



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA PODNIKATELSKÁ

FACULTY OF BUSINESS AND MANAGEMENT

ÚSTAV INFORMATIKY

INSTITUTE OF INFORMATICS

NÁVRH AUTOMATICKÉHO OBCHODNÍHO SYSTÉMU NA DEVIZOVÝCH TRZÍCH S VYUŽITÍM FRAKTÁLNÍ GEOMETRIE

AUTOMATIC TRADING SYSTEM ON THE FOREIGN EXCHANGE MARKET BASED ON A FRACTAL
GEOMETRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Babič

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Budík, Ph.D.

BRNO 2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Vojtěch Babič

Informační management (6209T015)

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb., o vysokých školách, ve znění pozdějších předpisů, Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně a Směrnicí děkana pro realizaci bakalářských, magisterských a doktorských studijních programů zadává diplomovou práci s názvem:

Návrh automatického obchodního systému na devizových trzích s využitím fraktální geometrie

v anglickém jazyce:

Automatic Trading System on the Foreign Exchange Market Based on a Fractal Geometry

Pokyny pro vypracování:

Úvod
Cíle práce, metody a postupy
Teoretická východiska práce
Analýza problému
Vlastní návrhy řešení
Závěr
Seznam použité literatury

Seznam odborné literatury:

DOSTÁL, P. Pokročilé metody analýz a modelování v podnikatelství a veřejné správě. Brno: CERM, 2008. 432 s. ISBN 978-80-7204-605-8.

GOLDBERG, D. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. USA: Addison-Wesley, 1989. 412 p. ISBN 978-02-011-5767-3.

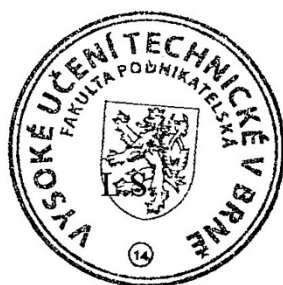
GRAHAM, B. Inteligentní investor. Praha: Grada, 2007. 504 s. ISBN 978-80-247-1792-0.

REJNUŠ, O. Finanční trhy. Ostrava: KEY Publishing, 2008. 548 s. ISBN 978-80-87-8.

WILLIAMS, L. Long-Term Secrets to Short-Term Trading. USA: Wiley-Interscience, 1999. 255 p. ISBN 0-471-29722-4.

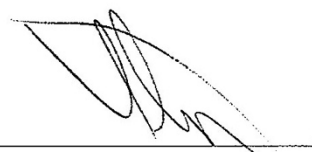
Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Budík, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.





doc. RNDr. Bedřich Půža, CSc.
Ředitel ústavu



doc. Ing. et Ing. Stanislav Škapa, Ph.D.
Děkan

V Brně, dne 29. 2. 2016

ABSTRAKT

Práce se zaměřuje na současné přístupy k technické analýze, automatickým systémům a shrnuje zajímavé poznatky, dle kterých je následně navržen a implementován automatický obchodní systém, se kterým je možné obchodovat v prostředí FOREXu. Optimalizace a testování jsou předpokladem pro nasazení do reálného obchodování. Navržený obchodní systém je proto testován na historických datech a je provedena optimalizace jeho vybraných vstupních parametrů s cílem maximalizace stability a zisku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Forex, AOS, MetaTrader, fraktál, technická analýza, indikátory, investiční modely, optimalizace, finanční trhy

ABSTRACT

The main focus of the thesis are approaches to technical analysis, trading systems and it summarizes interesting findings, according to which a FOREX automated trading system was designed and implemented. Optimization and testing were a prerequisite for a real-world deployment, so the automated trading system was tested on historical data and some of its input parameters were optimized for maximum stability and profit.

KEYWORDS

Forex, automated trading system, Metatrader, fractal geometry, technical analysis, indicators, investment models, optimization, financial markets

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BABIČ, V. Návrh automatického obchodního systému na devizových drzích s využitím fraktální geometrie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská, 2016. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Budík, PhD.

Prohlašuji, že diplomová práce je původní a vypracovaná samostatně. Dále prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná a že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským, ve znění pozdějších předpisů).

V Brně dne 11.5.2016

.....

Vojtěch Babič

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat panu doktoru Janu Budíkovi, vedoucímu mé diplomové práce za cenné rady, čas a úsilí, které mi a mé práci věnoval a za možnost získat nové dovednosti, a velmi také rodině za podporu v těžkých obdobích.

1.	Úvod	9
2.	Cíle práce, metody, postupy	10
2.1.	Primární cíl	10
2.2.	Sekundární cíle.....	10
2.3.	Metody a postupy	10
3.	Teoretická východiska práce	11
3.1.	Finanční systém, finanční trh	11
3.1.1.	Finanční systém	11
3.1.2.	Finanční trh	12
3.1.3.	Měnový trh, trh s cizími měnami.....	13
3.2.	Analytické nástroje	16
3.2.1.	Fundamentální analýza.....	16
3.2.2.	Metody fundamentální analýzy.....	17
3.2.3.	Technická analýza	18
3.2.4.	Metody používané v technické analýze	22
3.3.	Umělá inteligence.....	24
3.3.1.	Umělé neuronové sítě.....	25
3.3.2.	Genetické algoritmy.....	31
3.3.3.	Genetické operátory	32
3.4.	Teorie chaosu	37
3.4.1.	Atraktory	37
3.5.	Fraktální geometrie	39
3.5.1.	Fraktál.....	40
3.5.2.	Hurstův exponent.....	44
4.	Analýza problému	46
5.	Návrhy řešení.....	52
6.	Závěr	55

1. Úvod

Obchodování je spojeno s lidskou společností od nepaměti. V počátcích se využíval barterový obchod, určité množství zboží nebo služeb se vyměňovalo za určité množství jiného zboží a služeb přímo. Bez použití peněz, které teprve čekaly na své vynalezení. S rozvojem obchodu se začaly formovat konkrétní hodnoty zboží, hodnota se začala přepočítávat na některou ze základních věcí směny, jako byly například kusy dobytka, nebo některé vzácné předměty. Později se začala se formovat směna s pomocí věcí mající komoditní charakter, obilí, plátno, kovy. To mělo nesporné výhody, díky možnosti je vážit, dělit, jednoduše přenášet a trvanlivě skladovat, a především kovy se brzy staly novou základní komoditou a platidlem. To už zbýval jen krůček k ražbě mincí a jejich využívání jako peněz.

Obchodníci již nemuseli obchodovat pouze se zbožím, ale i se samotnými penězi, a tato aktivita dochovala dodnes. V moderní době především sledujeme, jak se s výzkumem chování finančního trhu zefektivňují analytické metody a predikce cen. Obchodování lze dokonce zautomatizovat. Hromadným využíváním analytických metod se jejich účinnost snižuje, což jsme mohli zaznamenat u technické analýzy s masovým rozšířením počítačů a zvýšení dostupnosti obchodní platformy. To však neznamená, že na trhu pro technickou analýzu již není místo. Pořád lze zkoušet nové a lepší metody, algoritmy a optimalizace, možností je nespočet.

Jeden takový obchodní systém si zkusím naprogramovat v této práci. Hlavní část práce se věnuje hypotéze fraktálního trhu a implementaci systému, závěrečná kapitola je pak shrnutím celého projektu a vyhodnocení přínosů práce.

2. Cíle práce, metody, postupy

Cílem práce je prozkoumání možností, které nabízí postupy založené na fraktální geometrii k analýze a predikci devizových trhů, a využití získaných poznatků k návržení algoritmu automatického obchodního systému. Bude provedeno jeho testování na historických a současných tržních datech a jeho optimalizace tak, aby dosahoval co nejstabilnější equity křivky a zisku.

2.1. Primární cíl

Hlavním cílem práce je prozkoumání fraktální geometrie jakožto nástroji k analýze a predikci devizových trhů, návržení a následná implementace automatického obchodního systému, jenž bude principy fraktální geometrie využívat. Navržený systém bude následně testován a optimalizován.

2.2. Sekundární cíle

Vedlejšími cíli jsou vybrané kvalitativní vlastnosti navrženého systému, kterým myslíme především jeho ziskovost a celkovou rizikovost při dané míře zisku. Obojí však musí ruku v ruce být doplněno rozumnou stabilitou výsledků, tedy možnost jej spustit bezprostředně po optimalizaci tak, aby se „nerozladil“ a již během svého, například několikaměsíčního běhu, nepotřeboval novou optimalizaci, aby nebyl ve ztrátě.

2.3. Metody a postupy

Práce bude implementována v programovacím jazyku MetaQuotes Language, vyvinutém pro automatizaci programu MetaTrader. Vývoj a debug kódu bude probíhat v editoru MetaEditor přímo vyvinutým pro tento jazyk. Systém bude využívat interní funkce nabízené jazykem MQL, popřípadě code snippety sdílené MetaTrader komunitou. využívat knihovny třetích stran. Testování proběhne na historických datech, naimportovaných do MetaTraderu z externích zdrojů jako je ČNB, nebo s využitím historických dat poskytnutých přímo MetaTraderem. Optimalizace obchodního systému proběhne krokovou analýzou obchodů a nákupů a vyhodnocením, zda nepomůže upravit některé parametry spouštěného systému a jaké hodnoty dosadit.

3. Teoretická východiska práce

Každá odborná práce musí být vystavena na řádném teoretickém základu, a výjimkou nebude ani tato práce. Seznámíme se se strukturou finančních trhů, základy jejich analýzy, využití umělé inteligence a způsoby její aplikace na tyto trhy.

3.1. Finanční systém, finanční trh

Nejdřív je vhodné si připomenout, co je to systém. Systémem rozumíme účelově definovanou množinu prvků a vazeb mezi nimi, jež vykazují jako celek určité vlastnosti, resp. chování.

3.1.1. Finanční systém

Soubor trhů, institucí, zákonů, regulací a technik, s jejichž pomocí jsou obchodovány akcie, obligace a jiné cenné papíry, pak můžeme chápat jako finanční systém. Pan profesor Oldřich Rejnuš ve své monografii definuje finanční systém jako mechanismus, jehož prostřednictvím se prostředky k zapůjčení dostávají těm, kteří si je chtějí vypůjčit. Představuje souhrn všech dílčích segmentů finančního trhu a všech na nich obchodovaných finančních nástrojů, a také všech ekonomických subjektů, které tyto finanční nástroje, s využitím svých odborných znalostí, obchodují, či poskytováním řady různých finančních služeb fungování finančního systému napomáhají.

Finanční systém tak zajišťuje soustředování dočasně volných peněžních prostředků a jejich následnou alokaci a neustálé přelévání za účelem přeměny úspor v investice. Zároveň nám určuje, kolik peněžních prostředků je v konkrétní okamžik k dispozici pro platby, zboží, služby a výrobní faktory.

Dochází zde ke směně peněz za různé druhy finančních služeb a finančních nároků, představovaných různými nástroji finančního trhu. To umožňuje kupovat nové kapitálové statky a zvyšovat produkční možnosti ekonomiky, což zároveň vyústuje v urychlování ekonomického růstu.

Realizace uvedených druhů finančních toků a finančních činností souvisí se základními funkcemi finančního systému.

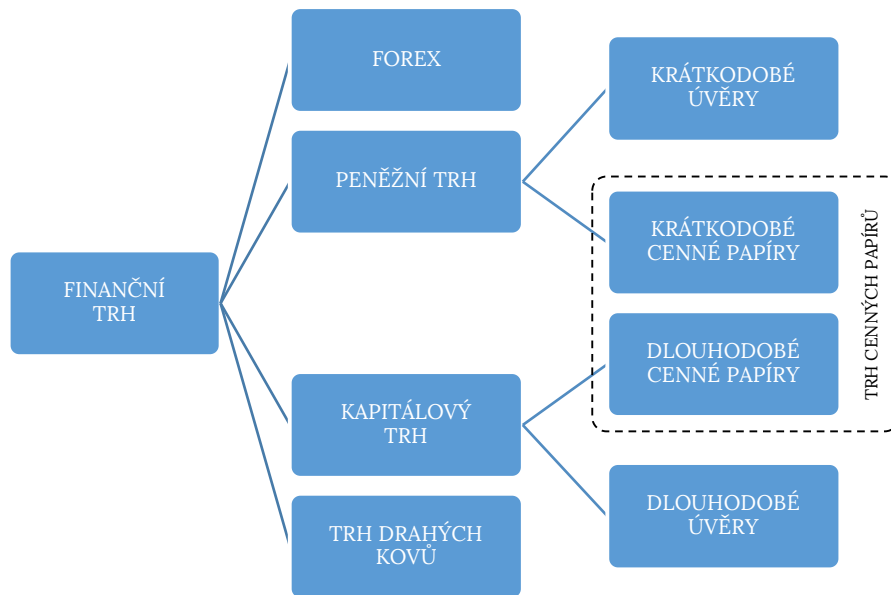
Finanční systém plní svou funkci prostřednictvím finančního trhu. Finanční trh v rámci finančního systému zajišťuje především depozitní a kreditní funkci. Depozitní funkce pro nás znamená možnost ukládat, investovat úspory, čímž jsou v důsledku akumulovány peněžní prostředky pro investiční a spotřební výdaje ekonomických subjektů. Kreditní funkce poskytuje ekonomickým subjektům volné peněžní prostředky, to napomáhá zvyšování spotřebních výdajů, což se příznivě odráží ve zvyšování poptávky po zboží a službách (domácnosti) a urychluje realizaci investic (podnikatelskými subjekty a státem). Ve výsledku je tím stimulována ekonomika a podporován její růst.

Všechny funkce finančního systému působí společně, zároveň, navzájem se podmiňují. Je proto důležité si je alespoň uvést:

- 1) Uchování hodnoty
Uchování kupní síly ekonomických subjektů, minimalizace důsledků inflace
- 2) Ochrana ekonomických subjektů proti různým druhům rizika,
prostřednictvím pojistných smluv.
- 3) Platební funkce
Umožňuje provádět všechny druhy plateb.
- 4) Funkce likvidity
Možná přeměna jednotlivých druhů finančních aktiv na peněžní hotovost.
- 5) Politická funkce
Stát prostřednictvím finančních nástrojů státní regulace, jako je monetární a fiskální politika, působí na finanční systém s cílem ovlivnit celý ekonomický systém z hlediska prosazení svých cílů.

3.1.2. Finanční trh

V rámci finančního trhu funguje celá řada dílčích segmentů. Nejčastější způsob členění je podle druhů finančních nástrojů, které se v příslušných segmentech finančního trhu obchodují. Jeho hlavními segmenty jsou především peněžní trh a kapitálový trh, ale do popředí se dostává i specifický trh s cizími měnami. Zavedený je i trh cenných papírů, kterým však ve skutečnosti myslíme trh krátkodobých a dlouhodobých cenných papírů dohromady.



Obrázek 1 – Členění finančního trhu podle základních finančních investičních instrumentů [7]

3.1.3. Měnový trh, trh s cizími měnami

Měnovým trhem rozumíme *trh s měnovými páry*, nebo také *trh se zahraničními měnami*. Z anglického slovního spojení *Foreign exchange market* pochází také často používaný akronym – *Forex*.

Princip Forexu spočívá v současném průběhu operací nákup a prodej – koupě jedné měny a prodej druhé. Z hlediska množství obchodů je nejpoužívanějším měnový pár USD/EUR.

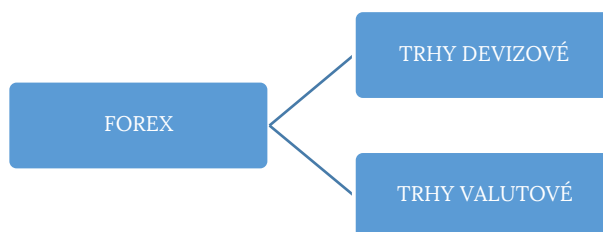
Trh s cizími měnami je možno rozdělit na dva dílčí segmenty, kterými jsou *trhy devizové* a *trhy valutové*. V rámci práce nás zajímají především devizové trhy, na kterých budeme obchodovat. Trhu s cizími měnami vládnu právě trhy devizové. Jsou to trhy s bezhotovostními formami cizích měn. Jejich směňováním dochází k tvorbě jejich kurzů. Nejvyšší vliv na kurz mají velkoobchodní subjekty směňující ve velkých objemech. Dealeři obchodních a centrálních bank, dealeři investičních fondů a *brokeři* (brokers), zprostředkovatelé devizových operací.

