

**Univerzita Karlova v Praze
Fakulta sociálních věd**

Institut ekonomických studií

Bakalářská práce

2010

Tomáš Jarolímek

**Univerzita Karlova v Praze
Fakulta sociálních věd**

Institut ekonomických studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Akciové trhy pod vlivem behaviorálních
agentů**

Vypracoval: Tomáš Jarolímek
Vedoucí: PhDr. Petr Švarc
Akademický rok: 2009/2010

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil pouze uvedené
prameny a literaturu

V Praze dne

podpis studenta

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá kritikou současného pojetí ekonomie a představuje pojetí nové, ekonomii komplexní. Kritice podrobuje zejména užívání realitě odporujících zjednodušujících předpokladů, koncept statické ekonomie a hypotézu efektivních trhů. Na druhé straně pak vyzdvihuje poznatky behaviorální ekonomie a užití moderní výpočetní techniky. Za tímto účelem představuje nový model simulující akciové trhy za užití prospektové teorie a reálných kontinuálních obchodních mechanismů.

Klíčová slova: prospektová teorie, kontinuální režim, multiagentní model, komplexní ekonomie, hypotéza efektivních trhů, MATLAB

Abstract:

This bachelor thesis criticizes current conception of economics and introduces new approach called complexity economics. It mainly concerns with unrealistic and reality deforming assumptions, static form of economics and efficient-market hypothesis. On the other side positively evaluates findings of behavioral economics and usage of modern computer-related computational methods. For this purpose it introduces new model of artificial stock market based on prospect theory and continuous double auction.

Keywords: prospect theory, continuous double auction, agent-based computational finance, complexity economics, efficient-market hypothesis, MATLAB

Obsah

1 Úvod	7
2 Historie tradiční ekonomie	10
2.1 Léon Walras a William Jevons	10
2.2 Ekonomie bez života	12
3 Hypotéza efektivních trhů	16
3.1 Počátek hypotézy	16
3.2 Formulace hypotézy	17
3.3 Racionální investor	19
3.4 Efektivita jako pojem	21
3.5 A Non-Random Walk	22
4 Multiagentní modely	24
4.1 SFI market	25
4.2 Farmerova nulová inteligence a Genoa market	27
4.3 Chiarella, Iori a Perelló	29
5 Simulace akciového trhu	32
5.1 Charakteristiky trhů	32
5.2 Model prospektů v kontinuálním režimu	33
5.2.1 Agenti	34
5.2.2 Prospektová teorie	34
5.2.3 Averse ke ztrátám	34
5.2.4 Averse k riziku	35
5.2.5 Vyhledky	36
5.2.6 Aplikace	37
5.2.7 Status quo	37
5.2.8 Parametry modelu	38
5.2.9 Technické zpracování	38
5.2.10 Oceňovací mechanismus	39
5.2.11 Nahodilí agenti	39
5.2.12 Techničtí agenti	42
5.2.13 Fundamentální agenti	44
6 Výstup modelu	46
6.1 Heterogenní investoři	46

6.2 Charakteristiky simulovaného trhu	47
6.2.1 Autokorelace výnosů a sdružování volatility.....	47
6.2.2 Šikmost a špičatost.....	49
6.2.3 Vzájemná korelace rozpětí a volatility	50
7 Závěr.....	51
Bibliografie	52
Publikace	52
Internetové odkazy	54
Příloha 1	55
Příloha 2	60

1 Úvod

Americký ekonom Eric D. Beinhocker popisuje ve své knize „The Origin of Wealth“¹ zlomové setkání, ke kterému došlo roku 1987 kdesi v poušti státu Nové Mexiko, kde se pod záštitou Institutu Santa Fe sešli zástupci mnoha vědních disciplín, aby se podělili o své znalosti a jedinečné přístupy. Setkání bylo koncipováno jako interdisciplinární symposium, kde mělo být prezentováno současné pojetí ekonomie ostatním ekonomii nepoznamenaným odborníkům, od čehož si organizátoři slibovali neotřelý pohled na věc a s trochou štěstí i stimulaci k tomu, aby se ekonomie jako vědní disciplína posunula někam dál od doby, kdy se vzhlédla v metodologii fyziky 19.století².

