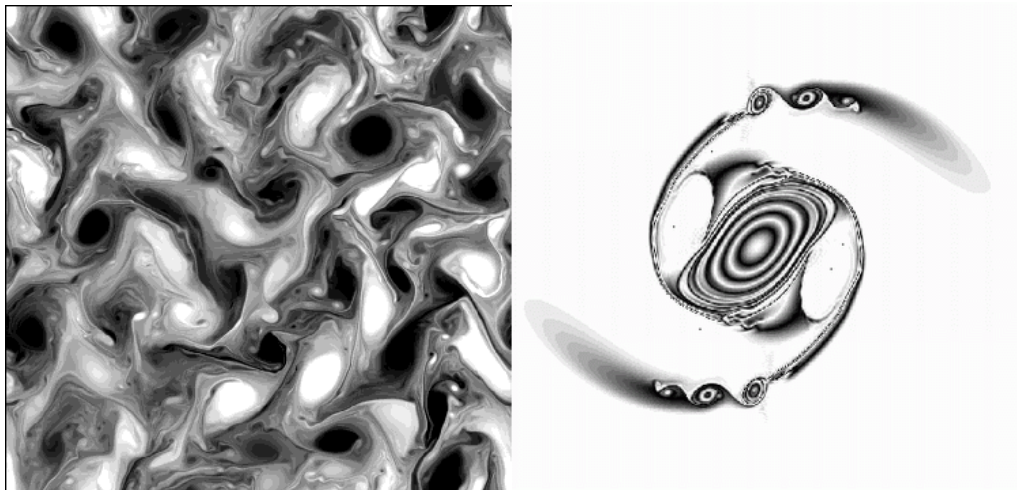
1.1 Fyzikální popis

O některých projevech chaosu se ví již poměrně dlouhou dobu, většinou však byly v minulosti považovány za neúčinnou anomálii a proto také tabu pro výzkum. Dnes na chaos pohlížíme jako na způsob chování vlastní všem přírodním dynamickým systémům, které se nalézají dostatečně daleko od jejich statické rovnovážné polohy. Za těchto podmínek totiž vzniká zcela zákonitě chaotické chování v souvislosti s uplatněním nelinearit.

1.1.1 Turbulence

Typickým příkladem relativně dobře prozkoumaného systému, chovajícího se podle zákonů deterministického chaosu, je turbulentní proudění [9]. Struktura vyvinutého turbulentního proudění je charakterizována vírovými koherentními strukturami jejichž velikost je dána

jistými zákonitostmi, okamžitá poloha a orientace konkrétního víru v prostoru je však náhodná. Turbulentní proudění lze pozorovat při experimentech, lze jej však také modelovat pomocí numerické simulace rovnic popisujících pohyb tekutiny. Matematický model proudící tekutiny je dán rovnicemi bilance hybnosti, jedná se o tzv. Navier-Stokesovy rovnice spolu s rovnicí kontinuity (zachování hmoty). Navier-Stokesovy rovnice jsou parciální diferenciální, nelineární rovnice. V každém případě se jedná o deterministický matematický model. Ukazuje se však, že za určitých podmínek může dojít k extrémnímu zesilování poruch určitého charakteru v proudovém poli. Systém tedy funguje jako filtr, který některé poruchy potlačuje, jiné zesiluje. Tento proces, který je zpočátku lineární, vede po určitém čase, kdy dojde k zesílení poruch nad jistou mez, k masivnímu uplatnění nelinearit a k přechodu systému do chaotického stavu.



Obr. 1. Turbulence

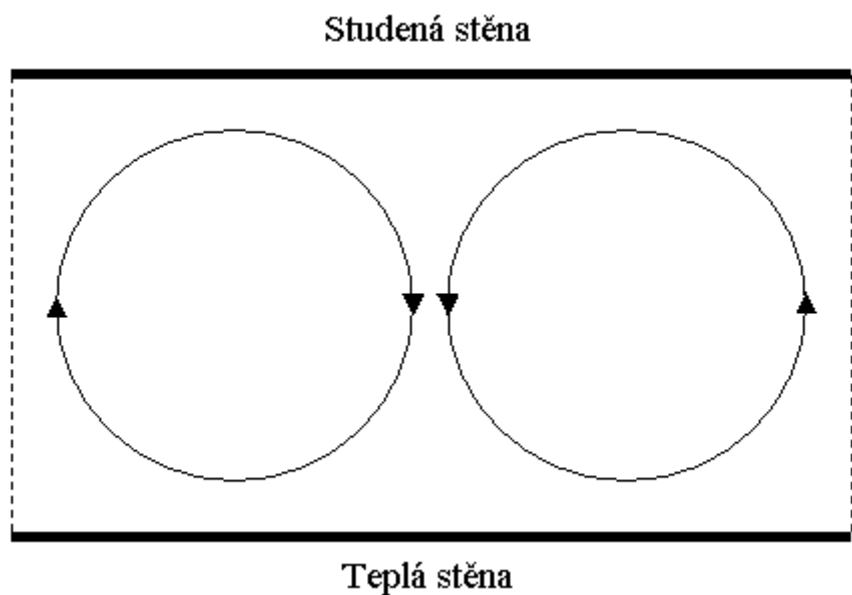
1.1.2 Motýlí efekt – Lorenzův systém

Edward Lorenz působil začátkem 60. let minulého století na Massachusetts Institute of Technology, kde vytvořil jednoduchý matematický model zemské atmosféry, na kterém se pokoušel studovat počasí, konkrétně vynucenou konvekci v atmosféře [9]. K simulacím použil z dnešního pohledu primitivní, ve své době však špičkový číslicový počítač, jednalo se o počítač Royal-McBee LGP-30 s 16kB paměti, který vypočetl 60 násobení za sekundu. Jeho výpočty byly s přesností na 6 platných číslic. Lorenz provedl zaokrouhlení počáteční podmínky na 3 platné číslice a očekával, že toto zaokrouhlení nebude mít vliv na výsledky, přitom narazil na nestabilní chování matematického modelu. Postupně zjednodušil svůj

matematický model, který měl původně 12 dimenzí až na známý třírozměrný Lorenzův systém z roku 1963 (1).

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \sigma(y - x), \\ \frac{dy}{dt} &= -xz + rx - y, \\ \frac{dz}{dt} &= xy - bz.\end{aligned}\tag{1}$$

Tento matematický model zachycuje základní vlastnosti konvektivního proudění atmosféry, která je zahřívána povrchem ze spodu a ochlazována z vrchu. Vzniká tak rotační pohyb částic vzduchu, kdy ohřátá částice stoupá, tím se ochlazuje a začne klesat, aby se opět zahřála a stoupala. Tento jev je známý jako Rayleigh-Bénárdova nestabilita. Okrajové podmínky jsou poněkud idealizovány: proudění v horní oblasti je považováno bez smykového napětí místo realističtější podmínky stejných rychlostí, v příčném směru je uvažována periodická okrajová podmínka místo omezení stěnami a celý případ je modelován jako rovinný místo prostorového. Schéma tohoto modelu je na (Obr. 2.), jedná se o tzv. Rayleigh-Bénárdovu buňku, která se periodicky opakuje v příčném směru.



Obr. 2. Schéma Lorenzova systému - Rayleigh-Bénárdova buňka

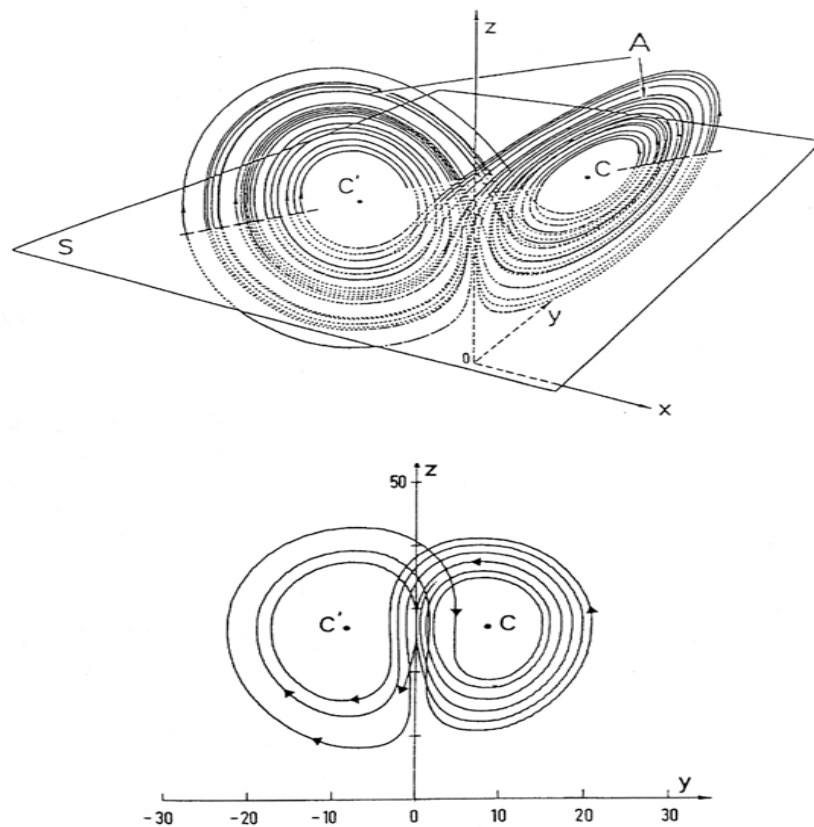
Proměnné x , y a z v rovnici (1) nejsou souřadnicemi v prostoru, jejich fyzikální význam je poněkud abstraktní. Proměnná x představuje rychlost rotace pohybu částice, kladná hodnota je ve směru hodinových ručiček. Proměnná y je potom rozdíl teplot stoupající a klesající tekutiny. Proměnná z charakterizuje odchylku svislého profilu teploty od lineárního průběhu. Parametr r je Rayleighovo číslo, parametr b představuje štíhlost válce tekutiny při konvekci, tedy poměr jeho délky a průměru.

Z matematického hlediska má systém rovnic (1) následující vlastnosti:

- rovnice jsou autonomní, to znamená, že jejich pravá strana explicitně neobsahuje čas, koeficienty jsou konstantní;
- obsahují pouze první časové derivace. Důsledkem tohoto spolu s uvažováním autonomie systému je zřejmé, že jeho vývoj závisí pouze na okamžitých vlastnostech proměnných (x , y , z) a nikoli na jejich historii;
- rovnice jsou nelineární, viz členy xz a xy ve druhé a třetí rovnici;
- systém je disipativní. Tento závěr plyne z přítomnosti diagonálních částí soustavy rovnic, které odpovídají ustalujícímu se řešení;
- řešení soustavy rovnic je omezené v prostoru proměnných.

Obvyklé parametry pro atmosférické podmínky $r = 10$, $r = 28$ a $b = 8/3$ způsobují chaotické chování systému, kdy se směr rotace náhodně mění. Dynamické systémy jsou charakterizovány limitním stavem - atraktorem, který nastává po určitém přechodovém čase, který závisí na počátečních podmínkách. Tento limitní, konečný stav může být zobrazen ve fázovém prostoru buďto jako bod - konečný stav klidu ke kterému systém spěje nebo jako limitní cyklus - uzavřená křivka, který odpovídá periodickému pohybu.

Atraktor příslušející Lorenzovu systému za určitých podmínek vybočuje z tohoto konceptu, nedojde k jeho ustálení ani po velmi dlouhém čase, vzniká nekonvergující křivka. Atraktor je pro omezený čas znázorněn (Obr. 3.).

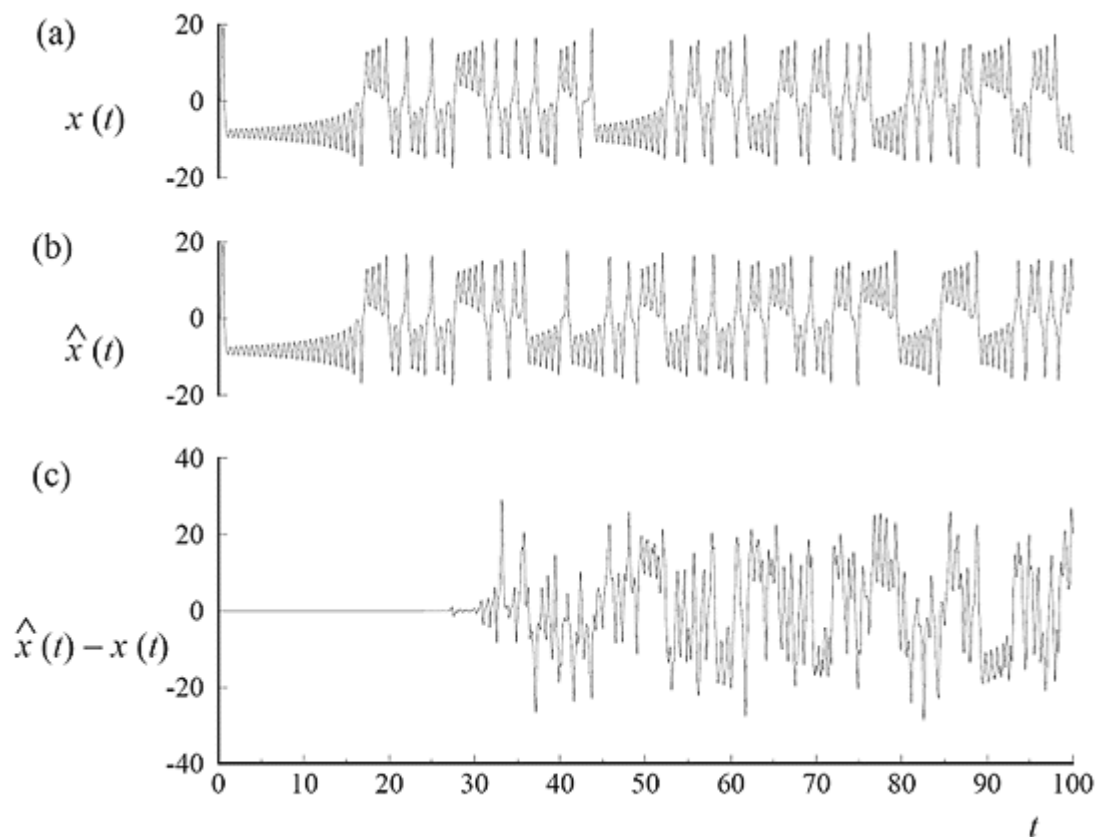


Obr. 3. Lorenzův podivný traktor

Tento atraktor je prvním z tzv. "podivných atraktorů" charakterizujících chaotické chování dynamického systému, který byl podroben zevrubnému systematickému zkoumání. Tento atraktor má některé vsutku podivné vlastnosti:

- je tvořen spojitou křivkou v prostoru, která obecně začíná v jistém počátečním bodě, může však mít nekonečně velkou délku. Přitom vyplňuje jistý přesně vymezený podprostor ve fázovém prostoru, ze kterého nikdy nevybíhá;
- nikdy neprotíná sám sebe, nekříží se ani se neopakuje;
- má vlastnost fraktálů, tj. jeho struktura se opakuje na různých měřítkách;
- jeho průběh v prostoru je náhodný, chaotický, nepředpověditelný.

Ukazuje se, že kritická hodnota parametru r při výše uvedených hodnotách parametrů r a b je rovna asi 24,74, pro hodnoty nižší směřuje vývoj systému do jediného bodu ve fázovém prostoru, pro hodnoty vyšší dostáváme nekonečný pohyb s prvky chaosu.



Obr. 4. Časový průběh proměnné x při simulaci Lorenzova systému

Na (Obr. 4.) je ukázán výsledek simulace pro různé okrajové podmínky. (Obr. 4-a) představuje simulaci průběhu proměnné x v čase t provedenou pro počáteční podmínky

$$[x(0), y(0), z(0)] = [0.1, 0.1, 0.1],$$

na (Obr. 4-b) je potom simulace pro nepatrně změněné počáteční podmínky

$$[\hat{x}(0), \hat{y}(0), \hat{z}(0)] = [0.100001, 0.1, 0.1]$$

Z grafu je zřejmé, že časový průběh souřadnice x je pro oba případy prakticky stejný až do času asi 30, dále se potom oba případy vyvíjejí zcela odlišným způsobem. Toto je zvláště zřetelně vidět na grafu (Obr. 4-c), kde je znázorněn rozdíl proměnné x pro oba případy počátečních podmínek. Vidíme, že hodnota proměnné x přeskakuje z kladných hodnot do záporných a naopak, tomu odpovídá pohyb po dvou větvích Lorenzova atraktoru. Přeskok z jedné větve na druhou je právě tím kritickým jevem, který určuje další vývoj systému. Ukazuje se, že přeskok je výsledkem nestabilního chování systému vznikající v souvislosti

s jeho nelineární podstatou a jeho výskyt v jisté konfiguraci systému je výsledkem vlivu nesmírně malých poruch. Tyto poruchy mohou mít svůj původ v nepřesně definovaných parametrech úlohy, jejích počátečních či okrajových podmínkách nebo v případě matematické simulace v jakkoli malých zaokrouhlovacích chybách výpočetního systému a mohou být běžnými prostředky neměřitelné[9].

1.2 Matematický popis

Ukazuje se, že lineární systémy jsou pouhou idealizací a ve skutečnosti žádný reálný systém nelze dokonale popsat lineárním matematickým modelem. Lineární model může pro skutečný systém platit s dostatečnou přesností pouze pro malé fluktuace výchylek, vždy však existuje jistá mez, nad kterou je chování systému nelineární. Většina systémů je však silně nelineární, linearizovaný model pro takové systémy platí pouze pro infinitesimálně malé výchylky od rovnovážné polohy. Všechny dynamické systémy vyskytující se v přírodě jsou ve své podstatě nelineární a za určitých podmínek může být jejich chování popsáno jakožto deterministický chaos. Proto je chaotické chování v přírodě tak časté.

1.2.1 Chaotické systémy

Chaotické systémy reprezentují třídu modelů neurčitosti lišící se od modelů stochastických [3]. Zatímco se znalostí současného systému deterministického modelu můžeme předpovídat trajektorie budoucnosti na libovolně dlouhou dobu, u modelu stochastického nelze určit přesnou předpověď, dokonce ani pro libovolně krátký čas. Chyba předpovědi chaotického modelu roste exponenciálně a následná předpověď může být určována jen na omezenou dobu definovanou dovolenou chybou předpovědi. Procesy v chaotických modelech mají tvar nepravidelné oscilace, kde se mění jak frekvence tak amplituda. Před 20.stoletím, byly lineární diferenciální rovnice hlavními matematickými modely oscilací v mechanických, elektrických, a jiných systémech. Přesto na přelomu století bylo zcela jasné, že lineární oscilační modely nedokážou popsat nové lékařské objevy, inženýrské jevy a procesy. Základy nového matematického aparátu, teorie nelineárních oscilací, položili A. Poincare, B. Van der Pol, A.A. Andronov, N.M. Krylov, a N.N. Bogolyubov[6].