Na devizovém trhu se pro spotové obchody používá organizace *Over-the-counter*. To znamená, že obchodování neprobíhá pod záštitou žádné oficiální instituce, která by vykonávala dohled nad trhem a přebírala odpovědnost nad realizací obchodů. Jde o mimoburzovní, decentralizovanou organizaci – všichni účastníci jsou propojeni

přímo mezi sebou a vyjednávají o podmínkách 24 hodin denně, 7 dní v týdnu. Díky absenci oddělených burz zároveň vzniká z trhu jeden velký globální celek.

Na trhu cizích měn se burzy nacházejí, ale obchoduje se na nich především s termínovanými devizovými kontrakty, jako jsou *opce* a *futures*. [4]

Trhy valutové jsou trhy s hotovostními formami měn, které se obchodují za valutové kurzy. Valutové trhy hrají „druhou ligu“ – protože mají v celkovém kontextu spíše maloobchodní charakter, nemají samy o sobě kurzotvorný význam. Jejich kurz se zpravidla odvozuje od devizového kurzu.



Obrázek 2 – Členění trhu s cizími měnami [7]

Se zlepšující se dostupností počítačové techniky, internetu a možností obchodovat online individuálním investorům bez omezení, celkový obchodovaný objem se na Forexu posledních 15 let neustále zvyšuje. S celkovým obratem přes 5 bilionů dolarů je Forex největším finančním trhem světa.

Jeho obliba je zapříčiněna díky zajímavým vlastnostem. Forexový trh je otevřený 24 hodin denně. Většina brokerů otevírá v neděli odpoledne a zavírá v pátek odpoledne. Na Forexu však můžete obchodovat asijskou, evropskou a americkou seanci. Nepřetržitým obchodováním se dále minimalizuje riziko *gapů*, se kterými se na ostatních trzích můžeme setkat často. Díky decentralizované povaze zde nejsou žádná omezení pro obchodování, což je rájem pro spekulanty. Příkazy se provádí okamžitě, nedochází tedy ke změně situace na trhu v čase mezi zadáním příkazu a jejím faktickým provedením (*slippage*). Na Forexu lze profitovat nejen na býčím, ale i na medvědím trhu. Neustále se zvyšujícím objemem obchodů se zvyšuje i likvidita.

Trhu se nyní účastní tolik hráčů z celého světa, že i banka nebo fond se svými výraznými obchody mají minimální sílu trh ovlivňovat.

Decentralizovaný systém však umožňuje využívat i některé kontroverzní instrumenty, které zavádí do obchodování větší rizika. Nejjednodušší je asi *finanční páka*. Finanční páka spočívá v tom, že investor obchoduje nejen se svým kapitálem, ale především s pomocí dodatečně zapůjčeného kapitálu. Poměr vlastního a zapůjčeného kapitálu se pohybuje od 1:5, na Forexu najdeme páky sahající až do poměru kolem 1:1000. Investorovi tak stačí malá záloha, aby mohl kontrolovat mnohem větší, zapůjčený kapitál. Finanční páka takto zvyšuje investorovi zisky, ale i případné ztráty. Typickým případem páky je *CFD trading* u online brokerů. Investor má s brokerem smluvně dohodnuto, že mu případné ztráty zaplatí dodatečně.

1	USD	americký dolar	87 %
2	EUR	Euro	33 %
3	JPY	japonský jen	23 %
4	GBP	britská libra	12 %
5	AUD	australský dolar	9 %
6	CHF	švýcarský frank	5 %
7	CAD	kanadský dolar	5 %

Tabulka 1 – Nejvíce obchodované měny v roce 2013 [23]

Největšími trhy, a tedy nejvíce obchodovanými měnovými páry, jsou dvojice EUR-USD (24 %), USD-JPY (18 %), a GBP-USD (9 %), kde dolar se vyskytuje ve více jak 80 % z celkového objemu 200 %. Celek celek je 200%, protože každá taková transakce obsahuje dvě rozdílné měny.

Mezi dvojicemi najdeme i domácí měnu, českou korunu, v páru CZK-USD, a po zavedení *křížových měn* i v libovolných dalších párech, neobsahujících americký dolar. Českou korunu mezi nejobchodovanějšími měnami nenajdeme, jak je i vidět v Příloze 1.

3.2. Analytické nástroje

K analýze finančních trhů se používají dva základní přístupy. *Fundamentální analýza* zkoumá ekonomické podmínky v reálném světě. Naopak *technická analýza* nebere reálný svět v potaz a analyzuje čistě historii a objemy zrealizovaných obchodů, jejich vývoj v čase, a snaží se v tom najít určitá pravidla a vzory. V obou případech je cílem analýzy dokázat předpovědět budoucí vývoj trhu.

3.2.1. Fundamentální analýza

Podle prof. Rejnuše lze fundamentální analýzu považovat za nejkompexnější druh analýzy trhu, jež se v investiční praxi při přípravě zásadních investičních rozhodnutí používá. Fundamentální analýza je založena na předpokladu, že vnitřní hodnota komodity se liší od jejího aktuálního kurzu. Výsledek analýzy nám dá informaci, zda je její vnitřní hodnota vyšší, či nižší než cena, za kterou je komodita aktuálně na trhu obchodována. V případě, že je vnitřní hodnota komodity vyšší než její kurz, je považována za podhodnocenou, a naopak, v případě nižší vnitřní hodnoty ve srovnání s aktuálním kurzem, za nadhodnocenou.

Vnitřní hodnota komodity není nic jiného, než individuální názor kteréhokoli účastníka trhu na spravedlivou „odpovídající“ výši kurzu. Finanční analytici mají svůj názor obvykle podložený nějakou svou metodikou, kterým kurz vypočítají. Zaměřují se na ekonomické, sociální a politické síly řídící nabídku a poptávku. Sledují makroekonomické indikátory jako úrokové sazby, tempo růstu, inflace a nezaměstnanost.

Jelikož se fundamentální analýza dělá ručně, analytici používající tuto analýzu musí neustále sledovat všechny možné endo- i exogenní ukazatele, jež by mohly mít vliv na ekonomické, sociální, či politické prostředí, vzniklé zprávy a události interpretovat a vhodně je zařazovat do analýzy. Analytik musí mít širší přehled o trhu a jeho podmínkách a být neustále „v obraze“.

Fundamentální analýza je procesem, který se neobejde bez dokonalého seznámení s instrumentem, který hodláme obchodovat. Při dnešním počtu dostupných informací a tempu vzniku informací nových, aktuální „rychlá doba“ tedy prakticky nutí fundamentální analytiky se stále více specializovat. Nejen, že je analytik zaměřen na konkrétní typ trhu, jako jsou průmyslové komodity, zemědělské komodity, drahé kovy, akcie, dluhopisy, či měny, ale je zaměřen na vybranou subkategorii, nebo dokonce konkrétní trh, jako například akcie konkrétní firmy.

3.2.2. Metody fundamentální analýzy

Metodiky pro vytvoření fundamentální analýzy nejsou nijak standardizované, výsledky analýzy různými obchodníky se tedy mohou diametrálně lišit. Analytici berou v potaz různé informace různým způsobem, a zařazují je do svých různě postavených hodnotících měřítek. Dokonce i při použití stejných analytických metod bývají výsledky výpočtů zpravidla rozdílné. Ne každý obchodník pak má přístup ke stejným či stejně kvalitním informacím. Navíc, fundamentální analýzu může vlastně provádět i laik. S vhodnou zapáleností do tématu, dobrým přehledem o historii a chování daného trhu a selským rozumem, je možné dosáhnout stejných výsledků, jako mají profesionálové.

Fundamentální analýza je vhodná a používá se především pro obchodování v dlouhém období. Získaná vnitřní hodnota komodity v krátkém a ultrakrátkém období se pak považuje za neměnnou a je tedy jednoduché ji v tomto období porovnávat s aktuálním kurzem.

3.2.3. Technická analýza

Metoda určená ke krátkodobé předpovědi budoucího vývoje ceny určitého investičního instrumentu (v rámci finančního trhu) se nazývá technická analýza.

Hlavním předpokladem je, že aktuální cena a historická data obchodovaného instrumentu odráží všechny relevantní informace nutné k předpovědi jeho budoucího pohybu. Zároveň počítá s určitou konkrétní závislostí současné hodnoty na minulých hodnotách, kterou se snaží teoretizovat algoritmem. Z těchto předpokladů je pak možné spuštěním algoritmu předpovědět budoucí hodnoty z hodnot aktuálně známých.

Technická analýza lze použít pro grafické znázornění ceny měnící se v čase. Na cenu jsou potom, dle konkrétní použité metody, aplikovány ukazatele, s cílem najít v datech opakující se vzory. Pomocí předpovědět následujících vývoj můžou i statistické analýzy dat jako časových řad, s využitím běžných a pokročilých statistických metod. Experimentální mohou mýt další způsoby – použití neuronových sítí či fraktálů.

Do poloviny 80. let minulého století zcela dominuje fundamentální analýza, technická analýza se příliš nepoužívala kvůli své výpočetní náročnost. Velmi těžko by se zaváděly algoritmy, učící se z celého období jako celku, například v období v řádu let. Při nutnosti změny algoritmu nebo nové optimalizace muselo začít s počítáním zase od začátku stanoveného období. Výsledkem bylo využívání pouze jednodušších algoritmů.

S příchodem počítačové éry technická analýza zažívá boom. Možnost rychle propočítat každý tick a okamžitě reagovat se stala realitou.

Ústředním bodem technické analýzy je *graf*. Teorie technické analýzy studuje grafy a hledá v něm různé útvary, které pojmenovává, dává jim určitá pravidla, zjišťuje, co je předchází, a podobně. Například, jedním z nejjednodušších, viditelný pouhým okem, je *útvary dvojitého dna*, nebo *dvojitého vrcholu*.

Pro promítnutí vývoje ceny se používají specifické typy grafů, které nám dávají užitečné informace pro analýzu.

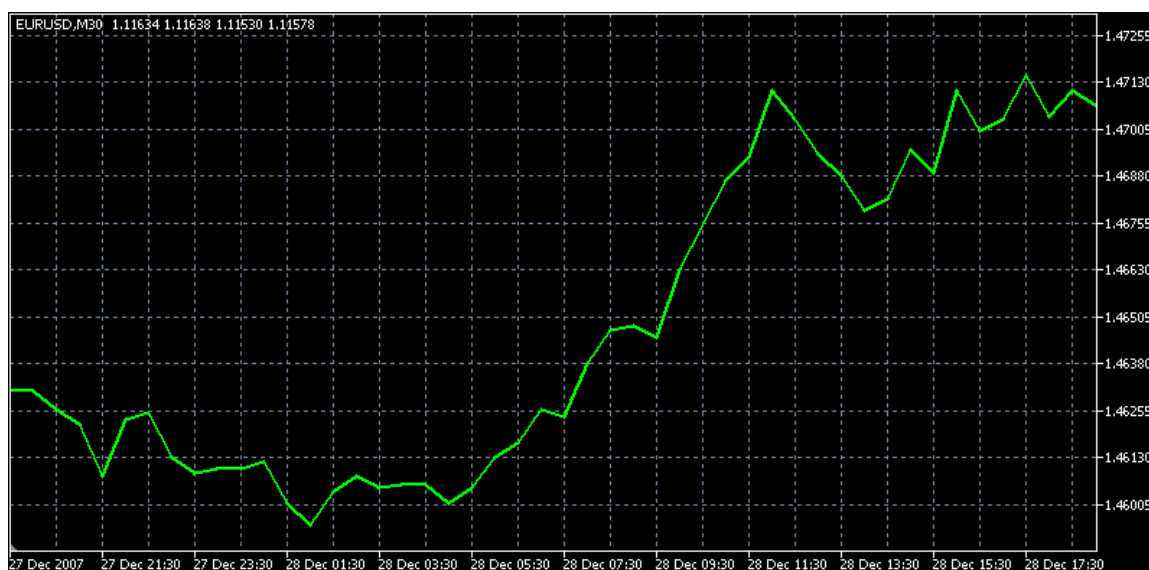
Všechny grafy mají společnou vlastnost, a to osy. Na vertikální ose je zanesena cena obchodované komodity, na horizontální ose je pak zanesen čas. Rozsah vertikální osy bývá obvykle přizpůsoben tak, aby pojal všechny hodnoty v celém období, které grafem zobrazujeme. Obvykle se používá zobrazení konkrétního úseku, např. 1 den,

1 týden, 1 měsíc, 6 měsíců, 1 rok, 5 let, u některých trhů je dostupný i graf vývoje ceny za celé období od vzniku trhu. Výhodu zde mají počítačové monitory, kde lze s grafem libovolně horizontálně posunovat.

Musíme si uvědomit, že čas je na horizontální ose kvantovaný. Šířka výsledného grafu záleží i na měřítku, které zvolíme. Zvolíme-li měřítko na denní rozlišení, kdy máme zobrazenou historii na 30 dní, dostaneme graf s 30 stupínky na horizontální ose, kde každý stupínek na představuje průběh obchodování během celého dne.

Tímto se dostáváme k tomu, že pro technickou analýzu nás nezajímají jen výsledky obchodování (zavírací cena), ale potřebujeme z grafu vyčíst další údaje jako jsou otevírací cena, *spread*, a také minimální a maximální cena, kterou hodnota dané komodity během obchodování nabyla.

Co se týče používaných typů grafů. Laika jako první intuitivně napadne *graf čárový*. Ten je zároveň grafem nejjednodušším, protože zobrazuje pouze jedinou informaci, zavírací cenu, a graf je vlastně spojnicí těchto cen.



Obrázek 3 – Čárový graf. Zdroj: MetaTrader

V praxi se používají další typy grafů, které promítají pro obchodníka více užitečných informací najednou.



Obrázek 4 – Svíčkový graf. Zdroj: MetaTrader

Takovým grafem je například *candlestick*, *svíčkový graf*, který dostal pojmenování po vzhledu jednotlivých period. Vznikl už v 17. století v Japonsku a oblibu si drží dodnes. Pro každou časovou periodu prezentuje formou svíčky otevírací a zavírací cenu, a minimální a maximální cenu. Takovému typu grafu se říká, že je typu OLHC, OHLC (open, high, low, close) graf. Tělo svíčky je tvořeno obdélníčkem, jehož vrchní a spodní strana končí na úrovni otevírací a uzavírací ceně, a z těla svíčky směrem nahoru vystupuje knot (nazýváme jej *horní stín*), který vyjadřuje maximální cenu (končí na hodnotě shodnou s maximální cenou), a obdobně pro minimální cenu vystupuje druhá strana knotu (*spodní stín*) po ze spodní strany těla svíčky.

Směr pohybu ceny je pak vyjádřen rozdílnou barvou svíčky. Kvůli používání různých pozadí pro graf (tmavý či světlý) se může způsob vybarvování lišit, bílá svíčka na bílém pozadí pravděpodobně nebude mít stejný význam, jako na tmavém pozadí. Mnou používaný MetaTrader používá graf defaultně s černým pozadím, bílá svíčka znázorňuje pokles, průhledná vzrůst. Máme-li však před sebou na papíře tradiční černobílý svíčkový graf, bílá svíčka bude naopak značit růst, a černá pokles, je třeba si tedy dát pozor na konkrétní implementaci grafu.

Obecně se však dá shrnout, že vybarvené tělo barvou reprezentuje svíčku, jejíž uzavírací cena byla níže, než otevírací cena – znázorňuje medvědí periodu. Nevybarvené tělo – průhledné, s ohraničením – pak představuje periodu býčí.

Délka periody závisí na nastaveném rozlišení. Rozlišení můžeme nastavit např. na 1 den, pak hodnoty *open* představují otevírací hodnotu na začátku každého dne, hodnoty *close* na koncích každého dne. Hodnoty *low* a *high* jsou pak minima a maxima z obchodování během každého dne. Analogicky to platí pro rozlišení 1 hodina, 1 měsíc atd.

Výhodou svíčkového grafu je že, z obchodovaného období lze hned na první pohled vyčíst, jestli se jednalo o býčí, nebo o medvědí obchodní období, a to jen komplexním pohledem na barvu a pozici svíček. Svíčky mohou utvářet určité formace, podle kterých se dá následně očekávat budoucí vývoj. Celkovou nevýhodou může být v některých případech malá kompaktnost svíčkového grafu, proto se běžně používá ještě druhý typ OLHC grafu, *graf sloupcový*.

