



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

APLIKACE TEORIE CHAOSU NA ELLIOTTOVY VLNY

APPLICATION OF CHAOS THEORY TO ELLIOTT WAVE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VERONIKA LOUKOTKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. PŘEMYSL JANÍČEK, DrSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství

Ústav soudního inženýrství
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Veronika Loukotková

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Řízení rizik firem a institucí (3901T048)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aplikace teorie chaosu na Elliottovy vlny

v anglickém jazyce:

Application of Chaos Theory to Elliott Wave

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomový úkol je zaměřen na vymezení a následnou praktickou aplikaci teorie chaosu. Pomocí znalostí systémové metodologie bude v této oblasti řešen nepřímý problém, tj. analýza výskytu chaosu v konkrétní časové řadě. Pomocí teorie Elliottových vln pak bude predikován její další možný vývoj.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je vymežit chaos jako jednu z významných charakteristik ekonomických procesů. Na konkrétní časové řadě realizovat analýzu k prokázání či zamítnutí jeho existence. Pojednat o možných příčinách vzniku Elliottových vln a formou praktického příkladu demonstrovat využití této teorie v predikci.

Seznam odborné literatury:

DOSTÁL, P., K. RAIS a Z. SOJKA. Pokročilé metody manažerského rozhodování: konkrétní příklady využití metod v praxi. 1. vyd. Praha: Grada, 2005. 166 s. ISBN 80-247-1338-1.

JANÍČEK, Přemysl. Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: hledání souvislostí. Učební texty I. 1. vyd. Brno: CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-555-6.

JANÍČEK, Přemysl. Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: hledání souvislostí. Učební texty II. 1. vyd. Brno: CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-556-3.

SOJKA, Zdeněk a Petr DOSTÁL. Elliottovy vlny. 1. vyd. Brno: Tribun EU, 2008. 272 s. ISBN 978-80-7399-630-7.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 1.11.2011

L.S.

prof. Ing. Albert Bradáč, DrSc.
Ředitel vysokoškolského ústavu

Abstrakt

Diplomová práce staví do konfrontace teorii chaosu a teorii Elliottových vln s cílem zjistit, zda mezi nimi v oblasti predikce nastane shoda, či nikoli. Takto formulovaný hlavní problém je možné považovat za originální, novou a dosud neřešenou problematiku. Na základě řešení nepřímého problému deterministického chaosu nebyla jeho existence ve zkoumané časové řadě prokázána. Možnost alespoň v krátkodobém časovém horizontu predikovat budoucí vývoj této časové řady tak byla na základě výstupů teorie chaosu považována za nereálnou. Přesto byla následně provedená predikce pomocí Elliottových vln velmi přesná. Shoda obou teorií nebyla prokázána a ukázalo se, že znalost Elliottových vln a schopnost je ve správný moment vhodně interpretovat může být významným predikčním nástrojem.

Abstract

This diploma thesis compares chaos theory with Elliott wave theory in order to find out whether there is an agreement in the area of prediction. Such formulation of main problem is considered original, new and pioneering issue. By solving an indirect problem of deterministic chaos, existence of the chaos was not proved in a respective time series. The possibility to predict future development of this time series in a short-term period was considered impossible with respect of chaos theory results. Nevertheless, subsequent prediction that used Elliott wave theory showed to be precise. Finally, agreement of both theories was not confirmed. The diploma thesis proved that knowledge of Elliott wave theory and ability to interpret it correctly is a valuable means of prediction.

Klíčová slova

Teorie chaosu, Elliottovy vlny, predikce, kapitálový trh.

Keywords

Chaos theory, Elliott wave, prediction, capital market.

Bibliografická citace

LOUKOTKOVÁ, V. *Aplikace teorie chaosu na Elliottovy vlny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2012. 72 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....

podpis diplomanta

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Ing. Přemyslu Janíčkovi, DrSc. za příjemnou spolupráci, cenné rady a metodické vedení práce.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	VYMEZENÍ PROBLÉMOVÉ SITUACE.....	13
3	FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ	15
4	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU	17
4.1	Teorie chaosu.....	17
4.1.1	<i>Vymezení pojmů.....</i>	17
4.1.2	<i>Charakteristiky deterministického chaosu</i>	22
4.1.3	<i>Aplikační sféry deterministického chaosu</i>	23
4.1.4	<i>Typy problémů deterministického chaosu</i>	23
4.1.5	<i>Deterministický chaos v ekonomických soustavách</i>	24
4.2	Teorie Elliottových vln.....	31
4.2.1	<i>Vymezení pojmů.....</i>	32
4.2.2	<i>Základy teorie</i>	32
4.2.3	<i>Matematické vztahy</i>	35
4.2.4	<i>Pojednání o příčinách vzniku Elliottových vln.....</i>	37
5	ANALÝZA PROBLÉMU	39
6	METODIKA ŘEŠENÍ	41
6.1	Analýza výskytu deterministického chaosu	41
6.2	Predikce pomocí Elliottových vln	46
6.3	Porovnání výstupů teorie chaosu a Elliottovy vlnové teorie	47
7	REALIZACE ŘEŠENÍ A PREZENTACE VÝSLEDKŮ	49
7.1	Vymezení problémů	49
7.2	Zajištění věrohodnosti výsledků použitých metod.....	50
7.2.1	<i>Hurstův exponent.....</i>	50
7.2.2	<i>Ljapunovův exponent.....</i>	52
7.3	Případová studie	58

7.3.1	<i>Analýza výskytu deterministického chaosu</i>	58
7.3.2	<i>Predikce pomocí Elliottových vln</i>	63
7.3.3	<i>Verifikace hypotézy o shodě výstupů teorie chaosu a Elliottových vln</i>	64
8	ZÁVĚR.....	67
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
	SEZNAM TABULEK.....	72

1 ÚVOD

Předkládanou diplomovou prací „Aplikace teorie chaosu na Elliottovy vlny“ lze v jejích základních rysech obecně řadit do oboru ekonomie. Snaha o lepší pochopení složitých ekonomických soustav vytváří nový rámec vědeckého poznávání, v rámci něhož problémy v žádném případě nelze řešit izolovaně. Autorka si klade za cíl především metodologicky nadoborový pohled na řešený problém. Toho je dosaženo aplikací systémové metodologie, ze které tvorba práce vychází. Dále pak zdůrazňováním souvislostí a analogií s jinými vědními obory, především s psychologií. Díky zmíněnému lze práci zařadit také mezi práce s nadoborovým charakterem.

Řešení veškerých odborných problémů systémovou metodologií neodmyslitelně zahrnuje úvahy nad existencí deterministického chaosu u zkoumaných entit. Ekonomické soustavy svými vlastnostmi výskyt deterministického chaosu potenciálně umožňují, což je výchozím podkladem jeho analýzy v oblasti finančních trhů. Případné prokázání deterministického chaosu má pak zásadní význam ve vztahu k prognózování, kdy alespoň v krátkém časovém horizontu lze predikovat vývoj příslušných finančních entit. V opačném případě jsou, dle teorie chaosu, jakékoli snahy předpovědět budoucí vývoj liché a tvorba podrobných predikčních modelů pozbývá významu.

Vstupní informací do procesu řešení by tak vždy mělo být stanovení, zda výchozí časová řada obsahuje deterministickou složku, či je zcela náhodná. Od tohoto faktu by se následně měl odvíjet význam dalších predikcí. Z uvedených skutečností vychází tato práce, jejíž ambicí je nejen detekce deterministického chaosu, ale především prokázání, či zamítnutí jeho reálné platnosti aplikací na vybranou predikční metodu – teorii Elliottových vln.

Diplomový úkol je v teoretické rovině zaměřen na vymezení chaosu a jeho významu v ekonomických soustavách. Cílem této části je především poukázat na potenciální možnost výskytu deterministického chaosu v časových řadách generovaných ekonomickými procesy a chaos vytyčit jako jejich významnou charakteristiku, kterou je nutné při řešení nejrůznějších úkolů brát v úvahu.

Oblast aplikační se zabývá analýzou vzájemného působení dvou příbuzných teorií – teorie chaosu a do ní náležící Elliottovy vlnové teorie. Teorie Elliottových vln se především s rozvojem výpočetní techniky stala velmi rozšířeným prostředkem k prognózování finančních trhů. Jelikož díky svému fraktálnímu charakteru souvisí s teorií chaosu, je náplní diplomové práce zkoumání, jaké praktické výstupy tyto teorie poskytnou v oblasti predikce

a zda mezi nimi nastane shoda, či nikoli. Z pohledu systémové metodologie tedy bude řešen nepřímý problém, tj. analýza výskytu deterministického chaosu v konkrétní časové řadě. Na jejím základě bude následně rozhodnuto o tom, zda je možné budoucí vývoj dané časové řady predikovat. V další fázi práce bude provedena samotná prognóza vývoje příslušné finanční entity, jejíž výsledky budou dále porovnány s reálně dosaženými hodnotami časové řady. Cílem této stěžejní části je zjistit, zda časový horizont prediktability určený prostřednictvím teorie chaosu odpovídá důvěryhodné předpovědi znázorněné Elliottovými vlnami. A tedy obecně, jestli se výstupy získané teorií chaosu potvrdí také při prognóze pomocí Elliottových vln.

Na teoretické rovině bude pojednáno také o možných příčinách vzniku Elliottových vln. Toto pojednání pak tvoří poslední vytyčený cíl diplomové práce.

2 VYMEZENÍ PROBLÉMOVÉ SITUACE

V souladu se systémovou metodologií a tedy i atributem systémového přístupu, který klade požadavek na pojmovou čistotu, je nezbytné nejdříve vymezit samotný pojem „problémová situace“.

„Problémová situace je takový nestandardní stav entity (objektu nebo člověka), který z objektivních nebo subjektivních důvodů vyžaduje řešení s určitým vymezeným cílem, přičemž proces řešení není rutinní, takže řešitel musí využívat informační, hodnotící, tvůrčí a rozhodovací činnosti a hledat metody řešení.“ [1, s. 33]

Širší kontext diplomové práce, který problémovou situaci vymezuje, je určen následujícími východisky.

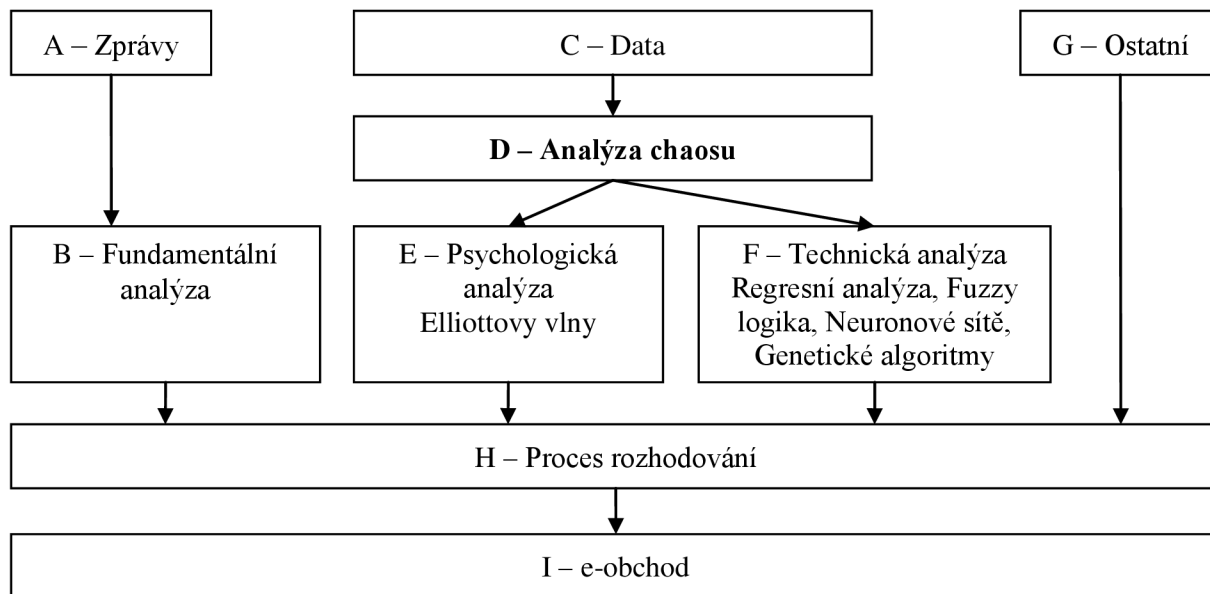
Pro vysvětlení jevů na kapitálovém trhu byly vytvořeny dvě hypotézy a to hypotéza efektivního trhu (náhodné procházky) a novější hypotéza fraktálního trhu [2, s. 1]. Prof. Janíček [3, s. 1186] pak proti hypotéze náhodné procházky staví jako její extrémní protipól hypotézu deterministického chaosu. Vždy však platí, že uplatnění hypotézy efektivních trhů odrazuje analytiku od předpovědi budoucích pohybů cen, jelikož ty podléhají náhodné procházce [2, s. 1]. Na druhé straně hypotéza deterministického chaosu předpokládá, že cenové pohyby jsou náhodné jen zdánlivě, a že ve skutečnosti jsou řízeny ryze deterministickým předpisem [3, s. 1186]. Utřídíme-li vzájemné vazby uvedené v [2, s. 4–11], že do teorie chaosu stejně jako do fraktální hypotézy kapitálového trhu zcela zapadá Elliottova vlnová teorie, můžeme hypotézu deterministického chaosu považovat za nadřazený pojem k hypotéze fraktálního trhu. Tím docílíme sjednocení dělení v uvedených literárních zdrojích.

Vlastnosti ekonomických soustav spolu s charakteristikami časových řad generovaných ekonomickými procesy podmiňují význam zkoumání existence chaosu také v oblasti kapitálového trhu. Dle [3, s. 1180] totiž skutečnost, že jsou tyto soustavy dynamické a nelineární, vede k testování hypotéz, zda se některé z ekonomických procesů neřídí deterministickým chaosem. Dané hypotézy pak, podle stejného zdroje, nacházejí odůvodnění v tom, že v jiných vědních oborech (kardiologie, neurologie, inženýrská mechanika¹) bylo dokázáno, že zdánlivě nahodilé chování některých jejich soustav je výsledkem nestabilních

¹ Ucelený přehled o problematice chaosu v nadoborovém pojetí a tím i ilustraci chaosu v různých vědních oborech poskytuje publikace prof. Janíčka [3].

deterministických zákonitostí, jimiž se dané soustavy řídí. Případné prokázání shodných závěrů v oboru ekonomie má tedy klíčový význam pro predikci finančních entit.

Jelikož ekonomické soustavy patří k vůbec těm nejsložitějším, je také predikce ekonomických veličin velmi obtížnou. Vstupní informaci do procesu řešení, v němž je klíčové hodnocení predikce z hlediska její kvality, poskytuje analýza chaosu. Postavení analýzy chaosu v rámci metod používaných k prognóze budoucího vývoje finančních entit je znázorněno na Obr. č. 1 – Schéma analýz dat a *informací* [4, s. 152].



Obr. č. 1 – Schéma analýz dat a *informací* [4, s. 152]

Autoři publikace [4, s. 151–153] toto schéma použili k demonstraci možného způsobu rozhodování pomocí kombinace metod (jako je například fuzzy logika, teorie chaosu a umělé neuronové sítě) při spekulacích na světových burzách. Pro potřeby diplomové práce není podstatné, jakým způsobem jsou často protichůdné výstupy jednotlivých analýz vyhodnocovány. Významná je především komplexnost modelu, který po získání dat (časových řad) přistupuje k analýze chaosu a až na základě jejích výstupů doporučuje, či zamítá pokračování v dalších analýzách.

Nestandardní stav entity tedy můžeme vymezit jako neznalost charakteru zákonitostí, jimiž se určitý proces na kapitálovém trhu řídí. Potřeba řešení je pak dána objektivními důvody, které lze spatřovat především ve významu tohoto zkoumání pro predikci. Vytyčený cíl potom tvoří verifikace hypotézy o shodě výstupů získaných pomocí teorie chaosu a Elliottových vln v oblasti predikce.

3 FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ

Tato kapitola, která obsahuje formulaci problému a cílů jeho řešení, patří k nejdůležitějším částem diplomové práce. V následujícím textu jsou vymezeny okruhy problémů, které budou řešeny a cíle, kterých má být dosaženo. Tím jsou získány výchozí podklady pro oblast a rozsah rešeršní studie. Ve smyslu pojmové čistoty je dále uvedeno vymezení pojmu „problém“.

„Problém je subjektem naformulované to podstatné z problémové situace, co vyžaduje řešení.“ [1, s. 32]

Okruhy řešených problémů, stejně jako jim příslušející cíle, jsou formulovány s ohledem na výše uvedenou citaci pojmu „problém“ takto:

- **Hlavní problém, jeho cíl a význam** – spočívá ve formulaci hypotézy, že teorie chaosu a do ní svým charakterem náležící Elliottova vlnová teorie poskytují v oblasti kapitálového trhu navzájem si odpovídající výstupy. Ty mají podobu shodného časového horizontu, v němž je možné se pokusit o kvalitní predikci. Výsledek řešení, jehož cílem je verifikace dané hypotézy, pak zahrnuje tyto situace:
 - Teorie chaosu i Elliottových vln jsou ve shodě (tj. neprokázání deterministického chaosu znamená také nepoužitelnost predikce pomocí Elliottových vln z hlediska její kvality, případně nastane opačná situace, kdy z potvrzení jeho existence a stanovení horizontu prediktability vyplyne také rozsah predikce Elliotovými vlnami).
 - Teorie chaosu a Elliottových vln nejsou z hlediska prediktability jednotné (tj. nastane například situace, kdy výskyt deterministického chaosu nebude prokázán, a přesto bude možné predikovat vývoj finanční entity prostřednictvím Elliottových vln).

Význam řešení hlavního problému je pak určen především zvýšením informační základny o zkoumané finanční entitě, čímž lze získat kvalitnější podklady pro rozhodování a tím také snížit rizika ztrát při obchodování na kapitálovém trhu.

- **Dílčí problémy, jejich cíle a význam** – je potřeba splnit, aby mohl být naplněn cíl hlavní. Jedná se o řešení nepřímého problému deterministického chaosu a predikci určenou pomocí Elliottových vln.

Cíle stanovené v rovině teoretické jsou pak představovány vymezením deterministického chaosu jako významné charakteristiky ekonomických procesů a pojednáním o možných příčinách vzniku Elliottových vln.

4 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

4.1 TEORIE CHAOSU

Rané zmínky o chaosu, v pojetí v jakém je chápán i dnes, můžeme nalézt již na konci 19. století. V té době francouzský matematik Henri Poincaré, aniž by hovořil o chaosu, nastínil v knize *Science and Method* moderní vědecké pojetí své teorie. To spočívalo ve formulaci myšlenky, že velmi drobná příčina unikající naší pozornosti způsobí rozsáhlé následky, kterých si nemůžeme nevšimnout, a pak o nich tvrdíme, že jsou výsledkem náhody. Malá chyba v počátcích tedy způsobí obrovskou chybu v důsledcích a předpověď se stává nemožnou. [3, s. 871]

Zmíněná Poincarého teorie, charakterizující tehdy ještě neznámý chaos, nenašla svého pokračovatele a byla na dlouhá desetiletí zapomenuta. Nepravidelnosti v pozorovaných procesech (atmosféře, epidemiích, srdeční či mozkové činnosti) byly ignorovány a považovány za náhodný projev přírody, až za její anomálii. Neexistovala žádná snaha použít na tuto „náhodnost“ vědecké metody. Zlom nastal až v sedmdesátých letech minulého století, kdy fyzikové, matematici, chemici a mnozí další oboroví specialisté začali hledat souvislosti mezi nepravidelnostmi v různých oborech. Lékaři se zabývali srdečními arytmii², ekonomové začali s výzkumem nepravidelností cen akcií na burzách a s rozvíjením teorie katastrof v ekonomice³. Doslovný „boom“ rozvoje teorie chaosu (nejdříve deterministického, pak stochastického a kvantového) nastal s využíváním počítačů, na nichž bylo možné realizovat numerické metody. Z vědců zabývajících se v různých oborech touto problematikou, kteří byli ještě na počátku sedmdesátých let minulého století osamoceni, se začalo vytvářet hnutí, které již používalo pojem teorie chaosu a začalo měnit základní podobu vědeckého poznávání. Nová věda o chaosu si vytvořila vlastní pojmovou soustavu s pojmy jak převzatými z jiných oborů, tak nově vytvořenými. [3, s. 871–872]

4.1.1 Vymezení pojmů

Tato stať obsahuje přehled charakteristických pojmů, které jsou spojeny s teorií chaosu. Nejdříve je však potřeba uvést pojem entita, který je v práci používán.