Nově vyvinuté metody analytické a numerické studie o systémech demonstrovaly, že chaos není v žádném případě výjimečný druh chování nelineárního systému. Zkrátka chaotické pohyby vyvstávají kdykoli jsou trajektorie systému globálně ohraničené a místně nestálé. V

chaotickém systému, se i sebemenší počáteční odlišnost trajektorií postupem času stává exponenciální. Frekvenční spektrum chaotické trajektorie je spojité. V mnoha případech takové nestabilní a neperiodické oscilace lépe reprezentují procesy ve fyzikálních systémech. Zaslouhuje si povšimnout, že je prakticky nemožné rozlišovat “pouhým okem” chaotický proces od periodického či téměř periodického.

Terminologie v doméně chaotických modelů stále není zcela vyjasněna tzn. že existuje několik odlišných definic chaotických systémů[6]. Nejjednodušší z nich budou nyní představeny:

Mějme spojitý dynamický systém:

$$\dot{x} = F(x) \quad (2)$$

kde $x = x(t) \in \mathbf{R}^n$ je systémový vektor, $0 \leq t \leq \infty$.

Definice 1. Uzavřený prostor $\Omega \subset \mathbf{R}^n$ je nazýván atraktorem systému (2), jestliže a) existuje takový otevřený prostor $\Omega_0 \supset \Omega$, že všechny trajektorie $x(t)$ systému (2) začínající v Ω_0 , jsou konečné pro všechna $t \geq 0$ a konvergují k Ω pro $t \rightarrow \infty$. To znamená že vzdálenost $(x(t), \Omega) \rightarrow 0$ pro $t \rightarrow \infty$, jestliže $x(0) \in \Omega_0$, kde $(x, \Omega) = \inf_{y \in \Omega} \|x - y\|$ je vzdálenost od bodu x k prostoru Ω , a za b) žádný vlastní podprostor Ω nemá tuto vlastnost.

Definice 2. Atraktor je nazýván chaotickým, jestliže je ohraničený a uvnitř začínající trajektorie je Lyapunova nestálá trajektorie.

Definice 3. Systém je nazýván chaotickým, jestliže má přinejmenším jeden chaotický atraktor. Lyapunova nestálost charakterizuje hlavní vlastnost chaotických oscilací zvanou “super citlivost” nebo “citlivá závislost” na počátečních podmínkách: jakékoliv dvě libovolně blízké trajektorie se v konečné vzdálenosti od sebe musí nutně vzdálit.

Jinými slovy: Vývoj libovolného dynamického systému lze znázornit a popsat pomocí abstraktního prostoru stavů, který se nazývá fázový prostor [1]. Jestliže ponecháme systém se vyvíjet, vzniká ve fázovém prostoru křivka (pokud je čas spojitý) nebo množina bodů stavů (pokud je čas diskrétní). Pokud systém ponecháme vyvíjet se dostatečně dlouho, křivka ve fázovém prostoru zvýrazňuje určitou strukturu, která se nazývá atraktor. Množina stavů, které vedou ke stejnému atraktoru, se nazývá oblast přitahování atraktoru. Pokud je atraktor tvořen uzavřenou hranicí, pak lze chování systému předpovídat na libovolně dlou-

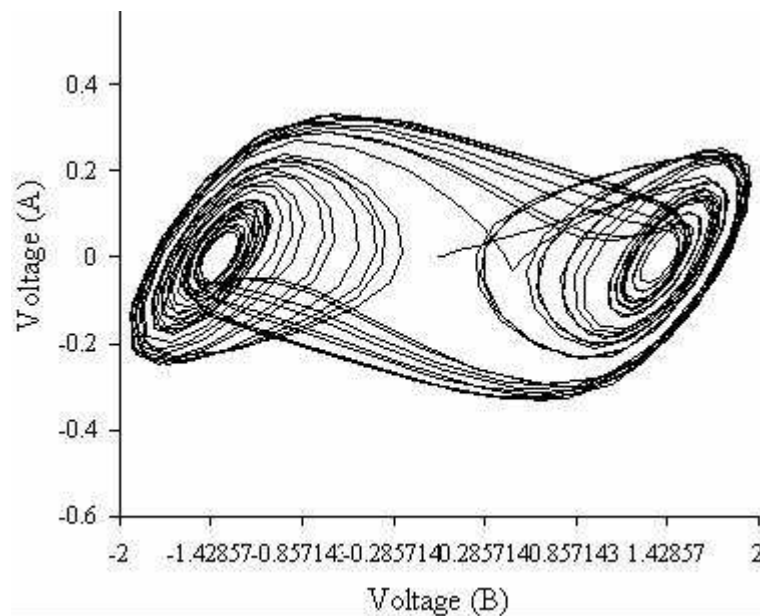
hou dobu. Chaotické chování dává naopak atraktor s neuzavřenou hranicí. U nechaotických atraktorů jsou body, které byly v určité době blízko sebe, blízko sebe trvale, tedy křivky příliš nedivergují.

Definice 4. Funkce $x : \mathbf{R}^1 \rightarrow \mathbf{R}^n$ se nazývá rekurentní (periodická), jestliže pro každé $\varepsilon > 0$ existuje $T_\varepsilon > 0$ takové, že pro každé $t \geq 0$ existuje $T(t, \varepsilon)$ a platí $0 < T(t, \varepsilon) < T_\varepsilon$. To znamená, že $\|x(t+T(t, \varepsilon)) - x(t)\| < \varepsilon$. Vlastnosti periodických trajektorií jsou popsány v [6].

Příklad 1: Chuův systém (Chuův obvod). Odborníci v elektronických obvodech L. Chua a M. Matsumoto navrhli v roce 1984 jednoduchý elektronický obvod s jedním nelineárním elementem, který je schopný generovat různorodé oscilace, včetně chaotických. Matematický model Chuova obvodu vypadá následovně:

$$\begin{cases} \dot{x} = p(y - f(x)) \\ \dot{y} = x - y + z \\ \dot{z} = -qy, \end{cases} \quad (3)$$

kde x, y, z jsou bezrozměrné veličiny a $f(x) = M_1 x + 0.5(M_1 - M_0)(|x+1| - |x-1|)$. Pro $p = 9$, $q = 14.3$, $M_1 = -6/7$, a $M_0 = 5/7$, vykazují trajektorie systému (3) chaotické chování.



Obr. 5. Výsledek simulace Chuova obvodu

Příklad 2: Chaotické oscilace mohou být vytvořeny napájením nelineárního oscilátoru harmonického signálu, například nahrazením sinusové funkce $z(t) = A \sin \omega_0 t$ za nulu v pravých stranách Van der Polových rovnic[6]: $y + \varepsilon(y^2 - 1) \dot{y} + \omega_2 y = 0$

Příklad 3: Systém

$$x_{k+1} = \{Mx_k\}, \quad (4)$$

kde $\{A\}$ je nepatrná část reálného čísla A , je chaotický pro některé $M > 1$. Systém (4) je často používán při tvorbě pseudonáhodného čísla a dost možná je prvním použitím chaosu. Vše je založeno na skutečnosti, že pro libovolnou počáteční podmínku x_0 nesrovnatelnou s M , je zlomek bodů sekvence (4) z intervalu ležícího uvnitř části $[0,1]$ úměrný délce tohoto intervalu.

Příklad 4: Henonův systém je definován diferenčními rovnicemi:

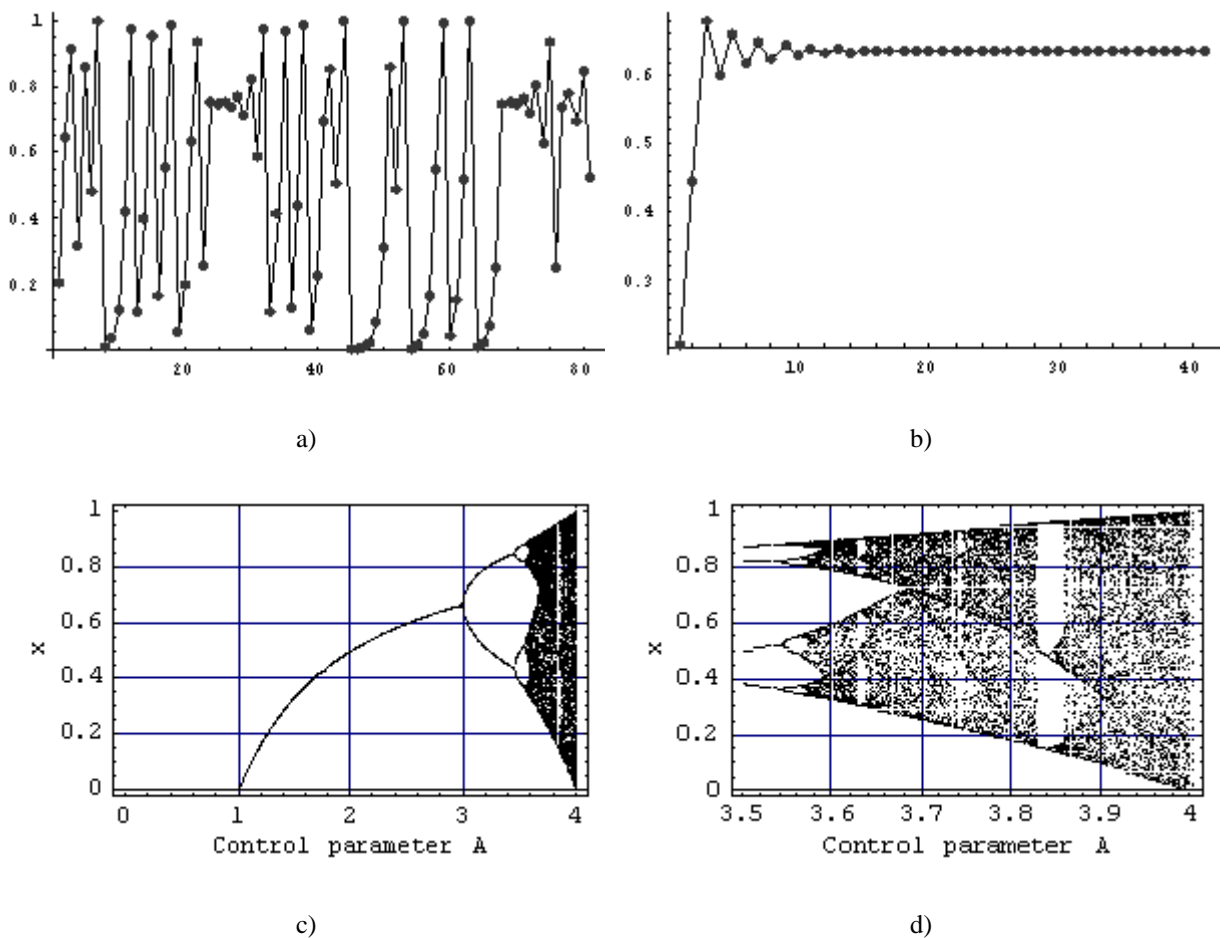
$$\begin{cases} x_{k+1} = 1 - \alpha x_k^2 + y_k \\ y_{k+1} = \beta x_k. \end{cases} \quad (5)$$

Chaotické chování systému (5) je sledováno například, pro $\alpha = 1.4$, $\beta = 0.3$.

1.2.2 Nejjednodušší model deterministického chaosu - logistická rovnice

$$x_{n+1} = Ax_n(1 - x_n) \quad (6)$$

Tato rovnice vznikla jako odezva na potřebu simulace biologických systémů, v jejichž rámci popisuje chování druhu v jeho přirozeném prostředí (např. kaprů a štik v rybníce) [5]. Pokud se do rybníku nasadí určité množství kaprů a štik, pak samozřejmě dojde k jejich množení a růstu. Ten bude mít nároky na kapacitu potravy (kaprů) v rybníku. Při rostoucím počtu jedinců bude klesat množství potravy v rybníku, což se projeví zpomalením růstu počtu kaprů. Od jisté hranice pro nedostatek potravy začnou štiky vymírat hlady, zatímco díky jejich poklesu se množství kaprů začne zvyšovat. To od určité hranice množství kaprů způsobí jejich opětovný nárůst. Prostým citem tedy lze očekávat, že populace bude asi "periodicky" oscilovat, nebo se ustálí na nějaké hodnotě. Jak již jednoduché simulace ukázaly, může systém popsaný touto rovnicí vykazovat velmi komplikované chování od ustáleného přes periodické až po chaotické [5].



Obr. 6. Logistická rovnice

a) chaotické chování rovnice při vhodné hodnotě řídicího parametru, b) deterministické chování téže rovnice pro jiné nastavení, c) bifurkační diagram, d) detail.

Všimněte si v části a) v kroku (osa x) 25 – 31 a 70 – 75 tvaru, který křivka vytváří. Jde o tzv. „trojúhelník“, jednu z mnoha geometrických formací (též technické ukazatele), které jsou zcela běžně využívány jako ukazatel blízkého budoucího chování pro obchodování na burzách.

2 ŘÍZENÍ DETERMINISTICKÉHO CHAOSU

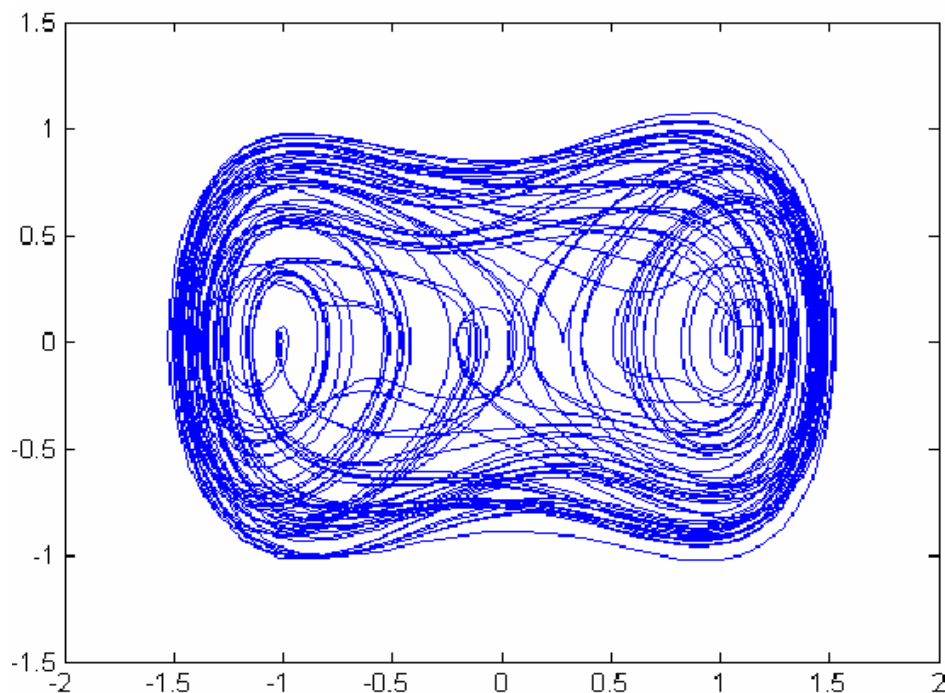
Řízením deterministického chaosu se rozumí takové působení na daný chaotický systém tak, aby se z režimu chaotického dostal systém do režimu periodického či neperiodického ustáleného stavu [5]. To je základní myšlenka řízení deterministického chaosu. Jsou zde samozřejmě ještě i opačné trendy, tzn. takové řízení, jenž by daný systém přivedlo právě do chaotického režimu. Ačkoliv to zní absurdně, je faktem že některé děje mají optimální průběh právě při chaotickém chování (např. chemické reakce).

2.1 Metody řízení

Nyní bude nedefinován chaotický systém jako příklad, na kterém budou demonstrovány jednotlivé metody řízení. Bude použit příklad prezentovaný Andrieskim a Fradkovem v [6] nazvaný „Duffing-Holmes oscilátor“ který představuje model podvodního ekosystému a je dán rovnicí:

$$\ddot{\varphi} - c\dot{\varphi} + b\varphi^3 = -a\dot{\varphi} + d \cos(\omega t) \quad (7)$$

Po zadání rovnice do MATLABu a nastavení počátečních podmínek takto: $\varphi = 1$ a $\dot{\varphi} = 0$ $c=b=\omega=1$, $a=0.25$ a $d=0.4a$; je možno spatřit, že systém je chaotický.



Obr. 7. „Duffing-Holmes oscilátor“

Nyní máme matematickou představu chaotického systému. Jedná se o systém, ve kterém dané počáteční podmínky ovlivňují výsledky, které nejsou omezené časem.

2.1.1 Řízení s otevřenou smyčkou (open loop control – OL control)

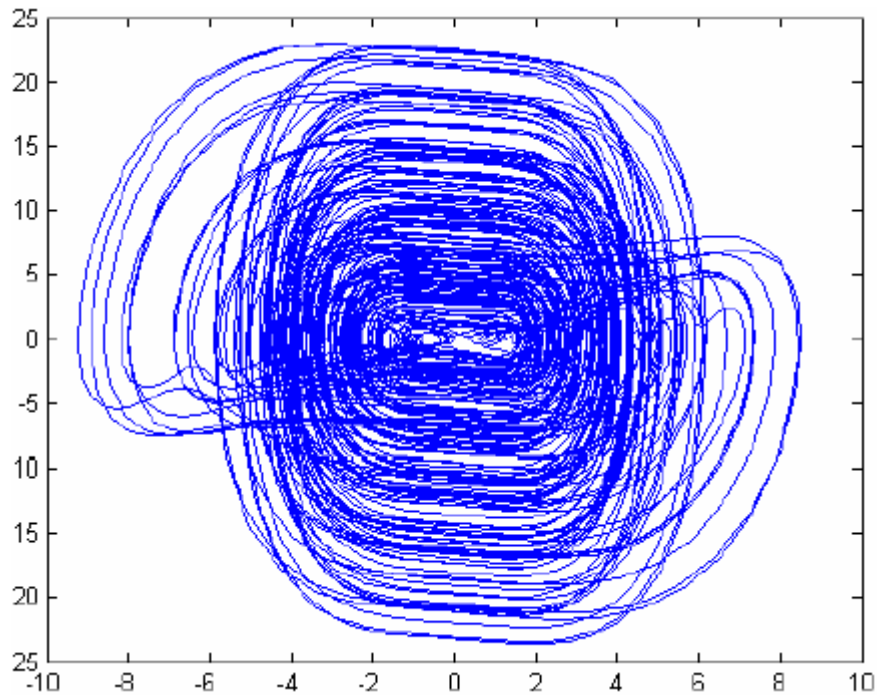
Podle Andrievského a Fradkova [6] je řízení s otevřenou smyčkou založeno na perturbaci. Perturbace je funkce času nezávislá na řízeném procesu. Princip řízení perturbací nebo „řízení signálem programu,” je vytváření řídicího signálu jako časové funkce neohledě na hodnoty kontrolovaného procesu, který je založen na rozlišném chování nelineárního systému akcí předurčeného externím vstupem $u(t)$, který může být buď jistá fyzická akce systému jako např. síla nebo pole nebo variace („modulace”) nějakého parametru kontrolovaného systému. Hlavní výhoda vychází z faktu, že řídicí proces je nezávislý na řízeném procesu. Tento přístup splní podmínku jednoduchosti, protože se obejde bez měření či senzorů. To je obzvláště důležité pro řízení super rychlých procesů působících například na molekulární nebo atomové úrovni, kde systémový stav nemůže být změřen (přinejmenším v reálném čase). Možnost variace dynamiky systému periodickou excitací je známa již dlouhou dobu. Například, jak bylo demonstrováno v první polovině minulého století, vysokofrekvenční excitace může stabilizovat kyvadlo v nejistém stavu.