Princip je stejný, jen periody jsou prezentovány vertikálními úsečkami, které mají krajní body v minimálních a maximálních cenách, a otevírací a zavírací ceny jsou představovány zobáčky zleva a zprava.



Obrázek 5 – Graf OLHC. Zdroj: MetaTrader

3.2.4. Metody používané v technické analýze

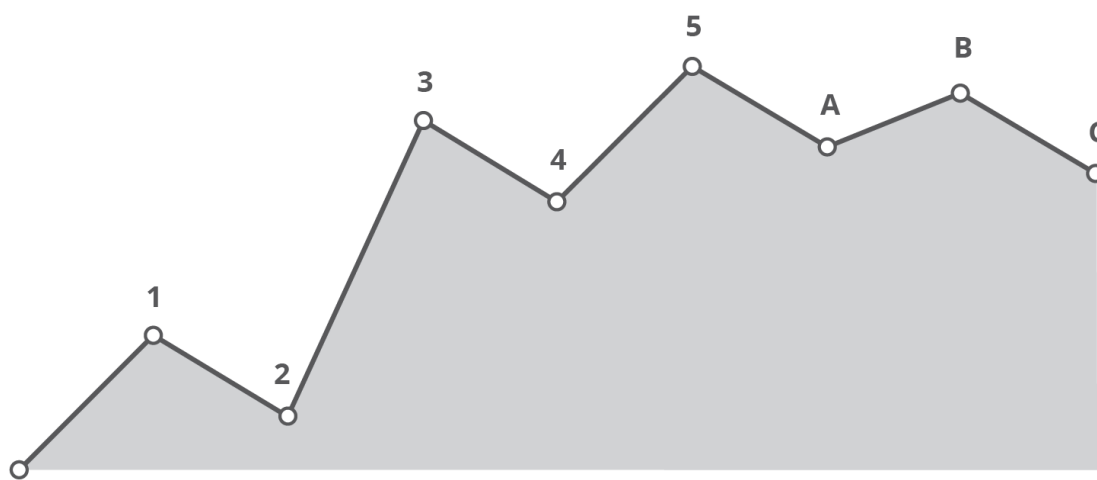
V technické analýze se postupem času vyprofilovalo několik hlavních používaných postupů analýzy. Základní technickou analýzou je rozpoznávání grafických formací a útvarů v grafech, které se dá provádět i ručně. Obchodník si zobrazí graf a hledá v něm známé formace. Například najde grafickou formaci *dvojitý vrchol*. Předpokládá tedy, že přijde obrat trendu ve formě korekce. Pokročilejší technické analýzy zavádějí do analýzy matematiku a statistiku. Vytvoří se ekonometrické modely, které pak aproximují pohyb cen v čase. Cílem těchto analýz je vždy odhadnout konkrétní následující směr pohybu ceny komodity, konkrétně odhadnout budoucí hodnotu komodity v určitém rozsahu $\langle min; max \rangle$, a doporučit tím, nebo dokonce přímo spustit konkrétní akci.

Nejpokročilejší technická analýza pak využívá různých vlnových teorií, kde nemusí být impulsy pro nákup a prodej viditelné. Teorie určí, jakým způsobem ceny oscilují, jaká jsou pravidla pro pohyb cen. Obvykle taková teorie vznikají na základě empirických zjištění. Algoritmy vlnových teorií určují vrcholy a dna ceny dané komodity, které se následně propojují řadou na sebe navazujících úseček. Takto rozložené pohyby se analyzují a hledá se, jaké místo ve vlnovém cyklu dané úsečky dle zvolené teorie představují, v jaké fázi se právě nachází trh. Na základě této informace, a znalosti pravidel použité teorie, lze potom přímo odhadnout následující vývoj trhu.

Jednou z vlnových teorií je, že hospodářství prochází dlouhodobými opakujícími se cykly. Tyto ekonomické cykly objevil při svých výzkumech sovětský ekonom Nikolaj Kondratěv, když zkoumal trendy velkoobchodních cen, mzdových a úrokových sazeb a produkce ve Francii, Velké Británii a USA. Zjistil, že přelomové objevy a vynálezy způsobí růst hospodářství a následně vzniká nadvýroba. Vzniklá nadvýroba však v důsledku dostává hospodářství do krize. Cyklus má tři rozlišitelné části, růst, stagnace a recese, dnes rozlišujeme ještě finální fázi (deprese). Tohoto chování se opakovalo při vynálezech jako je rozmach parního stroje, vynálezem vyzrňovacího stroje pro bavlnu (a strojní výroby příze), železnic, oceli, elektrického proudu, chemického průmyslu a automobilů. Každá vlna má trvání kolem 50 až 60 let. Nazývají se proto *dlouhé vlny*, nebo také *Kondratěvovy vlny*. Kondratěvova vlna platí i pro přelom tisíciletí kdy jsme zažili rozmach informačních technologií. Že úroveň hospodářství se pohybuje cyklicky mezi vrcholem a dnem si všimli i další ekonomové. Britský statistik Joseph Kitchin a jeho *Kitchinův cyklus* je nejkratším objeveným druhem hospodářského cyklu. Trvá asi 40 měsíců až pět let, a je připisován

k opakovaným změnám v zásobách rozpracované výroby. Juglarovy cykly pak mají periodu kolem 10 let a jsou ztotožňovány s periodickými výkyvy v investicích do kapitálových statků. [20][21][22]

Čas vrcholu a dna hospodářství Dnes nabyly vlnové teorie hodně na důležitosti, díky dostupnosti a výpočetní síle počítačů, někdy zavádí i umělou inteligenci.



Obrázek 6 – Elliottova vlna. Svislá osa hodnota, horizontální osa čas

Zajímavou teorií je pak teorie *Elliottových vln*, kterou se budeme blíže zabývat. Tu publikoval americký ekonom Ralph Nelson Elliott v roce 1938 ve své knize *The Wave Principle*, ještě před objevem a popisem fraktálů Mandelbrotem. Jako i jiné vlnové teorie i tato vznikla na základě empirického poznání. Elliott studoval pohyby cen na newyorské burze, a vypořádal v pohybech cen určitá pravidla. V pohybech jsou rozeznávány lokální vlny, teorie pak pracuje s formacemi těchto vln. Stejně formace se překvapivě opakují v různých měřítkách. Formace je složena z jednoho základního fraktálu, který popisuje trh jako celek. Již o 8 let později tuto teorii rozšířil v publikaci *Nature's Law – The Secret of the Universe*, kde principy své teorie ještě více zobecnil.

3.3. Umělá inteligence

Příchod počítačů nám nejen umožnil provádět výpočtově náročné technické analýzy, ale sestavovat i komplexní rozhodovací mechanismy, postavené na umělé inteligenci, anglicky *Artificial intelligence*.

Pojem umělá inteligence jistě svádí ke srovnání s člověkem, avšak *obecná inteligence*, jež by měla vědomí, uměla plně uvažovat, vnímat, učit se, plánovat, zpracovávat data libovolného typu, komunikovat v přirozeném jazyce, sebezdokonalovat se, sama se opravovat, či se dokonce spustit ve fyzické schránce, pohybovat se a manipulovat s předměty, je stále nedosaženým cílem v tomto oboru.

AI si dnes v praxi můžeme představit spíše jako běžící program na obecném, nebo specializovaném hardware, který neobsahuje pouze tradiční předem ručně předprogramované algoritmické postupy, procedury, vzorce a konstanty pro řešení daného problému, ale má implementovaný kód, který se dokáže ze vstupních dat, či metodou pokus-omyl, učit sám, a na základě těchto automaticky naučených vědomostí se rozhodovat, nebo rozhodnutí doporučovat. Umělá inteligence je v těchto případech vždy specificky přizpůsobená pro zvládnutí daného úkolu.

Z dlouhodobého hlediska má umělá inteligence velkou budoucnost. Ovšem ta stále teprve přichází. Už jednou přišlo vystřízlivění, kdy už v padesátých letech minulého století zakladatel moderní informatiky Alan Turing předpovídal [8], že do 50 let bude počítačová inteligence nakolik vyspělá, že člověk nebude schopen rozeznat, zda v textové konverzaci jedná se živým člověkem, nebo strojem. Jenže se ukázalo, že počítače sice závratně zvyšují svůj výkon a dostupnost, snižují svou cenu a velikost, ale algoritmy jsou stále příliš hloupé, neflexibilní a možnosti učení omezené.

U mnoha úkolů se ukázalo, že ruční algoritmizací příliš dobrých výsledků nedosáhneme. Jde o případy, kdy popis chování modelu nebo algoritmu je tak složitý, že lze jen obtížně programovat, pro danou situaci nejsou známé všechny kombinace vstupů a výstupů, nebo je potřeba algoritmus učit či neustále přeučovat podle nově přichozích dat. Typickými úkoly, které řeší umělá inteligence a strojové učení jsou dnes rozpoznávání tvarů v obrazech, rozpoznávání zvuků, komunikace v přirozeném jazyce, strojový překlad, analýza zvuku, manipulace robotickou rukou s obecnými předměty, nebo chůze robota.

V oblasti finančních trhů pak má využití např. v expertních systémech a automatických obchodních systémech. Expertní systémy sestavují sadu výsledků ve formě pravděpodobností budoucího chování systému a konkrétního doporučení k prodeji, nebo nákupu. V případě použití umělé inteligence mohou přestat být zcela závislé na bázi znalostí ručně sestavované experty a začít vycházet ze strojového učení, které zvládne analyzovat ohromné objemy dat a přizpůsobovat se novým poznatkům průběžně. Omezení expertních systémů znalostního typu překonaly umělé neuronové sítě.

3.3.1. Umělé neuronové sítě

Název není čistě náhodný. Řekneme-li dnes slovo *neuron*, většina lidí si představí specializovanou buňku v lidském mozku – základní jednotku nervové soustavy. Síť neuronů pak budou tvořit nervovou soustavu a mozek.

Právě z tohoto konceptu se snaží vycházet i teorie neuronových sítí. Cílem bylo vytvořit nástroj, kterým by člověk dokázal vytvořit systém napodobující chování a funkčnost lidského mozku.

První teoretické pokusy s umělými neurony započal již ve čtyřicátých letech americký neurofyziolog Warren S. McCulloch spolu s matematikem Walter Harry Pitts Jr. V roce 1943 vytvořili a popsali dnes nejznámější matematický model neuronu, tzv. *logický neuron*. Tyto neurony fungují velmi jednoduše, jejich výstup je 1, nebo 0 v závislosti na tom, jestli vážená suma ze vstupních signálů překročila, či nepřekročila určenou prahovou hranici. Žádná učící pravidla však tuto teorii nedoprovázely.

V roce 1957 pak přichází americký psycholog Frank Rosenblatt s konceptem *perceptronu*, nejjednodušším modelem neuronové sítě. Tato teorie již zahrnuje i učící pravidla, a vyvolává nadšení. Krátce na to se však objevilo významné omezení. Bylo zjištěno, že perceptronem lze řešit pouze lineárně separovatelné úlohy, což znamená, že je nemožné jím namodelovat například zdánlivě jednoduchou funkci XOR (jejíž hodnota je pravda, právě když každá vstupní hodnota nabývá unikátní hodnotu). Frank Rosenblatt se tento problém samozřejmě snažil vyřešit, ale nepřišel na to. Nadšení nad perceptrony upadlo a neuronové sítě se dostaly na okraj zájmu na dalších 25 let.

V roce 1986 na řešení problému s původním perceptronem nakonec americká dvojice vědců Rumelhart a McClelland přece jenom přišli. Navrhli vícevrstvé neuronové sítě s asociačními pravidly, nový algoritmus učení *backpropagation*, a

dokázali, že lze řešit i neseparovatelné úlohy. Napadlo je nahradit skokovou aktivační funkci perceptronu nahradit na spojitou funkci *sigmoidea*, se kterou se dodnes setkáme jako s nejčastější přenosovou funkcí. Svým objevem vzbudili novou vlnu zájmu o neuronové sítě.[9]

Neuronové sítě pracují diametrálně odlišně od dnes běžných programů naprogramovaných pro standardní CPU. Běžný program obsahuje instrukce procesoru, jako podmínky, skoky a výpočetní funkce, které se principiálně zpracovávají postupně jedna po druhé (princip Turingova stroje) ve smyslu určitého algoritmu. Tento algoritmus je navíc během svého provádění neměnný. Neuronové sítě se ale neprogramují instrukcemi, ale změnou propojení neuronů a jejich nastavení (změnou vah, prahů a dalších parametrů). Dokonce v neuronových sítích může během procesu učení docházet ke změnám vlivem samoorganizace. Každý neuron je sám o sobě paměťovou i výpočetní jednotkou a výpočet probíhá ve všech neuronech zároveň. Dnes se neuronové sítě úspěšně využívají v praxi. Ukázaly se jako dobré pro modelování oblastí, kde je objevení deterministických závislostí tak složité, že je prakticky nemožné je identifikovat a separovat, v oblastech, kde naopak hraje důležitou roli náhoda. V oblasti finančních trhů jsou neuronové sítě využívány v např. expertních systémech, kde překonaly expertní systémy znalostního typu. Uplatnění najdou i v bankovníctví, našli bychom je jako podpůrný nástroj k modelování změn měnově politické úrokové sazby (2T repo sazby) naší České národní banky:

„Ukazuje se, že se vícevrstvá síť MLP jeví jako vhodným nástrojem pro modelování změn 2T repo sazby. Poskytuje stabilní výsledek, který ve všech případech je lepší než výsledek získaný lineárním modelem měřený střední chybou modelu. Navíc nejlepší výsledek lze dosáhnout se sítí s nejjednodušší typologií a potřebný čas k dosažení tohoto výsledku je minimální. Zvolená síť dokáže vysvětlit kolem dvou třetin variability změny 2T repo sazby ČNB.“
[11]

Neuronových sítí ale existuje více typů lišící se nastavením i strukturou, kdy ne každá může být pro daný účet optimální. Proto si blíže tyto sítě popíšeme.

Neuron

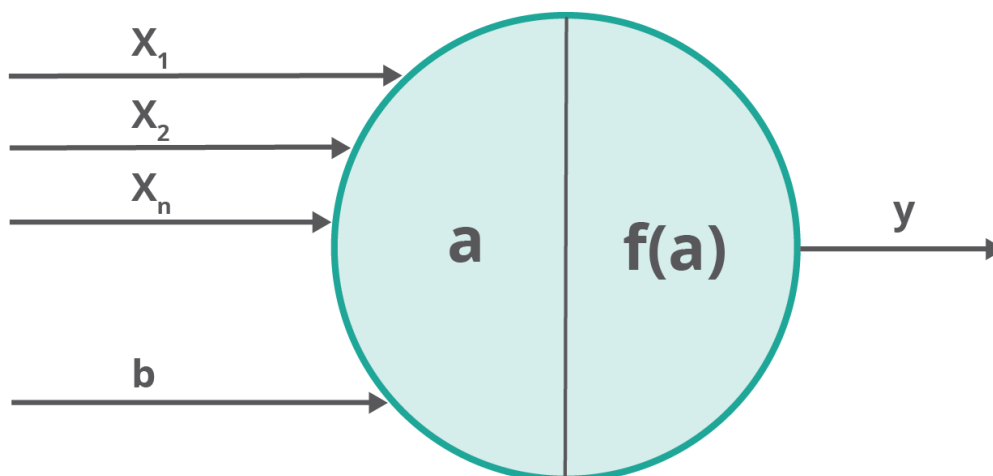
V modelování používáme jako jednotku *umělý neuron*, anglicky *artificial neuron*. Je to základní stavební jednotka neuronové sítě, matematický model, který zjednodušeně

napodobuje architekturu biologického neuronu. Každý neuron je složen ze vstupů, vnitřních vah, přenosové funkce a jednoho výstupu.

- 1) vektor vstupů x_i
- 2) vektor vah w_i
- 3) threshold, práh b
- 4) váha prahu w_b
- 5) aktivační funkce a
- 6) přenosová funkce $S(x) = f(a)$
(jinak *transformační funkce*)
- 7) výstup Y

Vstupní vektor \mathbf{X} představuje sadu všech vstupů neuronu. Může obsahovat podněty buď z vnějšku systému, nebo vstupy napojené na výstupy jiných neuronů.