Účastníci symposia byli rozděleni do dvou týmů, a to podle své odbornosti. První z nich byl veden Kennethem Arrowem a sdružoval desítku tehdejších předních ekonomů. Naproti nim stáli významní fyzikové, biologové a informatici. Ti měli za úkol podrobit ekonomické teorie kritickému rozboru a navrhnout vlastní postupy a postřehy, které by ekonomii oživily. Otázku, jestli nějaké oživení ekonomie vůbec potřebovala, si účastníci symposia vyřešili velice rychle:

„[W]hat really shocked the physical scientists was how to their eyes, economics was a throwback to another era. One of the participants at the meeting later commented that looking at economics reminded him recent trip to Cuba. As he described it, in Cuba, you enter a place that has been almost completely shut off from the Western world for over forty years by the U.S. trade embargo. The streets are full of Packard and DeSoto automobiles from the 1950s and relatively few cars of more recent vintage. He noted that one had to admire the ingenuity of the Cubans for keeping these cars running for so long on salvaged parts and the odd piece of Soviet tractor. For the physicists, much of what they saw in economics had been locked in its own intellectual embargo, out of touch with several decades of scientific progress, but meanwhile ingeniously bending, stretching, and updating its theories to keep them running. What the physicists were seeing was the legacy of Walras and Jevons. The mathematical Packards and DeSotos were the equations and techniques that the Marginalists had plundered from physics textbooks a hundred years ago.”³

¹ Beinhocker (2007)

² Beinhocker (2007)

³ Beinhocker (2007), str. 47

Toto přirovnání jednoduše shrnuje vše, co je vyčítáno takzvané tradiční ekonomii, tedy ekonomii středního proudu, jakou známe ze současných vysokoškolských učebnic. Ta zažila během svého vývoje mnoho zlomových okamžiků, které ji značně obohatily, ale v posledních dekadách zdá se nedrží krok s dobou a stále recykluje své kdysi nabyté a konzervované teorie. To jistě samo o sobě není hodno žádné výtky. Problém ale přichází v okamžiku, kdy nám realita ukáže, že tyto teorie nejsou dostačující. Zvláště současné turbulence na finančních trzích nám dávají příležitost zhodnotit, jak si tradiční ekonomie vlastně stojí.

Ač smyslem ekonomie a vědy obecně jistě není pouze predikce, ale také porozumění a vysvětlení přírodních a společenských jevů, je velice alarmující fakt, že podle ekonoma Jamese Galbraitha z celkového počtu patnácti tisíc amerických ekonomů jich dokázal předpovědět finanční krizi necelý tucet⁴. Podle výmluvně pojmenovaného článku „No one saw this coming“⁵ je těchto šťastlivců, kteří prokazatelně varovali před nadcházejícími problémy, pouze dvanáct ze všech akademiků, vládních poradců, konzultantů, investorů a studentů ekonomie po celém světě. Ač metodologie zpětného vyhledávání těchto vizionářů může být diskutabilní, na výsledném faktu, že drtivá většina ekonomů si s dostatečným předstihem nedokázala uvědomit přicházející nesnáze, to nic nemění.

Vše pak pouze dokresluje známý výrok bývalého předsedy Rady guvernérů Federálního rezervního systému Alana Greenspana, jednoho z nejváženějších soudobých ekonomů: „Yes, I found a flaw,“⁶ vztahující se ke snaze vysvětlit a zabránit současné ekonomické krizi metodami ekonomie středního proudu. Výrok plynule vychází z Greenspanovy rétoriky na půdě Federálního rezervního systému, kde před svými kolegy otevřeně přiznává: „We really do not know how this system works...It's clearly new. The old models just are not working.“⁷

Pokud tedy ekonomie podle současného stavu poznání nedokáže plnit úkoly, které od ní lidé očekávají, je třeba zakonzervované teorie podrobit revizi a kriticky přezkoumat, zdali není čas postoupit dál v jejím přirozeném vývoji. Finanční krize tak není zkouškou ohněm pouze pro světovou ekonomiku, ale také pro ekonomii jako vědní disciplínu. Můžeme ji vnímat jako Schumpeterovu tvořivou destrukci, během které

⁴ http://www.nytimes.com/2008/11/02/magazine/02wwln-Q4-t.html?_r=1&partner=permalink&exprod=permalink (staženo 20. 7. 2010)

⁵ Bezemer (2009)

⁶ <http://www.bloomberg.com/apps/news?pid=newsarchive&sid=ah5qh9Up4rlg> (staženo 20. 7. 2010)

⁷ <http://www.bloomberg.com/apps/news?pid=newsarchive&sid=ah5qh9Up4rlg> (staženo 20. 7. 2010)

dochází ke zboření zažitých dogmat a axiomů tradiční ekonomie, aby jejich místo zabraly poznatky jiných, dosud okrajových ekonomických disciplín.