Nyní se vraťme k Andrievského a Fradkovu příkladu chaotického modelu „Duffing-Holmes oscilátor“ a pokusme se jej řídit metodou OL-control.

V úvodu byl přepsán člen b na $b(1 + \eta \cos(\Omega t))$, kde Ω je uzavřený prostor ω kdy chaotické chování může být potlačeno. Nastavením $\eta=1$ a $\Omega=\omega$ je získán následující systém:

$$\ddot{\varphi} = c\varphi - b(1 + \cos(\omega t))\varphi^3 - a\dot{\varphi} + d \cos(\omega t) \quad (8)$$

V MATLABu je získáno následující řešení:



Obr. 8. Řízení s otevřenou smyčkou (open loop control)

Z výsledku je jasné, že řízení není příliš efektivní, nicméně má významný kruhový efekt.

2.1.2 Lineární a nelineární řízení (open-plus-closed-loop -OPCL control)

OPCL řízení se skládá z otevřené a uzavřené smyčky. Uzavřená smyčka je závislá na systému. Stávající systém bude vypadat následovně:

$$\dot{x} = f(x) + B u, \quad x, u \in R \quad (9)$$

kde B je matice, pro kterou platí $\det(B) \neq 0$. Andrievskii a Fradkov sestavili následující řízení:

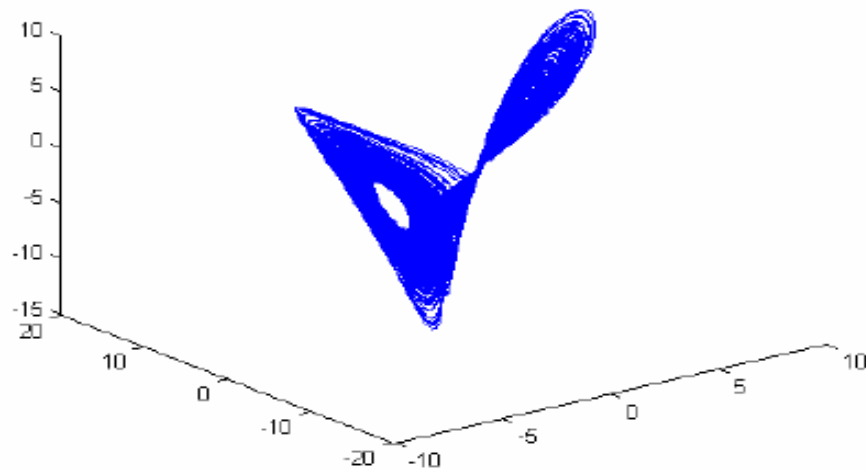
$$u(t) = B^{-1}(\dot{x}_*(t)) - f(x_*(t)) - K(x - x_*(t)) \quad (10)$$

Zde K je čtvercová matice. Rovnice nemá význam do té doby, dokud zde není zmíněn význam dolního indexu *. Tak tedy výraz $u(t) = B^{-1}(\dot{x}_*(t)) - f(x_*(t))$ značí otevřenou smyčku (nezávislá na systému), a $K(x - x_*(t))$ tvoří uzavřenou smyčku, protože je závislá na výrazu $x(t)$.

Lineární/nelineární řízení je tvořeno jednoduše užitím lineárních nebo nelineárních funkcí řízení systému. Andrievskii a Fradkov prezentovali nelineární řízení na známém Lorenzově systému:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \sigma(y - x) \\
 \dot{y} &= -y - xz \\
 \dot{z} &= -z + xy - r
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Tento model vykazuje chaotické volání jestliže $r \geq \sigma(\sigma + 4)/(\sigma - 2)$. Jestliže nastavíme, že parametr $\sigma = 4$ a $r = \sigma(\sigma + 4)/(\sigma - 2) + 5$, získáme v MATLABu tento výsledek:

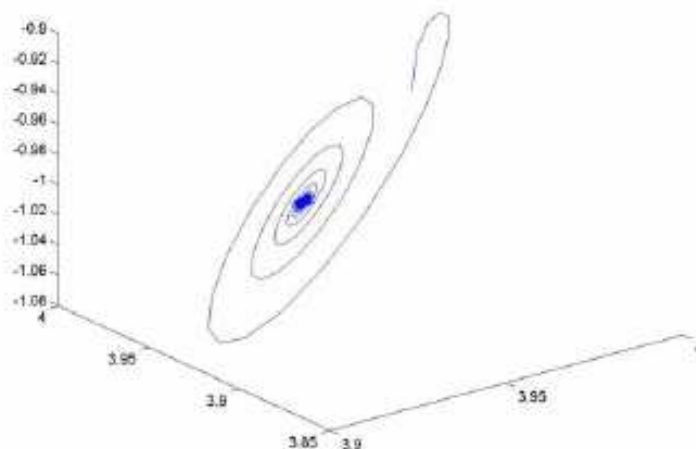


Obr. 9. Lineární řízení I

Přidáním parametru u do rovnice z , $u = -\gamma \sin(z + 1)$ je získán tento výraz:

$$\dot{z} = -z + xy - r - \gamma \sin(z + 1)
 \tag{12}$$

Nastavením parametru $\gamma=1$ a ponecháním všech ostatních je v MATLABu získán tento výsledek:



Obr. 10. Lineární řízení II

V tomto případě je řízení velmi efektivní.

2.1.3 Adaptivní řízení

V mnoha systémech nejsou vždy všechny řídicí parametry zcela známy. V takovém případě si systém žádá adaptivní řízení, které je založeno na algoritmických statistických metodách nejmenších čtverců a maximální pravděpodobnosti odhadů.

Samozřejmě, že existují ještě další metody řízení jako například linearizace Poincarého mapy známá spíše pod názvem OGY metoda, metoda zpožděné zpětné vazby a další [6], ale k jejich detailnímu popisu zde není prostor a ani to není předmětem práce.

Je velmi důležité si uvědomit, že neexistuje žádná „nejlepší“ metoda řízení. To znamená, že každý systém je individuální a reaguje jinak na různé metody řízení, kdy každá má svá pozitiva ale i negativa.

3 APLIKACE DETERMINISTICKÉHO CHAOSU V PRAXI

Chaos se objevuje u řady nelineárních systémů. Dokonce systémy jen s několika stupni volnosti, o nichž se domníváme, že jsou jednoduché, mohou projevovat složité chování, které nelze v dlouhých časových intervalech předpovědět. Avšak tento chaos se od náhodnosti zásadním způsobem odlišuje. Chaotické systémy jsou deterministické, zatímco náhodné systémy jsou nedeterministické již ze své vnitřní podstaty. Rozdíly mezi chováním obou typů systémů lze sledovat ve fázovém prostoru [1].

3.1 Fyzika

Fyzikální aplikace zahrnují řízení tření, turbulence, laserů a plazmatu. Multimodové lasery byly jednou z prvních aplikací řízení chaosu. Použitím řízení s otevřenou smyčkou (open-loop) bylo dosaženo zdokonalení v síle radiačního záření.



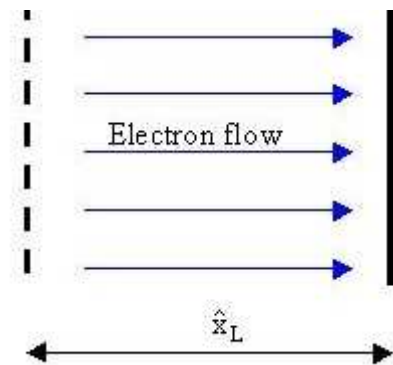
Obr. 11. 900nm Multimode Laser s úctyhodným výstupním výkonem 4 W

3.1.1 Řízení chaosu v plasmě

Plasma je plynný stav hmoty, v níž jsou atomy nebo molekuly silně ionizovány. V plasmě důležitou roli proto hrají vzájemné elektromagnetické síly mezi kladnými ionty a volnými elektrony. Hannes Alfvén ve 40. letech 20. století ukázal, že v plasmě existuje nový typ kolektivního chování, "magnetohydrodynamické vlny". Tyto vlny hrají rozhodující roli pro chování plasmy jak v laboratoři tak v zemské atmosféře nebo v kosmu.

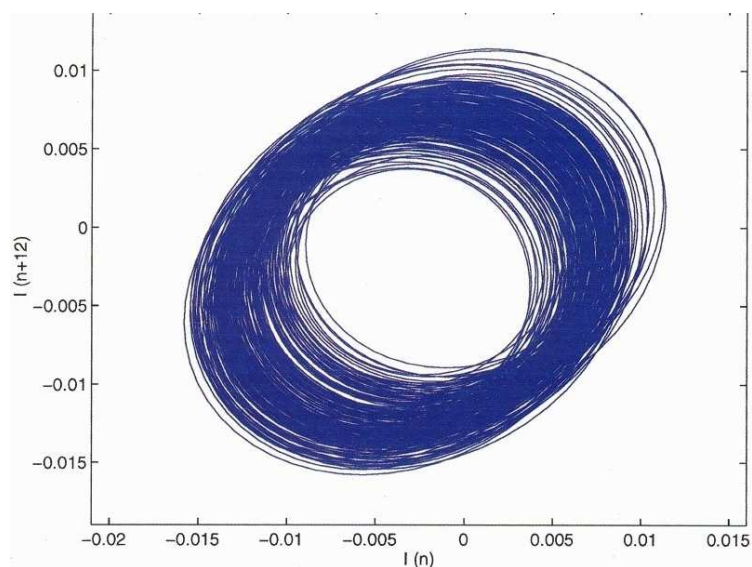
Plasma diody jsou velmi často používány jako jednoduchý model pro nové generátory silného mikrovlnného záření např. oscilátor virtuální katody[13]. V tomto případě model obsahuje dvě rovinné elektrody, mezi kterými je prostor naplněn nehybnými pozitivními ion-

ty konstantní hustoty. Elektronový paprsek dané proudové hustoty, začne prostupovat konstantní rychlostí systémem přes první polopropustnou elektrodu (Obr.12). Vnitřní nelinearita paprsku/pole vzájemně ovlivňujících proces může vést systém nejen k nestabilitě, ale také k oscilacím a chaosu. Cílem je porozumět detailům těchto fyzikálních procesů a objevit podmínky převažující v prostoru mezi elektrodami, které vedou k vyhnutí (vyvarování se) či naopak k získání složitého chování[13].

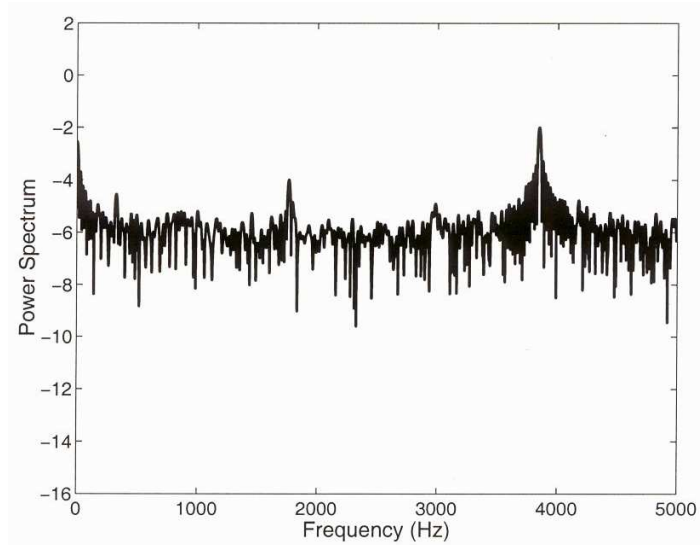


Obr. 12. Model plasma diody

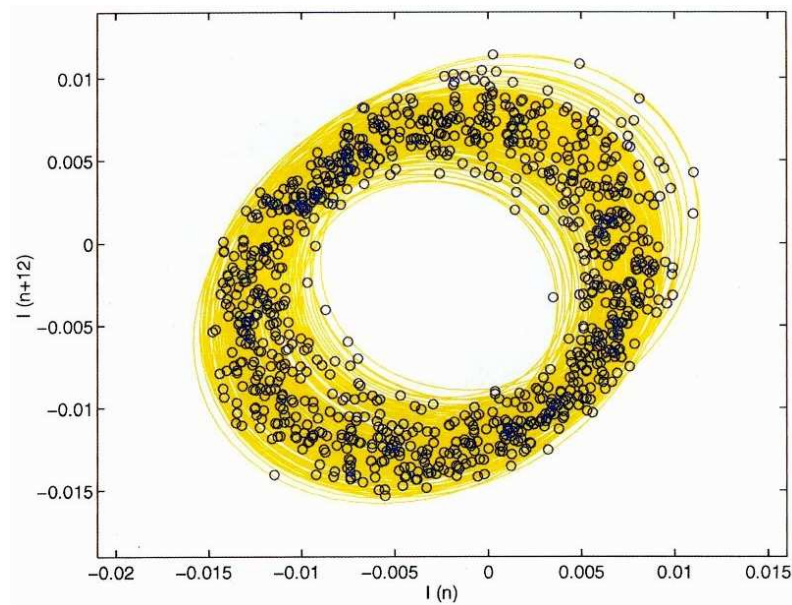
Struktury pevného skupenství schopné omezovat nebo vypouštět fotony jsou studovány ve viditelném, infračerveném a milimetrovém vlnovém rozsahu[14]. Charakteristická nerovnoměrnost délky rozpětí v řádu milimetrů ve strukturách označována jako “foto krystaly” je od kmitočtového rozsahu GHz po nanometrické velikosti kvantových pramenů uvažována ve viditelném rozsahu. Vzájemné ovlivňování fotonu s oscilacemi plazmy je závislé na vlnovém rozsahu.



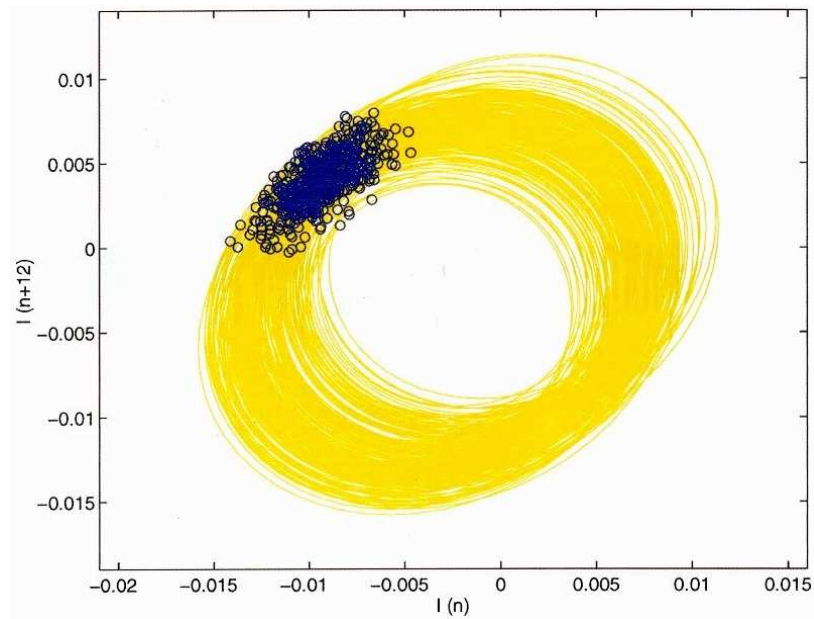
Obr. 13. Zpoždění vytvářející konstrukci plasma atraktoru



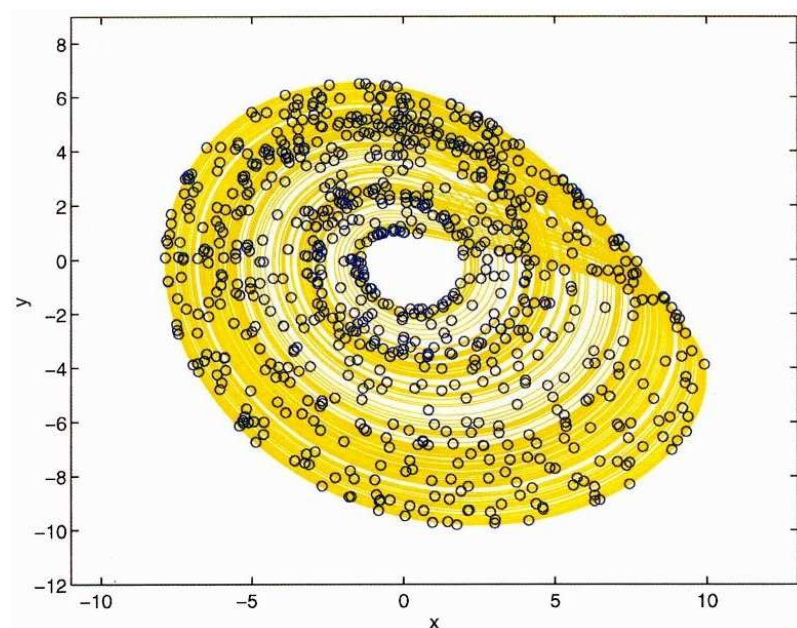
Obr. 14. Výkonové spektrum plasma signálu



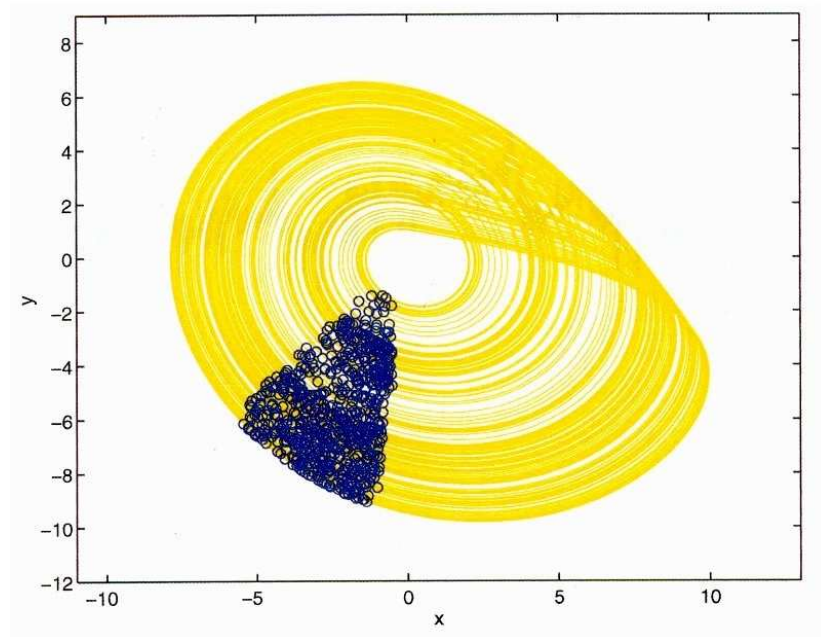
Obr. 15. Kruhy indikující stroboskopický povrch daného úseku v časovém intervalu $\Delta t = 260\mu s$, nezhuštěná plasma. Na pozadí je vidět atraktor.