Vektor vah nastavuje váhy jednotlivým vstupům, a představuje uložení zkušeností do neuronu. Čím vyšší je váha daného vstupu, tím je daný vstup důležitější.



Obrázek 7 – Základní model neuronu [15]

Práh označuje prahovou hodnotu aktivace neuronu. Je to běžná skalární hodnota. Neuron se aktivuje, jakmile hodnota aktivační funkce tento práh překročí. Aktivační

funkce není nic jiného, než suma všech vážených vstupů. Ve vzorci si to můžeme vyjádřit jako:

$$a = \sum_{i=1}^n (x_i w_i)$$

$$a = \sum_{i=1}^n (x_i w_i) + b w_b$$

Druhý vzorec představuje aktivační funkci v případě, že se použije váha i pro prahovou hodnotu. Aktivační funkce je pak vstupem pro přenosovou funkci neuronu, funkci, která určuje, jakým způsobem se z vážených vstupů vypočítá výstup. Přenosová funkce má velký vliv na způsob šíření vzruchu v neuronové síti, používá se proto hned několik typů přenosových funkcí, jako [24]

- 1) skoková přenosová funkce

$$f(a) = 1 \text{ pro } \forall a > b, \text{ jinak } f(a) = 0$$

práh definuje zlom mezi 0 a 1, vrací 0 pro vstup menší než práh, pro větší vrací 1

- 2) lineární funkce

$$f(a) = ka$$

- 3) znaménková funkce, *sign funkce*

$$f(a) = \text{sgn}(a), 1 \text{ pro } x > 0, -1 \text{ pro } x < 0, \text{ jinak } 0$$

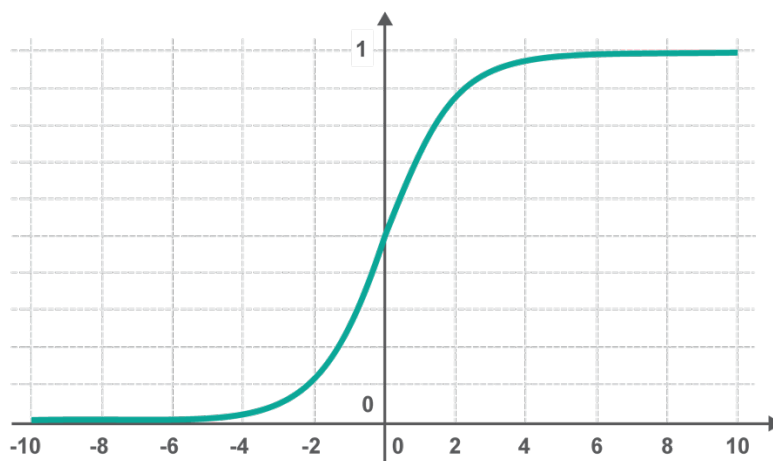
- 4) jednotkový skok, *Heavisideova funkce*

- 5) sigmoidální přenosová funkce, *sigmoída*, také na obrázku Obrázek 8

$$f(a) = \frac{1}{1 + e^{-sa}}$$

- 6) hyperbolická tangenta

$$f(a) = \frac{e^a - e^{-a}}{e^a + e^{-a}}$$



Obrázek 8 – průběh sigmoidální přenosové funkce [24]

Neuronová síť

Vzájemné propojení více neuronů tvoří neuronovou síť. Propojení je realizováno *synapsemi*, které zároveň zabezpečují přenos informace, šíření vzruchu. Počet synapsí určuje velikost a mohutnost neuronové sítě, větší počet synapsí v neuronové síti má možnost uchovat větší množství dat. Lidský mozek obsahuje asi 10^{11} neuronů a 10^{14} synapsí. Přitom již s malým počtem neuronů lze namodelovat nespočet funkčních i nefunkčních kombinací propojení, proto pro zjednodušení američtí vědci Rumelhart a McClelland v roce 1986 navrhli neurony rozkládat do tzv. vrstev, kdy jednotlivé neurony v následných vrstvách jsou propojené každý s každým, ale v rámci vrstvy propojeny nejsou. Takových vrstev pak může být libovolný počet a každá vrstva může obsahovat libovolný počet neuronů, jak však popisuje Aleš Maleček pod vedením docenta Václava Jirsíka ve své práci: „Pro vyřešení libovolného problému spojeného s klasifikací vzorů, nebudeme nikdy potřebovat více jak dvouvrstvou síť s vhodným počtem počtem neuronů v jednotlivých vrstvách.“ (*Kolmogorův teorém*). **Error! Reference source not found.** Počet potřebných neuronů pak může být určen adaptivně, nebo heuristicky. Adaptivní nastavení počtu neuronů není nic jiného, než smyčka, přidávající do sítě postupně po jednom neuronu do té doby, než proces trénování a testování sítě dosáhne akceptovatelnou úroveň chyby. Heuristika se naopak snaží určit počet neuronů vztahem přímo.

V průběhu vývoje teorie kolem neuronových sítí se vytvořilo několik hledisek, podle kterých je můžeme rozdělit na několik typů. Prvním z nich je počet vrstev. V počátku se pracovalo výhradně s jednovrstvými neuronovými sítěmi, což jsou

Hopfieldova síť a již zmíněný perceptron, později přišli Rumelhart s McClellandem s vícevrstevnými sítěmi. Prvními představiteli vícevrstevných sítí jsou MLP síť, tedy síť využívající vícevrstevný perceptron (*Multi Layer Perceptron*). Pak ART síť založené na teorii *Adaptive resonance theory*. A síť typu RBF.

Neuronové síť se liší také způsobem učení. Známý je algoritmus backpropagation, který představuje algoritmus učení sítě s učitelem. Učení bez učitele pak využívá např. Hopfieldova síť.

Dělení podle architektury

- | | |
|---------------------|------------------------|
| 1) Počet vrstev | 1 vrstva, více vrstev |
| 2) Cykličnost vazeb | acyklické, cyklické |
| 3) Organizovanost | pevné, samoorganizační |

Dělení podle použití

- 1) simulace algoritmu bez známého matematického předpisu
- 2) hledání skupin prvků s podobnými vlastnostmi
- 3) rozpoznávání vzorů, klasifikace
- 4) predikce

Dělení podle způsobu učení

- | | |
|----------------|-----------------|
| 1) s učitelem | backpropagation |
| 2) bez učitele | Hopfieldova síť |

Dělení podle typu učení

- | | |
|--------------------------|--------------------|
| 1) deterministické učení | backpropagation |
| 2) stochastické učení | evoluční algoritmy |

3.3.2. Genetické algoritmy

Při studiu genetických algoritmů a zde používaných pojmů může člověk získat pocit, že zabrousil do biologie a genetiky. A je to částečně pravda. Teorie genetických algoritmů je inspirovaná právě přírodou a využívá pojmy z přírodní evoluce a genetiky.

Genetické algoritmy jsou nejrozšířenějším typem evolučních algoritmů. Jsou společným vyjádřením pro třídu moderních matematických postupů, které využívají modely evolučních procesů v přírodě. Využívají se tam, kde by řešení úlohy systematickým prozkoumáním celého stavového prostoru trvalo neúměrně, nebo prakticky nekonečně dlouho. Dnes najdou uplatnění například v řešení problémů řízení firem.

Genetické procesy probíhající v přírodě objevil a studoval Gregor Johann Mendel v letech 1856 až 1863. Studoval nejen botaniku, zoologii, ale i chemii, matematiku a fyziku. Díky jeho zálibě v matematice, možná i díky jeho profesorovi fyziky známému Christianu Dopplerovi, který prosazoval užití kombinatoriky a teorie pravděpodobnosti v aplikovaných vědách, si Mendel uvědomil důležitost matematiky a statistiky pro vysvětlování přírodních dějů. Následně na základě svých pokusů v roce 1866 ve své práci *Pokusy s rostlinnými hybridy* formuloval tři pravidla, která později vešla ve známost jako *Mendelovy zákony dědičnosti*. Tyto zákony pak rozvinul Charles Darwin se svou evoluční teorií opírající se o přírodní výběr. V evolučním vývoji se podle něho prosazují jedinci, kteří mají jisté žádoucí charakteristiky, a které jsou na genetické úrovni určeny kombinováním rodičovských chromozomů.

V polovině 70. let 20. století pak vědce J. Hollanda a D. Goldberga napadlo, zda by se nedaly tyto obecné představy o hnacích silách evoluce převést do počítačových modelů, a jako jako první začali zkoumat, zda by bylo možno při hledání lepších řešení složitých problémů obdobným způsobem kombinovat části existujících řešení.

Jak jsme si již zmínili, v problematice genetických algoritmů najdeme termíny z přírodních věd. Dědičnost jednoho, nebo několika znaků řídí *geny*. Geny jsou v genetických algoritmech parametry jedince, jsou sekvenčně uspořádané v daném pořadí a výsledný řetězec tím tvoří strukturu nazývanou *chromozom*. Geny, a tedy i chromozom, jsou reprezentovány binárními řetězci, tzn. sekvencí jedniček a nul, a většinou představují zakódovaná dekadická čísla. Pozici genu v chromozomu nazýváme *locus*. Soubor všech genetických informací pak tvoří *genotyp*. U živých organismů se jedná o souhrnné označení pro kompletní genetickou informaci organismu nebo buňky. V počítačovém modelu je genotyp představován chromozomem přímo. *Fenotyp* je pak soubor všech pozorovatelných vlastností organismu, a představuje výsledek spolupůsobení genotypu s prostředím. To, jak organismus v daných znacích skutečně vypadá. V počítačovém světě je fenotypem *význam* informací v genotypu zakódovaných. [1] Máme-li tedy populaci, kde každý chromozom kóduje nějaké řešení problému, pak chromozom je genotyp a řešení, jenž kóduje a které představuje, je fenotyp.

Modely postavené na genetických algoritmech mají několik společných rysů. Namísto s jednotlivými řešeními pracují s celou množinou možných řešení zadaného problému. Řešení se postupně vylepšují tak, že se preferují lepší řešení. Lepší řešení vznikají z původních řešení křížením a mutací jejich chromozomu a eliminují řešení horší. Tomuto procesu říkáme *reprodukce*. Je to iterační proces, kdy v každé iteraci vzniká nová generace řešení.

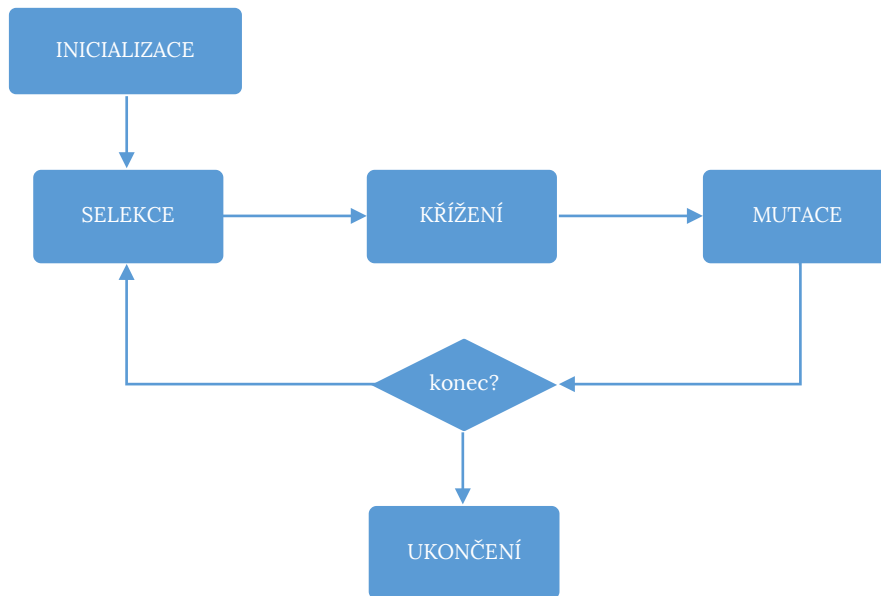
3.3.3. Genetické operátory

V genetických algoritmech se vyhranily tři základní genetické operátory. Selektce, křížení a mutace. Jsou to zároveň nejčastěji používané genetické operátory. Tyto operátory nepracují zcela náhodně. Například pro první z nich, selekci, je vhodné umět nějakým způsobem ohodnotit kvalitu všech jedinců, a vybrat jen ty nejlepší. Zde se objevují dva pojmy *účelová funkce* (*cost function*) a *fitness funkce* (vhodnost). Účelová funkce každému jedinci přiřazuje reálné číslo. Například může obsahovat penalizační funkci, která bude vyjadřovat postih za nesplnění předem daných omezujících podmínek pro řešení. Fitness funkce přímo vychází z účelové funkce, resp. je to normalizovaná hodnota účelové funkce. Normalizace se provádí typicky do intervalu $<0; 1>$, což znamená, že nejnižší hodnotě se přiřadí nula, nejvyšší jedna, a ostatní hodnoty jsou z původního intervalu do $<0; 1>$ lineárně namapovány.

Každý ze zmíněných genetických operátorů operátorů je spuštěn na předchozím setu chromozomů, aby vznikla nová generace. Je to iterační proces, nazývaný *reprodukce*. A jak taková reprodukce v digitálním světě pracuje? Nejdříve se založí počáteční populace o určitém počtu chromozomů. Obvykle jde o jejich náhodné vygenerování. Pomocí fitness funkce se ohodnotí kvalita všech jedinců (chromozomů) dané populace. Začne první iterace reprodukce, to znamená spuštění genetických operátorů na této populaci. Selektce, mutace a křížení spustí proces reprodukce a rekombinace. Původní jedinci se z populace odstraní jako zastaralé (ekvivalent úmrtí), a noví jedinci, které opět ohodnotíme pomocí fitness funkce, se zařadí do populace. Noví jedinci jsou vloženi do populace, a nahradili staré. Zde se opět dá inspirovat reálným světem, a nechat některé jedince přežít z minulé generace, čímž se generace budou částečně překrývat. Používanou možností je ponechání nejlepšího člena aktuální populace i do populace nové. To je pak zajištěno tak, že chromozom nového jedince vždy nahrazuje náhodného jedince s podprůměrnou hodnotou fitness funkce (kvalitou).

Toto se opakuje, dokud není splněna předem daná ukončující podmínka. Takovou podmínkou je nalezení takového chromozomu, který má hodnotu fitness funkce blízkou nebo rovnou její optimální hodnotě. Ukončení genetického algoritmu může ale nastat i například dosažením daného (maximálního) počtu provedených cyklů.

Již víme, že počáteční populaci získáváme náhodným vygenerováním. Nebylo by však lepší rovnou vybrat kvalitní chromozomy hned do počáteční populace, aby se k dobrému řešení dospělo rychleji? Kvalitní populaci jedinců můžeme mít již připravenou jinými heuristickými metodami. Tento způsob však ukázal jako nefunkční, ukázalo se, že se tímto zvyšuje šance, že předčasné konvergence do určitého lokálního optima, který není dostatečně dobrý. Velikost počáteční populace se doporučuje kolem jednoho sta jedinců, nebo mezi jedno- až dvojnásobkem délky binárního řetězce chromozomu.