² Problematice možné existence deterministického chaosu v činnosti srdce se věnuje prof. Janiček [3, s. 983–1005].

³ Teorie katastrof v ekonomice přesahuje vytyčený obsahový rámec diplomové práce, stať zabývající se danou teorií lze nalézt v [3, s. 1193].

- **Entita** [1, s. 8] – je pojmem používaným v mnohoznačných významech. Zahrnuje reálné objekty (tělesa, technické soustavy) nebo objekty abstraktní (protokoly, posudky), ale také procesy, problémy, činnosti, prostě vše, co v dané době existuje.

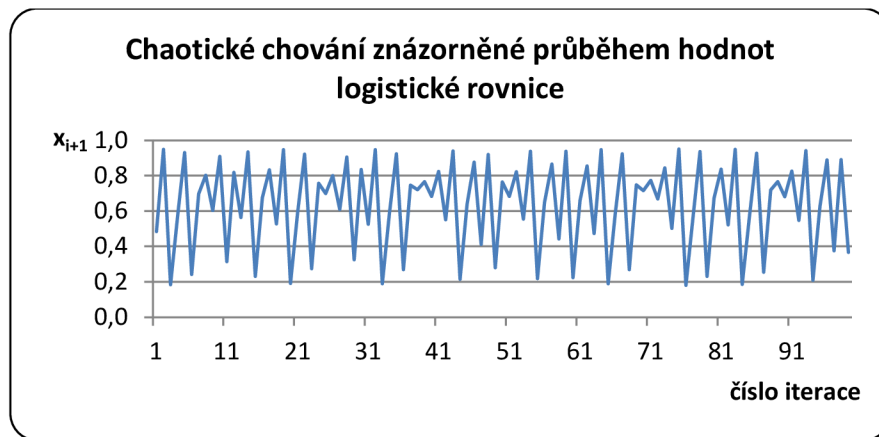
V následujícím textu jsou již vymezeny prvky pojmové soustavy teorie chaosu, jejichž interpretace je důležitá pro další zpracování diplomové práce. Důraz je tak kladen na deterministický chaos.

- **Řád** – v souladu s [3, s. 875] pod tímto pojmem chápeme určité periodické (rytmus), hierarchické (posloupnost) a estetické (harmonie) uspořádání. Přičemž entitě připisujeme řád, když tato vykazuje tzv. atributy řádu (známá struktura, vlastnosti, funkce, projevy, zákonitosti chování a splnění určitých estetických hledisek apod.). Charakteristická je uspořádanost, předvídatelnost, jednoznačnost, nenáhodnost, vysvětlitelnost, pochopitelnost, přehlednost apod.
- **Chaos** – dle [3, s. 875] je chaos považován za protiklad řádu. Entita je tak označována za chaotickou, pokud nevykazuje atributy řádu. Chaotická může být struktura, vlastnosti, projevy a tím i chování entity, přičemž charakteristická je neuspořádanost, nepředvídatelnost, nejednoznačnost, náhodnost, s čímž souvisí nevysvětlitelnost, nepochopitelnost, nesrozumitelnost, nepřehlednost, nejasnost atd.
- **Deterministický chaos** [3, s. 876] – u určité entity se za deterministický chaos považuje takový jev, u něhož existuje příčinný vztah mezi příčinami a následky – v tomto smyslu je tedy jev považován za deterministický, ovšem procesy, stavy, projevy a tím i chování entity, způsobené příčinami, nejsou předem předvídatelné – jsou tedy chaotické.
- **Logistická rovnice a chaotické chování** – deterministické chaotické chování lze znázornit pomocí tzv. logistické rovnice (v literatuře označované také jako logistická funkce [3, s. 904], či rekurentní rovnice [4, s. 100–101]). Dle [2, s. 7] lze logistickou rovnici vyjádřit ve tvaru

$$x_{n+1} = r x_n (1 - x_n)$$

kde r značí konstantu (řídící parametr) a nová hodnota je podle uvedeného vztahu počítána z předchozí. Na Obr. č. 2⁴ na následující straně je zobrazen graf průběhu hodnot logistické rovnice pro počáteční hodnotu $x_0 = 0,85$ a řídící parametr $r = 3,8$.

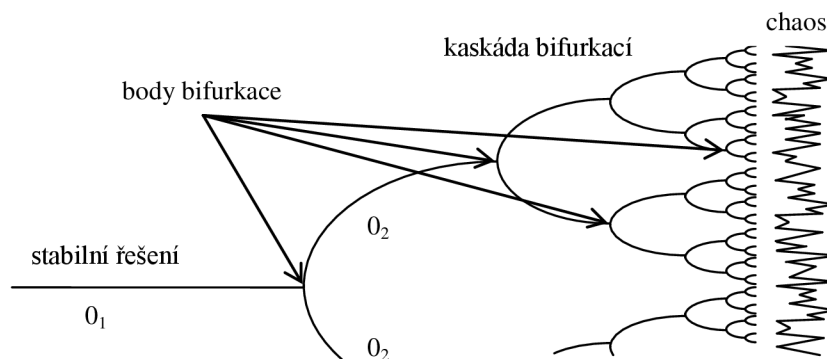
⁴ Pokud v textu u ilustrace (grafu, schématu apod.) či tabulky není uvedena citace použitého zdroje v hranatých závorkách, jedná se o autorčino vlastní zpracování.



Obr. č. 2 – Chaotické chování znázorněné průběhem hodnot logistické rovnice

Uvedený graf je možné považovat za praktické znázornění deterministického chaosu. Přesto, že se průběh hodnot pouhým vizuálním posouzením jeví jako náhodný, je přesně definován logistickou rovnicí.

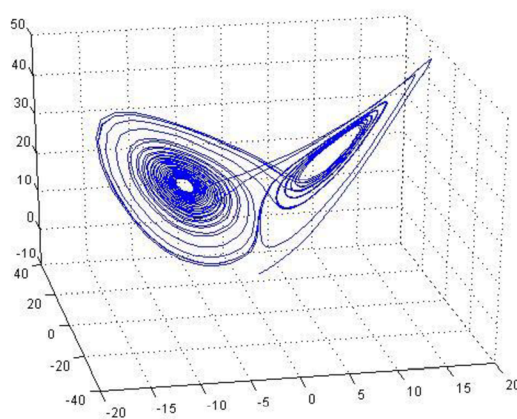
- **Bifurkační body, bifurkace** – pojmy bifurkační bod a bifurkace jsou charakteristické pro oblast deterministického chaosu. Ve shodě s [3, s. 1173] lze obecně konstatovat, že bifurkace je proces rozdělování stavu určité entity, který nastává u nelineárních dynamických soustav s určitými vlastnostmi, a který se odehrává v bifurkačním bodě. Ten je tak koncovým bodem stability či, jinak řečeno, prahem nestability. V analýzách potenciálně možného chaosu v nelineárních systémech znamenají bifurkace, dle stejného zdroje, změnu jejich projevů.
- **Bifurkační diagram** [3, s. 887] – bifurkaci (nastávající za takového stavu systému, v němž má tento možnost volby, jak se bude vyvíjet v čase) neboli větvení stavů systému je možné graficky zobrazit v diagramu bifurkace. V něm jsou na vertikální osu vynášeny výsledky řešení systému (jeho stavy), na osu horizontální pak podstatný parametr systému. Obr. č. 3 [3, s. 887] schematicky znázorňuje bifurkační diagram, z něhož je patrná kaskáda bifurkací přecházející v chaos.



Obr. č. 3 – Schematické znázornění bifurkačního diagramu [3, s. 887]

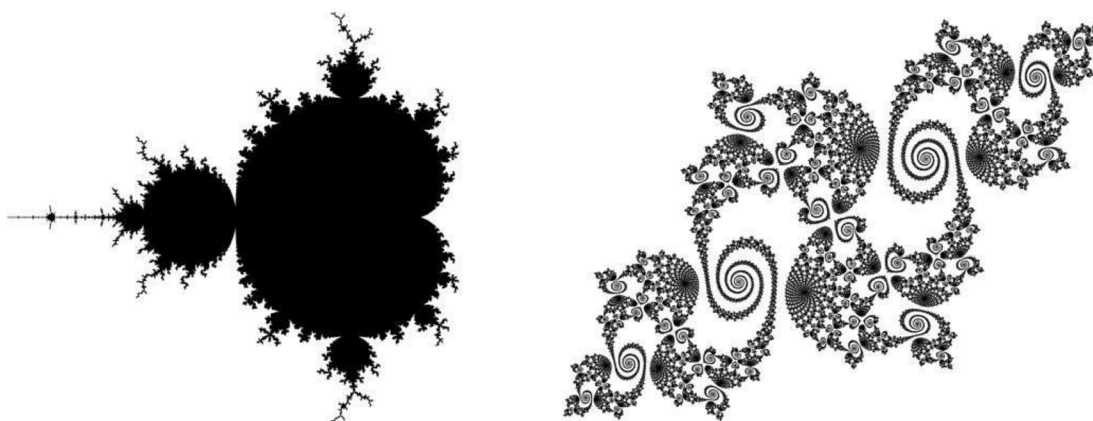
Tato stať dosud objasnila základní pojmy teorie chaosu, na logistické funkci bylo demonstrováno chaotické chování a pomocí bifurkačního diagramu také znázorněno, jak ke zmíněnému chaotickému chování dochází. Dále je již pojednáno o atraktorech a s nimi souvisejících pojmech.

- **Atraktor** – na základě vymezení uvedeném v [3, s. 886] je atraktor dynamického systému zobrazením chování dynamického systému ve fázovém prostoru, popisuje tedy dlouhodobé chování systému a konečný stav, do něhož tento systém směřuje. Dle stejného zdroje lze atraktory členit do následujících tříd:
 - Atraktory bodové (atraktorem jsou pevné body) – pro ně je charakteristické, že soustava a ji popisující systém se v nekonečném čase na konci procesu ustálily v určitém stabilním rovnovážném stavu. Příkladem tohoto atraktoru je kulička kutálející se do trychtýře, která, ačkoli je spuštěna z jakéhokoli místa na horním obvodu trychtýře, vždy skončí v trubičce zakončující trychtýř – tedy v přesně daném bodě.
 - Atraktory periodické (atraktorem jsou limitní cykly) – dané limitní cykly popisují pravidelné chování systému v čase, které odpovídá periodickým stavům. V nekonečném čase se tak systém ustálil takovým způsobem, že osciluje mezi několika stavy.
 - Atraktory podivné neboli chaotické – mají vlastnosti fraktálů, jsou velmi komplikované, přesto ale vykazují určité pravidelnosti a na rozdíl od periodických atraktorů také extrémní citlivost na počáteční podmínky. Ukázkou chaotického atraktoru je například Lorenzův podivný atraktor na Obr. č. 4, který byl vygenerován pomocí OpenTSTool toolboxu programu Matlab.



Obr. č. 4 – Lorenzův atraktor

- **Fraktál, soběpodobnost, soběpříbuznost** [5, s. 23, 30] – fraktál definujeme jako objekt, jehož geometrická struktura se opakuje v něm samém. Tyto objekty můžeme dělit na dva základní typy, a to na fraktály soběpodobné a soběpříbuzné. Se soběpodobnými fraktály se lze setkat pouze při matematických konstrukcích. Charakteristickým znakem těchto struktur je to, že se v nich opakuje původní originální motiv mateřského útvaru či tělesa. Jakýkoli výsek je tak kopií původního objektu. Naopak soběpříbuzné fraktály vidíme kolem sebe každý den. Jsou jimi mraky, lesy, hory apod., pro něž je typické, že kterýkoli výsek je podobnou kopií původního útvaru. Za „otce“ fraktální geometrie můžeme označit Benoita B. Mandelbrota. Ten ji proslavil knihou *The Fractal Geometry of Nature* (1982) a jeho tzv. Mandelbrotova množina zobrazená vlevo na Obr. č. 5 [6] se stala takřka jejím symbolem. Obr. č. 5 [6] znázorňuje vpravo také další příklad fraktálu – Juliovu množinu.



Obr. č. 5 – Mandelbrotova a Juliova množina [6]

- **Motýlí efekt, Edward Lorenz** [3, s. 872, 917] – americký fyzik a meteorolog E. N. Lorenz na střetnutí Americké asociace pro pokrok a vědu (1972 Washington) svým výrokem „Zamávání motýlím křídlem v Brazílii se může projevit jako tornádo nad Texasem.“ vyslovil metaforu, nyní známou jako motýlí efekt, a vyjádřil tak velkou citlivost chování nelineárních systémů na počátečních podmínkách. Edward Lorenz je jednoznačně považován za nejvýznamnějšího průkopníka deterministického chaosu. Jeho zásadní počiny v této oblasti představuje například chování tzv. Lorenzova vodního kola a problém dlouhodobé předpovědi počasí.

Problematika deterministického chaosu je spojena s řadou pojmů charakterizujících systémy. Aby obsah diplomové práce nebyl vágním, jsou v závěru této statě pojmy

dynamický systém, nelineární systém, deterministický a chaotický systém vymezeny dle zdroje [3, s. 881–882] takto:

- **Dynamický systém** – systém je abstraktní objekt vytvářený na objektu reálném (soustavě). Je tvořen množinou veličin a vazeb mezi nimi, jež jsou podstatné z hlediska určitého zájmu subjektu o reálný objekt. Pokud struktura soustavy, na níž je systém vytvořen, vykazuje dynamičnost – časovou závislost, pak systém je také dynamický.
- **Nelineární systém** – je takový systém, v němž vztahy mezi závislými a nezávislými veličinami jsou nelineární (tím se liší od systému lineárního). Mezi odezvami a příčinami u soustavy tedy neexistuje přímá či nepřímá úměra. Nelinearita systému potom může být důsledkem specifického uspořádání vazeb mezi prvky, které vytváří zpětnovazební smyčky interakcí.
- **Deterministický systém** – pokud je při známé rovnici časového vývoje systému, při známých hodnotách jeho parametrů a známých počátečních podmínkách možné na základě výpočtu stanovit budoucí vývoj tohoto systému – považujeme jej za deterministický.
- **Chaotický systém** – je charakterizován chaotickým chováním, které je nepředvídatelné.

4.1.2 Charakteristiky deterministického chaosu

V úvodu kapitoly 4.1.1 bylo objasněno, jaký jev se u určité entity považuje za deterministický chaos. Pro tento druh chaosu jsou charakteristické následující skutečnosti a z nich plynoucí důsledky [3, s. 876–877]:

- 1) Vznik deterministického chaosu je možný u entit, jejichž chování je dynamické a tedy časově závislé, přičemž vztahy mezi příčinami a následky jsou nelineární. Hovoříme tak o dynamických nelineárních systémech, které v případě, že vykazují chaotické chování, označujeme jako chaotické dynamické systémy. Veškeré nelineárně se chovající entity (soustavy) jsou tak potenciálně předurčené k chování chaotickému a je u nich žádoucí výskyt deterministického chaosu zkoumat (prokázat, či vyvrátit).
- 2) Vždy lze nalézt příčiny, které vedly k určitým následkům, v čemž spočívá ona determinističnost deterministického chaosu. Shodná příčina však nemusí způsobit stejné následky. Existuje nespočetné množství možných následků

(budoucností), které je nezbytné pokládat za stejně potenciálně možné. Která budoucnost se bude skutečně realizovat, se označuje lidově jako „osud“.

- 3) Chaotičnost chování entity znamená nepředpověditelnost následků známé příčiny.
- 4) Nepředpověditelnost chování entity se může projevit ve formě vzniku náhlých, velkých a nepředpověditelných změn. Zabývá se jimi teorie katastrof, přičemž termín katastrofa zde není chápán jako neštěstí, ale ve významu řeckého slova katastrofé – tj. ve smyslu náhlé změny v divadelním dramatu.
- 5) Hodnoty důsledků jsou extrémně závislé na hodnotách příčin, což je označováno jako extrémní citlivost na počáteční podmínky neboli motýlí efekt. V důsledku této extrémní citlivosti na počáteční podmínky se entity, které se v krátkodobém časovém intervalu chovají deterministicky, mohou v dlouhodobém horizontu chovat nepředvídatelně. Každá i drobná odchylka se v průběhu času exponenciálně zvětšuje, a proto u entit, u nichž je nutné počítat s deterministickým chaosem, není možné dlouhodobě předpovídat jejich chování.
- 6) Omezenost lidského poznání, ani nepřesnosti měření příčin jevu nezpůsobují existenci deterministického chaosu. Ta spočívá v samotné podstatě procesů, které u entit probíhají.

4.1.3 Aplikační sféry deterministického chaosu

Teorie chaosu je nadoborová disciplína. Potenciálně možný výskyt deterministického chaosu je tedy možné zkoumat napříč různými obory, ať už přírodovědnými nebo technickými. S rozvojem chaosu byl tento objevován ve všem, co člověka obklopuje. Aplikační sféry jsou například [3, s. 877]: fyzika (nelineární mechanika, turbulence atd.), strojírenství (mechanické a elektromechanické soustavy, mechatronické výrobky atd.), biologie a fyziologie (dynamika populací, evoluční jevy, aktivita srdce, epidemie různých nemocí apod.), geofyzika a meteorologie (předpovědi počasí), astrofyzika (reakce hvězd), astronomie (pohyby planet), chemie (různé chemické reakce), sociologie (demografické modely), ekonomika a finančnictví (modely trhů a burzy).

4.1.4 Typy problémů deterministického chaosu

Nadoborově lze problémy členit na přímé a nepřímé. Stejně vymezení je používáno také pro problémy řešené v oblasti deterministického chaosu, kde analogicky hovoříme o *přímém problému deterministického chaosu* a *nepřímém problému deterministického chaosu*.

Prof. Janíček ve své knize [3, s. 880] jednotlivé pojmy definuje takto:

Přímý problém deterministického chaosu vychází ze situace, v níž existuje entita, u níž lze předpokládat, že její projevy a tím i chování jsou dynamické a nelineární. Tím je splněn výchozí předpoklad potenciálního výskytu deterministického chaosu. U tohoto typu problému jsou vstupem do algoritmu řešení příčiny a výstupem pak důsledky daných příčin.

Nepřímý problém deterministického chaosu je řešen, pokud u entity bylo zjištěno chaotické chování, přičemž je žádoucí znát, za jakých okolností k němu došlo. Za vstup jsou považovány důsledky (projevy), výstup tvoří příčiny.

Výše uvedené charakteristiky jsou pouze obecným uvedením do řešené problematiky. Podrobně bude zejména nepřímý problém deterministického chaosu rozebrán v následující kapitole diplomové práce.

4.1.5 Deterministický chaos v ekonomických soustavách

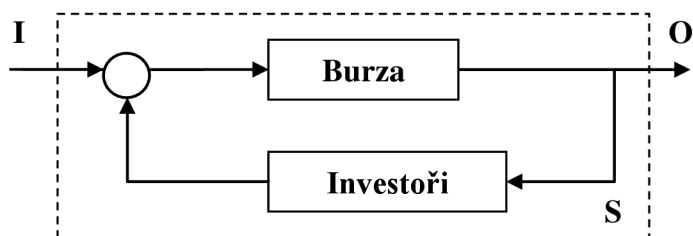
V úvodu této kapitoly je nejdříve pojednáno o vlastnostech ekonomických soustav, které musí splňovat určité předpoklady, aby v nich mohl být umožněn potenciální výskyt deterministického chaosu. V návaznosti na to, že jedním z dílčích problémů formulovaných v kapitole 3 je řešení nepřímého problému deterministického chaosu v tomto oboru, je tento dále vymezen spolu s uvedením možnosti jeho řešení.