Obr. 16. Zhuštěná plasma



Obr. 17. Kruhy indikující stroboскопický povrch daného úseku v pevném časovém intervalu $T = 6,088$ nezhuštěný Rosslerův systém



Obr. 18. Zhuštěný Rosslerův systém.

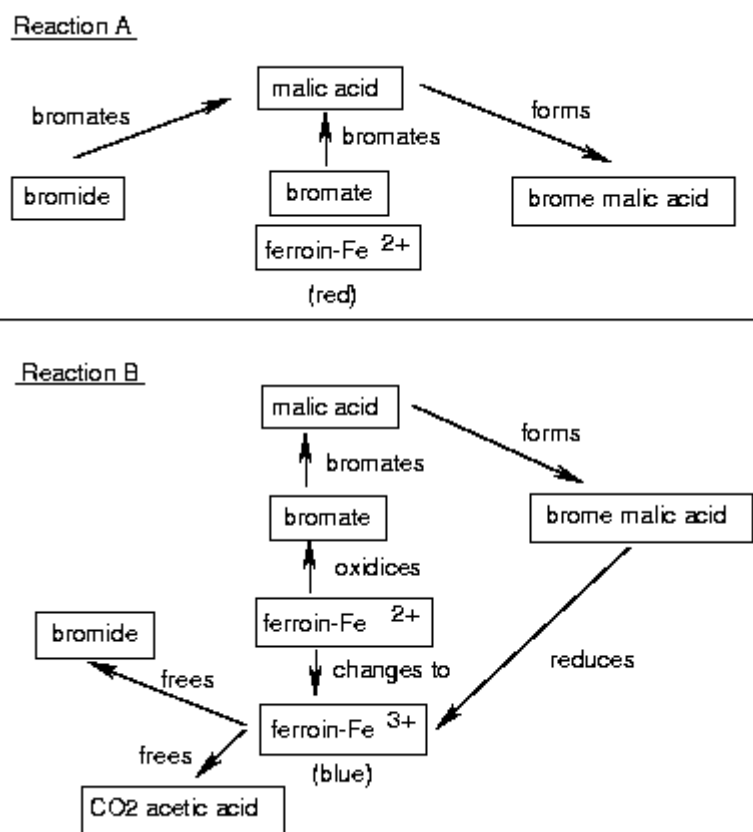
3.2 Chemie

Chaotické oscilace v chemických reakcích byly objeveny v 70. letech 20. století (Bélousov-Žhabotinského reakce). Cíl řízení je formulován jako dosažení reakce ustálení, což znamená potlačení chaotických oscilací, nebo excitace oscilačního nebo dokonce chaotického režimu. Chaotické chování je žádoucí například pro spalování, protože zvyšuje pohyb směsi paliva a vzduchu, což má za následek zrychlení celého procesu. Protože chaos vede k lepšímu míchání, reakce je často více jednotná a proto je produkt méně znečištěn.



Obr. 19. Bélousov-Žhabotinského reakce

Rezonující řízení chaosu světlem v chemiluminiscenční Bélousov – Žhabotinského reakci s katalyzou směsi ceria – ruthenia je popsáno v [6]. Řízení spočívalo ve změně toku světla. Na experimenty byl použit chemický reaktor s nepřetržitým mícháním (CSTR). Tok světla byl dán formou sledu “obdelníkových” pulsů.



Obr. 20. Schéma Bělousov-Žhabotinského reakcí

Experimenty používající komplexní řízení otevřené smyčky (open loop) včetně chaotických oscilačních elektrochemických procesů demonstrují to, že vybráním vhodné frekvence vnějšího napětí, mohou ne jen vytvářet chaotický proces periodický, ale také ovlivnit dynamiku pravidelných oscilací. Možnosti odstranění chaosu ve spojených elektrochemických oscilátorech řízených otevřenou smyčkou a dopravním zpožděním jsou popsány v [6], stejně jako fakta o experimentálním řízení chaosu v elektrochemickém rozpouštění mědi v kyselině fosforečné prostředky neuronových sítí.

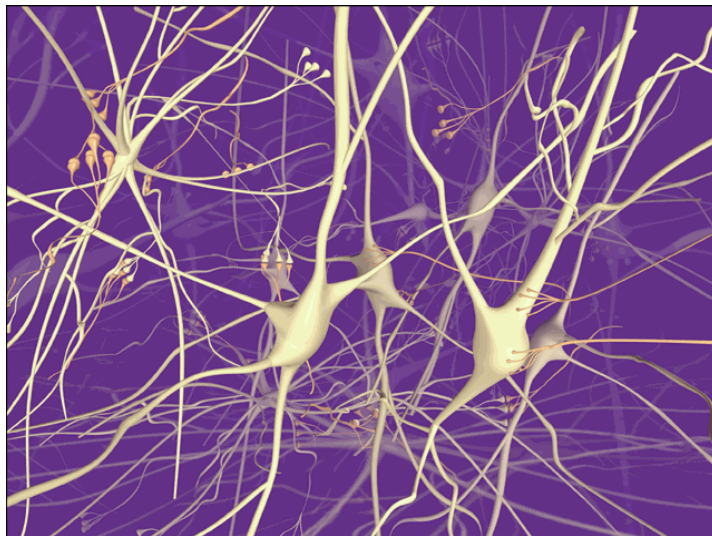
3.3 Lékařství

Dá se říci, že čím má nějaký systém blíže k životu, k živým organismům a lidem, tím spíše na něm nalezneme známky nepravidelnosti, neperiodičnosti a vůbec nepředpověditelnosti. Hlavním důvodem je fakt, že živý organismus se musí rychle adaptovat na měnící se životní podmínky a musí maximalizovat schopnost svého přežití. To by nedokázal, kdyby stále setrval ve snaze po jednoduché stabilitě. Ostatně největší stabilitou se vyznačuje stav naprostého klidu - což je v případě živého organismu smrt.

3.3.1 Elektrická léčba epilepsie aneb teorie chaosu v neurovědách

V jednom z vydání The Journal of Neuroscience se objevil zajímavý článek s názvem „Adaptivní kontrola epileptických záchvatů elektrickým polem“. Autoři zapojili řezy mozkové tkáně do zpětnovazebného elektrického obvodu, který rozpoznal v řezech uměle vyvolanou epileptiformní aktivitu a dokázal ji zastavit aplikací slabého elektrického pole. Podobný princip by se dal využít v léčbě lidské epilepsie.

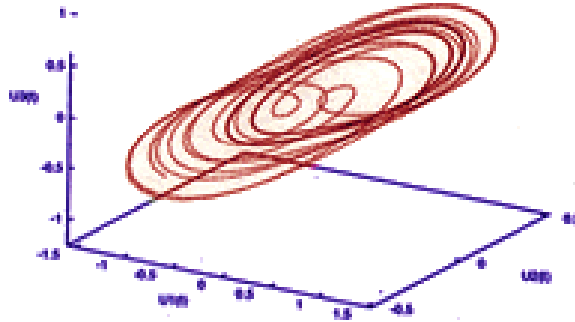
Elektrické chování vzájemně propojených neuronů v mozku je příkladem nelineární dynamiky, stejně jako např. některé elektronické obvody, planetární systémy, ale i kapající koutky. K popisu těchto komplexních jevů nelze použít klasickou matematiku a fyziku. Je třeba se uchýlit k teorii chaosu a nelineární dynamice. Ukazuje se, že komplikované a zdánlivě nesouvisějící systémy vykazují velmi podobné vzorce chování, které nejsou ani zcela náhodné, ani zcela pravidelné. Popis chování těchto systémů je významný pro jejich pochopení a možnost ovlivnění. Vědci se pokoušejí získat pravidelnost z chaosu, např. právě elektrickou stimulací mozku, která přeruší epileptické výboje.



Obr. 21. Neurony

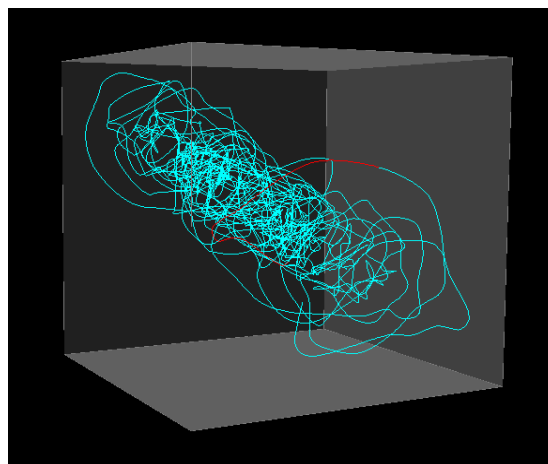
Unikátním aspektem popsaného experimentu je získání zpětné vazby přímo ze tkáně. Epileptický záchvat je vyvolán elektrickou aktivitou. Ta zapne elektrické pole, které vrátí činnost neuronů do normálního stavu. Elektrická aktivita každého z mnoha neuronů, které se podílejí na vzniku epileptického záchvatu, je komplikovaná a obtížně pochopitelná. Při záchvatu se však neurony začnou chovat synchronně. Celkový výsledek synchronní aktivity je mnohem snadněji pochopitelný a popsitelný než chování každého individuálního členu

takto složitěho systému. To umožňuje vědcům snáze systém poměrně jednoduchý zásahem vrátit do původního stavu. Možnost ovládat složité systémy bez pochopení jejich jednotlivých komponent je doménou a přínosem nelineární dynamiky.



Obr. 22. Trojrozměrný neuron attractor

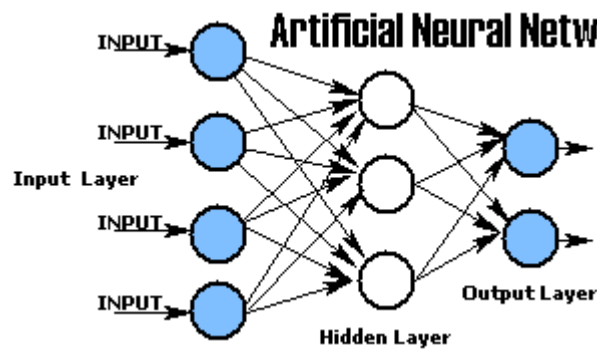
Podobné zpětnovazebné okruhy by se daly využít při léčbě fokální epilepsie. Ta se často řeší resekci epileptického fokusu. Možná by místo toho stačilo umístit drobné elektrody na povrch mozku nebo do komor. Podobné přístroje jsou již ve vývoji a neurochirurgové by je rádi začali v příštím roce testovat v klinických experimentech u lidí.



Obr. 23. Trojrozměrný diagram prostoru EEG

Mozek – nejsložitější a nejorganizovanější hmotu ve známém vesmíru, složenou z miliard neuronů, z nichž každý vytváří tisíce synapsí, rozhodně nepůjde zkrotit a predikovat jednoduchými lineárními vzorci klasické Galileovské a Newtonovské matematiky a fyziky. Teorie chaosu by mohla být výrazným přínosem pro kognitivní neurovědy a zejména psychi-

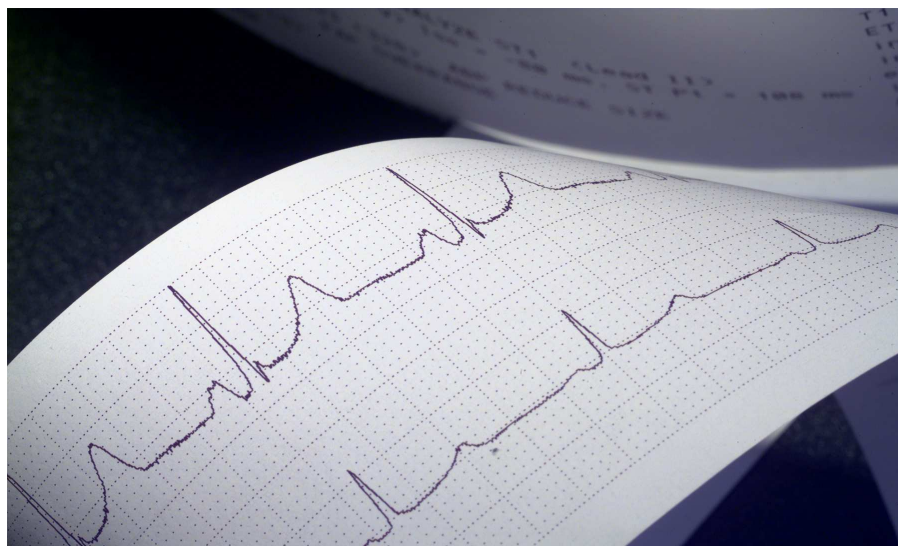
atrii, jejímž předmětem zájmu jsou právě nejkomplicovanější, v mozku značně distribuované a vzájemně složitě interagující systémy řídící emoce, myšlení, vnímání.



Obr. 24. Umělá neuronová síť

3.3.2 Srdce

Dynamika srdečního svalu a jeho chaotické pohyby (fibrilace), které byly řešeny povětšinou metodou pokus-omyl, se nyní zkoumají právě pomocí prostředků teorie chaosu, neboť bylo prokázáno, že nástup chaotických pohybů se děje přesně podle předpovědí Michela Feigenbauma. Nerozlišuje se také tolik druhů poruch srdečního rytmu, ale zahrnují se do různých projevů nástupu chaosu. Proto také odstraňování (a ještě spíše prevence) těchto chaotických stahů srdečních svalů je třeba řešit pomocí teorie chaosu (takže např. EKG se nyní zkoumá prostředky fraktálové geometrie).



Obr. 25. EKG diagram

Taktéž při tvorbě umělých srdečních chlopní je třeba uvažovat o nelineární dynamice (a tudíž chaotických atraktorech) krve v krevním řečišti, protože tvar cévy se mění s okamžitým tlakem krve a i jinak se pohybuje krev nelineárně.

Ovšem srdce není jediný orgán v lidském těle. Pomocí metod teorie chaosu se zkoumají psychické poruchy, pohyby oka při schizofrenii a mnoho dalších jevů. Další částí zkoumání jsou biologické hodiny, nemoc z přestupu časových pásem atd. Samozřejmě citlivá závislost na počátečních podmínkách nahrává tomu, že se začíná v mnohem větší míře prosazovat systematický (celkový) přístup k pacientům.

3.4 Biologie

3.4.1 Pohyb ryb v hejnu

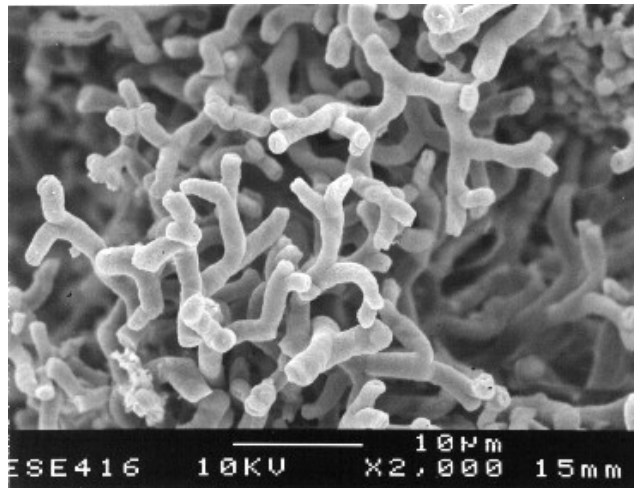
Pohyb každé jednotlivé rybky není nutné popisovat samostatně, protože každá rybka se řídí třemi jednoduchými lokálními pravidly: soudržnost hejna, zařazení a oddělení. Každé z těchto pravidel má svůj biologický význam, proto je model značně věrohodný. Překvapivé je, jak realistické a komplikované kolektivní chování z těchto tří jednoduchých pravidel vychází. Neexistuje žádný vůdce hejna a neexistuje žádný globální plán pohybu nebo perspektiva (pohyb rybek na počátku není nijak zorganizován)[10]. Tento jednoduchý příklad je příkladem samoorganizace [5]. Další příklady lze nalézt v kolektivním chování lidí nebo na akciovém trhu viz.níže.



Obr. 26. Hejno ryb

3.4.2 Kolonie bakterií

Při pohledu na nějaký snímek kolonie bakterií je možné vidět rozvětvenou strukturu, jejíž každá část při zvětšení vypadá podobně jako celek. Kolonie bakterií je příkladem náhodného fraktálu[10]. Přesné fraktály vypadají zcela stejně při libovolném zvětšení, zatímco náhodné fraktály se při zvětšení statisticky podobají. Fraktální struktura je každá samopodobná struktura v různých měřítcích velikosti.

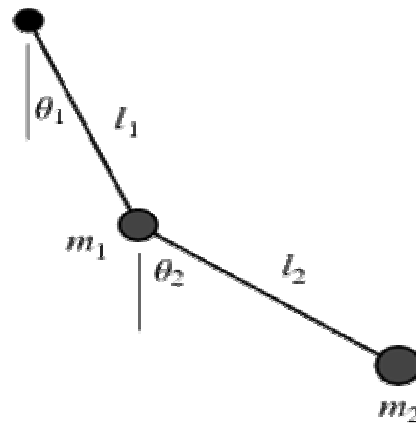


Obr. 27. Kolonie bakterií

3.5 Mechanické systémy

3.5.1 Dvojitě kyvadlo

Jednoduché kyvadlo se skládá z malého těžkého předmětu, připevněného na konec lehké tyče. Pro malé kmity (bez existence tření) se kyvadlo chová jako harmonický oscilátor. Perioda tohoto pohybu je úměrná druhé mocnině délky kyvadla [10]. Pro velké kmity je pohyb kyvadla sice ještě periodický, ale již neplatí jednoduchý vztah. Pro velké kmity jsou rovnice pohybu kyvadla nelineární na rozdíl od lineárních rovnic pro malé oscilace. Protože rovnice pro velké kmity jsou nelineární, nelze pohyb kyvadla předpovídat. Dvojitě kyvadlo se skládá ze dvou jednoduchých kyvadel, kdy jedno kyvadlo je připojeno na konec druhého kyvadla. Rovnice pohybu dvojitěho kyvadla pro velké kmity jsou nelineární, a pohyb je zcela nepravidelný a velmi citlivý vůči počátečním podmínkám.