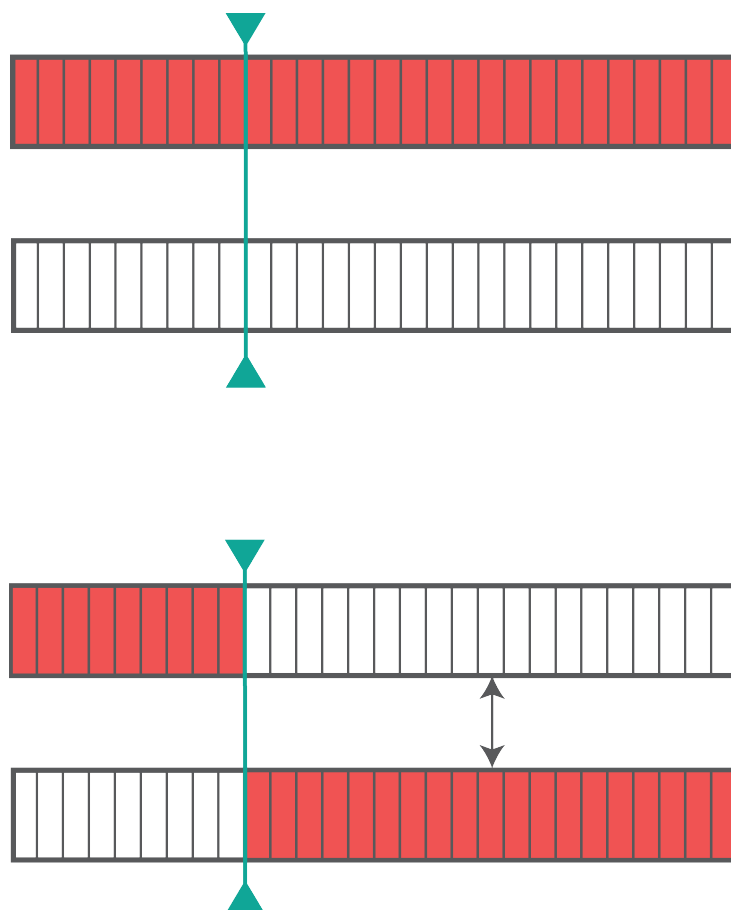
Obrázek 9 – Proces reprodukce [1]

Vraťme se ale zpět k jednotlivým genetickým operátorům. Během procesu selekce je důležité, aby selekční princip preferoval jednak jedince s dobrou hodnotou fitness funkce, a zároveň zachovával populaci dodatečně různorodou na straně druhé. Jakýmkoli jednotvárným omezením stavového prostoru může dojít k předčasné konvergenci do lokálního optima. Proto se používá například metoda *metoda ruletového výběru*, metoda, při které program vygeneruje všem rodičům hodnoty vhodnosti jako náhodná čísla z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$. Metoda ruletového výběru je zároveň nejčastěji používanou metodou selekce. Další metodou je *rank výběr*. Ten pracuje s přirozenými čísly, kdy seřazené hodnoty účelové funkce do rostoucí řady namapuje na rostoucí řadu přirozených čísel začínající číslem 1. Nejmenší hodnota účelové funkce má tedy rank 1, druhá nejmenší rank 2, atd. Metodu lze tím pádem bez problémů využít i pro účelovou funkci, která není normována. V druhém kroku rank výběru je potom vytvořena ruleta s počtem dílků odpovídajícím trojúhelníkovému číslu,

$$T_n = 1 + 2 + 3 + \dots + (n - 1) + n = \frac{n(n + 1)}{2} = \left(\frac{n + 1}{2}\right)$$

kde n je nejvyšší rank tak, aby mohl být každému jedinci vyhrazen na ruletě prostor odpovídající jeho ranku. Následně je pak spuštěn ruletový výběr. V praxi se ještě setkáváme s několika úpravami pro zlepšení průběhu genetických algoritmů, jako

například *elitismus*, kterým zamezíme ztrátě nejlepšího jedince. Ten vybírá nejlepšího jedince do nové populace přednostně a ruletový výběr či rank výběr provádí až následně.

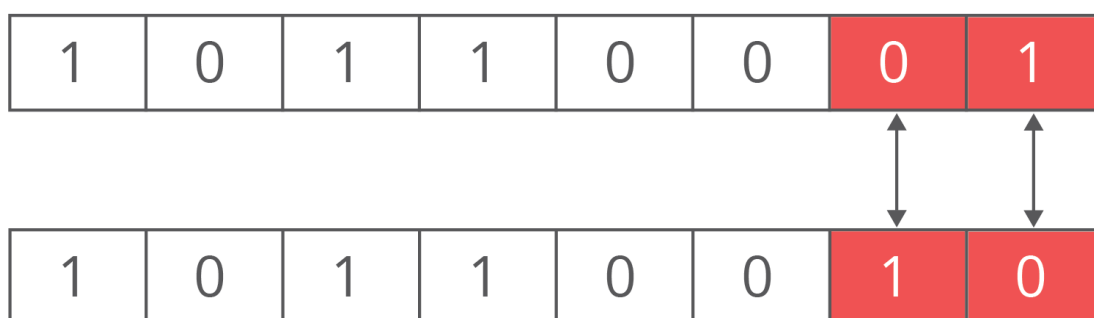


Obrázek 10 – Jednobodové křížení chromozomu.

Dle obrázku Obrázek 7 pokračuje proces operátorem křížení. Stejně jako v reálném světě, pro křížení jsou potřeba dva jedinci (rodiče), a není to nic jiného, než výměna částí svých chromozomů mezi sebou. Každý jedinec se navíc může křížit, a tím stát i rodičem, vícekrát. Na druhou stranu se nemusí na křížení podílet ani jednou. Pravděpodobnost křížení se nastavuje parametrem před začátkem běhu algoritmu, kdy stoprocentní pravděpodobnost znamená, že všichni potomci vzniknou křížením. Standardní hodnota je 80 až 95%.

Křížení může nastat více typů, ale v praxi se používá pouze nejjednodušší, jednobodové křížení. Je tedy určen jakýsi zlomový bod, který určuje místo, od kterého jsou následné geny mezi jedinci vyměněny. Stejným způsobem pak lze implementovat i multibodové křížení, kdy jsou prohozeny informace v chromozomech jen v určitých úsecích.

Proces následuje závěrečnou fází, mutací. Mutace představuje proces inverze náhodně vybraných bitů v chromozomu, a má důležitou funkci zabránit konvergenci algoritmu do lokálního extrému. Kolik bitů se bude mutovat, se určuje předem v parametrech genetického algoritmu. Nejjednodušší mutace může být jednobodová, kdy se invertuje jeden náhodný bit. Vícebodová pak mutuje n bitů. Mutace stačí nastavit na nízké hodnoty takové, aby se zabránilo zmíněné stagnaci, při příliš vysokých hodnotách se může výsledný algoritmus blížit náhodnému prohledávání, což je kontraproduktivní. Pro 200-bitový chromozom je vhodnou hodnotou mutovat jeden až dva bity, což odpovídá půl až jednomu procentu pravděpodobnosti mutace.



Obrázek 11 – Proces mutace chromozomu, mutovaný chromozom (dole) má dva bity invertované.

3.4. Teorie chaosu

Teorie chaosu popisuje chování nelineárních systémů, které mají vnitřní řád, přitom se ale jeví jako systémy založené na náhodných jevech. Chaos vzniká proto, že je systém velmi citlivý na počáteční podmínky, a tak nelze budoucí stavy tohoto systému běžnými způsoby předpovídat.

Teorie chaosu se v ekonomice dobře uplatňuje. Lineární modely popisují svoji reálnou předlohu úspěšně jen tehdy, je-li reálný systém také lineární. Pokud se jim to daří, pak jen po krátkou dobu. Procesy v ekonomice totiž obvykle nemají lineární charakter. Deterministický systém s nelineární dynamikou může generovat náhodné výsledky v krátkodobém měřítku, avšak trvalejší trendy a cykly mohou být stále přítomny. V této souvislosti si uvedeme dvě kategorie, které jsou ve vzájemném protikladu, co se týče řádu a nahodilosti. Některé jevy se mohou jevit jako jako náhodné, při podrobnějším zkoumání však můžeme objevit nějaký vnitřní řád tohoto jevu. Doc. Dostál toto vysvětluje na příkladu pohybu osob na nádraží. [1] Ten se může jevit jako nahodilý, ve skutečnosti jde jak o nahodilost, tak i řád tvořený příjezdy vlaků. Přítomnost různé míry řádu, chaosu a nahodilosti pak platí i pro ekonomiku, které řádné fungování může být narušeno politickými změnami, či přírodními katastrofami.

3.4.1. Atraktory

K teorii chaosu neodlučitelně patří atraktory. Z anglického slova *attract*, přitahovat, znamená *atraktor* dynamického systému množina stavů, do kterých tento systém směřuje. Je to stavová veličina, která popisuje rovnováhu systému, který není ve své rovnováze nehybný. Je to množina hodnot, kterých nabývá stavový vektor po dostatečně dlouhém časovém úseku od svého spuštění.

Řadíme je do několika tříd:

- 1) bodové atraktory
- 2) cyklické atraktory
- 3) chaotické atraktory

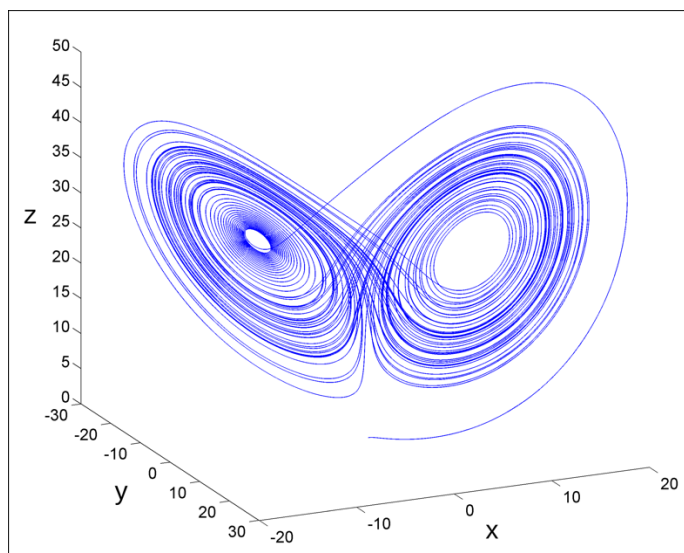
Nejjednodušším atraktorem je *bodový atraktor*, kdy je rovnováha představována bodem. Atraktorem označujeme množinu, ve které je stavový vektor daného dynamického systému, kdyby byl systém přítomen v nekonečném čase. V případě bodového atraktoru se tedy systém ustálí v jediném konečném bodě, příkladem budiž

pohyb kuličky zavěšené na provázku. Pokud je kulička vychýlena z rovnovážné polohy, koná kývavý pohyb, avšak v nekonečném čase se ustálí v jednom bodě, představující rovnovážný stav. Zároveň již ve své podstatě nejde o dynamický systém.

V případě *cyklického atraktoru* je již součástí rovnovážného stavu neustálý cyklický pohyb. Zde rovnováhu představuje limitní cyklus, kdy je systém přitahován do stavu, kdy osciluje mezi dvěma, či více konkrétními body. Pokud opět vezmeme do úvahy systém s kyvadlem, pokud mu je neustále dodávána energie nutná k tomu, aby kyvadlo nezastavovalo, pak se jedná o systém s cyklickým atraktorem. I v případě, že do kyvadla strčíme rukou a tím jej rozkýveme více, systém se časem ustálí na stejném slabším kývání, úměrným konstantně dodávané energii. Ustálené kývání je jeho limitním cyklem.

Zajímavé ale jsou především chaotické atraktory. Zde je součástí rovnovážného stavu také neustálý pohyb, avšak na rozdíl od cyklického atraktoru, kde se jednotlivé bodové atraktory opakují znovu ve stejném pořadí každou iteraci cyklu, a každý lze analyticky zkoumat, nelze v případě chaotického atraktoru budoucí chování systému určit. Přesto se nejedná o náhodný pohyb, systém je jen příliš citlivý na počáteční podmínky. Obdobně na příkladu s kyvadlem je kyvadlu dodávána energie nepravidelně. Kyvadlo pak necyklí mezi stejnými dvěma body, ale v určité oblasti se přesto nachází. Pro tuto oblast zde zavádíme pojem *dynamická rovnováha*.

Ekonomický systém je patrně typickým příkladem chaotického atraktoru, jelikož nejsou důkazy, že by ekonomické jevy směřovaly k bodovým či cyklickým atraktorům. Ekonomický systém se chová chaoticky, náhodně vykazuje neperiodické výkyvy, ať už z jakéhokoli důvodu (změna politické situace, technologický pokrok, přírodní události), avšak z dlouhodobého hlediska vždy konverguje do svého rovnovážného stavu. Konkrétně v ekonomice je jedno z vyjádření oblasti stability oblastí kolem eliptické trajektorie, po které se systém neustále pohybuje. Přesněji, systém je k ní pouze přitahován, ovšem přesně po linii základní elipsy se nikdy nepohybuje. Oblast stability pak znázorňujeme jako oblast ohraničenou elipsou s menšími a většími poloměry než je střední elipsa. Jak jsme si vysvětlili, malé impulsy vychylují trajektorii, ovšem systém se sám stabilizuje. Příliš velký impuls ale způsobí velké vychýlení mimo oblast stability a tím dojde i ke kolapsu systému, v našem příkladu zhroucení ekonomiky.



Obrázek 12 – Lorenzův atraktor.

Jedním z podivných atraktorů je Lorenzův atraktor, ve tvaru motýlích křídel. Křivka Lorenzova atraktoru nepravidelně přebíhá mezi prvním a druhým křídlem. Teorie chaosu pracuje s pojmem fraktál, proto si něco řekneme i o něm.

3.5. Fraktální geometrie

Fraktální geometrie úzce souvisí s teorií chaosu. Teorie chaosu pracuje s pojmem *fraktál*, kolem něž se postupně vyvinula celá vědní disciplína. Pojem poprvé použil francouzsko-americký matematik a profesor Benoît Mandelbrot, narozený 1924 ve Varšavě, žijícím v Paříži a později v Yorktown Heights v USA, v původním vydání své knihy *Les objets fractals, forme, hasard et dimension* v roce 1975. Výraz pochází z latinského *fractus*, zlomený. Na začátku osmdesátých let Mandelbrot rozšířil a aktualizoval své myšlenky a publikoval je v knize *The Fractal Geometry of Nature*. Toto dílo dostalo velkého zájmu a přivedlo fraktály do mainstreamu teoretické matematiky. Jev jako takový však byl zkoumán již dříve už v 17. století G. Leibnitzem a vědci na konci 19. století. Dříve se ale nejednalo přímo o hledání fraktálů, ale zkoumaly se například funkce, které jsou sice spojité v celém oboru, ale přitom nemají derivaci, jako je funkce

$$\sum_{n=0}^{\infty} a^n \cos(\pi b^n x), a \in (0; 1), ab > \frac{3\pi}{2} + 1$$

představená matematikem Karl Weierstrassem v roce 1872. Zajímavá je i Mandelbrotova množina, která byla popsána paradoxně již v roce 1905 francouzským

matematikem Pierrem Fatou jenž studoval rekurzivní procesy, dvacet let před narozením Mandelbrota. Byly bez grafické reprezentace, protože ruční výpočty byly příliš náročné a tehdy ještě nebyly dostupné počítače, kterými by mohl tyto množiny vykreslit. Mandelbrot sklídl úspěch proto, že tyto jevy komplexně popsal, nazval a tím teorii sjednotil [11]

Mandelbrota vedlo ke vzniku fraktální geometrie studium nahodilého pohybu tržních cen, když pracoval u IBM a měl možnost být ve styku s firemním počítačem. Zkoumal trh s bavlnou a všiml si, že ačkoliv byl průběh vývoje cen krátkodobě nepředvídatelný, posloupnost změn se dala vysledovat stejná v různých měřítcích. Podobný úspěch měl i v IBM. IBM zabezpečovalo přenosy přes existující kabeláž pevných linek, která se ve své době používala pro propojení počítačů, a potýkalo se s nepředvídatelnými poruchami linek ve formě vysoké chybovosti přenosu, způsobené bílým šumem, který se zcela náhodně objevoval a zase zanikal. Výměna kabeláže neměla na tento efekt vliv. Když se na tento problém zaměřil Mandelbrot, nechal si vytisknout grafy datových přenosů, našel zde podobnost s Cantorovým diskontinuem, považovaným dnes za fraktál. A tak začal vymýšlet teorii, jež by dokázala fluktuaci cen i šumu popsat. **Error! Reference source not found.**

3.5.1. Fraktál

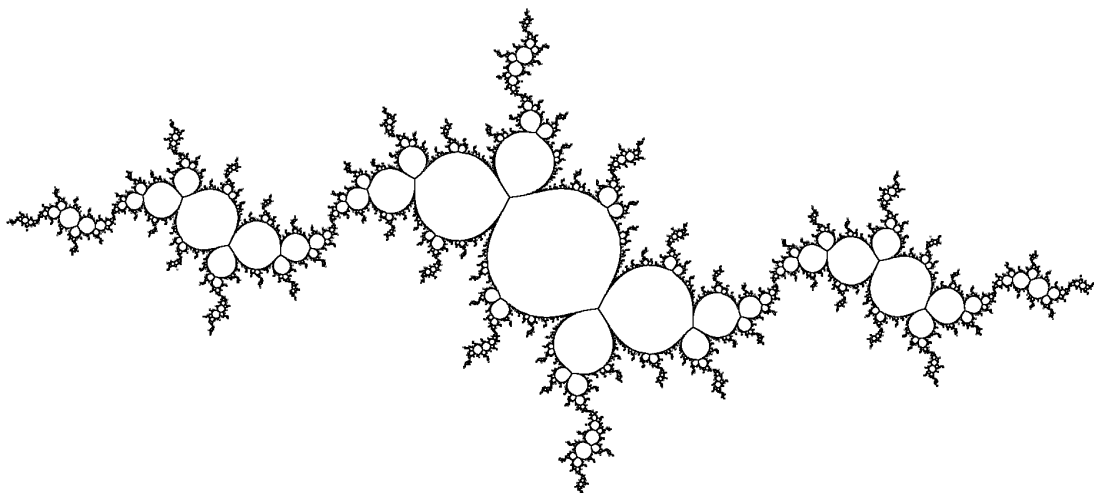
Během první světové války našli Gaston Julia a Pierre Fatou zajímavé jevy vznikající u iterační funkce paraboly, kde c a z_n leží v komplexní rovině. Hodnota c je libovolně zvolený bod z komplexní roviny, který zvolíme jednou jako konstantu pro všechny následující výpočty. Bod z_0 je pak bodem v komplexní rovině, pro který se počítá hodnota funkce. Výpočtem hodnoty funkce pro každý bod z_0 v komplexní rovině by měl vytvořit určitý obrazec. Funkce vypadá následovně

$$z_{n+1} = z_n^2 + c$$

Jenže ne pro každý bod tato funkce diverguje. Pokud určíme nějaký maximální počet iterací, po kterém usoudíme, že funkce pro daný bod nediverguje, a tedy nemá smysl pro daný bod dále pokračovat ve výpočtu, můžeme funkci vykreslit. Výsledkem bude velmi zajímavý obrazec. Například pro

$$c = \frac{e^{\frac{2\pi}{3}i}}{4} - 1$$

bude obrazec vypadat takto



Obrázek 13 – Příklad vykresleného okraje Juliovy množiny.