Vlastnosti ekonomických soustav

Co se týče **vlastností ekonomických soustav**, jsou to soustavy [3, s. 1176]:

- 1) **Strukturně heterogenní** – skládají se jak z prvků technických (zpracovatelské, výrobní, technologické komplexy), tak sociálních (organizační instituce, spotřebitelé). Okolí těchto soustav má pak charakter ekologický.
- 2) **Smíšené až měkké** – existuje určitá neostrost (mlhavost) při určování rozhraní mezi soustavami a jejich okolím a také zajišťování funkcí (které soustavy vykonávají) je spojeno s větší nejistotou úspěšnosti, než je tomu u soustav tvrdých (technické soustavy). Z těchto důvodů je obtížné formulovat problémy spojené s existencí a funkčností měkkých soustav.
- 3) **Velké, složité, špatně průhledné** – obsahují velký počet prvků (velké) a velké množství vazeb mezi prvky soustavy (složité), přičemž cesty soustavou jsou tak spletené, že je velmi obtížné se v nich orientovat (špatně průhledné).

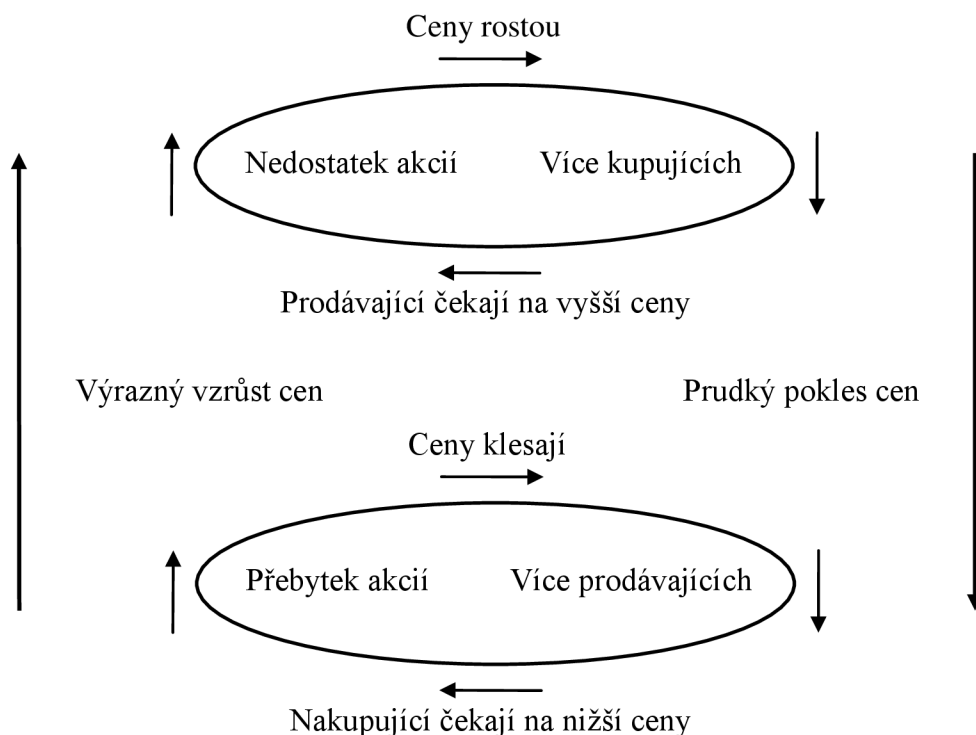
- 4) **Částečně strukturované** – nemusí být známe některé z prvků nebo vazeb struktury soustavy.
- 5) **Otevřené** – mezi soustavou a jejím okolím probíhají interakce.
- 6) **Disipativní** – disipativnost je podmíněna otevřeností ekonomických soustav a vychází ze skutečnosti, že lidé pro technické a ekonomické procesy čerpají ze svého okolí energii a jen její část vrací do okolí zpět. Přírodě také zcizují primární suroviny, které dále zpracovávají na zboží, přičemž zpět do přírody je opět vrácena jen část odebrané hmoty ve formě odpadu. Z uvedeného je zřejmé, že část energie a hmoty se v hospodářských procesech nenávratně ztrácí – disipuje.
- 7) **Dynamické** – charakteristiky ekonomických soustav jsou proměnné v čase. Dochází tak k tomu, že se mění jejich struktury, způsoby aktivace, procesy probíhající v soustavách, jimi vyvolané stavy a i jejich projevy.
- 8) **Nelineární** – v důsledku existence zpětnovazebních smyček nejsou závislosti mezi parametry ekonomických soustav lineární. Možné znázornění takové zpětné vazby, konkrétně v oblasti finančních trhů, demonstruje Obr. č. 6 [4, s. 127]. Jeho autoři k němu uvádějí, že při obchodování na světových burzách dochází k opakujícím se procesům, jelikož cena akcie neroste do nekonečna a (kromě případu krachu společnosti) také neklesá k nule. V procesu obchodování dochází k neustálému vzájemnému ovlivňování burzy a investorů, přičemž důležitou roli má právě zpětná vazba tvořená reakcí investorů na průběh burzy. Vstupem do uvedeného systému S je proměnná I – například jí může být informace o ceně akcie, za výstup O pak považujeme výslednou cenu této akcie. Bloky „Burza“ a „Investoři“ představují jejich chování. Na schématu vidíme, že zde kromě větve přímé jdoucí ve směru zleva doprava působí ve směru opačném (zprava doleva) také popsaná zpětná vazba.



Obr. č. 6 – Schéma zpětné vazby na finančních trzích [4, s. 127]

Zpětná vazba může mít, dle [4, s. 127], dvě podoby. Jsou jimi **kladná zpětná vazba**, která na finančních trzích dominuje (a to při růstu i poklesu cen akcií, indexů, komodit či kurzů měn) a představuje opakující se smyčku způsobující změnu ve stejném směru,

nestabilitu a chaos, a **záporná zpětná vazba**, jenž má tlumící účinek a pozitivní vliv na stabilitu. Proces působení kladné zpětné vazby je možné popsat pomocí Obr. č. 7 [4, s. 128].



Obr. č. 7 – Působení kladné zpětné vazby na finančních trzích [4, s. 128]

V horní části Obr. č. 7 [4, s. 128] je znázorněna smyčka, která je představována růstem cen, následným zvýšením počtu kupujících a vyčkáváním prodávajících, čímž nutně dojde k nedostatku akcií. Smyčka se několikrát opakuje až do doby, kdy je vytvořen nestabilní vrchol. Pod vlivem psychologického jevu „davového chování“ pak nastane prudký pokles cen. Rostoucí trend je tak nahrazen prudce klesajícím a další vývoj je představován dolní smyčkou. V ní ceny klesají, roste počet prodávajících a nakupujících, kteří čekají na nižší ceny, čímž nastane přebytek akcií. Smyčka se opět několikrát opakuje, až nastane propad, po němž vlivem „davového chování“ ceny znovu začnou růst. Po klesajícím trendu je nastoupen výrazný růst a dosažena horní smyčka. Na kladnou zpětnou vazbu mají zesilující vliv například nečekané zprávy (očekávání pozitivní/negativní zprávy, vyhlášení pozitivní/negativní zprávy). Přechod mezi zobrazenými smyčkami je dán působením záporné zpětné vazby. Ta podporuje stabilitu a je vyjádřením antagonismu kupujících a prodávajících, kteří mají ve stejnou dobu protichůdné názory. Kupující a prodávající tak neutralizují extrémní pohyb, přičemž tato silná záporná vazba utlumuje pohyb cen. [4, s. 127–128]

- 9) **Stochastické** – budoucí chování ekonomických soustav není jednoznačně dáno počátečními podmínkami.
- 10) **Synergické** – synergii v ekonomických soustavách chápeme ve dvou významech. Prvním je cílená kooperace procesů probíhajících v dané soustavě s cílem zvýšení efektivnosti jejího chování. Druhý tvoří kooperace procesů, jejímž výsledkem jsou samoorganizované procesy, které se projevují vznikem nových struktur a tím i nových procesů a projevů soustavy.

Uvážíme-li vlastnosti ekonomických soustav vymezené v předcházejícím textu, můžeme oprávněně tvrdit, že výskyt deterministického chaosu je v těchto soustavách potenciálně možný. Jejich otevřenost, dynamičnost a nelineárnost jsou odůvodněním toho, proč je nezbytné se při řešení nejrůznějších problémů v této oblasti zabývat otázkou deterministického chaosu.

Aplikační sférou, ve které má detekce deterministického chaosu svůj nezastupitelný význam, jsou kapitálové trhy. Od jejich samotného vzniku až do současnosti vznikl nespočet různých analýz (např. technická a psychologická analýza), které však vždy měly společného jmenovatele – snahu o pochopení podstaty cenových pohybů finančních entit a jejich následnou předpověď. Finanční analytici tyto nástroje ve své praxi využívají zpravidla v kombinaci a na základě jejich výstupů činí rozhodnutí. Nehledě na použité analýzy by však vstupní informací do procesu řešení vždy mělo být nejdříve stanovení, zda výchozí časová řada obsahuje deterministickou složku, či je zcela náhodná. Od tohoto faktu by se následně měl odvíjet význam dalších predikcí a tedy i aplikace analýz. Případné prokázání deterministického chaosu pak představuje možnost alespoň v krátkém časovém horizontu prognózovat vývoj příslušných finančních entit. V opačném případě jsou jakékoli snahy předpovědět budoucí vývoj liché a tvorba podrobných predikčních modelů pozbývá významu.

Podstatu deterministického chaosu na kapitálovém trhu lze tedy na závěr shrnout dle [3, s. 1186] následovně: „*Pokud by byl chaos na kapitálovém trhu potvrzen, pak by to znamenalo, že chování kapitálového trhu je popsáno deterministickými zákonitostmi v podobě určité soustavy matematických rovnic. To by umožňovalo alespoň krátkodobé předpovědi chování kapitálového trhu, což by byl významný nástroj v rukách makléřů.*“

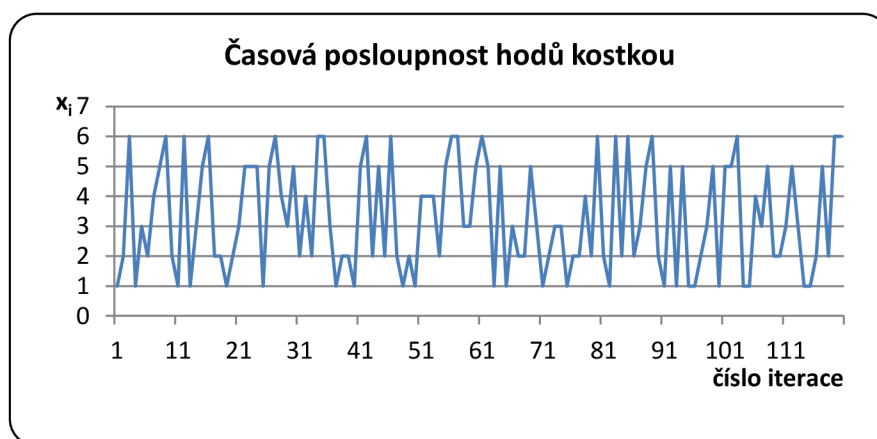
Úvod kapitoly 4.1.5 tedy vymezuje potenciální možnost existence deterministického chaosu v časových řadách generovaných ekonomickými procesy a jeho význam v oblasti kapitálových trhů, čímž je naplněn jeden z vytyčených cílů diplomové práce.

Analýza deterministického chaosu v ekonomických soustavách

Na potenciální výskyt chaotického chování ekonomické soustavy usuzujeme z řešení přímého, či nepřímého problému deterministického chaosu. Oba typy problémů jsou vymezeny v textu této statě.

Přímý problém deterministického chaosu v ekonomických soustavách a možnosti jeho řešení [3, s. 1179] – přímý problém je řešen, existuje-li dynamická soustava s výskytem nelinearit a má se zjistit, zda chování soustavy může být za určitých podmínek chaotické. Na řešení problému je možné aplikovat výpočtové či experimentální modelování. Úskalí však spočívá v samotných vlastnostech ekonomických soustav, které způsobují, že se obtížně proniká k podstatám ekonomických procesů a při modelování tak mohou nastat chyby. Již vytváření hypotéz o těchto procesech a jejich chování na lingvistické a následně matematické úrovni není snadné. Nelehká je také realizace ekonomických experimentů. Lze tedy konstatovat, že v současné době není řešení přímého problému deterministického chaosu snadné a tím i běžné.

Nepřímý problém deterministického chaosu v ekonomických soustavách a možnost jeho řešení – na existenci deterministického chaosu se usuzuje z časových řad ekonomických dat [3, s. 1180]. V praxi je velmi těžké pouze na základě zrakového posouzení odlišit, zda časová řada, která představuje grafický záznam projevů určité soustavy v čase, je zobrazením náhodného či chaotického (ve smyslu výskytu deterministického chaosu) chování soustavy. Toto tvrzení je podpořeno znázorněním časové řady vytvořené opakováním hodu homogenní hrací kostkou na Obr. č. 8. Porovnáme-li jej s Obr. č. 2 (na str. 19) znázorňujícím chaotický průběh logistické funkce, tak vidíme, že není možné chaotickou časovou řadu od náhodné rozeznat.



Obr. č. 8. – Časová posloupnost hodů kostkou

Řešení nepřímého problému deterministického chaosu (při známém průběhu časové řady a zkoumání, zda je tento chaotický) tak spočívá ve dvou samostatných, na sebe navazujících krocích [3, s. 1168–1169]:

- 1) **Rekonstrukce trajektorie systému ve fázovém prostoru** (neboli rekonstrukce fázového prostoru) – v této první fázi je nezbytné zrekonstruovat atraktor ve fázovém prostoru. K tomu slouží tři základní metody a to metoda derivací, metoda rozkladu na hlavní komponenty, nebo metoda časových zpoždění.
- 2) **Určení kvantifikátorů deterministického chaosu** – pomocí hodnot zvolených kvantifikátorů se určí, zda se jedná o deterministický chaos. Možnými kvantifikátory jsou například největší Ljapunovův exponent⁵ (v některých zdrojích označovaný také jako Lyapunovův exponent) a korelační dimenze.

V kapitole 7 diplomové práce bude rekonstrukce atraktoru provedena pomocí metody časových zpoždění. Na jejím základě bude dále možné odhadnout hodnotu největšího Ljapunovova exponentu. Jako první však bude vyjádřena hodnota Hurstova exponentu, který rovněž náleží do teorie chaosu a lze pomocí něj vyjádřit míru chaotičnosti časové řady. Pro jeho odhad není zapotřebí rekonstrukce atraktoru ve fázovém prostoru a je tak možné jej získat přímo z původní časové řady. Zmíněné exponenty v diplomové práci tvoří kvantifikátory chaosu. O problematice jejich odhadu je pojednáno v metodice řešení v kapitole 6.

Na závěr této statě, která vymezuje deterministický chaos v ekonomických soustavách, jsou uvedeny příklady prací, jejichž autoři se některým ze zvolených kvantifikátorů chaosu zabývali.

Práce z oblasti deterministického chaosu v ekonomických soustavách

Postavení deterministického chaosu v ekonomice je velmi komplikované, a to hned z několika příčin [3, s. 1194]:

- V dané oblasti existuje velký tradicionalismus v používání „nechaotických“ přístupů a metod.

⁵ Alexander Michajlovič Ljapunov – ruský matematik, jehož jméno je známo z teorie pravděpodobnosti, dynamických systémů a jejich stability. Ljapunovovým exponentem se u chaotických systémů popisuje rozbíhavost (divergence) blízkých trajektorií. [5, s. 22]

- Dokazování existence deterministického chaosu je specifické v tom smyslu, že je nezbytné řešit nepřímé problémy deterministického chaosu a usuzovat tak na jeho výskyt z empiricky určených časových řad ekonomických dat.
- Prokazování deterministického chaosu z časových řad vyžaduje proniknutí do podstat algoritmů daného prokazování.

Přesto existuje celá řada příspěvků, které se verifikací hypotéz o chaotickém chování určitých ekonomických procesů zabývají. Ilustrací jsou například následující články, v jejichž obsahu můžeme nalézt odhady Hurstova, či Ljapunovova exponentu, které v diplomové práci tvoří kvantifikátory chaosu.

- Článek uveřejněný v akademickém časopise *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research* s názvem „TIME-VARYING HURST EXPONENT FOR THE BUCHAREST EXCHANGE MARKET“ [7] zkoumá chování bukurešťského devizového trhu pomocí Hurstova exponentu (k jeho odhadu používá R/S analýzu). Pro časové řady logaritmických výnosů dvou zvolených finančních entit (Bucharest Exchange Trading Index a RASDAQ Composite Index⁶) byla zjištěna hodnota Hurstova exponentu větší než 0,5. Tato hodnota značí přítomnost dlouhodobé paměti v časové řadě a také to, že tato není normálně rozdělená.
- Modelováním časových řad akciových výnosů se ve stejnojmenném článku zabývají autoři ve zdroji [8]. Jako vstupní data používají denní uzavírací ceny akcií (ČEZ, Komerční banka, Philip Morris, Český Telecom a Unipetrol) v období let 2001–2005, tj. 1256 hodnot. Z těchto cen dále vypočítávají logaritmické výnosy v procentech a takto upravené časové řady podrobují R/S analýze ke zjištění Hurstova exponentu. Ten pouze pro akciové výnosy ČEZ a Unipetrol mírně překročil hodnotu 0,5. Pro ostatní výnosy byl nepatrně pod touto hranicí. Lze však konstatovat, že žádná ze zkoumaných časových řad neobsahuje dlouhodobý paměťový cyklus.
- Další z odborných článků nazvaný „CHAOS AND ORDER IN CAPITAL MARKETS – THE CASE OF A SMALL TRANSITION ECONOMY“ [9] prezentuje analýzu k prokázání dlouhodobé paměti u finanční entity (denních

⁶ Vstupní data pro analýzu tvoří denní uzavírací ceny v letech 1998–2009 pro Bucharest Exchange Trading Index a v letech 1999–2009 pro RASDAQ Composite Index. Původní řada hodnot byla následně převedena a řadu logaritmických výnosů.

výnosů slovinského akciového indexu – Slovenian Stock Index). Jeho autoři provedli odhad Hurstova exponentu a prokázali tak, že hypotéza efektivního trhu (náhodné procházky) v daném případě neplatí a data nemají normální rozdělení.

- Empirické důkazy o existenci chaotické struktury na ropných trzích (v časových řadách výnosů ropy) poskytuje článek „Chaotic Structures in Brent & WTI Crude Oil Markets: Empirical Evidence“ [10]. Jako jeden z nejvýznamnějších kvantifikátorů chaosu je zde počítán největší Ljapunovův exponent, z jehož kladné hodnoty můžeme usuzovat na existenci deterministického chaosu.
- Přehlednou tabulku, která shrnuje významné kvantifikátory chaosu pro akciové indexy vybraných trhů, lze nalézt v článku s názvem „Chaotic analysis of predictability versus knowledge discovery techniques: case study of the Polish stock market“ [11]. Pro všechny zkoumané finanční entity zde vyšly hodnoty Ljapunovových exponentů kladné. Opět tedy lze usuzovat na výskyt chaosu.

4.2 TEORIE ELLIOTTOVÝCH VLN

Finanční trh je ekonomickou soustavou, v níž neustále a opakovaně probíhají procesy kladných i záporných zpětných vazeb. V důsledku jejich působení vznikají charakteristické tvary časových řad finančních entit, které mají fraktální charakter a lze je popsat Elliottovými vlnami. Elliottovy vlny tak představují možný způsob analýzy trhů a predikce jejich budoucího vývoje.