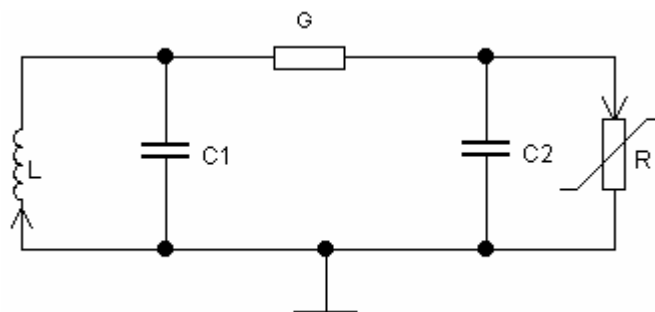


Obr. 28. Dvojité kyvadlo

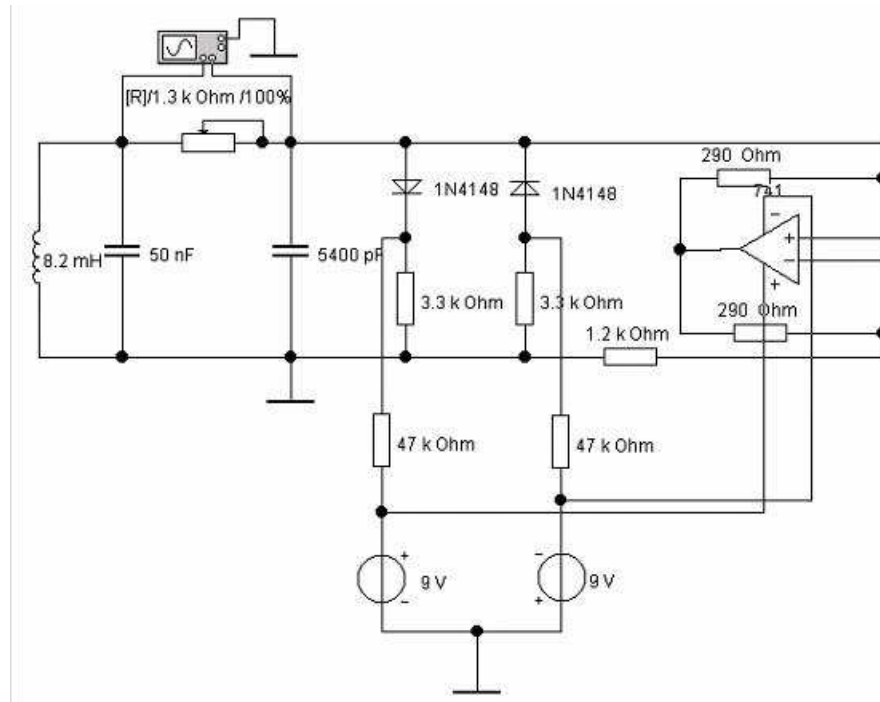
3.6 Elektronické systémy

3.6.1 Chuův obvod

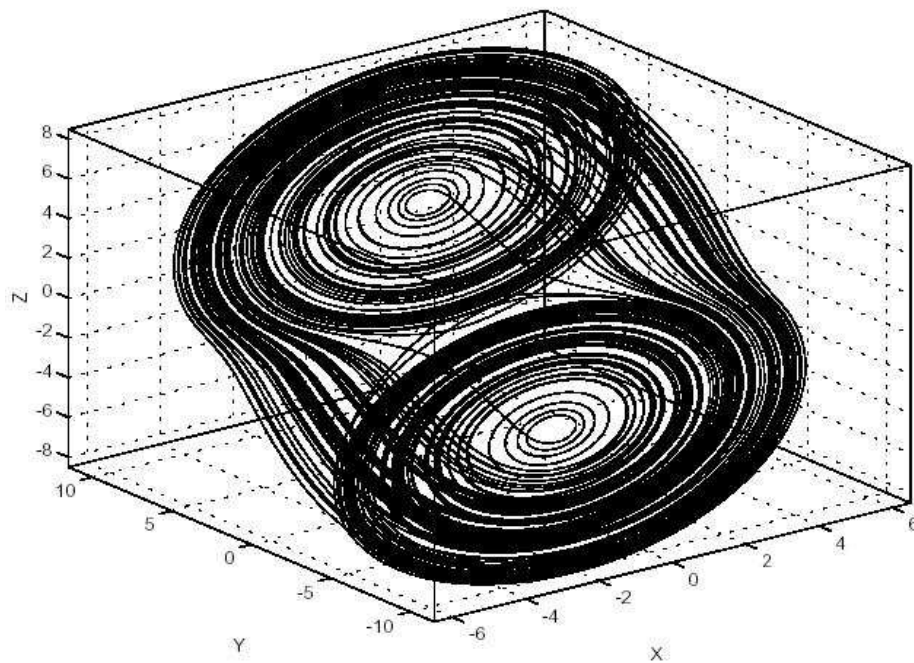
Jedná se o dva rezonanční obvody s tím, že první z nich je klasický paralelní LC oscilátor a druhý je RC oscilátor s nelineárním odporem mezi nimiž je vodivost G ($G=1/R$) což je řídicí parametr tohoto obvodu.



Obr. 29. Schéma funkce Chuova obvodu



Obr. 30. Celkové schéma zapojení Chuova obvodu



Obr. 31. Chuův atraktor

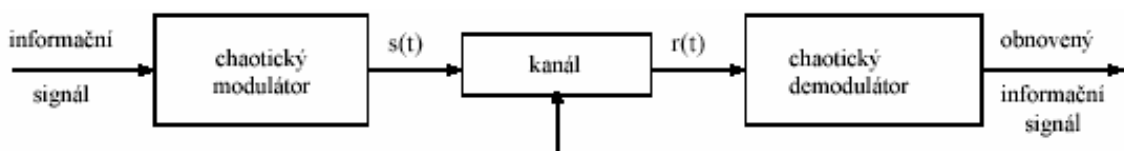
3.7 Komunikační systémy

V poslední době nabývají na významu systémy využívající chaos a různé aplikace využívající nelineární dynamiky. Chaotické signály se pro přenos informace používají ze dvou hlavních důvodů. Jedním z nich je ukrytí informace v chaosu. Tato aplikace nahrazuje konvenční šifrování. Druhým důvodem je to, že chaotické signály mají velmi široké spektrum, což je velmi výhodné pro víceuživatelské aplikace [16].

Proč se začalo zkoumat využití chaotických signálů v komunikacích? Původní myšlenka byla namodulovat informaci na chaotický signál, tak aby byla dostupná jen pro autorizovaného uživatele. Příjímač odstraní chaotickou složku a obnoví původní informaci. Kdokoliv, kdo zachytí vysílané signály, uvidí jen šumový, chaotický signál, ze kterého jen obtížně obnoví původní informaci. Zde se rýsuje velký prostor pro různé šifrovací metody, které mohou být vyvinuty. Druhá myšlenka má původ v široko-pásmové komunikaci (Ultrawide Band Communications, UWB), kde se používají pseudonáhodné signály pro zvětšení frekvenčního pásma. Důvodem používání těchto systémů je omezení interference signálů z jednotlivých zdrojů a také omezení vlivu zpožděných signálů v bezdrátové a mobilní komunikaci [16].

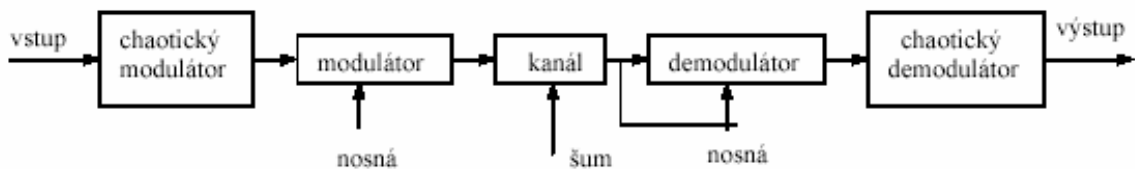
3.7.1 Modulování chaotického signálu

Modulování v klasickém komunikačním systému má za úkol sloučit nízkofrekvenční informační signál s vysokofrekvenčním signálem nosným, který přeneše informaci do pásma vhodného pro přenos. Při modulaci využívající chaos můžeme využít dva různé přístupy. V prvním přístupu je modulátorem samotný chaotický systém, který je vhodným způsobem ovlivňován informačním signálem. Tato metoda má výhodu, že je jednoduchá a výkonově úsporná, ale na druhou stranu je složité realizovat vysokofrekvenční chaotický systém. Tento způsob je vhodný pro výzkum, nikoliv pro praxi.



Obr. 32. Přímá modulace informačního signálu na vysokofrekvenční chaotickou nosnou vlnu.

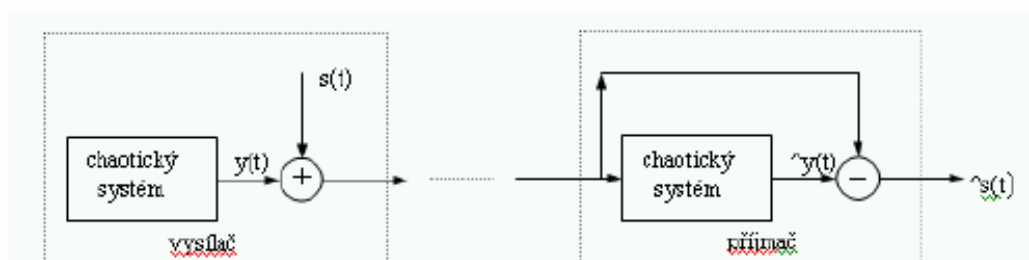
Ve druhém přístupu je smíchán chaotický signál s informačním na nízké frekvenci, a pak transformován tradičním modulátorem na vysokou frekvenci. Blokové schéma je na obrázku (Obr. 33). Výhodou je snadná realizace chaotického modulátoru a demodulátoru, ovšem za cenu větší složitosti a energetické náročnosti.



Obr. 33. Modulace chaotického signálu informačním signálem v základním pásmu, kombinovaná s klasickým párem modulátor-demodulátor

3.7.1.1 Chaotické maskování (chaotic masking)

Chaotické maskování spočívá ve smíchání informačního signálu s chaotickým a jeho obnovení synchronizací. Ve vysílači a přijímači jsou umístěny totožné chaotické systémy a synchronizace je dosaženo tak, že přijímač je řízen přijímaným signálem. Synchronizací se produkuje signál $\hat{y}(t)$, který je podobný čistě chaotickému signálu $y(t)$ ve vysílači. Proto můžeme informační signál $s(t)$ získat zpět pouhým odečítáním výstupního signálu synchronizace od přijímaného signálu. Nicméně tento systém pracuje pouze tehdy, když je informační signál vůči chaotickému zanedbatelně malý, takže ho změní jen málo. Je zřejmé, že šum v kanále znemožní obnovení informace, a proto tento způsob není často používán.

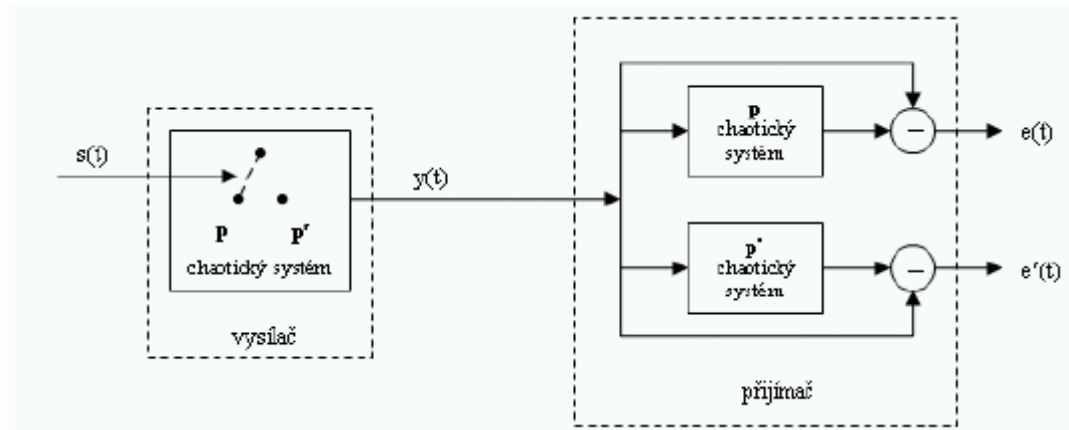


Obr. 34. Princip chaotického maskování

3.7.1.2 Chaotické klíčování (chaotic shift keying, CSK)

V této metodě moduluje informační signál nějaký parametr chaotického systému. V nejjednodušším případě je informační signál binární a řídí přepínání mezi dvěma vektory parametrů p a p' . Bit je reprezentován chaotickou křivkou určité délky. V původním návrhu

metody je bit detekován tak, že se snažíme přicházejícím signálem synchronizovat oba systémy, jeden s vektorem parametrů p a druhý s vektorem parametrů p' . Jakmile se jeden systém synchronizuje tak tím indikuje přijímaný bit.

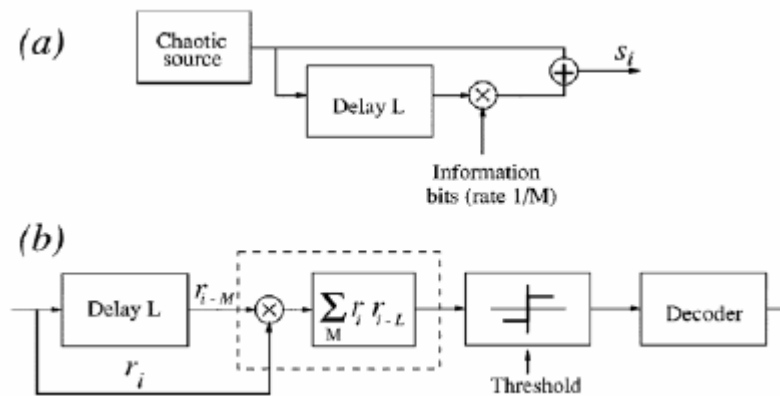


Obr. 35. Princip chaotického klíčování

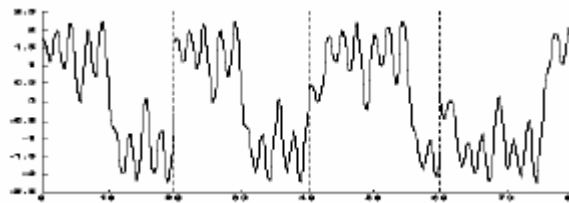
Dosud bylo navrženo mnoho metod chaotického klíčování. Nejednodušší metoda spočívá ve změně výstupní funkce v závislosti na přenášeném bitu jde o tzv. Chaos antipodal coding $b(t)$ [16].

3.7.1.3 Diferenční chaotické klíčování (differential chaos shift keying)

Tato metoda (DCSK) byla vyvinuta pro odstranění synchronizace vysíláním nemodulovaného signálu společně s modulovaným. Přesněji, při odeslání jednoho bitu se chaotickým systémem vygeneruje signál stanovené délky a ten je vyslán do přenosového kanálu. V případě že je přenášena "1" je za ním vyslána jeho kopie. V případě že je přenášena "0" je za ním vyslána jeho kopie sečtená s -1. V přijímači se pro získání informace obě části porovnávají. V této metodě se nevyužívá pro demodulaci žádná vlastnost chaosu, proto mohou být použity jakékoliv signály. Nevýhodou této metody nutnost použití zpožďovacích členů a spínačů, což vede k potížím při realizaci. Kromě toho je polovina času použita pro vysílání referenční křivky. Na druhou stranu je to neúčinnější metoda v komunikaci využívající chaos, nicméně je stále horší než BPSK. Byly navrženy modifikace této metody a to CDSK (correlation delay shift keying) a SCSK (symmetric chaos shift keying) a mnoho dalších.



Obr. 36. Operace v DCSK a) vysílač, b) přijímač



Obr. 37. Signál chaotické DCSK

Komunikace založená na chaosu je nová disciplína, proto ještě nedosahuje takových výsledků jako klasické metody. Je také otázkou, zda existují určité teoretické limity, které není možné překročit.

3.8 Informatika

3.8.1 Fraktální geometrie

Pravděpodobně největší uplatnění má fraktální geometrie a fraktály v počítačové grafice[19]. S rozvojem grafických schopností počítačů se stále více ukazovalo, že je zapotřebí objevit nové postupy, jak modelovat přírodní objekty. V principu jsou možné tři různé způsoby zadávání dat pro modely.

Prvním způsobem je modelování objektů animátorem[19]. Pro tento způsob se dlouhou dobu vytvářely modelovací programy typu CAD a CAM. V případě modelování technických a geometrických předmětů je tento způsob ideální. Problém nastává v případě, že chceme modelovat nějaký složitější přírodní objekt, například hory nebo stromy. Množství

vytvářených dat je obrovské a vynaložená práce většinou neodpovídá kvalitě a věrohodnosti výsledku.

Druhým způsobem je přímé snímání (skenování) daného objektu. Tato metoda má své uplatnění, ale není výhodná ve všech případech. Prostorové (trojrozměrné) skenery jsou drahá zařízení, která mají omezenou rozlišovací schopnost. Také jsou schopny skenovat pouze objekty určité velikosti a struktury. Například skenování hory či stromu je nemožné. Také objekty, které mají velkou členitost, je obtížné skenovat (hlava člověka s vlasy). Množství výstupních dat, která vycházejí po naskenování, je obrovské, protože je objekt reprezentován malými trojúhelníčky. Proto se tato metoda používá jen pro určitý okruh problémů a je vyhrazena jen CAD pracovištím, která mají možnost si toto drahé zařízení pořídit.

Třetí způsob spočívá ve využití takzvaného procedurálního modelování. Animátor nezadává přímo tvar objektu, ale způsob, jakým bude objekt generován. Tato metoda má tu přednost, že objem zadávaných dat je většinou malý a výsledný objekt lze modifikovat změnou počátečních podmínek (tak lze vytvářet zajímavé animace, jako je například růst stromů). Nevýhodou je nutnost výběru správné metody pro generování určité množiny objektů a také nutnost pochopit, co který parametr znamená a jak se projeví na výsledném tvaru objektu. Při vytváření objektu (zadávaní parametrů) není přímo vidět výsledek, pracuje se tedy metodou pokus-omyl.

Při procedurálním modelování se mimo jiné používají i fraktály. Fraktály lze v počítačové grafice využít například ke generování přírodních útvarů, jako jsou stromy, rostliny, hory, mraky, kameny atd[19]. V této oblasti neexistuje lepší způsob, který by dal věrohodnější výsledky.

3.8.2 Fraktálová komprese obrazu

Kromě snadného definování velmi složitých přírodních útvarů mohou být fraktály využity i v jiných vědeckých disciplínách. V poslední době se stále více využívá fraktální komprese, která je založena na IFS fraktálech[18]. Komprimační program se snaží nalézt v obrázku fraktální strukturu a pomocí ní definovat celý obrázek. Tento způsob komprese je samozřejmě ztrátový a poměrně náročný na nalezení vhodných transformací popisujících daný obrázek. Výhodou je však velmi vysoký stupeň komprese (v příznivém případě je možné popsat celý obrázek pouze pomocí několika funkcí)[18].