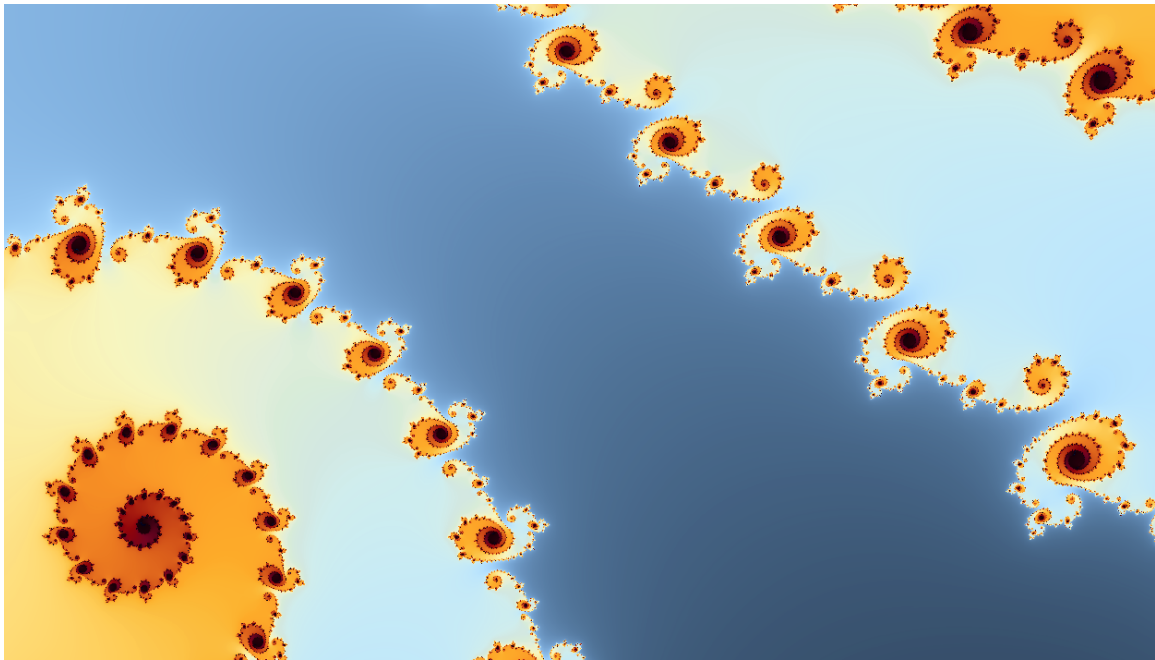
Obrazec je zcela jiný pro každý zvolený bod c . Množina všech bodů z_0 v komplexní rovině, pro které iterační funkce z_n nediverguje, se nazývá *Juliova množina*. Hranice takovéto množiny pak tvoří *fraktál*.

Fraktály jsou složitě strukturované objekty, jejichž charakter se nemění se změnou měřítka. Dá se říci, že fraktály jsou všude v našem okolí. Euklidovská tělesa, jako například přímky, čtverce či krychle, jsou pouze v učebnicích matematiky. Laik se tedy musí vzdát klasických představ o tělesech kolem, ale i dějích kolem nás. V přírodě najdeme fraktály ve tvarech blesků, zemského reliéfu, sněhových vloček, toků řek, oblaků, stromů, jejich větví i listí, cévní systémy živočichů a jejich pohyb krve, a mnoha dalších oblastech.



Obrázek 14 – Porovnání kapradiny z přírody s Barnsleyho kapradí, generovaným počítačem [15]

V praxi najdeme mnoho obrázků s barevně vykreslenými Juliovými obrazci. Souvisí to zároveň s konečnou výpočetní kapacitou našich počítačů. Pro každý bod řady se pomocí ukončovací podmínky zjišťuje, zda řada konverguje k danému atraktoru, například neustálým umocňováním k hodnotě 2. V případě, že se od něj vzdaluje, řada směřuje k nekonečnu. Barva pixelu pak představuje počet iteračních kroků nutných k zjištění, že řada pro daný bod z_0 v komplexní rovině diverguje. Pokud naopak řada k atraktoru konverguje, snadno by se program zacyklil. Proto je předem určen konečný maximální počet iteračních kroků, po kterých se rozhodne, zda pro daný bod směřuje výsledek k nekonečnu, nebo ne. Bod uvnitř Juliovy množiny je představován bodem vykresleným černou barvou, protože uvnitř je překročen práh maximálního počtu cyklů. Naopak na okraji Juliovy množiny funkce směřuje k nekonečnu nejrychleji, proto je barva na okraji nejsvětlejší. Nemusíme navíc zůstat u jedné barvy, pro ještě větší barevnost lze na počet iterací namapovat i vícebarevný gradient, nebo úplně vlastní paletu. Úpravy základního algoritmu potom eliminují efekt oblastí se stejnou barvou a vytvoří plynulé barevné přechody.



Obrázek 15 – Využití barevného gradientu při výpočtu grafické reprezentace Juliovy množiny

Fraktál je donekonečna dělitelný, přičemž všechny díly jsou stejné nebo jako původní celek. Typický je velmi složitý tvar, přestože je generovaný pomocí relativně jednoduchých pravidel. V přírodě se setkáme se soběpříbuznými fraktály, v matematice najdeme i fraktály soběpodobné. Na rozdíl od matematiky, kde nejsme velikostí nijak limitováni, v přírodě platí pro různá měřítka různá pravidla, takže fraktály v ní nalezené mají v nestejných úrovních měřítka relativně malé množství soběpodobných tvarů. Soběpodobné fraktály jsou pak zajímavé tím, že jakýkoliv výsek je přesnou kopií původního obrazce. Jsou tedy měřítkově invariantní, stejně jako je například čtverec v běžné geometrii invariantní vůči středovému zrcadlení, či přímka vůči posunu ve směru svého vektoru. Liší se jen typ transformace.

V Eukleidovské geometrii, kde pracujeme s tvary v bodě, délce, ploše, či prostoru, a tedy v s objekty bez-, jedno-, dvoj- a trojrozměrnými, si zcela vystačíme s vyjádřením dimenze jako celočíselné hodnoty 0, 1, 2 a 3, popřípadě více. V případě fraktálů nám však celočíselné dimenze nestačí. Ve fraktální geometrii se setkáme s pojmem *Hausdorff-Besicovitchova dimenze*, resp. *fraktální dimenze*. Ta je pro fraktál takovou základní charakteristickou hodnotou, matematicky vyjadřující, jak složitý pozorovaný útvar je. Z jedné z definic vyplývá, že fraktální dimenze převyšuje dimenzi topologickou. Velikost rozdílu mezi dimenzí fraktální a topologickou nám udává, jak moc je fraktál členitý. Čím je rozdíl větší, tím je fraktál členitější.

Dodnes nevykrytalizovala jednotná, široce přijímaná definice fraktálů. Matematická definice pojmu fraktál zatím neexistuje. Ve světě teorie můžou být *fraktály* chápány více způsoby, avšak prakticky se jedná o ten samý typ objektu. V Eukleidovské geometrii máme geometricky hladké útvary, jako je přímka, či čtverec, o konečném počtu parametrů, kterými je můžeme popsat. Fraktál je přesným opakem, můžeme jej tedy definovat jako nekonečně členitý útvar. Pokud zabrousíme k dílu pana Mandelbrota, tak říkal, že fraktál je matematická množina nebo geometrický útvar, jejíž fraktální dimenze překračuje dimenzi topologickou a může být neceločíselná. Jiná definice je však dnes možná vhodnější, ta specifikuje fraktál jednoduše jako množinu, jejíž Hausdorff-Besicovitchova dimenze je ostře větší, než dimenze topologická. Co to znamená, jsme si již vysvětlili výše. [11]

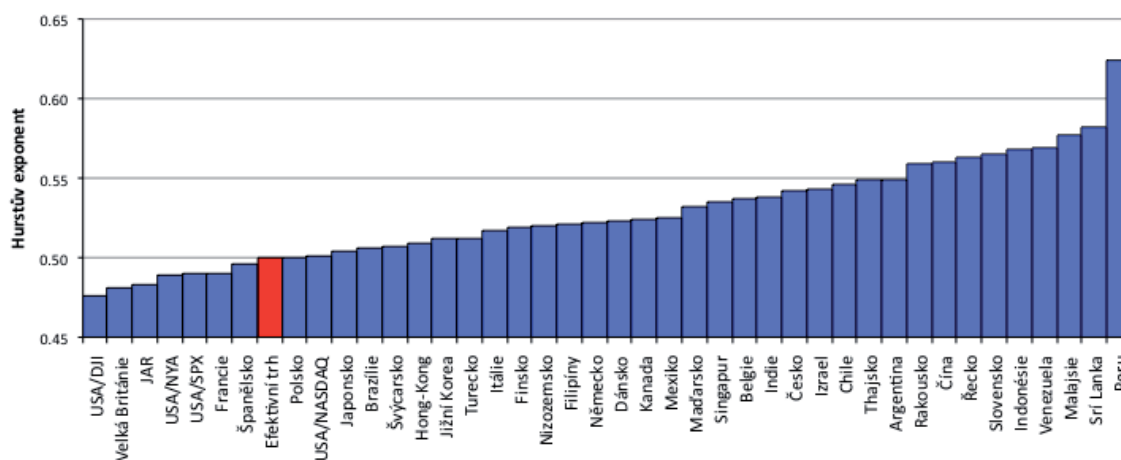
3.5.2. Hurstův exponent

Britský hydrolog H. E. Hurst pracoval na stavebních projektech vodních přehrad. Pro takové projekty je vždy nutná důkladná analýza všech přítoků, odtoků a znalost specifik chování vodních nádrží, aby se kromě jejich dalších parametrů správně určila potřebná kapacita. Jedním takovým specifikem je, že kromě běžných přítoků tvoří přítoky i příchody přírodních živlů jako záplav a vydatných dešťů. Tyto jevy se považovaly za náhodné. Když na počátku dvacátých let minulého století pracoval na analýze toku Nilu, nejdelší řeky Afriky a po Amazonce druhé nejdelší na světě, při zkoumání záznamů o potopách Nilu za poslední tisíciletí si všiml, že příchod záplav možná vykazuje rysy nějakého řádu. Porovnáváním meziročních změn hladiny Nilu vykazovalo podobné chování v krátkém i dlouhém období. Vyzkoušel aplikovat statistickou analýzu, avšak ta nenáhodné chování nepotvrdila. Přitom ale bylo ze záznamů jasně vidět, že po nadprůměrně velké potopě přichází obvykle ještě větší potopa, a naopak po podprůměrně velké potopě je pravděpodobné že přijde potopa ještě menší.

Pro popis tohoto chování si Hurst vytvořil vlastní analytickou metodu. Tu nazval *metodou přeškálovaných rozsahů*, *Rescaled Range Analysis*, zkráceně R/S. Metoda určí *time frame*, časové okno, podle kterého zkoumá časovou řadu hodnot. Časové okno je nad časovou řadou vytvořeno několikrát v různých měřících. Výsledkem metody je tzv. *Hurstův exponent*. Ten nabývá hodnot v intervalu $<0;1>$. Hodnota 0,5 značí řadu zcela neuspořádaných (náhodných) hodnot. Hodnoty takové řady mají Gaussovo, či jiné nezávislé rozdělení. Naopak hodnoty blízké krajům intervalu, tedy 0 a 1, označují

chaotickou řadu, systém citlivý na počáteční podmínky. Časová řada s hodnotou mezi 0,5 a 1 disponuje jevem zvaným *long memory effect*. Takové řady vykazují efekt nezávislý na použitém měřítku během zkoumání jevu, a označují se proto jako *perzistentní* časové řady. V přírodě se nacházejí právě perzistentní řady, jako výskyt povodní, sucha, či jiných přírodních katastrof, či v technickém světě výskyt poruch. Časová řada s hodnotou Hurstova exponentu menším jak 0,5 je řada *antiperzistentní* a mění znaménko častěji, než by se očekávalo pro náhodný proces. Zajímavé jsou pak poznatky z Hurstova exponentu odvozené. Například lze porovnávat Hurstovy exponenty vypočítané v po sobě jdoucích časových periodách. Pokud Hurstův exponent mezi periodami snížil svou hodnotu, je vyšší pravděpodobnost, že trend časové řady bude pravděpodobně pokračovat a ještě zesílí, a naopak.

Mandelbrot objevil přímý vztah mezi Hurstovým exponentem a fraktální dimenzí. Vztah se používá k výpočtu fraktální dimenze, a označíme-li fraktální dimenzi jako D , pak je vztah $D = 2 - H$.