Autorem vlnové teorie „Wave Principle“⁷, jejíž základy byly položeny již ve třicátých letech dvacátého století, je Ralph Nelson Elliott. Fascinován pohyby cen na Wall Streetu začal zkoumat měsíční, týdenní, denní, hodinové i půl hodinové grafy hodnot cenových průběhů různých indexů, které zahrnovaly 75 let chování burzy, a objevovat tak vlnovou teorii chování burzovního trhu pomocí empirických důkazů. Sestavoval grafy s hodinovým cyklem pro index Dow Jones Industrial Average a v roce 1934 sepsal na základě svých pozorování soubor pravidel, která aplikoval na všechny stupně vlnových pohybů. Elliott vlnovou teorii neustále zpřesňoval, prováděl korekce, studoval jevy do stále větší hloubky a objevoval také nová pravidla. Známým se Elliott stal v roce 1935, když přesně předpověděl výrazné hodinové minimum akcie Industrials a to 13 obchodních hodin dopředu. V dnešní době se již jeho pozorování označují za fraktální a hovoří se o teorii chaosu. Přičemž je zde zajímavé

⁷ Elliottova kniha nazvaná „The Wave Principle“ byla pro veřejnost publikována v roce 1938 [12, s. 261].

zdůraznit, že Elliott vytvářel svou teorii ve 30. letech minulého století, zatímco vznik fraktální geometrie se datuje o 40 let později. [2, s. 11, 16–17]

4.2.1 Vymezení pojmů

Cílem této kapitoly je uvést základní pojmy Elliottovy teorie. Výchozím zdrojem pro jejich vymezení je publikace [2, s. 18, 21]:

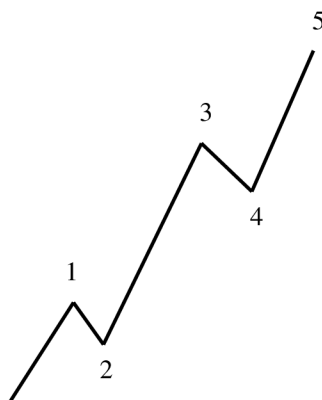
- 1) **Elliottovy vlny** – jsou složitým systémem s rigorózními vazbami mezi vlnami.
- 2) **Vlna** – za vlnu považujeme cenový pohyb (akcie či jiného aktiva) v určitém směru.
- 3) **Stupně vln** – Elliott vytvořil hierarchický systém vln. Stupeň vlny je určen její velikostí a postavením, které zaujímá vzhledem k ostatním vlnám, přičemž rozlišujeme devět stupňů (velký supercyklus, supercyklus, cyklus, primární, prostřední, malý, menší, nejmenší a minimální). Například vlna cyklus je tak tvořena primárními vlnami, ty prostředními apod.
- 4) **Pohyb** – tento pojem není v Elliottově teorii chápán absolutně jako růst (například ceny akcie), ale relativně ve smyslu směru, kterým jde vlna vyššího stupně.
- 5) **Hybný režim** – je vyjádřením souhlasného pohybu ve směru pohybu vlny vyššího stupně.
- 6) **Korekční režim** – znamená pohyb proti směru pohybu vlny vyššího stupně.
- 7) **Pravidla** – pravidla definují takové skutečnosti, které vlna musí bezpodmínečně ve všech případech splňovat.
- 8) **Směrnice** – směrnice vyjadřují ty skutečnosti, které nemusí být striktně dodržovány.

4.2.2 Základy teorie

R. N. Elliott na základě svých pozorování vytvořil velmi složitý hierarchický systém různých typů vln a stanovil přesné vazby mezi nimi. Tento systém ve své práci velmi podrobně popsal. Detailní popis vlnové teorie však přesahuje možnosti diplomové práce, a tak jsou v následujícím textu uvedeny pouze základní Elliottovy myšlenky.

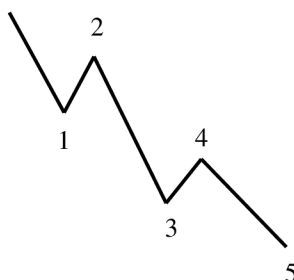
Elliottovy vlny představují fraktální strukturu, která popisuje charakter finančních trhů jako celku. Základním opakujícím se prvkem je pětivlnový pohyb, nazývaný impuls, a jeho třívlnová korekce. [13]

Pětivlnový pohyb – impuls je nejtypičtějším představitelem hybného režimu. Na Obr. č. 9 [2, s. 19] je znázorněn rostoucí trendový impuls. Vlny 1, 3, 5 v něm vyvolávají hybný pohyb, zatímco vlny 2 a 4 jsou naopak v rámci daného impulsu vlnami korekčními [2, s. 18].



Obr. č. 9 – Trendový impuls, rostoucí [2, s. 19]

Za impuls však označujeme nejen růstový pohyb (např. růst ceny akcie), ale také pohyb opačný (pokles ceny akcie). Impuls zobrazený na Obr. č. 10 [2, s. 19] je zobrazením právě cenového poklesu, neboť vlna vyššího stupně (jejíž je součástí) je vlnou klesající. [2, s. 18–19]



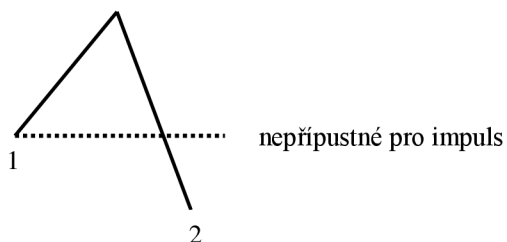
Obr. č. 10 – Trendový impuls, klesající [2, s. 19]

Pro správné určení impulsních vln je nezbytné znát určitá definovaná **pravidla, která musí vlna typu impuls splňovat**. Jsou jimi [2, s. 19]:

- 1) Vlna 2 nikdy nevstupuje do zóny vlny 1.
- 2) Nejkratší vlnou nikdy není vlna 3.
- 3) Vlna 4 se nikdy nepohybuje do zóny vlny 1, jinak řečeno, žádná část vlny 4 není totožná s vlnou 2.

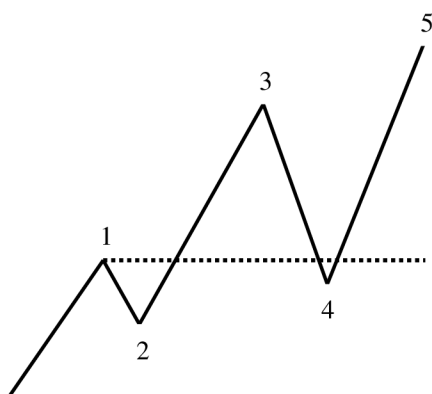
Nejsou-li tyto zásady u vlny dodrženy, nemůže se jednat o impuls, ale o jinou vlnovou formaci [2, s. 19]. Pro lepší přiblížení této problematiky je první a třetí výše zmíněné pravidlo dále graficky znázorněno pomocí obrázků.

Obr. č. 11 [2, s. 19] již demonstruje první pravidlo pro rostoucí impuls. Stejné pravidlo pro impuls klesající by bylo možné znázornit zrcadlově obráceně.



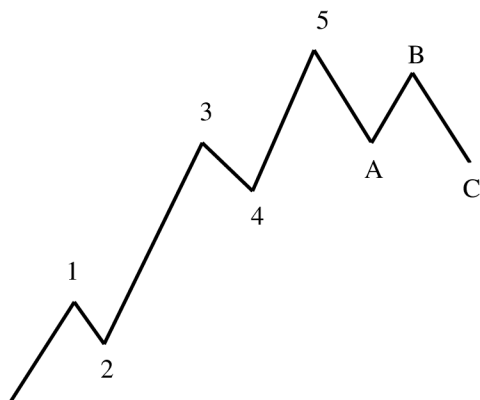
Obr. č. 11 – Vlna 2 se nikdy nepohybuje do zóny vlny 1 [2, s. 19]

Třetí pravidlo také při rostoucím impulsu, které lze pro opačný a tedy klesající impuls opět znázornit zrcadlově obráceně, zachycuje Obr. č. 12 [2, s. 20].



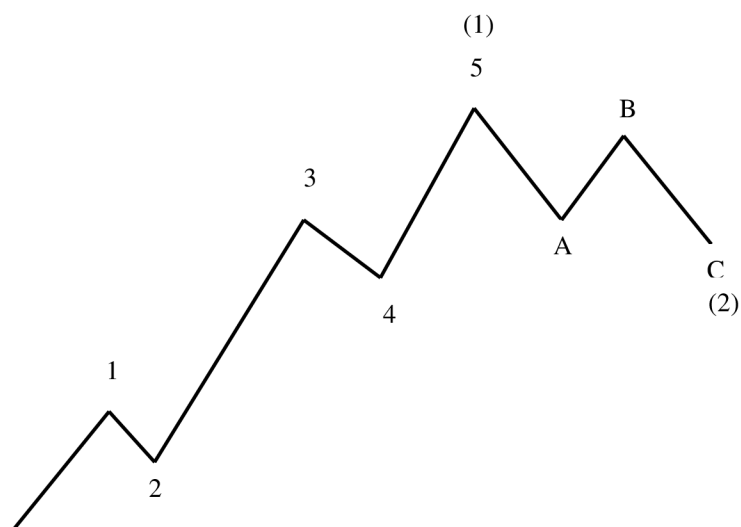
Obr. č. 12 – Vlna 4 nikdy neklesá do oblasti vlny 1 [2, s. 20]

Doplníme-li impuls znázorněný na Obr. č. 9 o korekční fázi tvořenou třemi vlnami označenými A, B, C, získáme základní motiv, který se na finančních trzích v časových řadách finančních entit v různém měřítku opakuje. Dokážeme-li daný motiv správně rozeznat, budeme také schopni určit budoucí cenový pohyb a případné otočení trendu. Popsaný trendový impuls s korekční fází je ilustrován pomocí Obr. č. 13 [2, s. 20].



Obr. č. 13 – Trendový impuls s korekční fází [2, s. 20]

Pomocí Obr. č. 14 [2, s. 21] je možné vysvětlit a graficky prezentovat stupně vln. Je zde patrné, že pětivlnová formace tvořená vlnami 1–5 je v rámci Elliottovy hierarchické struktury vlnou (1) vyššího stupně a formace A–C vlnou (2). Podobně lze postupovat také ke stupňům nižším. Vlna 1 (pětivlnové formace) tak může být tvořena pěti, nebo třemi vlnami o jeden stupeň nižšího stupně. [2, s. 20–21]



Obr. č. 14 – Trendový impuls s korekční fází jako součást vlny vyššího stupně [2, s. 21]

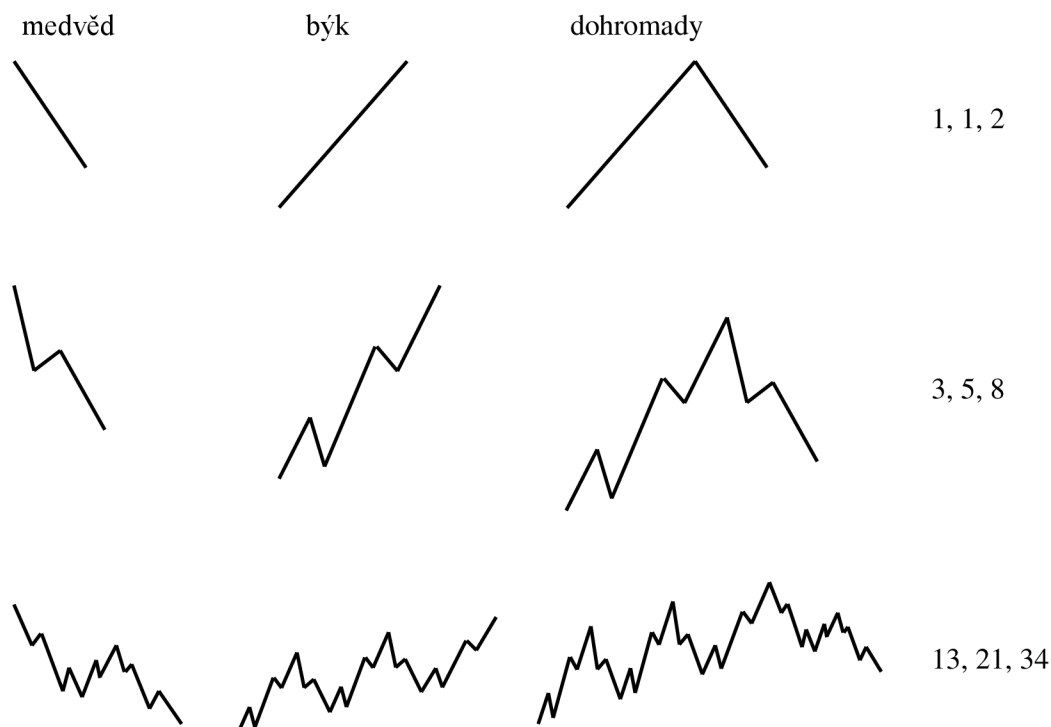
Seskupování vln do systému pěti a tři má své opodstatnění, které je v [2, s. 21] formulováno následovně: „Pokud má být dosaženo pokroku v určitém směru (trendu) a současně existuje kolísání (princip akce a reakce), pak nemůže existovat pouze vlna jediná, protože neobsahuje kolísání. Třívlnový princip obsahuje v sobě kolísání, ale nemusí obsahovat pokrok – trend (jsou-li tři vlny stejné velikosti a jedna z nich opačného trendu). Pouze pětivlnová formace v sobě zahrnuje jak kolísání, tak i trend (pravděpodobnost, že by se všech pět vln vzájemně vyrušilo, je malá).“

4.2.3 Matematické vztahy

Fibonacciho posloupnost

Leonardo Fibonacci da Pisa byl italský matematik, který znovuobjevil posloupnost čísel, jež po něm byla následně pojmenována. Fibonacciho posloupnost je definována jako rostoucí posloupnost čísel 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34 a dále až do nekonečna, která je řešením takto formulovaného problému: Kolik párů králíků umístěných v uzavřené oblasti je možné zplodit v jednom roce z jednoho páru, jestliže každý pár porodí nový pár každý měsíc počínaje druhým měsícem? Bližším pohledem na uvedenou posloupnost zjistíme, že součet dvou sousedních čísel určuje následující číslo posloupnosti. [2, s. 41]

Souvislost Elliottových vln a Fibonacciho posloupnosti znázorňuje Obr. č. 15 [2, s. 43]. Z něj pomocí grafického vyjádření vln vidíme, že tyto fungují na stejném matematickém základě. Elementární, dále nedělitelná impulsní vlna je přímka růstu. Nejjednodušší korekční vlnu představuje přímka poklesu. Dohromady tvoří dvě linie a tedy posloupnost 1, 1, 2. Korekční fáze se skládá ze tří vln, impuls je tvořen pětivlnovou formací. Získaná posloupnost je 3, 5, 8. Obdobně by bylo možné pokračovat dále a získat tak další čísla přesně odpovídající Fibonacciho posloupnosti čísel. [2, s. 43]

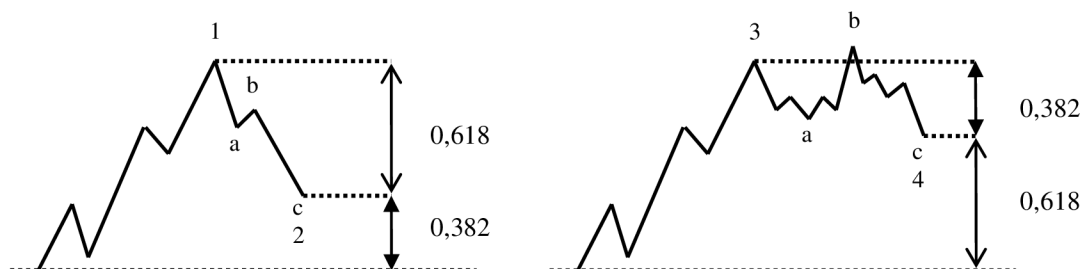


Obr. č. 15 – Elliottovy vlny a Fibonacci [2, s. 43]

Zlatý poměr

Vydělíme-li mezi sebou dvě sousední čísla Fibonacciho posloupnosti (nižší číslo vyšším), získáme poměr 0,618 (zmíněné však neplatí zcela pro první čísla posloupnosti). Mezi střídavými čísly – ob jedno číslo v posloupnosti, je poměr přibližně 0,382. Číslo 0,618 je pak známo jako zlatý řez, či zlatý poměr. Výskyt Fibonacciho čísel a zlatého poměru v přírodě je vysvětlením, proč poměr 0,618 k 1 je tak půvabný v umění. Člověk tento obraz do umění promítá, neboť jej vidí v přírodě. Ta užívá zlatý poměr ve svých stavebních prvcích, jakými je například DNA v buňce či struktura rostlinstev. Z rozsáhlosti existence Fibonacciho čísel v přírodě a umění, pak plyne také možnost používat tato čísla pro kvantifikaci společenských procesů včetně cenových pohybů na akciových či jiných trzích. [2, s. 41–42]

Teorie Elliottových vln poměrů mezi Fibonacciho čísly také využívá. Na základě zkušeností analytiků bylo prokázáno, že ostré korekce směřují k 61,8% velikosti předchozí vlny, zvláště pokud se jedná o vlnu 2 impulsu – jak je znázorněno vlevo na Obr. č. 16 [2, s. 44]. Pravá část téhož obrázku představuje šikmé korekce, které bývají 38,2% předchozí impulsní vlny, především jsou-li vlnou 4. [2, s. 43–44]



Obr. č. 16 – Poměr dvou sousedních vln [2, s. 44]

4.2.4 Pojednání o příčinách vzniku Elliottových vln

Kapitálový trh je dle [3, s. 1186] ekonomickou soustavou se složitou strukturou, mezi jejíž prvky patří mimo jiné obchodníci s velmi heterogenními vlastnostmi i chováním. Tito mají různý investiční horizont, na trh vstupují z odlišných důvodů, liší se svými názory, ochotou riskovat, množstvím a úrovní informací a také je charakterizuje různá úroveň racionálního jednání. Vzhledem k heterogenitě charakteristik tak není možné, dle stejného zdroje, vytvořit věrohodné matematické teorie pro popis chování kapitálového trhu.

Existuje však jeden aspekt, který je důvodem, proč pro úspěšnou předpověď budoucího vývoje určité finanční entity na kapitálovém trhu není matematických teorií zapotřebí.

Stěžejní je zde tendence lidí – obchodníků se shlukovat a tvořit dav. Chování skupiny nebo davu je nevyhnutelnou součástí lidského bytí. Davy vznikají na základě existence stejného přesvědčení a kvůli ochraně před přesvědčením opačným. Trhy tedy kolísají právě díky dynamice davu. V průběhu výrazného tržního trendu mají investoři tendenci dělat stejné věci ve stejnou dobu a tím získávat psychologickou podporu. Výsledkem faktu, že většina investorů jde „jedním směrem“, je zvrát cen, přičemž v okamžiku, kdy tento nastane, stojí tito investoři na špatné cestě. Zmíněné davy na finančních trzích jsou spíše psychologickým fenoménem, nemusí tak být nutně fyzicky shromážděné. Aktuální a potenciální účastníci jsou na sebe napojení a vzájemně se ovlivňují přes národní i mezinárodní komunikační sítě (noviny, televize, telefony či zprávy z trhů přímý kontakt nahrazují). Pokud tedy přijmeme uvedený předpoklad, že chování jednotlivce je do určité míry ovlivněno potřebou se družít

a získávat souhlas ostatních, můžeme se na veškeré ekonomické a finanční chování dívat jako na uspořádané. Nejisté chování jedince tak přechází v jasné chování davu, jehož výsledkem je snadněji vysvětlitelná předpokladatelná ekonomická a finanční aktivita. [12, s. 7, 71]

Tohoto faktu využívá teorie Elliottových vln. Cenové grafy finančních entit totiž lze v konečném důsledku považovat právě za odraz kolektivního chování obchodníků, které je ovlivněno iracionalitou a emocemi, jež se v daných grafech objevují ve vlnách [13]. Právě tyto opakující se vlny ve své práci podrobně popsal R. N. Elliott. Jeho teorie vychází z předpokladu, že vývoj emocí davů od optimismu k pesimismu a zase zpět, má tendenci se vyvíjet neustále stejným způsobem a vytvářet tak podobné vlnové struktury, čímž je možné pohyb na kapitálovém trhu predikovat. Charakter každé vlny v Elliottově teorii je tak integrální částí odrazu lidské psychologie, kterou tato vlna představuje. [2, s. 38]

Sám autor vlnové teorie Ralph Nelson Elliott již v roce 1935 řekl, že tyto vlny nedělají chyby, chybná je jen jejich interpretace [2, s. 17].

5 ANALÝZA PROBLÉMU

Základ pro další zpracování diplomové práce v oblasti analýzy deterministického chaosu byl vystavěn především na pojmové soustavě a komplexním vymezení dané problematiky v knize prof. Janička [3], se kterou se autorka ztotožňuje. Konkrétní metody, které budou dále použity pro řešení nepřímého problému deterministického chaosu, jsou popsány v následující kapitole.

Aby bylo možné interpretovat výsledky predikce určené pomocí teorie Elliottových vln a tedy řešit druhý dílčí problém, byly v předchozím textu nastíněny také základní Elliottovy myšlenky.