3.9 Ekonomie

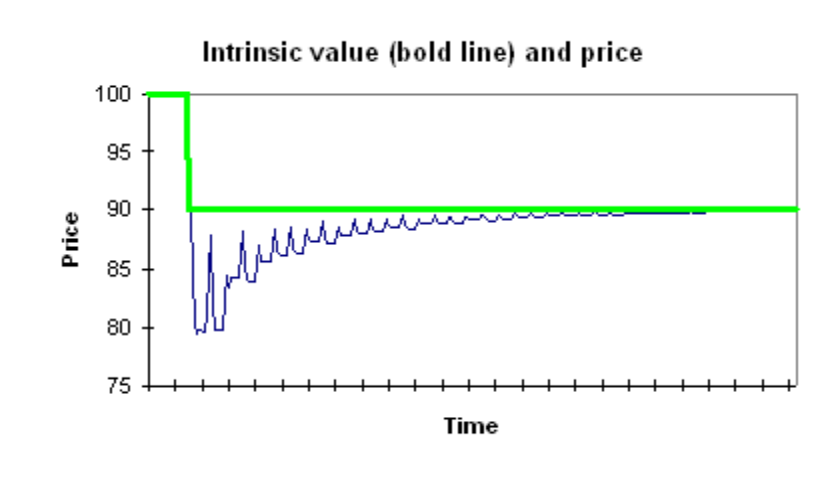
3.9.1 Kapitálové trhy

Finanční teorie byla samozřejmě rovněž ovlivněna vlnou zájmu o teorii chaosu. Zejména v první polovině devadesátých let se hlavně na americkém knižním trhu objevila řada publikací s tituly jako Vyděláváme pomocí chaosu a podobně. Poté tato vlna zájmu poněkud opadla, protože se ukázalo, že na těchto knihách vydělali především jejich autoři. Dramatické události na měnových a kapitálových trzích v roce 1997 však představují celou sérii učebnicových příkladů fungování teorie chaosu v praxi[11]. Protože se chaotické jevy na finančních trzích skutečně odehrávají a často mají velký význam, je dobré o nich něco vědět.

3.9.1.1 Chaotický model akciového trhu

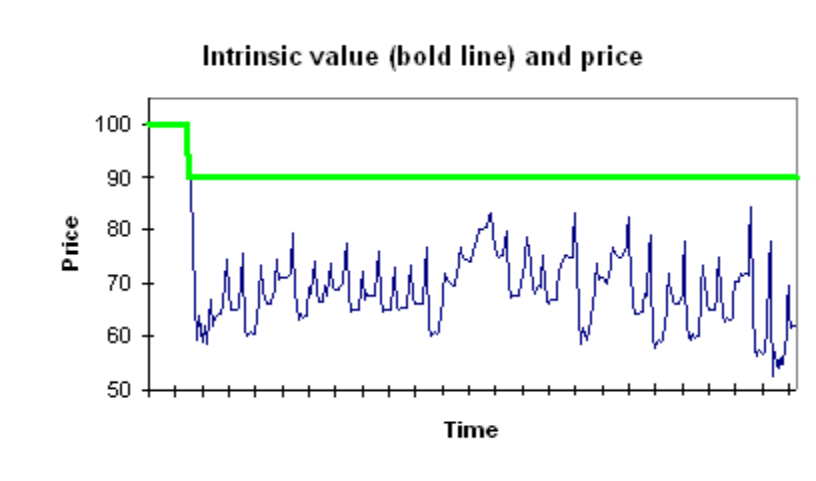
Podívejme se proto na možnosti výskytu chaotických procesů na akciovém trhu. Nejprve zavedme několik předpokladů:

- Trh je dokonale efektivní, což znamená, že ceny akcií se okamžitě přizpůsobují novým úrovním vnitřní hodnoty ihned, jakmile se vnitřní hodnota mění v důsledku působení nových informací.
- Účastníci trhu mají averzi vůči riziku, což znamená, že trh vyžaduje diskont (slevu) za riziko. Výše tohoto diskontu bude úměrná výši rizika.
- Existuje více různých měr rizika, z nichž pro jednoduchost budeme brát v úvahu pouze historickou volatilitu.



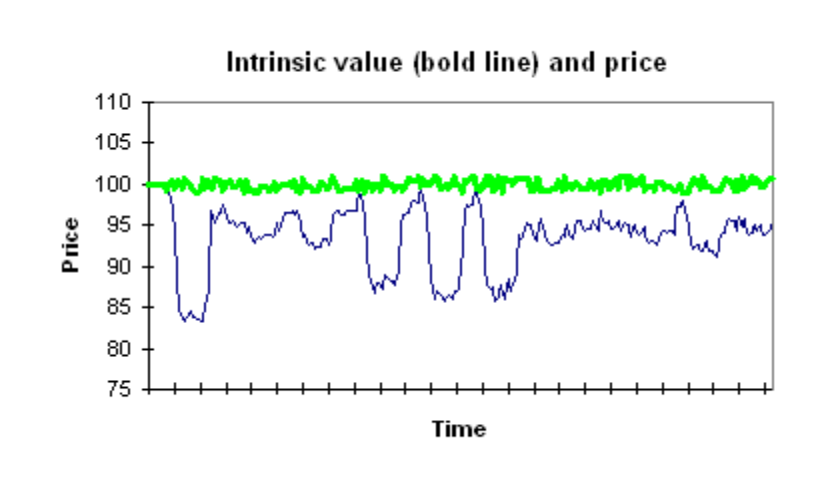
Obr. 38. Nechaotické přizpůsobení kursu nové vnitřní hodnotě

Malá změna parametrů modelu (zvýšení averzity trhu vůči riziku) však může mít velký efekt. Namísto spořádaného návratu na úroveň odpovídající vnitřní hodnotě se může cena akcie nebo hodnota indexu vydat na klikatou cestu. Může k tomu stačit jediný impuls!



Obr. 39. Jak může být chaotické chování spuštěno jednou událostí

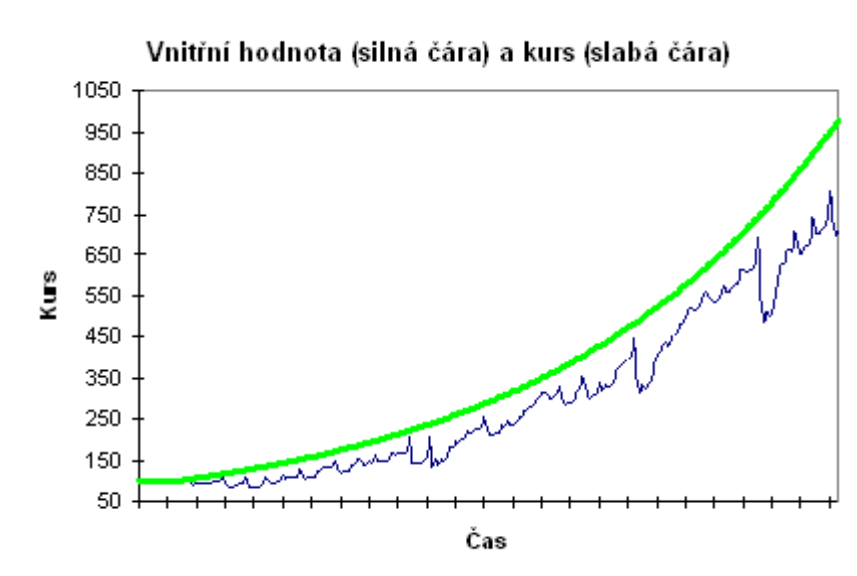
Přeroste-li riziko (anebo averze trhu vůči riziku) určitou hranici, tržní cena se nevrátí na úroveň vnitřní hodnoty a začne nepřetržitě kolísat, i když všechny fundamentální informace a vnitřní hodnota jsou naprosto stabilní[11]. Co je ještě důležitější: cena naší simulované akcie nesleduje nějaký pravidelný cyklus, nýbrž kolísá "ode zdi ke zdi" bez viditelného řádu. Průběh ceny neprozrazuje žádné pravidelné cykly a je sporné, zda lze určit nějakou úroveň ceny, kolem které kurs osciluje. Nejvíce fascinující vlastností našeho jednoduchého modelu však je, že z naprosto nezáludných předpokladů, které implikují plně deterministické chování bez jakýchkoli nahodilostí, jsme odvodili skutečný chaotický proces.



Obr. 40. Chaotické chování kursu akcie při malých změnách její vnitřní hodnoty

Vidíme, že spekulativní horečky a burzovní krachy mohou vznikát i v případech, kdy k tomu neexistují žádné podstatné fundamentální důvody a kdy trh je plně efektivní, tedy racionální. Burzovní propad v roce 1987 (a jiné podobné katastrofy) tedy nemusel být způsoben šílenstvím davů, nýbrž plně racionálním jednáním dokonale informovaných investorů. Totéž platí pro asijskou měnovou krizi v roce 1997 a pro propad hongkongských akcií na podzim téhož roku.

Krachy a spekulativní horečky se tedy mohou vyskytovat i za natolik nepravděpodobných okolností, kdy neexistuje nejistota ohledně budoucnosti a fundamentální ekonomické i jiné informace jsou perfektně předvídatelné. Následující graf ukazuje, jak by se trh mohl chovat, kdyby vnitřní hodnota akcií byla dokonale předvídatelná (zcela v duchu fundamentální analýzy Johna Burra Williamse[11]) při konstantním růstu (s výjimkou počátečního období, během kterého po určitou dobu předpokládáme nulový růst). Opět předpokládáme, že trh je plně efektivní a investoři jsou dokonale racionální.



Obr. 41. Jak mohou burzovní krachy vznikat i v případě dokonale předvídatelné ekonomiky

Všimněte si, že tento graf představuje plně deterministické chování, tj. absenci jakékoli náhodné složky. Přesto můžeme rozeznat obrazce, které silně připomínají dramatickou historii Dow-Jonesova indexu během tohoto století včetně významných krachů a několika "býčích trhů"[11]. Výskyt burzovních krachů tedy není nutně podmíněn iracionalitou nebo nedokonalou informovaností investorů.

3.9.1.2 Praktické použití

Jestliže dokážeme matematicky modelovat burzovní krachy na počítači, přirozeně se naskytá myšlenka využít počítač pro prognostické účely. Kdy nastane příští Černý pátek? Bohužel, nic takového nám teorie chaosu neřekne, ani kdybychom předpokládali silně zjednodušené (tj. velmi nerealistické) podmínky dokonalé racionality investorů a dokonalé předvídatelnosti ekonomiky. Jak bychom potom mohli předpovídat vývoj trhu ve skutečnosti, kdy investoři nejsou nikdy dokonale racionální a ekonomické prognózy nejsou spolehlivé?

Jedním z důsledků, které plynou z teorie chaosu pro běžného akciového investora, je poučení: nevěřit žádným prorokům, včetně proroků dobře placených prestižními investičními bankami. Nejspolehlivějším prostředkem, jak předpovědět krach, je mít prostě štěstí. Isaac Newton onehdy hořce podotkl (poté, co prodělal několik tisíc liber na spekulativní horečce a následném krachu akcií South Sea Company v roce 1720): "Dokážu spočítat pohyby pla-

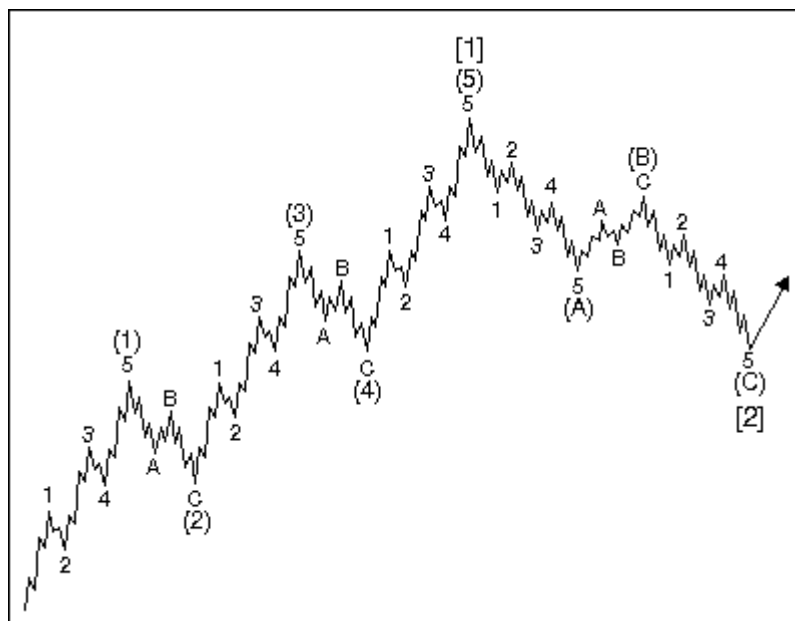
net na palec přesně, ale nemám ani tušení, jakým směrem požene šílenství davů trh zítra." Nyní, více než 250 let po Newtonově finančním neúspěchu, stále nedokážeme předvídat "šílenství davů". Vlastně jsme na tom ještě hůře: nedokážeme předvídat ani racionální chování davů.

Z teorie chaosu však lze odvodit ještě jeden závěr, který je mnohem optimističtější a pro investiční praxi užitečnější. Z modelu znázorněného na (Obr. 41.) lze odvodit, že po každém krachu následuje oživení (samozřejmě za předpokladu, že v důsledku krachu nenastane zhroutení systému, se kterým zde diskutovaný model nepočítá). Co tedy dělat po krachu? Nenechat se ovlivnit emocemi a rozvážit, zda akciový krach nebude mít nepříznivé důsledky pro ekonomiku, jako například v roce 1929 v USA, kdy "Černý pátek" zahájil řetězovou reakci bankovních krachů. Pokud zjistíme, že podobné nebezpečí nehrozí, můžeme směle investovat. Otázka, zda jsme schopni nezaujatě analyzovat situaci vzápětí po krachu, je jiný problém.

3.9.2 Elliotovy vlny

R. N. Elliot po dlouholetém zkoumání dat New Yorkské burzy objevil zajímavou zákonitost později nazvanou jako **Elliotovu vlnu**. Popis chování této vlny se datuje do období 1935 – 1947. V tomto období Elliot shromáždil množství znalostí o struktuře a vzájemných souvislostech mezi jednotlivými fázemi Elliotových vln[12]. Teprve později, v druhé polovině našeho století, bylo zjištěno, že Elliotovy vlny nejsou nic jiného než fraktály.

Ještě později se ukázalo, že celý jev úzce souvisí s chováním na první pohled chaotických systémů, jakým je např. burza. Elliotovy vlny samozřejmě nejsou vázány jen na činnost burzy, ale lze je pozorovat i v chování jiných dynamických systémů (např. sluneční aktivity).



Obr. 42. Elliotova vlna je fraktál

O fraktál se jedná proto, že se její tvar opakuje v ní samé (základní charakteristika fraktálů). Dokonce její dobrá znalost nám umožňuje s velkou pravděpodobností určit zlomy v cenovém vývoji a tím tak minimalizovat riziko obchodování na burze.

Celá podstata Elliotových vln vychází z existence dvou fází [12]: *impulzní* (vývoj ve směru trendu) a *korekční* (vývoj proti směru trendu). Každá impulzní fáze se skládá ze tří “podvln” vzestupných (pět zlomů) a každá korekční fáze ze dvou “podvln” sestupných (tři zlomy).

Použití Elliotových vln pro určování budoucího vývoje je relativně jednoduché. Jestliže se v burzovním vývoji vyskytne vlna, která se jeví jako Elliotova, lze po pátém zlomu vlny impulzní anebo po třetím zlomu vlny korekční očekávat změnu ceny opačným směrem, než jakým se ubíral dosavadní trend. Samozřejmě to není vždy tak snadné, poněvadž Elliotovy vlny bývají velmi často různě deformovány, což se také promítá do budoucího průběhu vývoje ceny. Z deformací, které zkreslují jinak ideální vzhled Elliotových vln, lze mnohdy vyčíst, v jakém stavu se trh (nebo jakýkoliv systém) momentálně nachází – a tedy také, co by mohlo následovat.

3.10 Meteorologie

Teorie chaosu stojí v první řadě na nedokonalosti lidského měření. Něco podobného je samozřejmě známo i v kvantové fyzice, zde se však celý problém přenáší do zcela jiných

měřítek. S naprostou (absolutní) přesností nemůžeme měřit nic, proto se některé jevy vzpírají našim předpovědím[15]. Těmto jevům říkáme jevy chaotické. Nová definice chaosu tedy říká, že neuspořádanost může být jednoduše vyšším řádem složitosti, která vzniká ze zcela deterministických procesů to znamená, že v rámci chaosu (součtu deterministických jevů) existuje současně jakási podivná organizovanost. I tato definice chaosu by ale byla poměrně nudná, kdyby jejím jediným závěrem byl fakt, že něco je náhodné a nic nejde pořádně změřit a už vůbec ne předpovídat.

Teorie chaosu přistupuje ke zkoumání časových řad zcela odlišným způsobem než statistika. Existuje několik metod, které umožňují rozhodnout, zda data jsou náhodná nebo zda vykazují určitou neviditelnou závislost. Toto zjištění je podstatné pro další analýzu a případnou predikci. Náhodné hodnoty jsou nepředpověditelné a neobsahují žádnou strukturu (rovnoměrně vyplňují prostor o libovolném rozměru). Neexistuje žádná vazba mezi jednotlivými hodnotami časové řady. Naproti tomu data, u kterých se prokáže existence jakési vnitřní struktury, mají zcela odlišný charakter. Existují určité vazby mezi hodnotami - např. předchozí hodnoty určují hodnoty následující. To má veliký význam pro předpovídání dalšího vývoje.

I v meteorologii existuje tendence k rovnovážnému stavu atmosféry[15]. Částí atraktoru je např. "NW" situace. Polohy tlakových útvarů, teplotních a vlhkostních polí jsou často velmi podobné, ale výsledné počasí může být i značně rozdílné a závisí na mnoha dalších vlivech (např. roční a denní době, stavu půdy, teplotě moře atd). Po jaké křivce (atraktoru) se bude počasí dále vyvíjet, jaký typ povětrnostní situace a za jak dlouho nastoupí lze v současné době určit v delším časovém kroku jen velmi problematicky. Lze ho však často vyjádřit jako pravděpodobnost. A to buď pomocí "klasické statistiky" nebo zkoumáním současně známého stavu počasí (zjištěného z měření o určité přesnosti) a určení citlivosti k různým cestám dalšího vývoje. Jedná se tedy o zcela nový kvalitativní přístup.

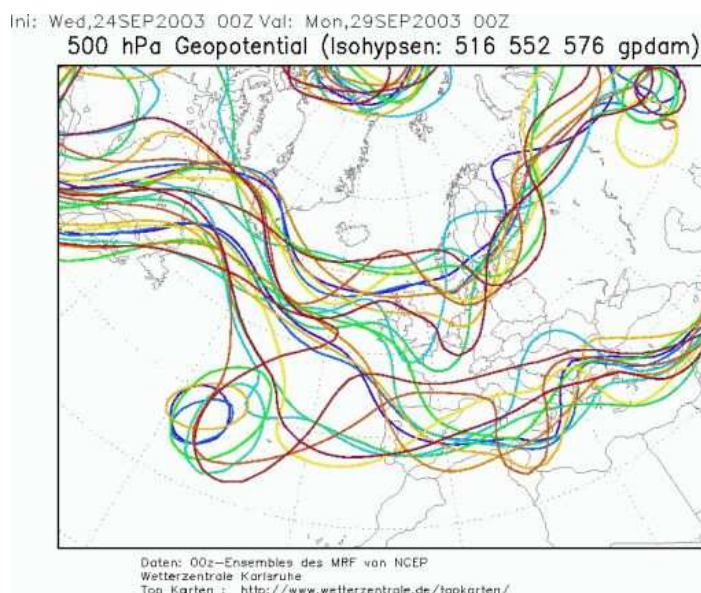
Peripetie, kterými systémy směřují ke stabilitě, jsou však kupodivu dosti složité. A tak zdánlivě triviální jev, jako je postupné zpomalování kyvadla, se může snadno ukázat být nad síly našeho matematického aparátu.