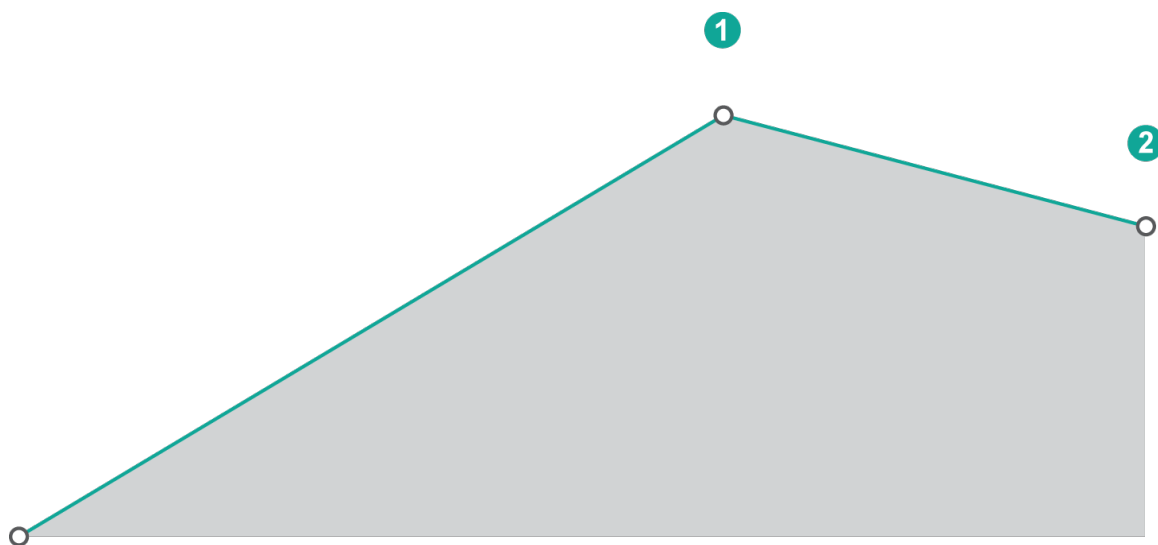


Obrázek 16 – Porovnání akciových indexů z let 2000-2011 Hurstovým exponentem [17]

Ve finanční oblasti je Hurstův exponent dlouhodobě zkoumán. Jeho využití se najde jako další indikátor technické analýzy, v některých případech dokáže odhalit trend, který jinak není v časové řadě vidět. Obchodníci s ním experimentují jako s jedním z nástrojů pro výpočet akciových indexů, úrokových měr, dluhopisů, či směnných kurzů. [17]

4. Analýza problému

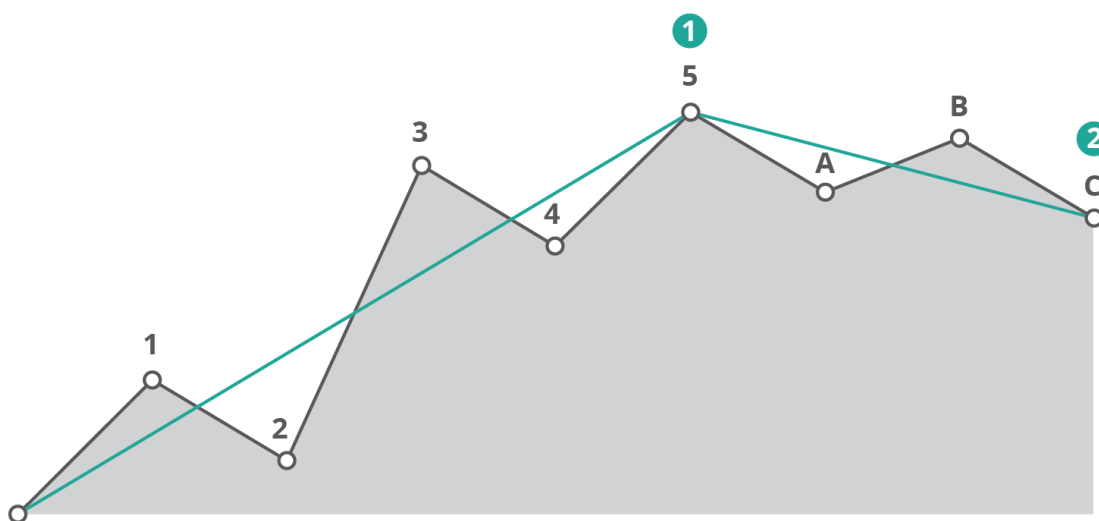
Teorie automatického obchodního systému je založena na tzv. *Elliottově postulátu*. Je to tvrzení, že trh vzrůstá v takzvané impulzní vlně a za ní následuje vlna korekční. Impulzní vlně někdy říkáme vlna hybná. To by nebylo ještě nic neobvyklého, teorie ale detailně určuje, jaké formace tyto vlny tvoří, a že tyto formace tvoří vlny vyšší úrovně. Vlna je hybnou vlnou, pohybuje-li se stejným směrem jako vlna vyššího stupně. Naopak vlna pohybující se proti směru pohybu vlny vyššího stupně je vlnou korekční. Obrázek 17 je případem, kdy nadřazená vlna je vlnou rostoucí. Hybná vlna, jenž se dle zmíněné definice pohybuje ve směru nadřazené vlny, je tedy také vlnou rostoucí, korekční vlna má pak směr klesající, protože se pohybuje proti směru nadřazené vlny. V případě, že nadřazená vlna má směr klesající, pak to bude přesně naopak. Hybná vlna bude mít též směr klesající, a rostoucí bude korekční vlna.



Obrázek 17 – hybná vlna (1) a korekční vlna (2) pro vlnu vyššího stupně, která je rostoucí.

Tyto vlny potom tvoří základní formace, kterou najdeme ve všech měřítkách. Formace se skládá z pětivlnové impulzní formace a třívlnové korekční formace. Elliott pro tyto vlny zavedl standardní označování. Číslicemi označuje vlny impulzní formace, písmeny pak formace korekční. Na obrázku Obrázek 18 je vidět Elliottova vlna vložena do nadřazené impulzní a korekční vlny. Vlny 1, 3 a 5 na obrázku se pohybují v hybném režimu, a vlny 2 a 4 v režimu korekčním. Vlny A a C se také pohybují v hybném režimu, protože mají stejný trend jako nadřazená korekční vlna.

Vlny mají dále specifické vlastnosti. Elliott stanovil několik pravidel, týkajících se velikosti těchto vln. Velikostí vlny zde chápeme rozdíl cen mezi počátečním a koncovým bodem vlny (úsečky). Časové hledisko (osa x) na velikost vlny nemá vliv.



Obrázek 18 – Elliottova vlna v nadřazené impulzní a korekční vlně

První vlna je impulzní, druhá korekční. Korekční druhá vlna není nikdy větší jako vlna první. To znamená, že vlna 2 na byčím trhu končí vždy na úrovni vyšší, než začíná vlna 1, jak je vidět na obrázku Obrázek 18. Třetí vlna je také impulzní, a platí pravidlo, že tato vlna není v nadřazené impulzní vlně nikdy tou nejkratší vlnou. Pro korekční čtvrtou vlnu obvykle platí, že se nikdy nenachází v zóně hodnot, ve které se již nachází vlna 1. To znamená, že vlna 4 na byčím trhu končí vždy nad úrovní konce vlny 1. Obvykle proto, že toto pravidlo může být porušeno v případě, že se jedná o závěrečný impulz.

Tyto vlny tvoří formace, a ty potom formace vyššího stupně, a tak dále. Formace najdeme od nejmenšího ve všech měřítkách. Abychom mohli určit, v kolikátém vnoření se nacházíme, bylo zavedeno patřičné absolutní adresování.

Elliott rozeznával devět stupňů vln.

- 1) velký super-cyklus
- 2) super-cyklus
- 3) cyklus
- 4) primární stupeň
- 5) prostřední stupeň
- 6) malý stupeň
- 7) menší stupeň
- 8) nejmenší stupeň
- 9) minimální stupeň

To znamená, že vlny *minimálního stupně* tvoří formaci, která představuje jednu vlnu *nejmenšího stupně*, vlny *nejmenšího stupně* tvoří vlnu *menšího stupně*, a tak dále až po nejvyšší stupeň.

Jak jsme zmínili v pravidlech pro Elliottovu vlnovou teorii, vlna 4 na býčím trhu končí vždy nad úrovní konce vlny 1, ale toto pravidlo může být porušeno v případě, že se jedná o závěrečný impuls. To proto, že v praxi ideální Elliottovy vlny v pohybech většinou nenajdeme.

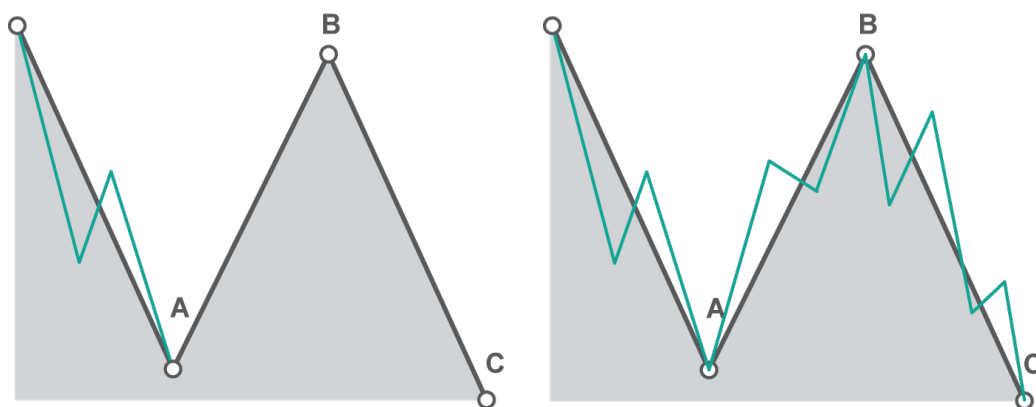
Vlny mají obvykle určité odchylky a deformace, jako jsou selhání poslední impulzní vlny (vlna 5), nebo prodloužení jedné z impulzních vln (tzn. větší pohyb v ceně, než odpovídá pravidlům teorie). K selhání páté (impulzní) vlny dojde v případě, že bude mít tato vlna nedostatečnou délku na to, aby dosáhla nad úroveň třetí vlny. Tato anomálie nastává nejčastěji po silné třetí vlně. Pokud se třetí vlna odehraje navíc ve velmi krátkém čase, může dojít k závěrečnému impulsu, což je situace, kdy čtvrtá vlna vstoupí do oblasti první vlny. Prodloužení znamená, že daná impulzní vlna se ve skutečnosti skládá z více menších vln nižšího stupně, s celkovým efektem jako zmíněná prodloužená impulzní vlna. Nejčastěji bývá prodlouženou vlnou vlna 3, ale prodloužení může nastat i u ostatních impulzních vln (1 a 5). Podívejme se znovu na Obrázek 18. Taková prodloužená vlna, skládající se z impulzních vln, může opět obsahovat prodlouženou vlnu, a tak vlnovou formaci z nižšího stupně.

Hybné vlny mají větší ráz, jsou lépe rozpoznatelné, než vlny korekční. Hybné vlny dělíme na dva typy: *impuls* a *závěrečný impuls*. Impuls je běžná hybná vlna, závěrečný impuls si vysvětlíme níže.

Vlny korekční je obtížnější predikovat. Jejich průběh je jemnější, a nastává více možných kombinací. Dělíme je na 4 typy, a tyto typy se vyskytují ve více variantách.

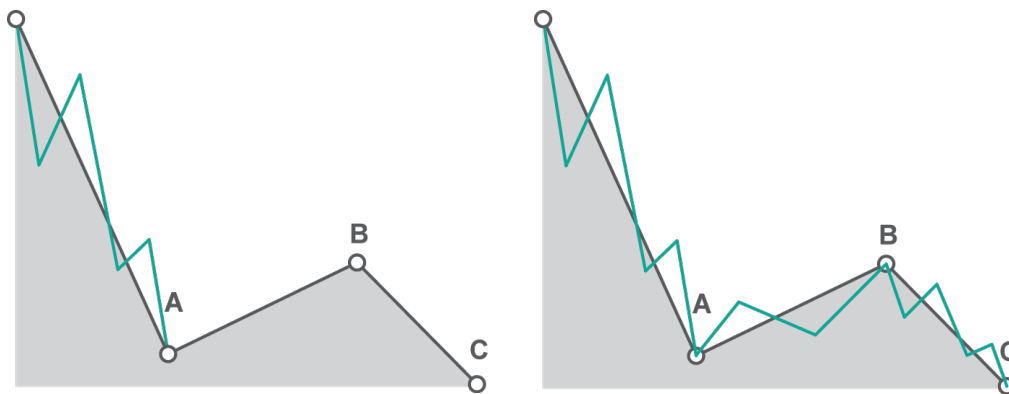
- 1) rovina
- 2) cikcak
- 3) trojúhelník
- 4) kombinace 1, 2 a 3

Korekční vlna typu *rovina* je třívlňovou formací. Každá z vln A, B, C se může skládat z vln nižší úrovně. Vlna A a B se může skládat z tří podvln, vlna C ze z pěti podvln. Vlna B končí typicky jen těsně pod úrovní začátku vlny A, a vlna C končí typicky jen těsně pod úrovní konce vlny A. Základní vlna typu rovina je na obrázku



Obrázek 19 – Korekční vlna rovina. Každá z vln A, B, C se může skládat z vln nižší úrovně.

Korekční vlna typu *cikcak* je také třívlňovou formací. Každá z vln A, B, C se může skládat z vln nižší úrovně. Vlna A a C z pěti podvln, vlna B ze tří podvln. Jak je vidět na obrázku Obrázek 20, vlna B je výrazně menší než vlna A. Cikcak se vyskytuje ve více variantách, jako je dvojitý, trojitý cikcak, rozšířený a zkrácený cikcak. Cikcak roste či klesá typicky více než rovina.

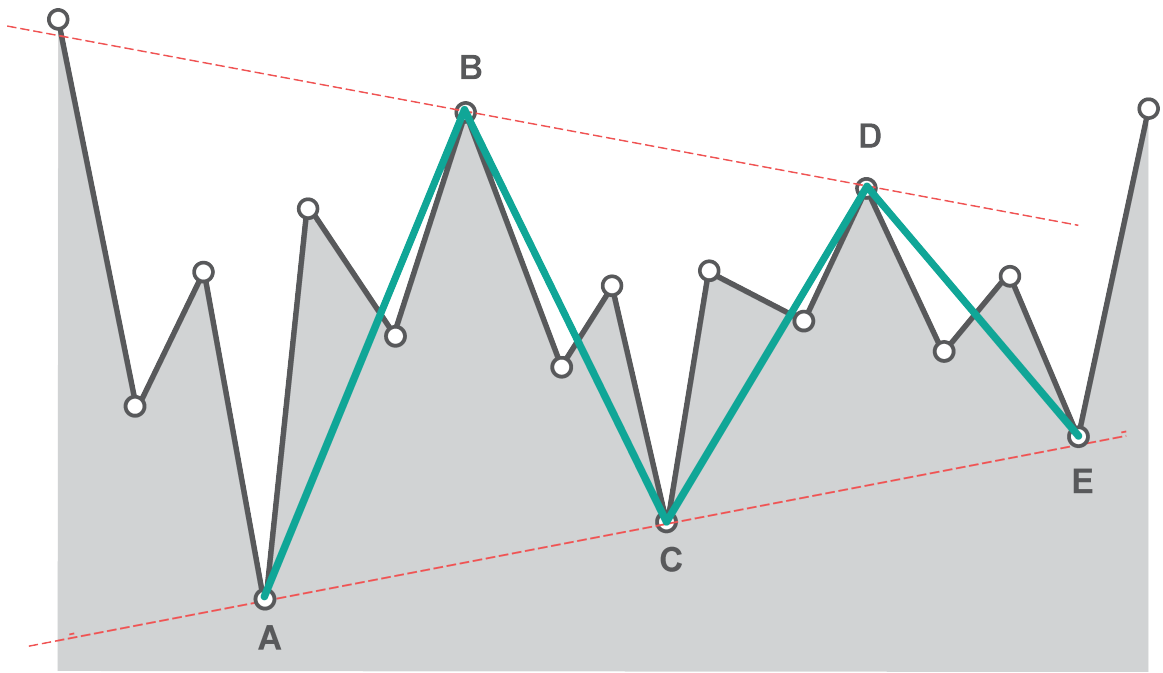


Obrázek 20 – Korekční vlna cikcak. Každá z vln A, B, C se může skládat z vln nižší úrovně.

Trojúhelník má složitější strukturu, je tvořen více třívlnovými strukturami, které jsou označeny písmeny A až E. Trojúhelník sestavíme spojením bodů A-C a B-D a prodloužením do přímky. Opticky vznikne trojúhelník, který se zužuje, nebo rozšiřuje, jako je vidět na obrázku Obrázek 16. Rozšiřující trojúhelník není příliš častý. Bod E se typicky nachází v blízkosti přímky AC, nemusí se však nacházet přesně na ní.

Trojúhelník se ve skutečnosti skládá z dalších podvln, jak je vidět na obrázku. Podvlny trojúhelníku bývají typu cikcak, nebo roviny.

Formace samozřejmě vzniká jak na býčím, tak na medvědímu trhu. Není neobvyklé, že obě linie mají stejný směr. Na býčím trhu v takovém případě mají obě linie rostoucí trend, na býčím pak klesající. Jinou variantou je, že jedna z linií je vodorovná. Další variantou je symetrický trojúhelník, který je na obrázku. Ten se může vyskytnout jak na býčím, tak medvědímu trhu. Má pouze jednu linii rostoucí, druhá je klesající.