Domnívám se, že lze oprávněně konstatovat, že hlavní problém, tak jak byl formulovaný v kapitole 3, nebyl dosud řešen. Předkládaná diplomová práce staví do konfrontace teorii chaosu a teorii Elliottových vln, a to s cílem zjistit, zda mezi nimi v oblasti predikce nastane shoda, či nikoli, což lze považovat za novost.

Existuje celá řada dostupných příspěvků, které se zabývají některým z kvantifikátorů chaosu. Ať už se jedná o Hurstův exponent, Ljapunovův exponent či jiný kvantifikátor, na jehož základě je možné na výskyt deterministického chaosu usuzovat. Na portálech věnovaných finanční sféře pak lze nalézt příspěvky, které demonstrují využití teorie Elliottových vln. Ačkoli styčná plocha mezi oběma teoriemi vede přes fraktály, dosud nebylo komplexně pojednáno o vzájemných interakcích obou teorií. Žádný z autorů prací, které se zabývají analýzou deterministického chaosu, nenavázal na získané výstupy a nerozšířil svoji práci o predikční část tak, aby dané výsledky prakticky potvrdil, či vyvrátil. Téma diplomové práce je tak možné považovat za originální a nové.

Pro řešení diplomového úkolu byl využit tabulkový procesor Microsoft Excel, ve kterém byly provedeny úpravy dat a následně také všechny výpočty a grafy týkající se odhadu Hurstova exponentu. Odhad Ljapunovova exponentu pak byl realizován v prostředí programu Matlab (využíván byl OpenTSTOOL toolbox). Zde hlavním úskalím nebylo samotné zvládnutí práce se softwarem, nýbrž dohledání popisů metod, které tento software k výpočtu používá, aby bylo možné jednotlivé dílčí výstupy získané v podobě grafů správně interpretovat. Predikce Elliottových vln dále vychází z řešení prostřednictvím programu Elwave.

Obsahově je práce nastavena tak, aby vymezený problém byl řešitelný a mohly tedy být naplněny veškeré stanovené cíle.

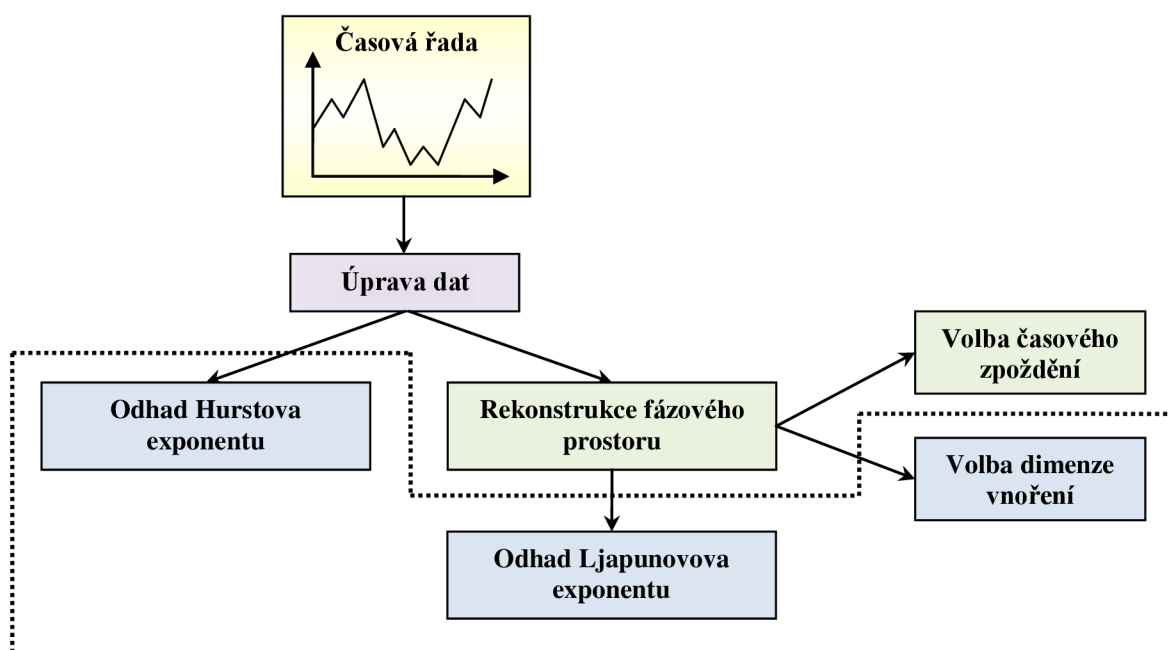
6 METODIKA ŘEŠENÍ

Řešení vymezeného problému se skládá ze tří dílčích částí:

1. *analýzy výskytu deterministického chaosu u zkoumané finanční entity,*
2. *predikce finanční entity pomocí Elliottových vln,*
3. *porovnání výstupů poskytnutých teorií chaosu a Elliottovou vlnovou teorií v oblasti predikce (verifikace hypotézy o shodě těchto výstupů).*

6.1 ANALÝZA VÝSKYTU DETERMINISTICKÉHO CHAOSU

V první části, tj. analýze potenciálního výskytu deterministického chaosu, která představuje nepřímý problém, bude postupováno podle algoritmu znázorněného na Obr. č. 17.



Obr. č. 17 – Schéma postupu při řešení nepřímého problému deterministického chaosu

- 1) První krok představuje získání dat pro analýzu ve formě časové řady. Požadavek zde byl kladen především na délku této řady, přičemž bylo nutné získat 4097 jejích po sobě jdoucích hodnot.
- 2) Druhým krokem je úprava dat, v rámci níž je původní časová řada převedena na řadu výnosů prostřednictvím vzorce
[14, s. 91]
- 3) S takto vytvořenou časovou řadou je již následně pracováno jak při odhadu Hurstova, tak i Ljapunovova exponentu. Hurstův exponent je možné získat přímo z této řady, odhadu Ljapunovova exponentu musí předcházet rekonstrukce fázového prostoru (ta

spočívá ve volbě časového zpoždění a dimenze vnoření). Modrou barvou a ohraničením jsou ve schématu vyznačeny kvantifikátory chaosu. V této fázi práce již ke zvoleným kvantifikátorům – Hurstovu a Ljapunovovu exponentu bylo možné přidat další prvek, na jehož základě lze odhalit chaotickou strukturu časové řady. Jak bude ukázáno v dalším textu, tak již při samotné volbě vhodné dimenze vnoření lze pomocí Caovy metody odlišit chaotickou řadu od náhodné.

Hurstův exponent – R/S analýza

V roce 1951 britský hydrolog H. E. Hurst (1900–1978) vynalezl metodu, dnes známou jako R/S analýza (Rescaled Range Analysis), pomocí níž je možné odlišit časové řady obsahující dlouhodobý nepravidelný cyklus od náhodných [15, s. 15]. Jinak řečeno, lze takto určit míru chaotičnosti časové řady a zjistit, zda je tato fraktální, či normálně rozložená [2, s 10].

Obecný postup R/S analýzy k odhadu Hurstova exponentu je následující [14, s. 91], [8, s. 118–119]:

- 1) Začínáme s časovou řadou uzavíracích cen určité finanční entity $\{P_1, P_2, P_3, \dots, P_M\}$ s délkou M , která značí M pozorování (hodnot).
- 2) Původní časovou řadu převedeme na řadu logaritmických výnosů prostřednictvím rovnice

Takto získaná časová řada má pak délku N , která odpovídá $M - 1$.

- 3) Časovou řadu výnosů rozdělíme do m sousedících, nepřekrývajících se intervalů o délce n , přičemž platí vztah $N = mn$. Pro každý z intervalů dále vypočítáme:

- 4) Průměrnou hodnotu ($j = 1, 2, \dots, m$)

– —

- 5) Časovou řadu kumulativních odchylek od průměru ($k = 1, 2, \dots, n$)

–

- 6) Rozpětí kumulativních odchylek

7) Směrodatnou odchylku

$$\frac{\quad}{\quad}$$

8) Hodnotu R/S

$$\frac{\quad}{\quad}$$

9) Posledním krokem je pak výpočet průměrné hodnoty R/S pro interval délky n

$$\frac{\quad}{\quad}$$

10) Uvedené kroky se opakují pro další hodnoty n (značící délku intervalu), dokud není dosaženo $n = N/2$. Poté je již možné odhadnout Hurstův exponent H pomocí lineární regrese

,

v níž $\log(n)$ je nezávisle proměnná (vynášena na osu x grafu) a $\log(R/S)_n$ je závisle proměnná (vynášena na osu y grafu), c je konstanta. Směrnice přímky pak tvoří odhad Hurstova exponentu H .

Je-li hodnota Hurstova exponentu rovna 0,5, pak je časová řada normálně rozložená, neboli neobsahuje dlouhodobý paměťový cyklus. Blíží-li se naopak jeho hodnota k 0 nebo 1, pak to značí, že časová řada dlouhodobý paměťový cyklus má. [4, s. 103]

Ljapunovův exponent

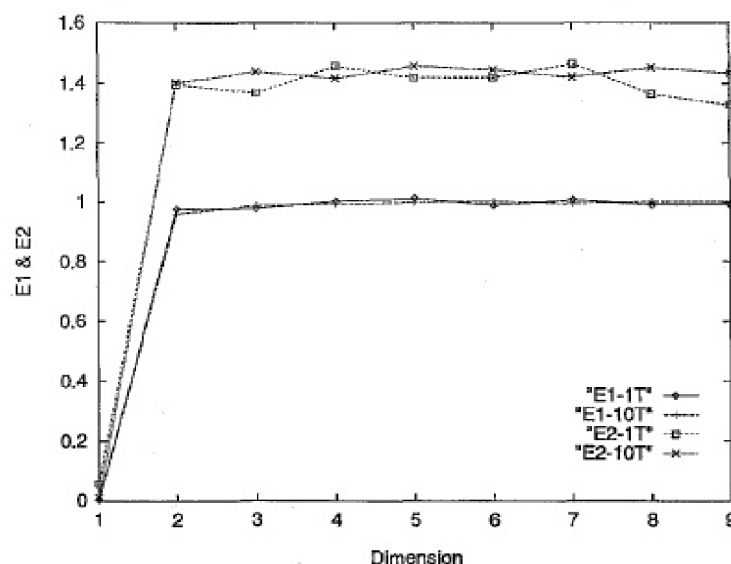
Odhadu největšího Ljapunovova exponentu předchází rekonstrukce trajektorie systému ve fázovém prostoru. Nejběžněji používanou metodou pro tuto rekonstrukci při analýze chaosu v časových řadách je metoda zpoždění (Method of Delays).

Metoda časových zpoždění vychází z předpokladu existence jednorozměrné časové posloupnosti, ze které je pomocí parametrů τ a m rekonstruován atraktor. Přičemž τ reprezentuje časové zpoždění (time lag) a m je tzv. vnořená dimenze (embedding dimension). Proces rekonstruovaný metodou zpoždění je tak reprezentován atraktorem v m -rozměrném fázovém prostoru. Je zjevné, že jeho správná rekonstrukce závisí na stanovení vhodného časového zpoždění i dimenze vnoření. [3, s. 991]

Volba časového zpoždění bude v rámci diplomové práce provedena **metodou vzájemné informace**. Míra vzájemné informace představuje průměrné množství informace,

kteřou je možné získat z hodnot náhodné veličiny X o hodnotách náhodné veličiny Y . Pro potřebu této práce a její další zpracování je postačující to, že jako vhodná délka časového zpoždění pro rekonstrukci atraktoru ve fázovém prostoru se doporučuje taková hodnota τ , v rámci níž míra vzájemné informace dosáhne prvního minima. [16, s. 307–308]

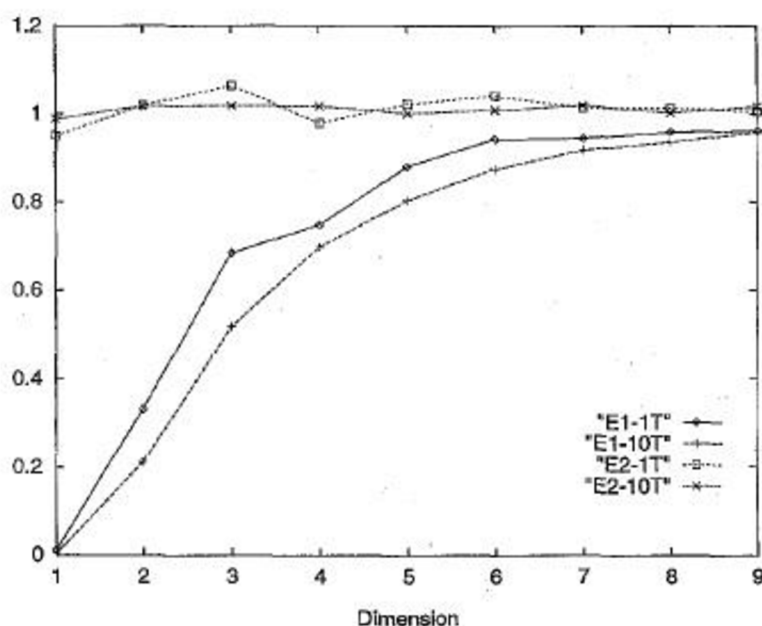
Volba dimenze vnoření (minimal embedding dimension) bude určena **Caovou metodou**. Tato metoda má oproti jiným řadu výhod. Patří mezi ně skutečnost, že kromě časového zpoždění τ neobsahuje žádné jiné subjektivní parametry, její výsledek není dále silně závislý na počtu dat, která jsou k dispozici a co je velmi důležité, dokáže jasně odlišit deterministickou a stochastickou časovou řadu. Pro volbu dimenze vnoření m využívá parametr $E1$. Pokud je zkoumaná časová řada chaotická, přestává se hodnota $E1$ pro určitou dimenzi vnoření měnit (dosáhne nasycení), tato je pak hledanou minimální dimenzí vnoření. Pro náhodné časové řady by tedy $E1$ daného nasycení neměla nikdy dosáhnout. Může však nastat situace, kdy se $E1$ přestane pro určitou dimenzi vnoření měnit, ačkoli je časová řada náhodná. Z toho důvodu Caova metoda používá také druhý parametr $E2$, na jehož základě je možné deterministickou a náhodnou časovou řadu odlišit. Pro náhodná data, v nichž budoucí hodnoty nijak nezávisí na hodnotách minulých, bude $E2$ dosahovat přibližně hodnoty 1 pro jakoukoli dimenzi vnoření. Naopak pro data deterministická vždy musí existovat určitá dimenze vnoření, pro kterou $E2$ bude různé od jedné. Vzhledem k uvedeným skutečnostem doporučuje autor této metody výpočet $E1$ i $E2$. [17]



Obr. č. 18 – Průběh hodnot $E1$ a $E2$ pro časovou řadu generovanou Hénonovým chaotickým atraktorem [17, s. 45]

Obr. č. 18 [17, s. 45] na předchozí straně je znázorněním průběhu hodnot E1 a E2 v závislosti na dimenzi vnoření pro časovou řadu generovanou chaotickým Hénonovým atraktorem. „E1-1T“ a „E1-10T“ značí, že bylo použito 1000 respektive 10 000 hodnot časové řady. Stejná je interpretace pro „E2-1T“ a „E2-10T“. Je patrné, že minimální dimenze vnoření je 2 a dosažený výsledek není ovlivněn počtem použitých dat.

Jiná je situace pro náhodnou časovou řadu na Obr. č. 19 [17, s. 46]. Caova metoda dokázala pomocí průběhu hodnot E2 odlišit tuto řadu od deterministické, neboť pro jakoukoli dimenzi vnoření jsou hodnoty E2 přibližně jedna a nemají žádnou vazbu k hodnotám E1.

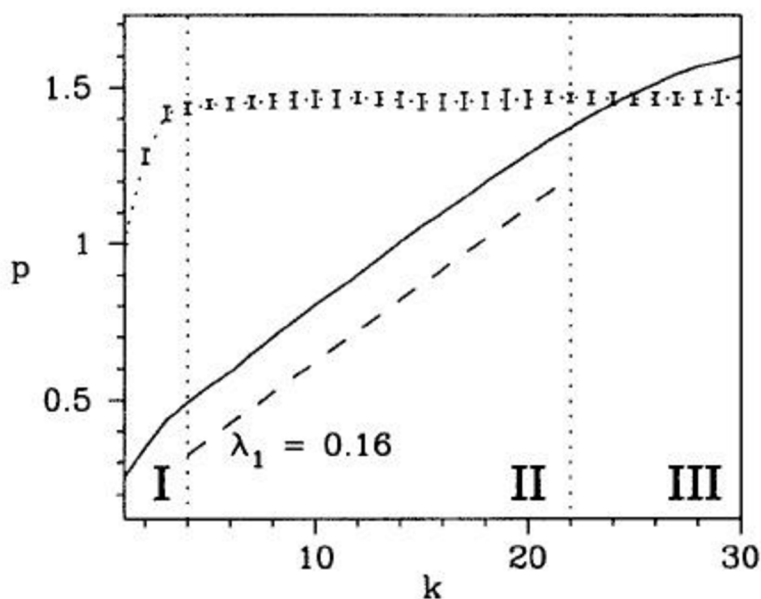


Obr. č. 19 – Průběh hodnot E1 a E2 pro náhodnou časovou řadu [17, s. 46]

Nyní již bude pojednáno o samotné problematice odhadu *Ljapunovova exponentu*, z jehož kladné hodnoty je možné usuzovat na výskyt deterministického chaosu u zkoumané entity. Chování nelineárních dynamických systémů lze charakterizovat podle chování dvou vzájemně blízkých trajektorií, které se od sebe v chaotické oblasti vzdalují, tedy divergují [3, s. 920]. Největší Ljapunovův exponent, který je v rámci diplomové práce posledním stanoveným kvantifikátorem chaosu, bude z grafu odhadnut na základě metody uvedené v [18, s. 223–224], která tento divergentní pohyb trajektorií dokáže odhalit. Daný graf je pak znázorněním závislosti chyby predikce p (prediction error) na počtu časových kroků k , přičemž tuto závislost je možné rozdělit do tří fází. První fáze je pouze přechodná, sousední trajektorie v ní konvergují ke směru, který odpovídá největšímu Ljapunovovu exponentu. Během druhé fáze již vzdálenost mezi trajektoriemi narůstá exponenciálně. Pokud je tato fáze dostatečně dlouhá, objeví se v grafu lineární segment, jehož směrnice je odhadem největšího

Ljapunovova exponentu. Třetí, poslední fáze se vyznačuje tím, že vzdálenost blízkých trajektorií narůstá pomaleji než exponenciálně. Tato metoda tedy umožňuje nejen odhad zmíněného exponentu, ale také poskytuje možnost verifikace exponenciálního růstu vzdáleností k rozlišení deterministického chaosu od stochastického procesu, v rámci něhož dochází k neexponenciálnímu rozdělení trajektorií. [18, s. 223–224]

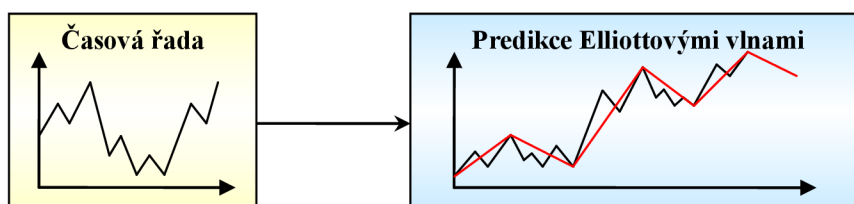
Obr. č. 20 [18, s. 224] je příkladem použití uvedené metody pro odhad Ljapunovova exponentu pro data generovaná chaotickým Colpittsovým oscilátorem. Zřejmý je z něj lineární segment, na jehož základě je odhadnut Ljapunovův exponent. Jeho kladná hodnota správně odhalila chaotickou podstatu časové řady.