Poměrně malá úspěšnost předpovědí počasí se před takovými třiceti lety zdůvodňovala nedostatečnou znalostí počátečních podmínek. Údaje o stavu počasí byly získávány téměř výhradně z pozemních a námořních stanic, naprosto nerovnoměrně umístěných po celé

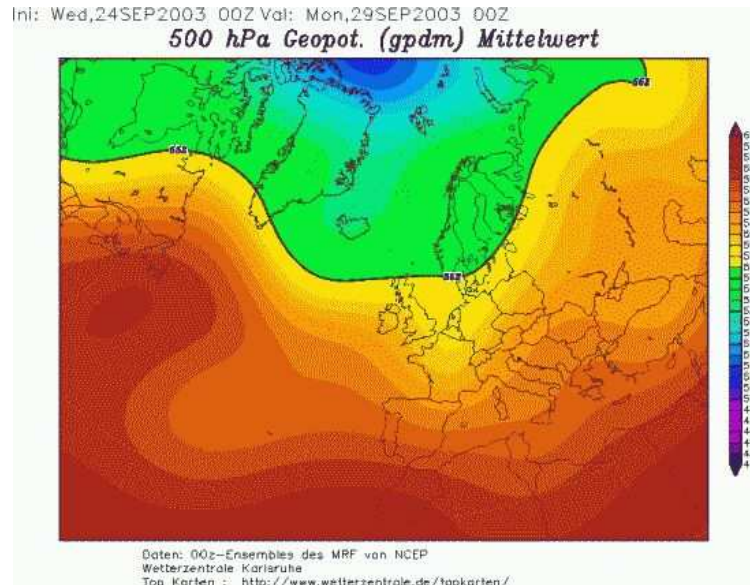
Zemi. Proto se vkládala velká naděje do družicových měření, jež pokrývají rovnoměrně celou Zemi a umožňují i na vertikální sondáž atmosféry a dají se zároveň neustále aktualizovat. Souběžně s rozvojem družicové meteorologie se podstatně zvýšil výkon moderních superpočítačů, takže zdánlivě nic nestálo v cestě tomu, aby se předpovědi počasí nápadně zlepšily. Je pravda, že ke zlepšení vsutku došlo, ale zdaleka ne v míře očekávané odborníky. Proto zájem o chaos (či všeobecněji o nelineární dynamické systémy) vzrostl prudce v roce 1963, kdy Lorenz publikoval svůj jednoduchý model proudění a rozebral jeho důsledky pro předpověď počasí, na kterém demonstroval zásady této teorie.

3.10.1 Příklady a možnosti využití v praxi:

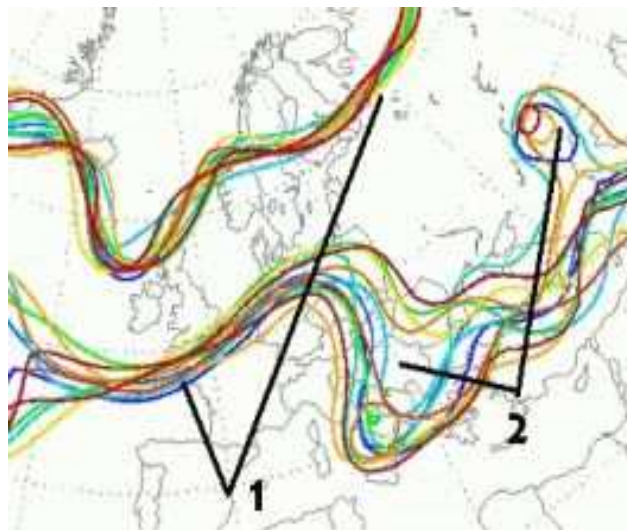
Do modelu jsou zadány počáteční hodnoty, které se nepatrně liší jen v rámci přesnosti měření nebo přesnosti určení počáteční analýzy. Jednotlivé isohypsy (516, 552 a 576) jsou ke konkrétnímu časovému kroku zaneseny do jedné mapy (Obr. 43). Výsledky výpočtu hladiny AT 500 hPa (jak je patrné z obrázku) začínají být již značně rozdílné, v některých místech i nepodobné.



Obr. 43. „Špagetová mapa“ hladiny 500hPa



Obr. 44. mapa vypočítaná jako průměr všech nepatrně pozměněných předpovědí



Obr. 45. “Špagety” v hladině 500hPa. Zobrazeny jen isohypsy 516, 552 a 578

Na obrázku (Obr. 45) je naopak vidět, že různá místa mají různou citlivost počátečních podmínek na vývoj v dalším období. Pro některá území jsou výsledky výpočtu podobné (1), a pro jiná ne (2). Např. hloubku brázd lze předpovědět jen s určitou pravděpodobností

a tím se úspěšnost předpovědi stává problematickou. V jiných oblastech však deterministická předpověď bude ještě vcelku úspěšná.

Ke zlepšení úspěšnosti předpovědi máme na výběr z těchto možností:

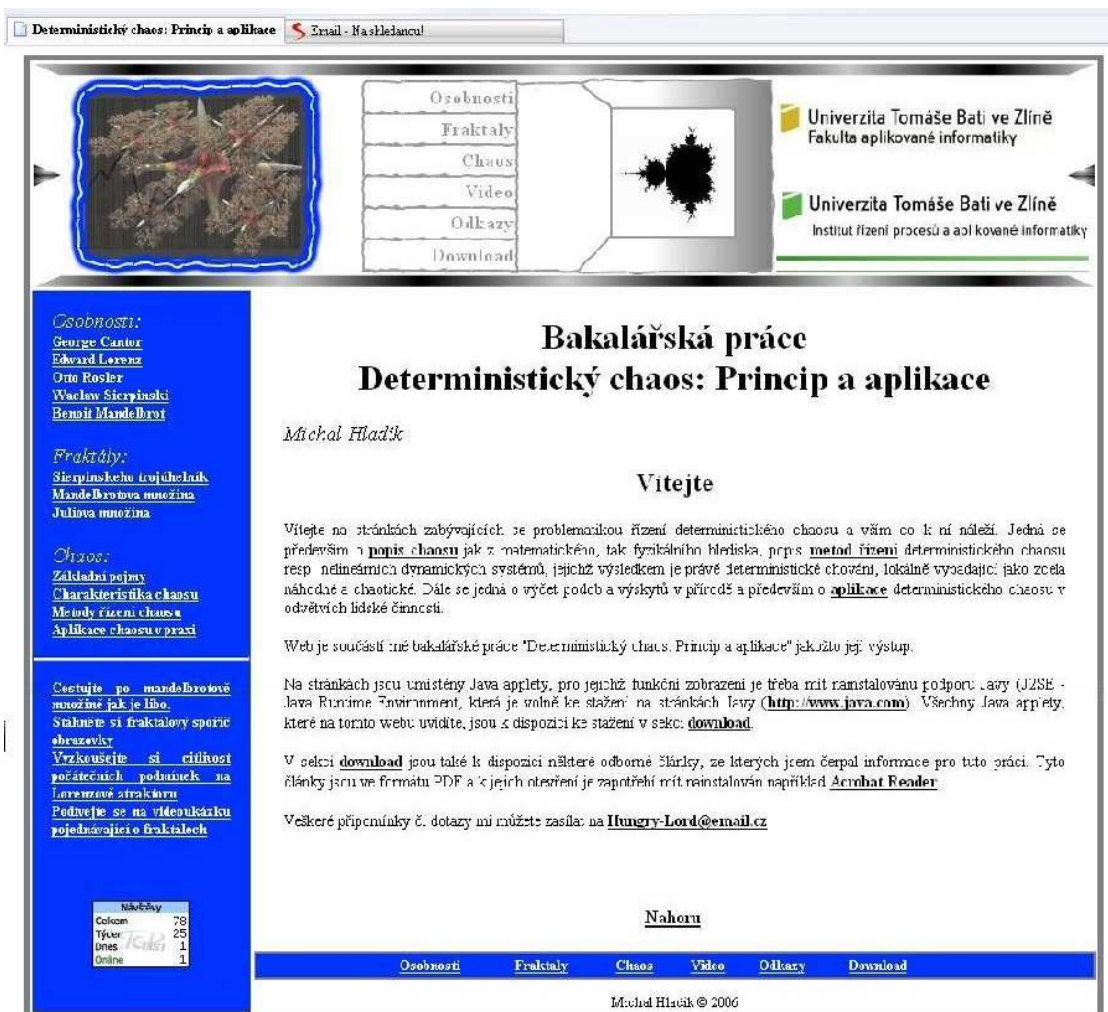
- a) vydat předpověď za použití mapy vypočítané jako průměr hodnotu ze všech zkoumaných případů (která je lepší než předpověď deterministická) (Obr.44)
- b) vydat konkrétní nejpravděpodobnější předpověď doplněnou jednou či více alternativami;
- c) vydat předpověď méně podrobnou.

Výše uvedené mapy jsou konkrétní výsledky použití teorie chaosu v meteorologii[15]. Je vidět, že přístup meteorologů ke střednědobé nebo dlouhodobé předpovědi musí mít zásadně pravděpodobnostní charakter. Meteorolog musí výsledky roztřídit a s přihlédnutím ke určitému místu zjistit možné alternativy vývoje. Rovněž uživatele těchto předpovědí je nutno vést k tomu, že předpověď počasí na delší období nemůže být deterministická.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 TVORBA WEBOVÝCH STRÁNEK

Webové stránky vytvořené v rámci praktické části této bakalářské práce, jsou koncipovány jako jeden ze standardních modelů webu (Obr. 46). Veškeré formátování textu a ostatních prvků je provedeno pomocí kaskádových stylů umístěných v souboru style.css. Na stránkách jsou použity ActiveX prvky v podobě Flash animací. Pro plně funkční zobrazení je tedy třeba mít nainstalován flash player verze 8.0 a vyšší. Samozřejmě, že stránky, nejsou zcela závislé na dodatečné instalaci softwaru „třetí strany“. Proto po vstupu na hlavní stránku dochází k detekci existence instalovaného flash playeru (příloha PII) a pokud chybí, je uživateli nabídnuto, zda chce nainstalovat potřebný modul a nebo zda chce pokračovat. Při volbě pokračovat se pak stránky zobrazují v „neflashové verzi“. V takovém případě je pak uživatel ochuzen o shlédnutí videosnímků, které jsou streamovány a spouštěny jako flash animace.



Obr. 46. Celkový vzhled webu

Videosnímky jsou pořízeny z dokumentárního filmu „Teorie chaosu“ z cyklu dokumentárních filmů „Zázraky vědy“ (Orig. název epizody: The Power of Chaos, Dokument Velká Británie Vysíláno: 26/03/2005 vydáno: 30/03/2005 Zdroj: TV / Spektrum). Z důvodů velkého objemu dat videosnímků, kdy každý má po zkomprimování do standardního formátu avi cca 30MB, byla použita výše zmíněná metoda streamování ve flashi, který si zdrojové video ještě jednou zkomprimuje do svého interního formátu flv, který je skutečně velmi úsporný. Video ztratilo přibližně 5/6 ze svého objemu (z původních cca 30MB na 4-5MB), což v rámci internetového digitálního videa, kdy se hledí na každý „megabajt“ je nezanedbatelná část.



Obr. 47. Streamované video

Na stránkách je umístěno i několik Java appletů jako názorných příkladů při vysvětlování konkrétních problematik (např. co je to a jak vypadá Lorenzův atraktor, Mandelbrotova množina apod.). Pro jejich funkční zobrazení je potřeba mít nainstalovanou podporu Javy (J2SE - Java Runtime Environment, který je volně ke stažení na stránkách Javy (<http://www.java.com>)). Všechny applety i zdrojové kódy, které jsou volně ke stažení v sekci download, jsou získány z internetových zdrojů, které je poskytují zdarma a jsou zdarma šířitelné.

Po obsahové stránce je web koncipován velmi podobně jako psaná část této práce, konkrétně tedy:

- Osobnosti: zde je uvedeno několik stěžejních osobností i s jejich největšími příspěvky;

- Fraktály: zde jsou uvedeny nejznámější fraktály, včetně popisu a grafických ukázek;
- Chaos: tato sekce je nejobsáhlejší a obsahově prakticky kopíruje psanou část práce. Je rozdělena na popis, metody řízení a aplikaci chaosu v praxi. Navíc je přidáno vysvětlení některých základních pojmů z oblasti teorie chaosu.
- Video: zde může uživatel shlédnout streamovaná videa.
- Odkazy: odkazy na další stránky zabývající se problematikou chaosu.
- Download: zde jsou k dispozici ke stažení C/C++ kódy, Java applety, aplikace, odborné články, animace, m-fiy a Pov-ray kódy.

ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo vypracovat studii o principu a aplikaci deterministického chaosu v praxi, provést jeho matematický popis, včetně projevů a grafických ukázek, a popis metod řízení. Vzhledem k rozsáhlosti tohoto tématu byla práce zaměřena spíše na stručný a grafický popis problematiky, kde cílem bylo podat čtenáři ucelený obraz o rozmanitosti a rozsáhlosti výskytu této relativně mladé vědní disciplíny, která zasahuje celé spektrum lidských činností a změnila tak celkový pohled nejen na fyziku přírodních systémů, ale také například na biologii, geometrii, filozofii, psychologii, ekologii, apod.

První část práce je zaměřena na přehlednou rešerši týkající se především historie a současnosti problematiky deterministického chaosu a na jeho popis jak z fyzikálního, tak matematického hlediska. Je zde uvedeno několik definicí a příkladů. Mimo jiné turbulentní proudění v kapalinách, Чууv elektronický obvod, Lorenzův „podivný“ atraktor, či logistickou rovnici biologických systémů.

Další část se zabývá hlavními metodami řízení nelineárních dynamických systémů. Jako vzorový příklad je nadefinován chaotický systém „Duffing-Holmesova oscilátoru“, který představuje model podvodního ekosystému. Na tomto příkladu je demonstrováno řízení s otevřenou smyčkou (open loop control – OL control), lineární a nelineární řízení (open-plus-closed-loop – OPCL control) a adaptivní řízení, coby základní metody řízení deterministického chaosu.

Další a nejrozsáhlejší část práce obsahuje množství příkladů aplikace deterministického chaosu v praxi. Tato část měla čtenáře nejvíce obohatit a ukázat, kde všude se člověk setkává s deterministickým chaosem, či jeho vlivem. Snahou bylo uvést co nejvíce odvětví lidské činnosti, co nejvíce příkladů a obrázků, tak aby byl splněn hlavní účel celé práce. Čtenář se zde mohl dočíst o aplikaci chaosu mimo jiné například ve fyzice (fyzika plazmatu), chemii (Bélousov-Žabotinského reakce), lékařství (léčba epilepsie, předpověď fibrilace srdce), biologii (samoorganizace živočichů žijících ve společenství či hejnu), ekonomii (kapitálové trhy, Elliotovy vlny), informatice (fraktální geometrie, fraktálová komprese obrazu), komunikačních systémech (modulace signálu), meteorologii a jiných odvětvích lidských aktivit.

Posledním bodem práce a zároveň jejím výstupem byla tvorba webových stránek obsahujících ucelenou a přehlednou vizualizaci problematiky teorie chaosu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Hilborn R.C.1994, Chaos and Nonlinear Dynamics, Oxford University Press, ISBN 0-19-508816-8, 1994
- [2] Gonzáles-Miranda J. M. 2004, Synchronization and Control of Chaos, Imperial College Press 2004, ISBN 1-86094-488-4
- [3] Horák J., Krlín L.1996, Deterministický chaos, Academia, ISBN 80-200-0416-5,1996
- [4] Gleick J.1996, Chaos, Ando publishing, ISBN 80-86047-04-0, 1996
- [5] Zelinka I.: Řízení deterministického chaosu, Automatizace, 5, 2003, 310-315., ISSN 0005-125X
- [6] Andrievskii B.R., Fradkov A.L., Control of chaos: Methods and applications. I. Methods. Automation and Remote Control, Vol. 64 (2003) 673-713.
- [7] Andrievskii B.R., Fradkov A.L., Control of chaos: Methods and applications. II. Applications. Automation and Remote Control, Vol. 65 (2004) 505-533
- [8] S.Boccaletti et al. / Physics Reports 329 (2000) 103 -197
- [9] Náhoda v exaktní vědě, Václav Uruba, (poslední revize 12.06.2006), dostupné z URL: <http://www.essentia.cz/index.php?obsah=6&id=81>
- [10] Složitost, Jiří Svršek, (poslední revize 12.06.2006), dostupné na URL: <http://natura.eri.cz/natura/2002/11/20021101.html>
- [11] Teorie chaosu a kapitálové trhy, Pavel Kohout, (posl. revize 12.06.2006) http://archiv.neviditelnypes.zpravy.cz/skrblik/clanky/270_0_0_0.html
- [12] Fraktální geometrie a využití v predikci, (poslední revize 12.06.2006), dostupné na URL: <http://homel.vsb.cz/~nav79/fraktgeo/index.html>
- [13] Controlling Chaos in Plasma-filled diodes, Prof. P. A. Lindsay, Dr. X. Chan, J. Watkins, J. Zhang, (poslední revize), dostupné z URL: <http://www.elec.qmul.ac.uk/research/projects/pfd.htm>
- [14] Plasma phenomena and chaos laboratory, (poslední revize 12.06.2006), dostupné z URL: http://www.pfi.lt/lab/plazrlab_e.html

- [15] Krátký úvod do teorie chaosu a jeho odraz v meteorologii, Jiří Vašíček, (poslední revize 12.06.2006), dostupné z URL: <http://www.pu.army.sk/view.php?cislocclanku=2003110701>
- [16] Aplikace teorie chaosu v komunikacích, Doc. Ing. Vladislav Škorpil, CSc., (poslední revize 12.06.2006), dostupné z URL: <http://www.utko.feec.vutbr.cz/vks/materialy/Chaos.pdf>
- [17] CompLexicon, Jim Crutchfield, (poslední revize 12.06.2006) dostupné z URL: <http://www.exploratorium.edu/complexity/CompLexicon.html>
- [18] Fraktální komprese, Martin Prikryl, (poslední revize 12.06.2006), dostupné z URL: <http://www.prikryl.cz/cze/htmlseminarka.php?id=fraktal>
- [19] Fraktály v počítačové grafice IV, Pavel Tišnovský, (poslední revize 12.06.2006), dostupné z URL: <http://www.root.cz/clanky/fraktaly-v-pocitacove-grafice-iv/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Turbulence	11
Obr. 2. Schéma Lorenzova systému - Reygleigh-Bénárdova buňka.....	12
Obr. 3. Lorenzův podivný traktor	14
Obr. 4. Časový průběh proměnné x při simulaci Lorenzova systému	15
Obr. 5. Výsledek simulace Chuova obvodu.....	18
Obr. 6. Logistická rovnice.....	20
Obr. 7. „Duffing-Holmes oscilátor“	21
Obr. 8. Řízení s otevřenou smyčkou (open loop control)	23
Obr. 9. Lineární řízení I	24
Obr. 10. Lineární řízení II	24
Obr. 11. 900nm Multimode Laser s úctyhodným výstupním výkonem 4 W	26
Obr. 12. Model plasma diody	27
Obr. 13. Zpoždění vytvářející konstrukci plasma atraktoru.....	27
Obr. 14. Výkonové spektrum plasma signálu	28
Obr. 15. Kruhy indikující stroboskopický povrch daného úseku v časovém intervalu $\Delta t = 260\mu s$, nezhuštěná plasma. Na pozadí je vidět atraktor.....	28
Obr. 16. Zhuštěná plasma	29
Obr. 17. Kruhy indikující stroboskopický povrch daného úseku v pevném časovém intervalu $T = 6,088$ nezhuštěný Rosslerův systém	29
Obr. 18. Zhuštěný Rosslerův systém.....	30
Obr. 19. Bělousov-Žabotinského reakce.....	30
Obr. 20. Schéma Bělousov-Žabotinského reakcí.....	31
Obr. 21. Neurony	32
Obr. 22. Trojrozměrný neuron attractor.....	33
Obr. 23. Trojrozměrný diagram prostoru EEG	33
Obr. 24. Umělá neuronová síť	34
Obr. 25. EKG diagram	34
Obr. 26. Hejno ryb	35
Obr. 27. Kolonie bakterií	36
Obr. 28. Dvojitě kyvadlo	37
Obr. 29. Schéma funkce Chuova obvodu	37