Obrázek 21 - Korekční vlna symetrický trojúhelník.

5. Návrhy řešení

Jako programovací platforma bude zvolen MetaTrader od ruské společnosti MetaQuotes Software. Platforma nabízí prvky přímo přizpůsobené pro vývoj automatických obchodních systémů.

Mezi tyto prvky patří vlastní programovací jazyk MetaQuotes Language, známý jako MQL. Jazyk je specializovaný pro programování pro platformu MetaTrader. Jeho syntaxe je srozumitelná, inspirovaná jazykem C. MQL je objektově orientovaný jazyk, není však zcela shodný s C++. Některé vlastnosti, jako je například vícenásobná dědičnost, MQL neobsahuje. Oproti C++ přidává svůj událostní systém (*event model*), kdy se naprogramují handlers pro vybrané události, již dostupné v MQL. Způsob programování se díky tomu podobá některým skriptovacím jazykům. MQL zavádí několik typů událostí, mezi kterými jsou

- Init
- DeInit
- Start
- NewTick
- Calculate
- Timer
- Tester
- Chart Event

Základní událostí je událost *Init*, která nastane při spuštění skriptu. Z ostatních je nejdůležitější událost *NewTick*, která intuitivně nastane při každém ticku. Jazyk je navržen především pro 4 specifické typy programů, kterými jsou

- *Custom indicators*, vlastní indikátory
- *Expert advisor*, automatický obchodní systém
- skripty, procedury určené pro automatizaci opakovaných úkonů a zjednodušení práce s programem, spouští se výhradně ručně
- funkční knihovny, sady specializovaných, nebo pomocných funkcí

Spolu s programem MetaTrader je dodáváno i specializované vývojářské studio MetaEditor. Co se týče práce se samotným kódem, nedosahuje sice úrovně pokročilosti vývojářských studií pro jiné, obecnější jazyky s větší uživatelskou základnou, ale pro vývoj automatického obchodního systému dostačuje díky funkcím specificky poskytovaným pro svůj účel.

Implementace systému byla rozdělena do několika fází. Úplným základem je samotný binding na události MetaTraderu. Druhou fází bylo sestavení setu konstant, které se umístí na začátek programu a budou sloužit jako nastavení. Pak může následovat experimentování se zprovozněním vestavěných technických indikátorů. Další fází byla implementace funkcí pro zamezení ztrát, Stop Loss a Take profit, které umožnilo se s programovacím jazykem MQL dále seznamovat postupně.

Z teorie uvedené v kapitole 3 vyplývá, že pro obchodování je nutné nejdříve dokázat najít vlnové formace a určit, v jaké části vlnové formace se právě nacházíme. Detekce vrcholů je založena na hledání takových vrcholů, které jsou v parametry předem určeném okolí nejvyšší. Obdobně to platí pro dna. Takové vrcholy a dna se nazývají swing high a swing low, a poskytuje je technický indikátor ZigZag. Indikátor ZigZag je dodáváný s programem MetaTrader v základní instalaci. Vstupem indikátoru ZigZag je tzv. hloubka prohledávání. Určena je ve formě počtu posledních ticků, které se opakovaně procházejí kvůli výpočtu swing high a swing low. Výstupem indikátoru je pole hodnot, ke kterému se, podobně jako je běžné v jazyku C, přistupuje přes ukazatel do paměti.

V další fázi byla implementována pravidla pro vlastnosti vln dle teorie Elliottových vln. Cílem je rozeznat konec vlny 3, která bývá výrazná. Potom ní se totiž očekává, že bude následovat korekční vlna 4, což v případě býčího trhu znamená, že pro realizaci zisku na konci vlny 3 zadá systém příkaz pro otevření obchodu. Obchod se následně uzavře co nejbližší konci čtvrté vlny. Obchod by měl ziskový v celém průběhu vlny 4, nesmí se však příliš překročit její konec vlnou 5. Pravidla bylo třeba implementovat i s ohledem na medvědí trh. Pravidla ETW musí systém vždy kontrolovat rekurzivně a to až do nejnižší úrovně (nejvyššího rozlišení).

zisk	-944,21 \$
počet obchodů	8
ziskové obchody	0
ztrátové obchody	8
průběžný majetek max.	10000 \$
průběžný majetek min.	9055,79 \$

Tabulka 2 – Systému se zprvu nedařilo správně rozeznávat pozici ve vlnových formacích.

Optimalizace obchodního systému proběhla krokovou analýzou obchodů a nákupů a experimentální úpravou parametrů spouštěného systému, pravidel ETW a Stop Loss. Byla implementována další omezení na maximální velikost otevíraného obchodu.

zisk	1301,89 \$
počet obchodů	30
ziskové obchody	25
ztrátové obchody	5
průběžný majetek max.	10000 \$
průběžný majetek min.	12900,83 \$

Tabulka 3 – Průběh obchodování během období 10.1.2016 až 31.3.2016 na měnovém páru USD/EUR.

6. Závěr

Práce se věnuje zkoumáním možností, které nabízí postupy založené na fraktální geometrii k analýze a predikci devizových trhů. Prozkoumána je teorie Elliottových vln, která je také využita pro návrh algoritmu automatického obchodního systému na světově nejobchodovanějším měnovém páru EUR/USD. Bylo provedeno jeho testování na historických a současných tržních datech a zjištěné nedostatky byly postupně odstraňovány. První verze obchodního systému měly problémy v implementaci EWT a chybně identifikovaly vlnové formace. Výsledkem bylo pravidelné dosahování limitu Stop-loss. Po sérii oprav a optimalizací se na zkoumaném období podařilo dosáhnout zhodnocení kapitálu. Ziskovost na zkoumaném období v roce 2015 přesahovala 20 %. Systém byl spuštěn na další 4 měsíce roku 2016, kde dosáhl 13% celkové ziskovosti. Obchodní systém by šel dále vylepšovat, např. zlepšit stabilitu equity křivky.

ZDROJE

- [1] DOSTÁL, P. *Pokročilé metody analýz a modelování v podnikatelství a veřejné správě*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. 340 p. ISBN 978-80-7204-605-8.
- [2] GOLDBERG, D. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. USA: Addison-Wesley, 1989. 412 p. ISBN 978-0201157673.
- [3] GRAHAM, B. *Inteligentní investor*. GRADA, 2007. 504 s. ISBN 978-80-247-1792-0.
- [4] REJNUŠ, O. *Finanční trhy*. Ostrava: KEY Publishing, 2008. 548 p. ISBN 978-80-87-8.
- [5] PEITGEN, H. O. et al. *Chaos and Fractals: New Frontier of Science*. USA: Springer-Verlag, 1992. 984 s. ISBN 0-387-97903-4.
- [6] WILLIAMS, L. *How I Made One Million Dollars Last Year Trading Commodities*. USA: Windsor Books, 1979. 130 p. ISBN 978-0930233105.
- [7] ROSE, P. S. *Money and Capital Markets: Financial Institutions and Instruments in a Global Marketplace*. Sixth edition, Chicago, IRWIN, 1997. ISBN 978-02-5615-239-5
- [8] TURING, A. M. (1950). *Computing machinery and intelligence*. *Mind*, 59, 433-460.
- [9] David E. Rumelhart & James L. McClelland (1986). *Parallel Distributed Processing*, Vols. 1 & 2, MIT Press, Cambridge, MA.
- [10] MALEČEK, Aleš a Tran Van QUANG. *Rychlost učení vícevrstvé sítě*. Brno, 2011. FEKT. Vedoucí práce Doc. Ing. VÁCLAV JIRSÍK, CSc.
- [11] SPROTT, Julien C. *Chaos and time-series analysis*. Oxford: Oxford University Press, 2003, 507 s. ISBN 978-0-19-850840-3.
- [12] Edward Lorenz's Strange Attraction. *Logical Tightrope* [online]. Greg MacCabe, 2013 [cit. 2015-12-31]. Dostupné z: <https://logicaltightrope.com/2013/08/29/edward-lorenzs-strange-attraction/>
- [13] Mandelbrot, Benoît. *Fraktály: Tvar, náhoda a dimenze*. Mladá fronta, Praha 2003, ISBN 80-204-1009-0.
- [14] Gleick J. *Chaos: vznik nové vědy*. Brno: Ando Publishing, 1996
- [15] Barnsley M. F. *Fractals Everywhere*. Academic Press Inc., San Diego, 1988.

- [16] Fractal Geometry. IBM 100. [online]. [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: <http://www-03.ibm.com/ibm/history/ibm100/us/en/icons/fractal/>
- [17] KRIŠTOUFEK, Ladislav a Miloslav VOŠVRDA. *Capital Markets Efficiency: Fractal Dimension, Hurst Exponent and Entropy*. Politická ekonomie [online]. 2012, 60(2), 208-221 [cit. 2016-03-23]. ISSN 2336-8225. Dostupné z: <https://www.vse.cz/polek/download.php?jnl=polek&pdf=838.pdf>
- [18] SOJKA, Zdeněk a Petr DOSTÁL. *Elliottovy vlny*. Brno: Tribun EU, 2008. ISBN 978-80-7399-630-7.
- [19] POSER, Steven W. *Applying Elliott Wave theory profitably*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2003. ISBN 0471420077.
- [20] KITCHIN, Joseph. *Cycles and Trends in Economic Factors*. Review of Economics and Statistics. 1923, roč. 5, čís. 1, s. 10-16.
- [21] PRESSMAN, Steven. *Encyklopedie nejvýznamnějších ekonomů*. Brno: Barrister & Principal, 2005. 247 s. ISBN 80-86598-57-8.
- [22] JUREČKA, Václav. *Makroekonomie*. Praha: Grada, 2010. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-3258-9.
- [23] *Foreign exchange turnover in April 2013: preliminary global results* [online]. 2013 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.bis.org/publ/rpfx13fx.pdf>
- [24] VOLNÁ, Eva. *Neuronové sítě 1*. Ostrava, 2002. Ostravská Univerzita, Přírodovědecká fakulta.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Členění finančního trhu podle základních finančních investičních instrumentů [7].....	13
Obrázek 2 – Členění trhu s cizími měnami [7].....	14
Obrázek 3 – Čárový graf. Zdroj: MetaTrader	19
Obrázek 4 – Svíčkový graf. Zdroj: MetaTrader	20
Obrázek 5 – Graf OLHC. Zdroj: MetaTrader	21
Obrázek 6 – Elliottova vlna. Svislá osa hodnota, horizontální osa čas	23
Obrázek 7 – Základní model neuronu [15]	27
Obrázek 8 – průběh sigmoidální přenosové funkce [24]	29
Obrázek 9 – Proces reprodukce [1]	34
Obrázek 10 – Jednobodové křížení chromozomu.....	35
Obrázek 11 – Proces mutace chromozomu, mutovaný chromozom (dole) má dva bity invertované.....	36
Obrázek 12 – Lorenzův atraktor.....	39
Obrázek 13 – Příklad vykresleného okraje Juliovy množiny.....	41
Obrázek 14 – Porovnání kapradiny z přírody s Barnsleyho kapradí, generovaným počítačem [15].....	42
Obrázek 15 – Využití barevného gradientu při výpočtu grafické reprezentace Juliovy množiny	43
Obrázek 16 – Porovnání akciových indexů z let 2000-2011 Hurstovým exponentem [17].....	45
Obrázek 17 – hybná vlna (1) a korekční vlna (2) pro vlnu vyššího stupně, která je rostoucí.....	46
Obrázek 18 – Elliottova vlna v nadřazené impulzní a korekční vlně	47
Obrázek 19 – Korekční vlna rovina. Každá z vln A, B, C se může skládat z vln nižší úrovně.....	49

Obrázek 20 – Korekční vlna cikcak. Každá z vln A, B, C se může skládat z vln nižší úrovně.....	50
Obrázek 21 – Korekční vlna symetrický trojúhelník.....	51

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Nejvíce obchodované měny v roce 2013 [23].....	15
Tabulka 2 – Systému se zprvu nedařilo správně rozeznávat pozici ve vlnových formacích.	54
Tabulka 3 – Průběh obchodování během období 10.1.2016 až 31.3.2016 na měnovém páru USD/EUR.	54

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Nejobchodovanější měny na Forexu do roku 2013 dle globálního průzkumu

PŘÍLOHY

Příloha 1: Nejobchodovanější měny na Forexu do roku 2013 dle globálního průzkumu prováděného každé 3 roky, kam svými daty přispívá 1200 institucí z 52 států včetně České republiky. [23]

Currency	1998		2001		2004		2007		2010		2013	
	Share	Rank	Share	Rank	Share	Rank	Share	Rank	Share	Rank	Share	Rank
USD	86.8	1	89.9	1	88.0	1	85.6	1	84.9	1	87.0	1
EUR	...	32	37.9	2	37.4	2	37.0	2	39.1	2	33.4	2
JPY	21.7	2	23.5	3	20.8	3	17.2	3	19.0	3	23.0	3
GBP	11.0	3	13.0	4	16.5	4	14.9	4	12.9	4	11.8	4
AUD	3.0	6	4.3	7	6.0	6	6.6	6	7.6	5	8.6	5
CHF	7.1	4	6.0	5	6.0	5	6.8	5	6.3	6	5.2	6
CAD	3.5	5	4.5	6	4.2	7	4.3	7	5.3	7	4.6	7
MXN ³	0.5	9	0.8	14	1.1	12	1.3	12	1.3	14	2.5	8
CNY ³	0.0	30	0.0	35	0.1	29	0.5	20	0.9	17	2.2	9
NZD ³	0.2	17	0.6	16	1.1	13	1.9	11	1.6	10	2.0	10
SEK	0.3	11	2.5	8	2.2	8	2.7	9	2.2	9	1.8	11
RUB ³	0.3	12	0.3	19	0.6	17	0.7	18	0.9	16	1.6	12
HKD ³	1.0	8	2.2	9	1.8	9	2.7	8	2.4	8	1.4	13
NOK ³	0.2	15	1.5	10	1.4	10	2.1	10	1.3	13	1.4	14
SGD ³	1.1	7	1.1	12	0.9	14	1.2	13	1.4	12	1.4	15
TRY ³	...	33	0.0	30	0.1	28	0.2	26	0.7	19	1.3	16
KRW ³	0.2	18	0.8	15	1.1	11	1.2	14	1.5	11	1.2	17
ZAR ³	0.4	10	0.9	13	0.7	16	0.9	15	0.7	20	1.1	18
BRL ³	0.2	16	0.5	17	0.3	21	0.4	21	0.7	21	1.1	19
INR ³	0.1	22	0.2	21	0.3	20	0.7	19	1.0	15	1.0	20
DKK ³	0.3	14	1.2	11	0.9	15	0.8	16	0.6	22	0.8	21
PLN ³	0.1	26	0.5	18	0.4	19	0.8	17	0.8	18	0.7	22
TWD ³	0.1	21	0.3	20	0.4	18	0.4	22	0.5	23	0.5	23
HUF ³	0.0	28	0.0	33	0.2	23	0.3	23	0.4	24	0.4	24
MYR ⁴	0.0	27	0.1	26	0.1	30	0.1	28	0.3	25	0.4	25
CZK ⁴	0.3	13	0.2	22	0.2	24	0.2	24	0.2	27	0.4	26
THB ⁴	0.1	19	0.2	24	0.2	22	0.2	25	0.2	26	0.3	27
CLP ⁴	0.1	24	0.2	23	0.1	25	0.1	30	0.2	29	0.3	28
ILS ⁴	...	34	0.1	25	0.1	26	0.2	27	0.2	31	0.2	29
IDR ⁴	0.1	25	0.0	28	0.1	27	0.1	29	0.2	30	0.2	30
PHP ⁴	0.0	29	0.0	29	0.0	31	0.1	31	0.2	28	0.1	31
RON ⁴	...	35	...	37	...	40	0.0	34	0.1	33	0.1	32
COP ⁴	...	36	0.0	31	0.0	33	0.1	33	0.1	32	0.1	33
SAR ⁴	0.1	23	0.1	27	0.0	32	0.1	32	0.1	34	0.1	34
PEN ⁴	...	37	0.0	32	0.0	35	0.0	36	0.0	36	0.1	35
OTH	...		6.6		6.6		7.7		4.7		1.6	
Total	200.0		200.0		200.0		200.0		200.0		200.0	