Obr. č. 20 – Příklad odhadu největšího Ljapunovova exponentu pro data generovaná chaotickým Colpittsovým oscilátorem [18, s. 224]

6.2 PREDIKCE POMOCÍ ELLIOTTOVÝCH VLN

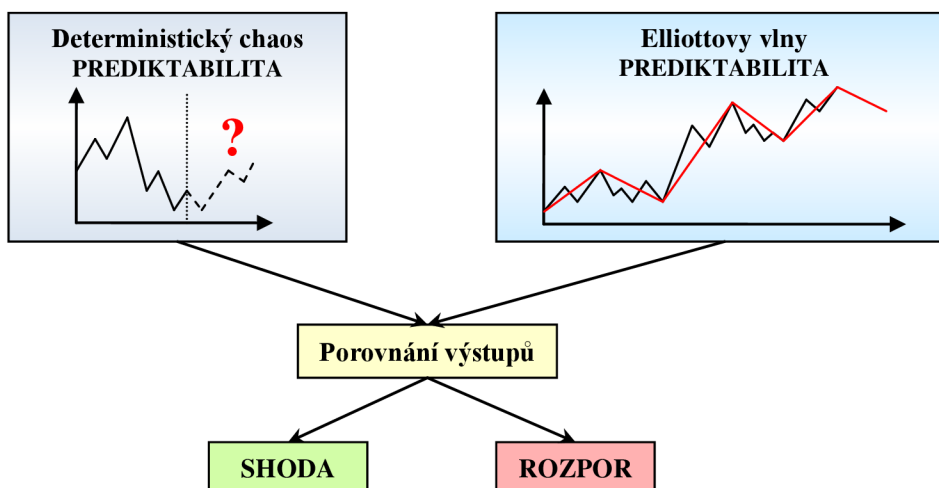
Druhá část řešení vymezeného problému bude věnována predikci finanční entity pomocí Elliottových vln. Obr. č. 21 je grafickou interpretací zmíněného. Časová řada s délkou 4097 hodnot tedy bude podrobena analýze, jejímž výstupem je zmíněná predikce.



Obr. č. 21 – Schéma postupu při predikci Elliottovými vlnami

6.3 POROVNÁNÍ VÝSTUPŮ TEORIE CHAOSU A ELLIOTTOVY VLNOVÉ TEORIE

Postup řešení závěrečné, stěžejní části diplomové práce, která odpovídá na otázku, zda mezi teorií chaosu a Elliottovou vlnovou teorií nastane v oblasti predikce shoda, je zobrazen na Obr. č. 22. Jeho popis je následující. Na základě analýzy deterministického chaosu (jeho potvrzení, či vyvrácení) bude rozhodnuto o možnostech predikce. Následně bude trend predikovaný Elliottovými vlnami porovnán se skutečně dosaženým vývojem dané časové řady, čímž bude možné vyslovit závěry o přesnosti predikce (shodě predikce a reálných hodnot časové řady). Takto získané výstupy teorie chaosu na straně jedné a teorie Elliottových vln na straně druhé budou vzájemně porovnány. Závěrem pak bude zjištěna jejich shoda, či rozpor, čímž bude naplněn hlavní cíl diplomové práce.



Obr. č. 22 – Schéma postupu při porovnání výstupů poskytnutých teorií chaosu a Elliottovou vlnovou teorií

7 REALIZACE ŘEŠENÍ A PREZENTACE VÝSLEDKŮ

7.1 VYMEZENÍ PROBLÉMŮ

V textu této části diplomové práce bude v logických souvislostech popsáno vlastní zkoumání vymezeného problému. Řešena bude *případová studie* s následující strukturou:

- 1) ***Vymezení problému č. 1 – otázka výskytu deterministického chaosu u finanční entity***
 - Vstupní údaje do procesu řešení
 - Použitá testová kritéria – Hurstův a největší Ljapunovův exponent
 - Odhad Hurstova exponentu
 - Vlastní řešení + prezentace výsledků
 - Odhad největšího Ljapunovova exponentu
 - Vlastní řešení + prezentace výsledků
- 2) ***Vymezení problému č. 2 – otázka predikce finanční entity pomocí Elliottových vln***
 - Vstupní údaje do procesu řešení
 - Vlastní řešení + prezentace výsledků
- 3) ***Vymezení problému č. 3 – otázka verifikace hypotézy o shodě výstupů teorie chaosu a Elliottových vln v oblasti predikce***
 - Vstupní údaje do procesu řešení
 - Vlastní řešení + prezentace výsledků

První dva výše zmíněné problémy korespondují s dílčími problémy formulovanými v kapitole 3. Realizace jejich řešení a interpretace výsledků je východiskem pro třetí z problémů, který reprezentuje problém hlavní prvotně formulovaný taktéž v kapitole 3 diplomové práce. Uvedeným postupem zkoumání budou postupně naplněny vytyčené cíle.

Krokem, který předchází realizaci případové studie, je *zajištění věrohodnosti výsledků* při řešení nepřímého problému deterministického chaosu. V případě odhadu Hurstova exponentu bude tedy pomocí R/S analýzy nejdříve zkoumána časová řada s normálním rozdělením a na základě výstupů (porovnáním dosaženého výsledku s teoreticky očekávaným) bude následně rozhodnuto, zda lze pomocí této metody získat věrohodné výsledky. Co se týče Ljapunovova exponentu, je pro jeho odhad nejprve potřeba zrekonstruovat atraktor ve fázovém prostoru. Zde se nabízí možnost pomocí Caovy metody nejen určit dimenzi vnoření, ale také odhalit chaotickou časovou řadu. Caově metodě bude proto podrobena nejdříve chaotická časová řada generovaná Colpittsovým oscilátorem

a následně také časová řada s normálním rozdělením. Stejně jako u Hurstova exponentu bude cílem zjistit, zda metoda správně odliší chaotickou řadu od náhodné. Závěrem bude demonstrován odhad největšího Ljapunovova exponentu u zmíněné chaotické časové řady a nemožnost jeho určení u řady náhodné.

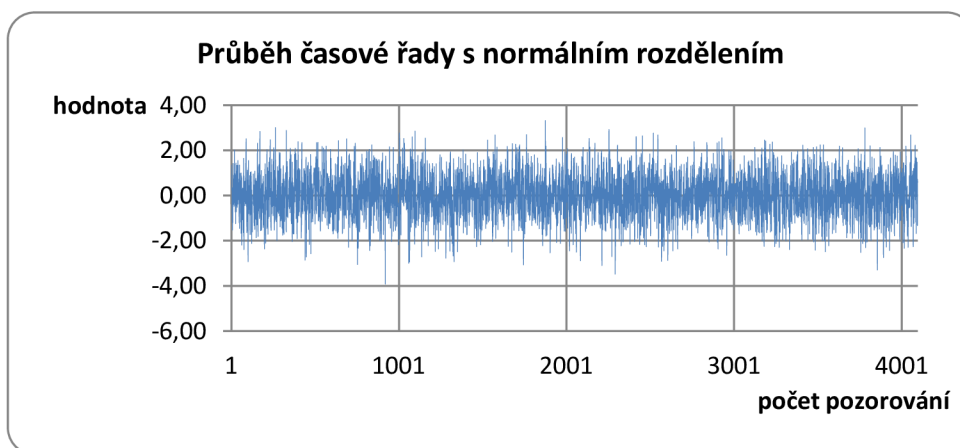
7.2 ZAJIŠTĚNÍ VĚROHODNOTI VÝSLEDKŮ POUŽITÝCH METOD

7.2.1 Hurstův exponent

Hurstův exponent byl zvolen jako jeden z kvantifikátorů deterministického chaosu. Na základě odhadu jeho hodnoty bude usuzováno na potenciální výskyt. Je tedy nezbytné, aby prostřednictvím R/S analýzy byly získány skutečně relevantní výstupy. Pouze tak lze zaručit, že konečné rozhodnutí nebude nepřesnostmi použitých metod zkresleno.

Na základě postupu uvedeném v kapitole 6 bude tedy R/S analýze podrobena časová řada s normálním rozdělením, přičemž metoda bude považována za přesnou, pokud výstupem bude odhad Hurstova exponentu $H = 0,5$. Hodnotu 0,5 lze tedy pro tuto část práce považovat za verifikační standard.

V prostředí programu Matlab byla vygenerována časová řada s normálním rozdělením o stejné délce, jaká bude následně použita při řešení případové studie, a tedy 4096 hodnot. Její průběh je zobrazen níže na Obr. č. 23.



Obr. č. 23 – Průběh hodnot vygenerované normálně rozdělené časové řady

Délka časové řady byla volena s ohledem na to, že ji v rámci R/S analýzy bylo nezbytné rozdělit do určitého počtu sousedících a nepřekrývajících se intervalů m o určité délce n . Délky jednotlivých intervalů byly stanoveny jako mocniny čísla 2, čímž byla výchozí časová řada rozdělena postupně na 256 intervalů o délce 16, 128 intervalů délky 32,

64 intervalů délky 64, 32 intervalů délky 128 a takto bylo postupováno dále, až bylo dosaženo rozdělení časové řady do 2 intervalů o délce 2048 hodnot.

V první fázi výpočtu byla tedy časová řada rozdělena na zmíněných 256 intervalů, přičemž každý z nich byl tvořen 16 hodnotami. Pro jednotlivé intervaly byla dále spočítána průměrná hodnota, časová řada kumulativních odchylek od průměru, rozpětí kumulativních odchylek a další dle algoritmu R/S analýzy uvedeném v kapitole 6.1 diplomové práce. Ze získaných 256 hodnot veličiny R/S byla následně počítána její průměrná hodnota pro danou délku $n = 16$ dle následujícího vzorce

—

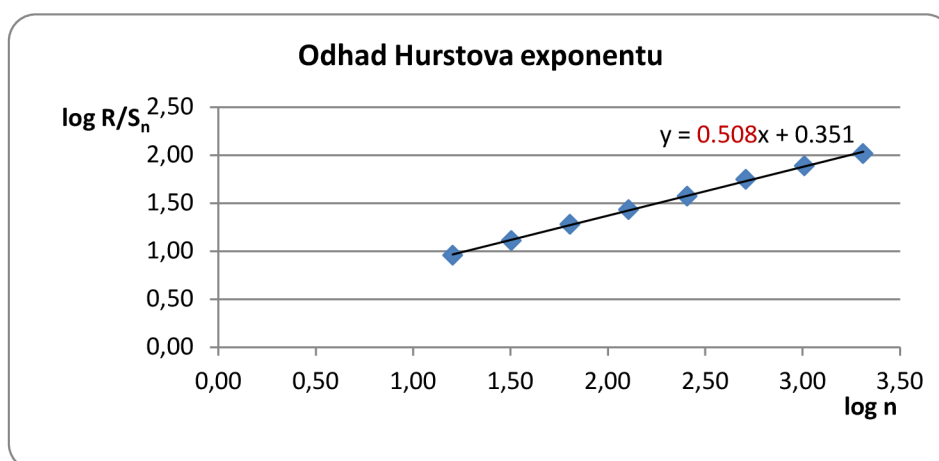
Dané kroky byly opakovány také pro další stanovené délky intervalů n , čímž byla získána níže uvedená tabulka hodnot.

Tab. č. 1 – Tabulka hodnot pro odhad Hurstova exponentu pro normálně rozdělenou časovou řadu

Počet intervalů m	Délka intervalu n	R/S_n	$\log(R/S)_n$	$\log n$
256	16	9.04	0.96	1.20
128	32	12.85	1.11	1.51
64	64	18.99	1.28	1.81
32	128	26.99	1.43	2.11
16	256	37.32	1.57	2.41
8	512	55.85	1.75	2.71
4	1024	77.25	1.89	3.01
2	2048	103.70	2.02	3.31

Promítnutím hodnot $\log(R/S)_n$ a $\log(n)$ do grafu můžeme pomocí lineární regrese odhadnout Hurstův exponent. Daný graf je uveden na následující straně diplomové práce.

Obr. č. 24 znázorňuje graf, na jehož základě lze Hurstův exponent odhadnout.



Obr. č. 24 – Odhad Hurstova exponentu pro normálně rozdělenou časovou řadu

Ze směrnice přímky lze vyčíst odhad hodnoty Hurstova exponentu 0,5, který značí, že analyzovaná časová řada není chaotická.

Analyzovaná časová řada je normálně rozdělená, není chaotická a neobsahuje tak ani dlouhodobý paměťový cyklus. Metodu R/S analýzy tedy můžeme hodnotit jako spolehlivou při odlišení deterministické a stochastické časové řady.

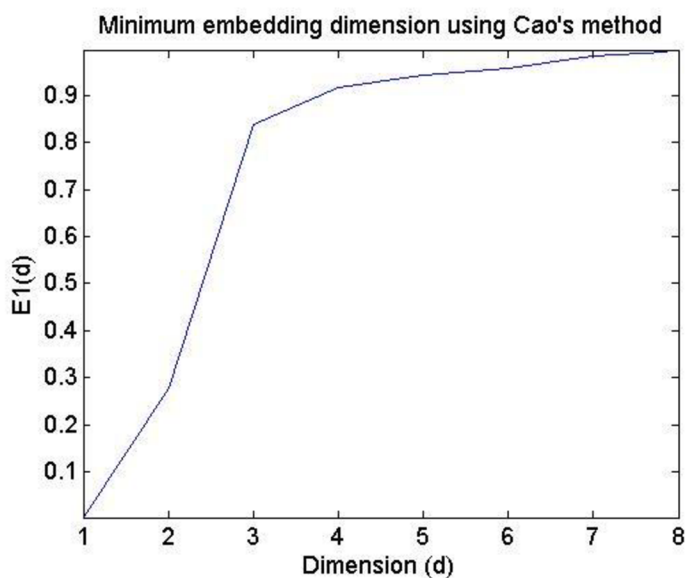
7.2.2 Ljapunovův exponent

Odhadu tohoto exponentu předchází rekonstrukce fázového prostoru. V rámci dané rekonstrukce, jak již bylo v předchozím textu naznačeno, je vhodné využít Caovu metodu nejen pro určení minimální dimenze vnoření, ale také k rozlišení chaotické časové řady od náhodné. První verifikace Caovy metody bude tedy zaměřena na to, zda tato dokáže správně určit výsledky pro časovou řadu generovanou chaotickým Colpittsovým oscilátorem. Jako druhá pak bude testována také časová řada s normálním rozdělením. Až na základě obdržných výsledků bude možné dále rozhodnout, zda lze prostřednictvím této metody získat relevantní podklady pro posouzení výskytu chaosu.

V posledním příkladu bude demonstrován odhad největšího Ljapunovova exponentu u zmíněné chaotické časové řady a také u řady náhodné. U časové řady náhodné by měla nastat situace, kdy v grafu nevznikne lineární segment, na jehož základě by bylo možné Ljapunovův exponent odhadnout. Pokud se tak stane, potvrdí se schopnost i této metody odlišit od sebe časové řady, které mají zcela odlišnou podstatu.

Caova metoda

V prostředí programu Matlab a jeho OpenTSTOOL toolboxu⁸ byly nejdříve stanoveny průběhy hodnot E_1 , E_2 v závislosti na dimenzi vnoření pro Colpittsův oscilátor. Na základě níže uvedeného grafu – Obr. č. 25, který je zobrazením průběhu parametru E_1 , je možné určit minimální dimenzi vnoření pro rekonstrukci atraktoru. Ke zlomu dochází v bodě, kde dimenze d nabývá hodnoty 3, čímž je také určena požadovaná minimální dimenze vnoření.



Obr. č. 25 – Minimální dimenze vnoření pro chaotický Colpittsův oscilátor

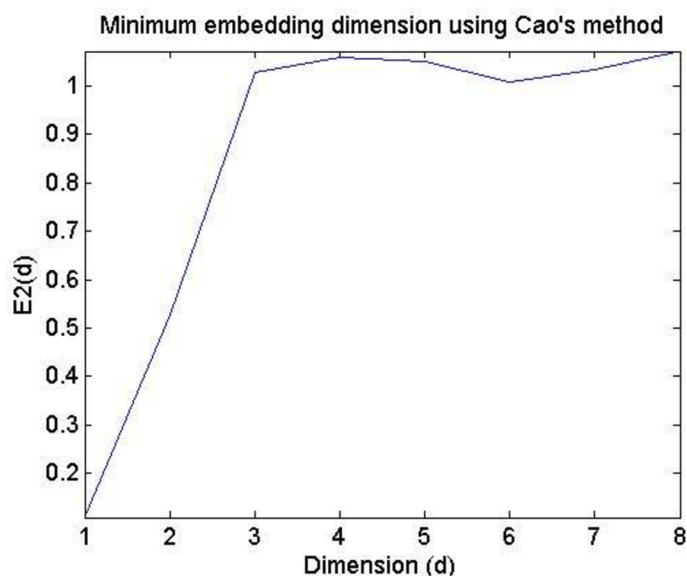
Řadou analýz však bylo zjištěno, že pouze fakt, že charakteristika E_1 pro určitou hodnotu dimenze dosáhne nasycení a přestane se tak se vzrůstající hodnotou dimenze měnit, není postačující pro to, aby bylo možné usuzovat na výskyt deterministického chaosu. Uvedené je tak odůvodněním toho, proč je nezbytné v rámci této analýzy zkoumat také vývoj parametru E_2 .

Pro náhodná data, v rámci nichž jsou budoucí hodnoty nezávislé na hodnotách minulých, bude E_2 přibližně 1 pro jakoukoli hodnotu dimenze vnoření. Pro data deterministická je E_2 na dimenzi vnoření závislá a nemůže tedy být pro jakékoli d konstantní.

Minimální dimenze vnoření pro Colpittsův oscilátor stanovená na základě průběhu hodnot E_1 je rovna číslu 3. Víme, že projevy chování oscilátoru jsou chaotické. Je-li metoda spolehlivá, charakteristika E_2 by tedy měla tento fakt potvrdit.

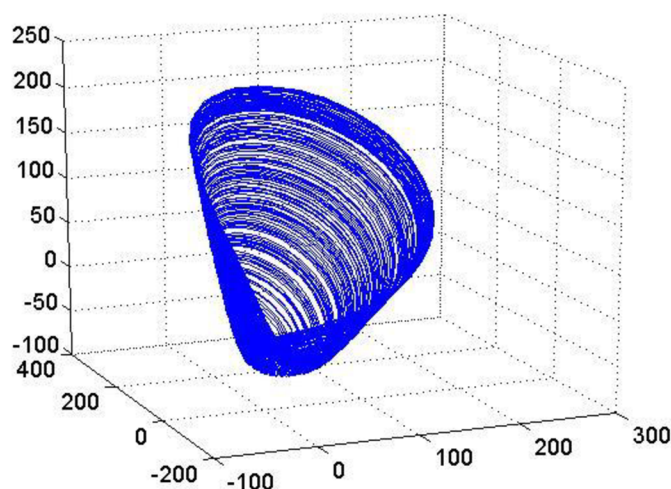
⁸ Pro práci s programem byl využíván OpenTSTOOL User Manual [19].

Prostřednictvím grafu – Obr. č. 26 lze prakticky potvrdit předchozí výstupy. Také pomocí průběhu hodnot parametru E_2 v závislosti na dimenzi vnoření se ukázala dimenze 3 jako optimální pro rekonstrukci atraktoru ve fázovém prostoru. Důležitým poznatkem je však především prokázání závislosti budoucích hodnot na hodnotách minulých. E_2 není pro jakoukoli zvolenou hodnotu dimenze konstantní, a tak lze konstatovat, že Caova metoda v tomto případě potvrdila existenci deterministického chaosu.



Obr. č. 26 – Průběh hodnot charakteristiky E_2 pro chaotický Colpittsův oscilátor

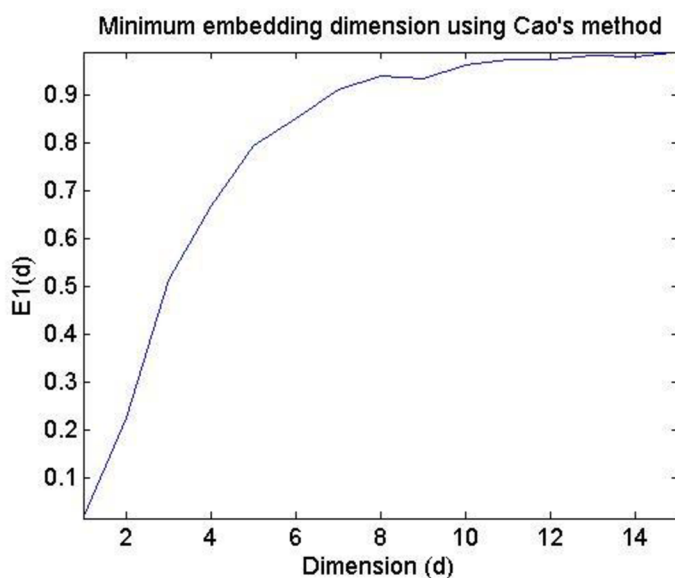
Jedním z nejzajímavějších výstupů, které řešení nepřímého problému deterministického chaosu poskytuje, je právě možnost rekonstrukce trajektorie systému ve fázovém prostoru. Určíme-li časové zpoždění a dimenzi vnoření na hodnotách 4 a 3, vypadá atraktor pro Colpittsův chaotický oscilátor takto – Obr. č. 27.