Obr. 30. Celkové schéma zapojení Chuova obvodu	38
Obr. 31. Chuův atraktor	38
Obr. 32. Přímá modulace informačního signálu na vysokofrekvenční chaotickou nosnou vlnu.	39
Obr. 33. Modulace chaotického signálu informačním signálem v základním pásmu, kombinovaná s klasickým párem modulátor-demodulátor	40
Obr. 34. Princip chaotického maskování	40
Obr. 35. Princip chaotického klíčování.....	41
Obr. 36. Operace v DCSK a) vysílač, b) přijímač	42
Obr. 37. Signál chaotické DCSK	42
Obr. 38. Nechaotické přizpůsobení kursu nové vnitřní hodnotě	45
Obr. 39. Jak může být chaotické chování spuštěno jedinou událostí.....	45
Obr. 40. Chaotické chování kursu akcie při malých změnách její vnitřní hodnoty	46
Obr. 41. Jak mohou burzovní krachy vznikat i v případě dokonale předvídatelné ekonomiky	47
Obr. 42. Elliotova vlna je fraktál	49
Obr. 43. „Špagetová mapa“ hladiny 500hPa.....	51
Obr. 44. mapa vypočítaná jako průměr všech nepatrně pozměněných předpovědí	52
Obr. 45. “Špagety” v hladině 500hPa. Zobrazeny jen isohypsy 516, 552 a 578.....	52
Obr. 46. Celkový vzhled webu	55
Obr. 47. Streamované video.....	56

SEZNAM TABULEK

SEZNAM PŘÍLOH

PI Předpověď počasí

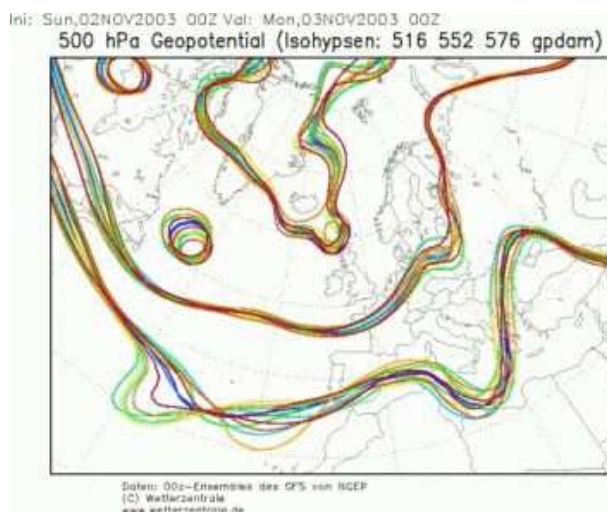
PII Detekce flash playeru na straně klienta

PŘÍLOHA P I: PŘEDPOVĚĎ POČASÍ

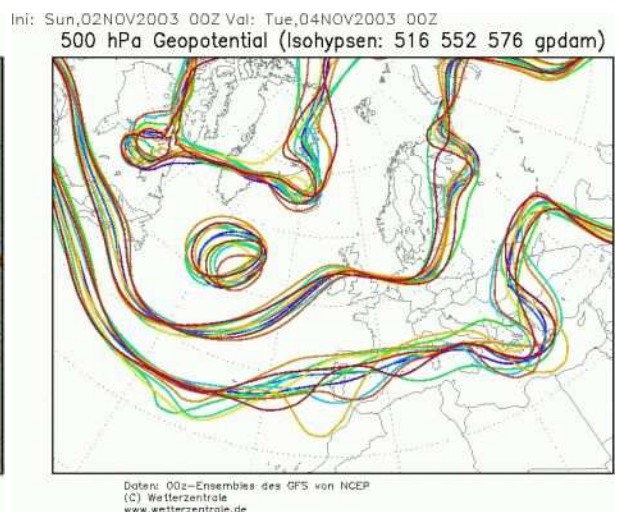
Ukázka toho, jak se v současné době „rozbíhá“ výpočet předpovědi v hladině AT 500hPa modelu „MRF“ jestliže měníme počáteční podmínky v rámci přesnosti měření nebo přesnosti určení počáteční analýzy. Na mapách jsou vyneseny pouze izohypsy 516, 552 a 576 geopotencionálních dekametřů. Na tomto konkrétním případě je vidět, že asi od 120 hodin předpověď hladiny AT 500hPa pro některá místa při použití deterministického modelu nejistá.

Předpověď na 360 hodin (poslední obrázek) je za použití tohoto modelu naprosto nemožná.

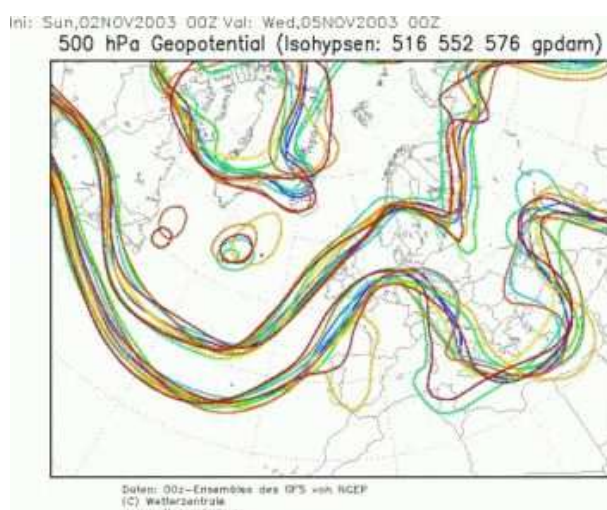
předpověď na +24 hodin



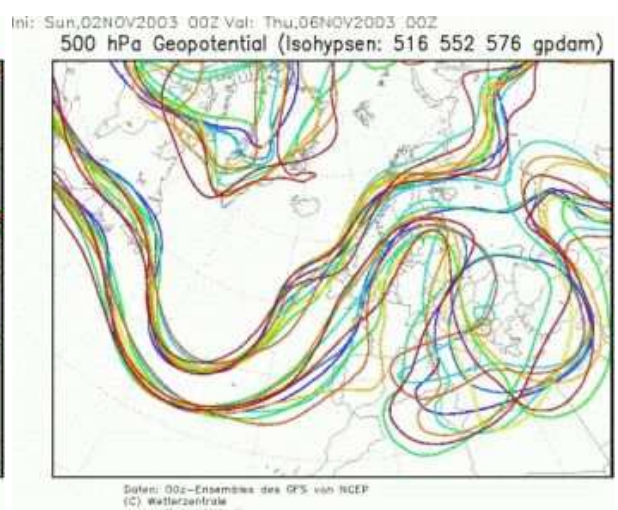
předpověď na +48 hodin



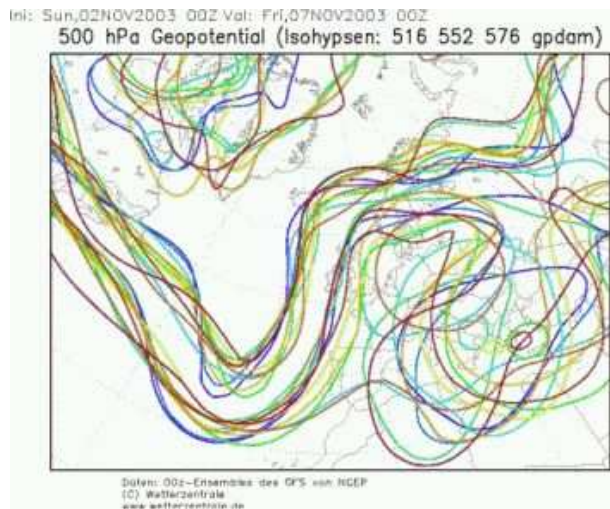
předpověď na +72 hodin



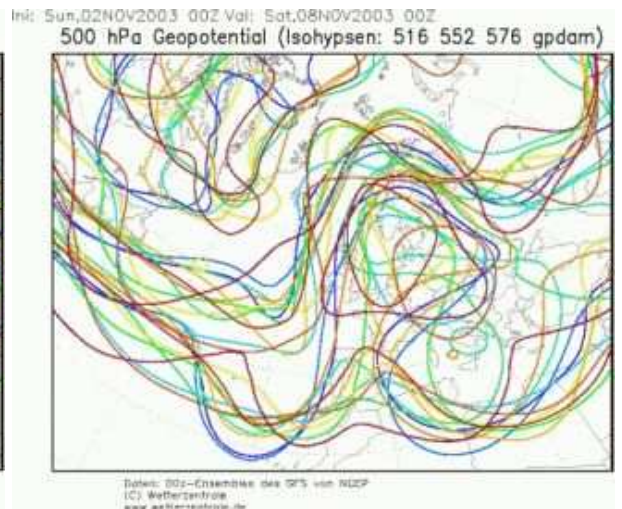
předpověď na +96 hodin



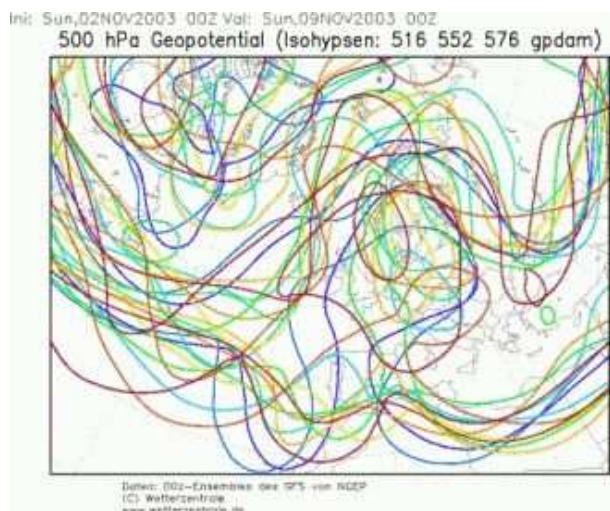
předpověď na +120 hodin



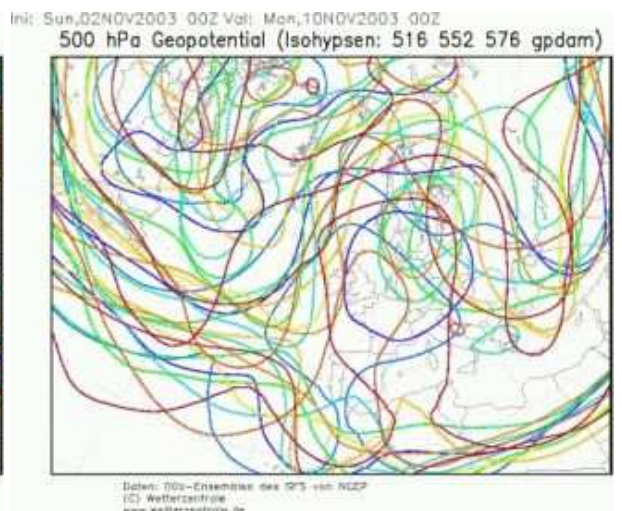
předpověď na +144 hodin



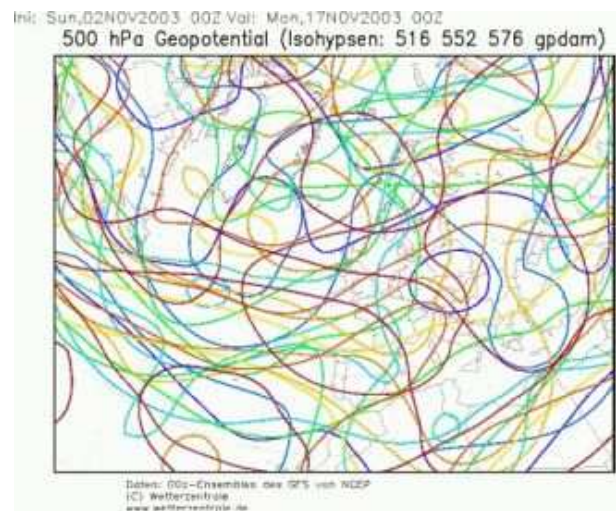
předpověď na +168 hodin



předpověď na +192 hodin



předpověď na +360 hodin



PŘÍLOHA P II: DETEKCE FLASH PLAYERU NA STRANĚ KLIENTA

```
<script language="JavaScript" type="text/javascript">
var requiredMajorVersion = 8;
var requiredMinorVersion = 0;
var requiredRevision = 0;
var jsVersion = 1.0;
</script>
<script language="VBScript" type="text/vbscript">
Function VBGetSwfVer(i)
    on error resume next
    Dim swControl, swVersion
    swVersion = 0
    set swControl = CreateObject("ShockwaveFlash.ShockwaveFlash." + CStr(i))
    if (IsObject(swControl)) then
        swVersion = swControl.GetVariable("$version")
    end if
    VBGetSwfVer = swVersion
End Function
</script>
<script language="JavaScript1.1" type="text/javascript">
<!-- // Detect Client Browser type
var isIE = (navigator.appVersion.indexOf("MSIE") != -1) ? true : false;
var isWin = (navigator.appVersion.toLowerCase().indexOf("win") != -1) ? true : false;
var isOpera = (navigator.userAgent.indexOf("Opera") != -1) ? true : false;
jsVersion = 1.1;
// JavaScript helper required to detect Flash Player PlugIn version information
function JSGetSwfVer(i){
    // NS/Opera version >= 3 check for Flash plugin in plugin array
    if (navigator.plugins != null && navigator.plugins.length > 0) {
        if (navigator.plugins["Shockwave Flash 2.0"] || navigator.plugins["Shockwave Flash"]) {
            var swVer2 = navigator.plugins["Shockwave Flash 2.0"] ? " 2.0" : "";
            var flashDescription = navigator.plugins["Shockwave Flash" + swVer2].description;
            descArray = flashDescription.split(" ");
            tempArrayMajor = descArray[2].split(".");
            versionMajor = tempArrayMajor[0];
            versionMinor = tempArrayMajor[1];
            if ( descArray[3] != "" ) {
                tempArrayMinor = descArray[3].split("r");
            } else {
                tempArrayMinor = descArray[4].split("r");
            }
            versionRevision = tempArrayMinor[1] > 0 ? tempArrayMinor[1] : 0;
            flashVer = versionMajor + "." + versionMinor + "." + versionRevision;
        } else {
            flashVer = -1;
        }
    }
    else if (navigator.userAgent.toLowerCase().indexOf("webtv/2.6") != -1) flashVer = 4;
    else if (navigator.userAgent.toLowerCase().indexOf("webtv/2.5") != -1) flashVer = 3;
    else if (navigator.userAgent.toLowerCase().indexOf("webtv") != -1) flashVer = 2;
    else {
        flashVer = -1;
    }
    return flashVer;
}
function DetectFlashVer(reqMajorVer, reqMinorVer, reqRevision)
```

```

{
    reqVer = parseFloat(reqMajorVer + "." + reqRevision);
    for (i=25;i>0;i--) {
        if (isIE && isWin && !isOpera) {
            versionStr = VBGetSwfVer(i);
        } else {
            versionStr = JSGetSwfVer(i);
        }
        if (versionStr == -1 ) {
            return false;
        } else if (versionStr != 0) {
            if(isIE && isWin && !isOpera) {
                tempArray    = versionStr.split(" ");
                tempString    = tempArray[1];
                versionArray  = tempString .split(",");
            } else {
                versionArray  = versionStr.split(".");
            }
            versionMajor    = versionArray[0];
            versionMinor    = versionArray[1];
            versionRevision = versionArray[2];

            versionString   = versionMajor + "." + versionRevision; // 7.0r24 == 7.24
            versionNum      = parseFloat(versionString);
            if ( (versionMajor > reqMajorVer) && (versionNum >= reqVer) ) {
                return true;
            } else {
                return ((versionNum >= reqVer && versionMinor >= reqMinorVer) ?
true : false );
            }
        }
    }
    return (reqVer ? false : 0.0);
}
}
</script>
<script language="JavaScript" type="text/javascript">
var hasRightVersion = DetectFlashVer(requiredMajorVersion, requiredMinorVersion, requiredRevision);
if(hasRightVersion) { // if we've detected an acceptable version
    var oeTags = '<object classid="clsid:D27CDB6E-AE6D-11cf-96B8-444553540000"'
        + 'width="350" height="350"'
        + 'codebase="http://download.macromedia.com/pub/shockwave/cabs/flash/swflash.cab">'
        + '<param name="movie" value="data/intro.swf" /><param name="quality" value="high" /><param na-
me="devicefont" value="true" /><param name="bgcolor" value="#ffffff" />'
        + '<embed src="data/intro.swf" quality="high" devicefont="true" bgcolor="#ffffff" '
        + 'width="350" height="350" name="intro" align="middle"'
        + 'play="true"'
        + 'loop="false"'
        + 'quality="high"'
        + 'allowScriptAccess="sameDomain"'
        + 'type="application/x-shockwave-flash"'
        + 'pluginspage="http://www.macromedia.com/go/getflashplayer">'
        + '<\embed>'
        + '<\object>';
    document.write(oeTags); // embed the flash movie
} else { // flash is too old or we can't detect the plugin
    var alternateContent = '<a href=data/mrnous.php></a>'
        + 'Alternate HTML content should be placed here.'
        + 'This content requires the Macromedia Flash Player.'
        + '<a href=http://www.macromedia.com/go/getflash/>Get Flash</a>';
}
}

```

```
    document.write(alternateContent); // insert non-flash content
}
</script>
<noscript>
    // Provide alternate content for browsers that do not support scripting
    // or for those that have scripting disabled.
    <a href="data/mrnous.php">.</a> Alternate HTML content should be placed here. This content
requires the Macromedia Flash Player.
    <a href="http://www.macromedia.com/go/getflash/">Get Flash</a>
</noscript>
```