Obr. č. 27 – Atraktor chaotického Colpittsova oscilátoru

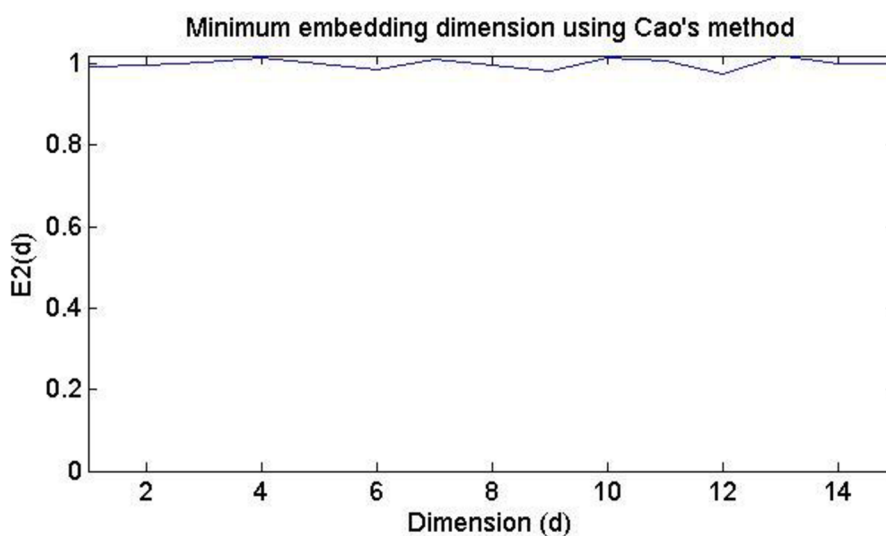
V dalším textu již bude stejným postupem, jakým byla analyzována časová řada generovaná chaotickým Colpittsovým oscilátorem, hodnocena také časová řada s normálním rozdělením.

Jako první byl stanoven průběh hodnot parametru $E1$, na jehož základě je možné určit minimální požadovanou dimenzi vnoření pro rekonstrukci atraktoru. Z grafu – Obr. č. 28 je patrné, že se tato rovná hodnotě 7. Zobrazovaný parametr nám však nic neříká o charakteru procesu, který danou časovou řadu generuje. Možnost rozhodnout, zda je zkoumaná časová řada chaotická, či náhodná, tak poskytuje až charakteristika $E2$.



Obr. č. 28 – Minimální dimenze vnoření pro časovou řadu s normálním rozdělením

Z průběhu hodnot charakteristiky $E2$, zobrazeném na Obr. č. 29, je velmi dobře vidět, že hodnoty $E2$ jsou pro jakoukoli dimenzi d přibližně 1.



Obr. č. 29 – Průběh hodnot charakteristiky $E2$ pro časovou řadu s normálním rozdělením

Caova metoda tak správně určila, že analyzovaná časová řada není chaotická, ale náhodná.

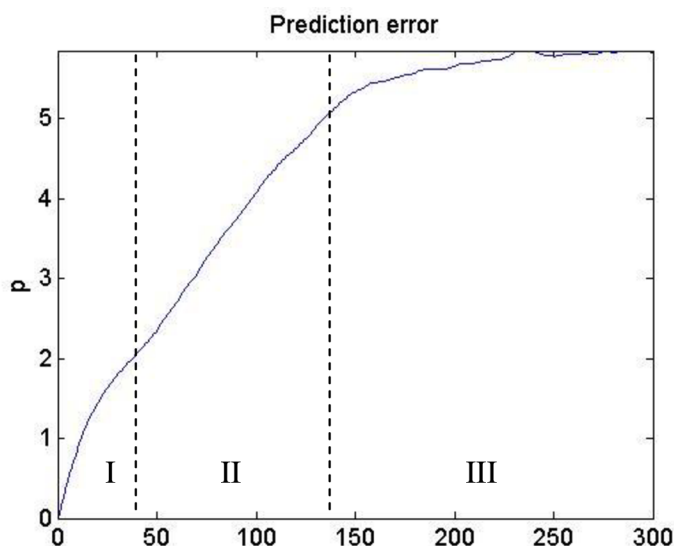
Zkoumáním výstupů, které Caova metoda poskytla při analýze chaotické a následně také normálně rozdělené časové řady se potvrdilo, že tato metoda dokáže dané časové řady správně odlišit.

Caova metoda v praxi dokáže odlišit náhodnou časovou řadu od chaotické.

Odhad Ljapunovova exponentu

Odhad největšího Ljapunovova exponentu v rámci diplomové práce vychází z přímé metody, která je založena na grafickém vyjádření vazby přírůstku času a chyby predikce. Přičemž závislost chyby predikce na čase může být rozdělena do tří fází. Pro odhad největšího Ljapunovova exponentu je však důležitá pouze fáze dvě. Ta je vyjádřením faktu, že vzdálenost mezi sousedními trajektoriemi exponenciálně narůstá, což je charakteristickým rysem chaotických procesů. Pokud je druhá fáze dostatečně dlouhá, objeví se v grafu lineární segment, jehož směrnice je odhadem největšího Ljapunovova exponentu.

Popsaný graf pro odhad Ljapunovova exponentu pro chaotický Colpittsův oscilátor je zobrazen na Obr. č. 30.

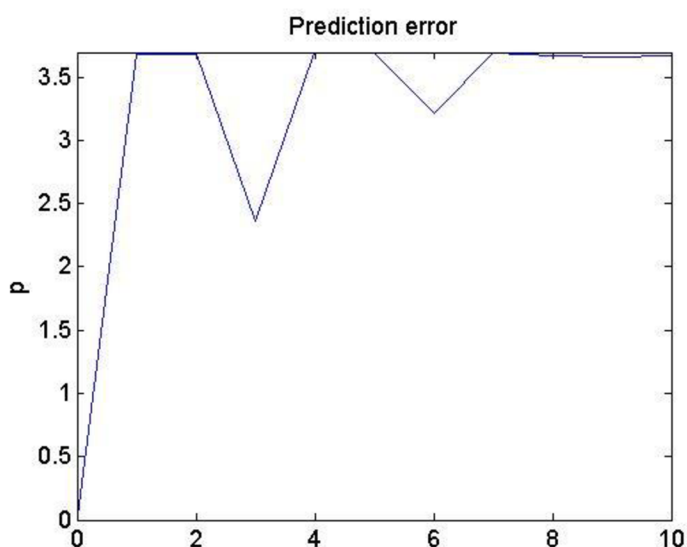


Obr. č. 30 – Graf závislosti chyby predikce na čase pro odhad Ljapunovova exponentu chaotického Colpittsova oscilátoru

Téměř ve střední části grafu (označené II) je dobře viditelný lineární segment, který je možné použít pro odhad největšího Ljapunovova exponentu.

Vznik lineárního segmentu je dále také verifikací výskytu deterministického chaosu, neboť tento se v grafu objeví jen tehdy, pokud dochází k exponenciálnímu růstu vzdáleností mezi vzájemně blízkými trajektoriemi.

Stejně zobrazení, uvedené na Obr. č. 31, pro normálně rozdělenou časovou řadu však nabízí jinou interpretaci. V žádné části grafu nevzniká lineární segment. Největší Ljapunovův exponent tak nelze nalézt a potvrzuje se fakt o normálním rozdělení časové řady.



Obr. č. 31 – Graf závislosti chyby predikce na čase pro odhad Ljapunovova exponentu pro normálně rozdělenou časovou řadu

Přímá metoda odhadu největšího Ljapunovova exponentu se ukázala jako spolehlivá nejen pro zmíněný odhad, ale také pro odlišení deterministické časové řady od náhodné.

Stať byla věnována zajištění věrohodnosti výsledků poskytnutých jednotlivými metodami, které jsou v práci aplikovány. Přesto, že se může tato část zdát příliš obsáhlá, tak se domnívám, že bez verifikace věrohodnosti metod by nebyla zajištěna relevantnost jakýchkoli dalších výstupů. Rozhodování o existenci deterministického chaosu na základě nijak nepodložených výsledků by tak nebylo možné považovat za důvěryhodné. Všechny metody však v praktické rovině potvrdily své teoretické aplikační možnosti.

7.3 PŘÍPADOVÁ STUDIE

Při volbě vstupních údajů nebyl relevantní výběr konkrétní finanční entity. Pro potřeby diplomové práce mohla být zvolena časová řada cen akcií stejně tak jako například časová řada cen indexů, jelikož u všech těchto finančních entit je stejná potenciální možnost výskytu deterministického chaosu a také shodná možnost predikovat jejich vývoj pomocí Elliottových vln. Jediným požadavkem určujícím konečnou volbu tak byla dostupnost dostatečně dlouhé posloupnosti dat.

Pro analýzy uvedené v následujícím textu byla vybrána časová řada cen akcií společnosti Apple Inc., přičemž data byla získána prostřednictvím serveru Yahoo! Finance [20], kde lze historická data stáhnout a dále s nimi pracovat.

7.3.1 Analýza výskytu deterministického chaosu

Vstupní údaje do procesu řešení

Primární vstupní data tvoří denní uzavírací ceny akcií Apple v období 25. 10. 1995 – 1. 2. 2012, tj. za 4097 obchodních dní. Výchozí časová řada byla dále upravena na řadu logaritmických výnosů, čímž došlo k jejímu zkrácení na 4096 hodnot.

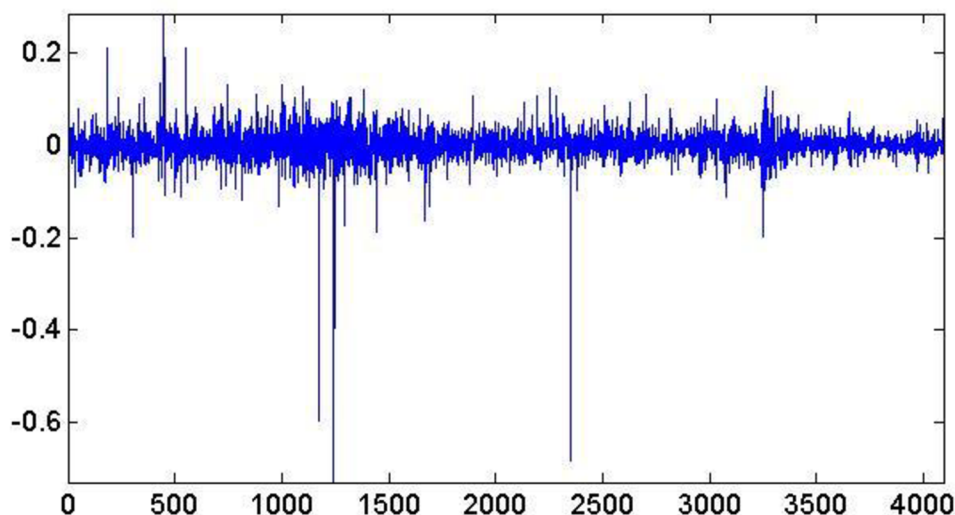
Následující text kapitoly je tak věnován analýze výskytu deterministického chaosu v časové řadě výnosů akcií Apple.

Testová kritéria (kvantifikátory chaosu)

Za testová kritéria při hodnocení výskytu deterministického chaosu byl zvolen Hurstův a Ljapunovův exponent. Tyto jsou nejběžněji používanými kvantifikátory, pomocí nichž lze, jak bylo ukázáno v kapitole 7.2, spolehlivě odlišit chaotické časové řady od náhodných.

Odhad Hurstova exponentu

Pomocí Hurstova exponentu zkoumáme přítomnost procesu s dlouhou pamětí ve vývoji časové řady výnosů akcií Apple. Vývoj výnosů je zachycen na *Obr. č. 32* na následující straně, kde osa x představuje jednotlivá pozorování (která odpovídají příslušným obchodním dnům) a osa y pak logaritmické výnosy.



Obr. č. 32 – Výnosy akcii Apple

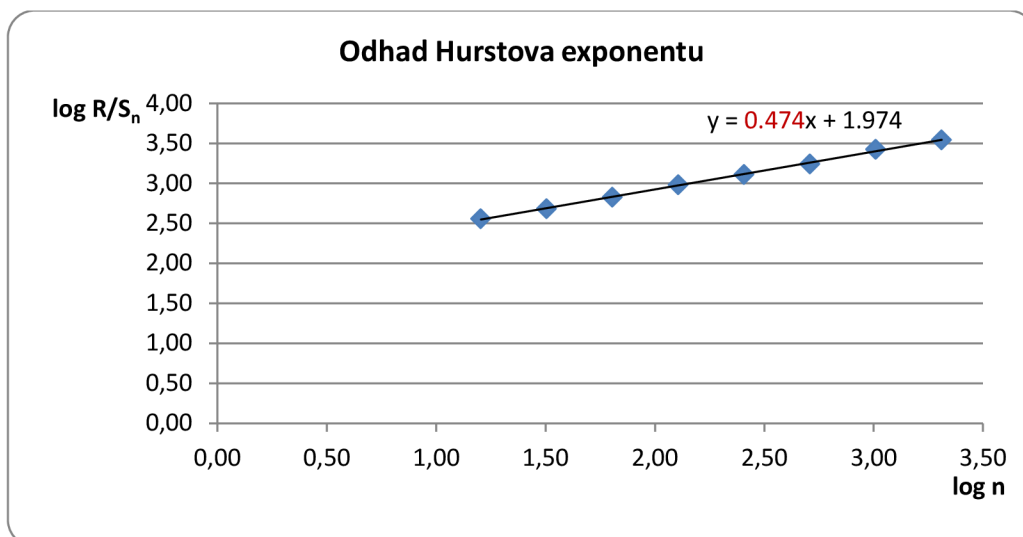
Pro odhad Hurstova exponentu je použita R/S analýza, která dokáže spolehlivě odlišit deterministickou a stochastickou časovou řadu. Pro časovou řadu akciových výnosů je tak postupováno dle algoritmu uvedeného v kapitole 6.1 diplomové práce. Délka analyzované časové řady umožňuje její postupné rozdělení do 256 intervalů o délce 16, 128 intervalů délky 32, 64 intervalů délky 64 a dále, až je dosaženo rozdělení do 2 intervalů o délce 2048 hodnot.

Výstupem R/S analýzy pro zkoumanou časovou řadu je následující tabulka hodnot – Tab. č. 2.

Tab. č. 2 – Tabulka hodnot pro odhad Hurstova exponentu pro časovou řadu akciových výnosů Apple

Počet intervalů m	Délka intervalu n	R/S_n	$\log(R/S)_n$	$\log n$
256	16	359.44	2.56	1.20
128	32	479.65	2.68	1.51
64	64	668.86	2.83	1.81
32	128	956.99	2.98	2.11
16	256	1284.97	3.11	2.41
8	512	1739.57	3.24	2.71
4	1024	2652.76	3.42	3.01
2	2048	3480.65	3.54	3.31

Promítnutím hodnot $\log(R/S)_n$ a $\log(n)$ do grafu můžeme pomocí lineární regrese odhadnout Hurstův exponent.



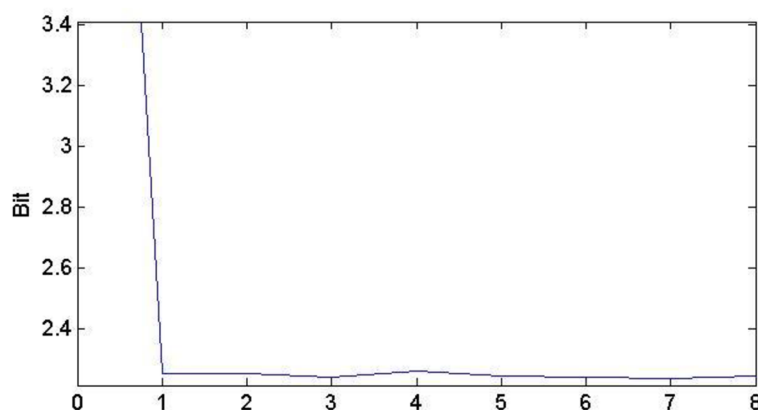
Obr. č. 33 – Odhad Hurstova exponentu pro časovou řadu akciových výnosů Apple

Ze směrnice přímky (Obr. č. 33) lze vyčíst hodnotu Hurstova exponentu 0,474. Na jejím základě můžeme vznést předpoklad, že časová řada logaritmických výnosů akcií společnosti Apple není chaotická. Přesto, že stanovená hodnota není přesně rovna číslu 0,5 (značící normálně rozdělenou, náhodnou časovou řadu), není zde na základě Hurstova exponentu na výskyt deterministického chaosu možné usuzovat.

Odhad největšího Ljapunovova exponentu

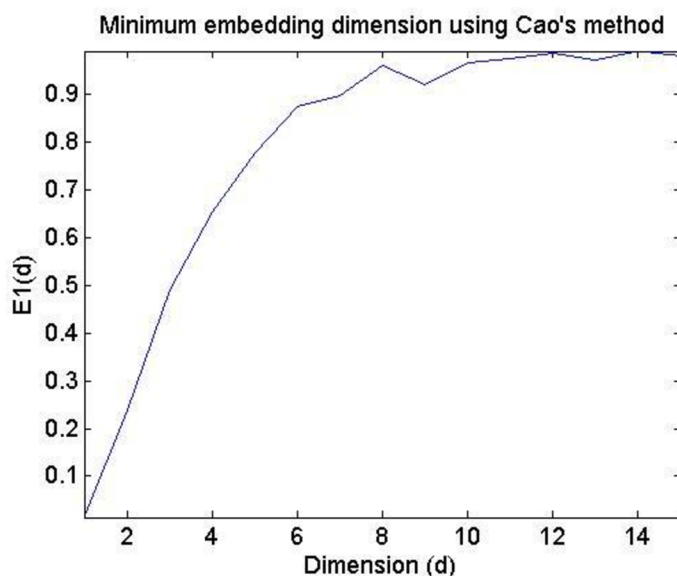
Odhad největšího Ljapunovova exponentu vychází z rekonstrukce atraktoru v m-rozměrném fázovém prostoru. Sama rekonstrukce pak spočívá ve volbě vhodného časového zpoždění a dimenze vnoření.

Časové zpoždění je určeno na základě prvního lokálního minima v grafu vzájemné informace, který je zobrazen na Obr. č. 34.



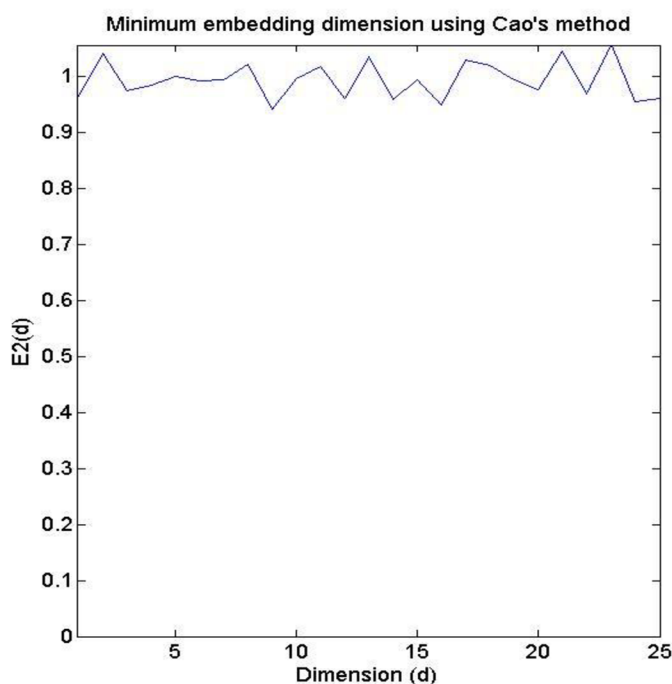
Obr. č. 34 – Graf pro určení vhodného časového zpoždění

Lokální minimum je dosaženo v hodnotě 3, optimální časové zpoždění se tedy bude této hodnotě rovnat. Na základě znalosti časového zpoždění jsme dále schopni pokračovat v rekonstrukci a prostřednictvím Caoovy metody určit minimální dimenzi vnoření. Graf pro její určení je zobrazen na Obr. č. 35.



Obr. č. 35 – Minimální dimenze vnoření pro časovou řadu výnosů Apple

Na základě charakteristiky E1 stanovíme minimální dimenzi vnoření na hodnotě 8. Nemůžeme však rozhodnout o chaotičnosti, či náhodnosti časové řady. K tomu slouží graf znázorňující průběh hodnot parametru E2 na Obr. č. 36.

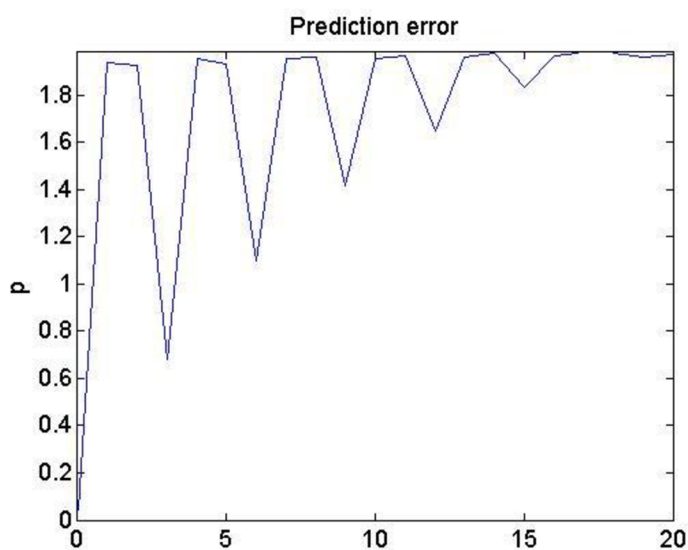


Obr. č. 36 – Průběh hodnot charakteristiky E2 pro časovou řadu výnosů Apple

Vycházíme-li z uvedeného grafu (Obr. č. 36 na předchozí straně), můžeme tvrdit, že parametr E_2 je roven přibližně 1 pro jakoukoli dimenzi vnoření d , což je charakteristické pro náhodné časové řady.

Všechna testová kritéria dosud svědčí o tom, že se ve zkoumané časové řadě akciových výnosů deterministický chaos nevyskytuje.

Toto tvrzení může být podpořeno také posledním ze stanovených kvantifikátorů chaosu, pokud se ani největší Ljapunovův exponent nepodaří odhadnout.



Obr. č. 37 – Graf závislosti chyby predikce na čase pro odhad Ljapunovova exponentu pro časovou řadu výnosů Apple

Obr. č. 37 přináší potvrzení předchozích závěrů. Zobrazený graf, na jehož základě má být určen největší Ljapunovův exponent, neobsahuje lineární část, ze které by jej bylo možné odhadnout. Naopak obsahuje segmenty, které svědčí o stochastičnosti časové řady.

Výskyt deterministického chaosu u zkoumané časové řady výnosů akcií společnosti Apple nebyl prokázán.

7.3.2 Predikce pomocí Elliottových vln

Predikce Elliottovými vlnami byla stanovena na základě použití softwaru Elwave, který umožňuje řešiteli, aby se zaměřil na interpretaci získaných výstupů. Je tak odstraněna potřeba ručního vyhledávání cenových vzorů a propočtu Fibonacciho poměrů.

Vstupní údaje do procesu řešení

Data pro analýzu jsou tvořena maticí, která obsahuje denní ceny akcií společnosti Apple ve formátu Open (zahajovací cena), High (maximální cena), Low (minimální cena), Close (uzavírací cena). Nejedná se tedy pouze o jednu časovou řadu cen, ale o čtyři zmíněné, na jejichž základě je softwarem propočítána výsledná cena akcií tak, aby tato co nejlépe odrážela výsledek obchodování daného dne. Délka časových řad v matici odpovídá 4097 obchodním dnům v analyzovaném období 25. 10. 1995 – 1. 2. 2012.

Predikce Elliottovými vlnami

Na Obr. č. 38 je již zobrazen průběh cen akcií Apple ve zkoumaném období. Zobrazena je cena v dolarech za akcii (USD/akcie).



Obr. č. 38 – Průběh cen akcií Apple v období 25. 10. 1995 – 1. 2. 2012

Po spuštění analýzy jsou programem propočítávány kombinace cenových vzorů a formací. Výsledek je následně zobrazen v grafu, v němž jsou vykresleny Elliottovy vlny z různých hierarchických stupňů. Správná interpretace vln je v této části pro predikci stěžejní.



Obr. č. 39 – Analýza zkoumané časové řady pomocí Elliottových vln

Na Obr. č. 39 je vykreslena predikce Elliottovými vlnami, z níž je důležitá zejména interpretace vlnové formace z nejnižšího zobrazeného stupně – Intermediate. Ten je v grafu popsán zelenými čísly v kulatých závorkách, stejnou barvou jsou znázorněny také vlny, které do daného stupně patří. Vidíme, že se nacházíme v průběhu třetí vlny tohoto stupně, jejíž cílová hodnota by měla dosáhnout úrovně 553,49 USD za akcii. Poté by nastala korekce čtvrtou vlnou, čímž by došlo k poklesu ceny.

Na základě analýzy určené prostřednictvím Elliottových vln se časová řada ve zkoumaném období 25. 10. 1995 – 1. 2. 2012 nachází ve třetí, dosud nedokončené vlně stupně Intermediate. Její cílová hodnota byla stanovena na ceně 553,49 USD za akcii. Po dosažení daného cíle je predikována korekce a pokles ceny v rámci čtvrté vlny.

7.3.3 Verifikace hypotézy o shodě výstupů teorie chaosu a Elliottových vln

Vstupní údaje do procesu řešení

Teorie chaosu – diplomová práce se zabývala analýzou deterministického chaosu u časové řady výnosů akcií Apple. Na základě stanovených kvantifikátorů chaosu nebyl tento ve zkoumané finanční entitě prokázán. Proto je možné stanovit následující závěr pro oblast predikce.

Na základě výstupů teorie chaosu, z důvodu neprokázání výskytu deterministického chaosu, lze konstatovat, že budoucí vývoj zkoumané finanční entity nelze predikovat.

Teorie Elliottových vln – pro vyslovení závěrů o predikční schopnosti Elliottovy vlnové teorie je zapotřebí nejdříve srovnat hodnoty predikované a skutečně dosažené. Reálný vývoj časové řady cen akcií Apple je zobrazen na Obr. č. 40.



Obr. č. 40 – Průběh cen akcií Apple v období do 1. 5. 2012

Na základě analýzy uvedené v předchozím textu práce byla předpovězena cílová hodnota třetí vlny ve stupni Intermediate na ceně 553,49 USD/akcie. Dne 2. 3. 2012 byla reálně dosažená cena přibližně 546 USD/akcie, přičemž tato tvořila vrchol třetí vlny. Pokud by se investoři řídili tímto výsledkem, který byl k dispozici 1. 2. 2012 (kdy byla cena akcie přibližně na hodnotě 455 dolarů), mohli by využít rostoucího trendu ve svůj prospěch.

Na základě výstupů teorie Elliottových vln lze konstatovat, že tato dokázala v cenovém grafu věrohodně rozpoznat trend, jímž se bude časová řada ubírat a také stanovit přibližnou cílovou hodnotu dané vlny.

Závěrečným porovnáním výstupů obou teorií, je možné konstatovat, že teorie chaosu na straně jedné a teorie Elliottových vln na straně druhé neposkytují v oblasti predikce shodné výstupy.

8 ZÁVĚR

Diplomová práce postavila do konfrontace na jedné straně teorii chaosu a na straně druhé teorii Elliottových vln s cílem zjistit, zda mezi nimi v oblasti predikce nastane shoda, či nikoli. Takto formulovaný hlavní problém je možné považovat za nové, dosud neřešené téma. K jeho naplnění bylo v práci postupováno řešením dílčích problémů. Prvním z nich byla analýza výskytu deterministického chaosu u zvolené finanční entity. Na základě výstupů této analýzy bylo konstatováno, že z žádné hodnoty zvolených kvantifikátorů chaosu nelze na jeho výskyt usuzovat. Možnost alespoň v krátkodobém časovém horizontu predikovat budoucí vývoj analyzované časové řady tak byla na základě uvedených výstupů považována za nereálnou. Přesto byla následně provedená predikce prostřednictvím Elliottových vln, která tvoří druhý dílčí problém, velmi přesná. V cenovém grafu byl správně rozpoznán nejen růstový trend, ale také přibližná cílová hodnota, kterou daná vlna dosáhne. Tuto predikci mohli mít investoři k dispozici s měsíčním předstihem a využít ji tak ve svůj prospěch. Vlnová teorie se tedy v daném případě ukázala být významným predikčním nástrojem. Porovnáním výsledků poskytnutých teorií chaosu a Elliottovou vlnovou teorií bylo závěrem uvedeno, že tyto v oblasti predikce nedosahují shody.

Práce naplnila stanovené cíle také v teoretické rovině, v rámci níž byl diplomový úkol zaměřen na vymezení chaosu a jeho významu v ekonomických soustavách. Tyto svými vlastnostmi výskyt deterministického chaosu umožňují a tak je nezbytné při řešení nejrůznějších úkolů brát danou skutečnost v úvahu. Pojednáno bylo také o možných příčinách vzniku Elliottových vln, čímž byl naplněn také poslední vymezený cíl diplomové práce. Lze tedy říci, že cíle práce byly splněny v plném rozsahu.

Řešení prezentované v diplomové práci je možné dále rozvíjet o nové poznatky. Námětem pro další výzkum je jak oblast analýzy výskytu deterministického chaosu, tak i oblast aplikace teorie Elliottových vln pro predikci. Stejným postupem, jako v předložené práci, mohou být analyzovány jiné časové řady, či zkoumány důvody, proč je vlnová teorie schopna odhalit trend vývoje i přibližnou budoucí hodnotu, kterou časová řada dosáhne.

Pochopení podstat ekonomických procesů, zvláště v oblasti kapitálových trhů, může usnadnit rozhodování o případných investicích a snížit také rizika ztrát.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JANÍČEK, Přemysl. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: hledání souvislostí*. Učební texty I. 1. vyd. Brno: CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-555-6.
- [2] SOJKA, Zdeněk a Petr DOSTÁL. *Elliottovy vlny*. 1. vyd. Brno: Tribun EU, 2008. 272 s. ISBN 978-80-7399-630-7.
- [3] JANÍČEK, Přemysl. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: hledání souvislostí*. Učební texty II. 1. vyd. Brno: CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-556-3.
- [4] DOSTÁL, P., K. RAIS a Z. SOJKA. *Pokročilé metody manažerského rozhodování: konkrétní příklady využití metod v praxi*. 1. vyd. Praha: Grada, 2005. 166 s. ISBN 80-247-1338-1.
- [5] ZELINKA, I., F. VČELAŘ a M. ČANDÍK. *Fraktální geometrie: principy a aplikace*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. 159 s. ISBN 80-7300-193-4.
- [6] TIŠNOVSKÝ. Fraktály. [online]. [cit. 2012-01-22]. Dostupné z: http://www.fit.vutbr.cz/~tisnovpa/fract/clanky/1.htm#tth_chAp1
- [7] LUNGU, Eliza-Olivia. Time-varying Hurst exponent for the Bucharest exchange market. *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*. [serial online]. October 2010, 44(4):1-15 [cit. 2012-02-05]. Dostupné z: Business Source Complete
- [8] TREŠL, Jiří a Dagmar BLATNÁ. Modelování časových řad akciových výnosů. *Acta Oeconomica Pragensia* [online]. 2007, roč. 15, č. 1 [cit. 2012-02-02]. Dostupné z: <http://www.vse.cz/polek/download.php?jnl=aop&pdf=44.pdf>
- [9] JAGRIČ, Timotej a Matej PODBREGAR. Chaos and order in capital markets – the case of a small transition economy. *Our Economy (Nase Gospodarstvo)* [serial online]. November 2004, 50(5/6):94-105 [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: Business Source Complete
- [10] LING-YUN, He. Chaotic Structures in Brent & WTI Crude Oil Markets: Empirical Evidence. *International Journal of Economics & Finance* [serial online]. October 2011, 3(5):242-249 [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: Business Source Complete
- [11] CHUN, S., K. KIM a S. H. KIM. Chaotic analysis of predictability versus knowledge discovery techniques: case study of the Polish stock market. *Expert Systems* [serial online]. November 2002, 19(5):264-272 [cit. 2012-03-12]. Dostupné z: Business Source Complete

- [12] PLUMMER, Tony. *Prognóza finančních trhů: psychologie úspěšného investování*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2008. 373 s. ISBN 978-80-251-1997-6.
- [13] Obchodujeme Elliottovy vlny I. *Financnik.cz* [online]. [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://www.financnik.cz/komodity/zkusenosti/elliottovy-vlny-1.html>
- [14] FOULADI, Ahmadreza. Empirical Study on the Existence of Long-term Memory In the Philippine Foreign Exchange Market. *DLSU Business & Economics Review* [online]. 2012, pp. 87-108 [cit. 2012-04-18]. Dostupné z: <http://ejournals.ph/index.php?journal=BER&page=article&op=viewFile&path%5B%5D=4573&path%5B%5D=4708>
- [15] HAN, Hai-bo. Nonparametric test of long-term memory of financial time series: Analysis of exchange rate volatility based on Hurst Exponents. *China-USA Business Review* [serial online]. June 2007, 6(6):15-18 [cit. 2012-03-04]. Dostupné z: Business Source Complete
- [16] KODERA, Jan a Tran VAN QUANG. Vizuální nelineární rekurentní analýza a její aplikace na český akciový trh. *Politická ekonomie* [online]. 2009 [cit. 2012-02-10]. Dostupné z: <http://www.vse.cz/polek/abstrakt.php3?IDcl=686>
- [17] CAO, Liangyue. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series. *Physica D* [online]. 1997, 110:43-50 [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: http://ac.els-cdn.com/S0167278997001188/1-s2.0-S0167278997001188-main.pdf?_tid=7947081f7b560b01326cc071fd84541b&acdnat=1337469506_4853b95d6a3896a9142dce91e281535b
- [18] PARLITZ, Ulrich. Nonlinear time-series analysis. *Nonlinear Modeling – Advanced Black-Box Techniques* [online]. 1998:209-239 [cit. 2012-03-05]. Dostupné z: <http://www.physik3.gwdg.de/~ulli/pdf/P98b.pdf>
- [19] MERKWIRTH, Christian et al. OpenTSTOOL User Manual [online]. [cit. 2012-02-11]. Dostupné z: <http://www.physik3.gwdg.de/tstool/manual.pdf>
- [20] AAPL Historical Prices: Apple Inc. Stock - Yahoo! Finance. *Yahoo! Finance* [online]. [cit. 2012-01-05]. Dostupné z: <http://finance.yahoo.com/q/hp?s=AAPL&a=09&b=25&c=1995&d=01&e=01&f=2012&g=d>

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. č. 1 – Schéma analýz dat a informací [4, s. 152]</i>	14
<i>Obr. č. 2 – Chaotické chování znázorněné průběhem hodnot logistické rovnice</i>	19
<i>Obr. č. 3 – Schematické znázornění bifurkačního diagramu [3, s. 887]</i>	19
<i>Obr. č. 4 – Lorenzův atraktor</i>	20
<i>Obr. č. 5 – Mandelbrotova a Juliova množina [6]</i>	21
<i>Obr. č. 6 – Schéma zpětné vazby na finančních trzích [4, s. 127]</i>	25
<i>Obr. č. 7 – Působení kladné zpětné vazby na finančních trzích [4, s. 128]</i>	26
<i>Obr. č. 8. – Časová posloupnost hodů kostkou</i>	28
<i>Obr. č. 9 – Trendový impuls, rostoucí [2, s. 19]</i>	33
<i>Obr. č. 10 – Trendový impuls, klesající [2, s. 19]</i>	33
<i>Obr. č. 11 – Vlna 2 se nikdy nepohybuje do zóny vlny 1 [2, s. 19]</i>	34
<i>Obr. č. 12 – Vlna 4 nikdy neklesá do oblasti vlny 1 [2, s. 20]</i>	34
<i>Obr. č. 13 – Trendový impuls s korekční fází [2, s. 20]</i>	34
<i>Obr. č. 14 – Trendový impuls s korekční fází jako součást vlny vyššího stupně [2, s. 21]</i>	35
<i>Obr. č. 15 – Elliottovy vlny a Fibonacci [2, s. 43]</i>	36
<i>Obr. č. 16 – Poměr dvou sousedních vln [2, s. 44]</i>	37
<i>Obr. č. 17 – Schéma postupu při řešení nepřímého problému deterministického chaosu</i>	41
<i>Obr. č. 18 – Průběh hodnot $E1$ a $E2$ pro časovou řadu generovanou Hénonovým chaotickým atraktorem [17, s. 45]</i>	44
<i>Obr. č. 19 – Průběh hodnot $E1$ a $E2$ pro náhodnou časovou řadu [17, s. 46]</i>	45
<i>Obr. č. 20 – Příklad odhadu největšího Ljapunovova exponentu pro data generovaná chaotickým Colpittsovým oscilátorem [18, s. 224]</i>	46
<i>Obr. č. 21 – Schéma postupu při predikci Elliottovými vlnami</i>	46
<i>Obr. č. 22 – Schéma postupu při porovnání výstupů poskytnutých teorií chaosu a Elliottovou vlnovou teorií</i>	47
<i>Obr. č. 23 – Průběh hodnot vygenerované normálně rozdělené časové řady</i>	50

<i>Obr. č. 24 – Odhad Hurstova exponentu pro normálně rozdělenou časovou řadu</i>	<i>52</i>
<i>Obr. č. 25 – Minimální dimenze vnoření pro chaotický Colpittsův oscilátor</i>	<i>53</i>
<i>Obr. č. 26 – Průběh hodnot charakteristiky E2 pro chaotický Colpittsův oscilátor</i>	<i>54</i>
<i>Obr. č. 27 – Atraktor chaotického Colpittsova oscilátoru</i>	<i>54</i>
<i>Obr. č. 28 – Minimální dimenze vnoření pro časovou řadu s normálním rozdělením</i>	<i>55</i>
<i>Obr. č. 29 – Průběh hodnot charakteristiky E2 pro časovou řadu s normálním rozdělením ..</i>	<i>55</i>
<i>Obr. č. 30 – Graf závislosti chyby predikce na čase pro odhad Ljapunovova exponentu chaotického Colpittsova oscilátoru</i>	<i>56</i>
<i>Obr. č. 31 – Graf závislosti chyby predikce na čase pro odhad Ljapunovova exponentu pro normálně rozdělenou časovou řadu</i>	<i>57</i>
<i>Obr. č. 32 – Výnosy akcií Apple</i>	<i>59</i>
<i>Obr. č. 33 – Odhad Hurstova exponentu pro časovou řadu akciových výnosů Apple</i>	<i>60</i>
<i>Obr. č. 34 – Graf pro určení vhodného časového zpoždění</i>	<i>60</i>
<i>Obr. č. 35 – Minimální dimenze vnoření pro časovou řadu výnosů Apple</i>	<i>61</i>
<i>Obr. č. 36 – Průběh hodnot charakteristiky E2 pro časovou řadu výnosů Apple</i>	<i>61</i>
<i>Obr. č. 37 – Graf závislosti chyby predikce na čase pro odhad Ljapunovova exponentu pro časovou řadu výnosů Apple</i>	<i>62</i>
<i>Obr. č. 38 – Průběh cen akcií Apple v období 25. 10. 1995 – 1. 2. 2012</i>	<i>63</i>
<i>Obr. č. 39 – Analýza zkoumané časové řady pomocí Elliottových vln</i>	<i>64</i>
<i>Obr. č. 40 – Průběh cen akcií Apple v období do 1. 5. 2012</i>	<i>65</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. č. 1 – Tabulka hodnot pro odhad Hurstova exponentu pro normálně rozdělenou časovou řadu</i>	<i>51</i>
<i>Tab. č. 2 – Tabulka hodnot pro odhad Hurstova exponentu pro časovou řadu akciových výnosů Apple</i>	<i>59</i>