Tyto axiomy, jejich vzestup a pád budou popsány v kapitolách 2 a 3 této práce, zatímco kapitola 4 představí zcela nový ekonomický směr, který by mohl tradiční ekonomii nahradit. Na jeho základě je pak postaven model, který se pokouší simulovat akciové trhy a vysvětlit jejich charakteristické rysy, popsány v kapitolách 5 a 6.

2 Historie tradiční ekonomie

Pokud se znovu podíváme na uvedený citát shrnující údiv fyziků nad podobou tradiční ekonomie, bylo by na místě lépe vysvětlit odkaz na zmíněného Léona Walrase, Williama Jevonse a jejich matematické metody zpodobněné jako omšelé automobily Packards a DeSotos. Tyto ekonomy devatenáctého století, s trochou nadsázky označované za otce moderní ekonomie, překvapivě spojuje velice nepřesvědčivá akademická kariéra⁸. Tento fakt by nebyl nikterak zarážející, pokud by to nebyli právě Walras a Jevons, kdo do ekonomie přinesli striktní formalismus a sofistikované matematické modely a kdo ji přetvořili do takové podoby, jakou ji známe dnes.

2.1 Léon Walras a William Jevons

Léon Walras přišel s koncepcí „čisté ekonomie“, tedy snahy povýšit ekonomii na úroveň skutečné vědy, systematizovat ekonomické poznatky a samozřejmě zavést matematický formalismus. Tím měla být finálně koncipována ekonomická vědní disciplína, která by mohla navázat na předchozí monumentální a úspěšný rozvoj fyziky. Walrasova snaha o formalizaci ekonomie byla vskutku revoluční, jelikož již od dob Adama Smithe se ekonomové považovali spíše za morální filozofy než matematiky. Absence komplexní teorie v soudobé ekonomii a snaha aplikovat na ni fyzikální poznatky vedly Walrase k tvorbě velice abstraktních modelů. Právě z jeho pera vzešel například známý předpoklad dokonalé konkurence.

Walras se ale fyzikou pouze neinspiroval, některé její poznatky do ekonomie přímo přenesl. Je to jeho teorie ekonomické rovnováhy, která pro následující století určila, jakou cestou se bude ekonomie vyvíjet. Vycházejí z příkladu přírodních sil, které se navzájem uvádějí do rovnovážného stavu, i Walrasův ekonomický svět se pohyboval ve stálé rovnováze. Byl vyjádřen soustavou rovnic dílčích rovnovážných stavů, jejichž řešením se dospělo ke generálnímu ekvilibriu. Vyjádřit realitu jako soustavu jednoduchých rovnic determinujících všeobecnou rovnováhu si ale vyžadovalo značné zjednodušení a zavedení nerealistických předpokladů. Byl to pak tedy zase Léon Walras, kdo se svými předpoklady natolik vzdálil realitě, že jeho mistrně propracované modely byly ve výsledku jen těžko aplikovatelné. Mezi těmito svazujícími presumpcemi můžeme jmenovat například obchodování pouze za rovnovážnou cenu a takzvaného Walrasova licitátora.

⁸ Holman (2001), str. 175

Samotný koncept rovnovážného stavu zajistil, že se model stal čistě statickou záležitostí. Pokud by totiž účastníkům trhu bylo povoleno při hledání rovnováhy obchodovat za netržní ceny, soustavně by se tak měnily výchozí podmínky modelu, což by vedlo i k soustavnému pohybu hledané rovnováhy⁹. Tato dynamika by vedla k absenci možnosti najít jedinečné řešení, ve kterém se trhy vyčistí. Proto na scénu přichází licitátor, skrze kterého probíhá veškerý obchod. Licitátor průběžně přijímá nabídky a poptávky a flexibilně mění cenu všech komodit, dokud nenalezne rovnovážné ceny, za které jednotlivé obchody proběhnou. Trh se nám tak stává predikovatelný za vysokou cenu ztráty realističnosti a přirozené dynamiky.

William Jevons se ve svých úvahách velice podobal Léonu Walrasovi v tom směru, že se snažil ekonomii předefinovat novou metodologií matematických modelů, přičemž se zaměřoval zejména na chování jednotlivců založeném na teorii užitečnosti. Vzorem mu taktéž byly fyzikální učebnice, přičemž Jevons se vzhledl zejména v gravitační teorii¹⁰. Jeho ekonomický aktér byl hédonistickým člověkem, který byl přitahován ke komoditám, které mu přinášely slast. V cestě mu ale stály překážky ve formě omezených zdrojů, řekli bychom rozpočtového omezení. Vzájemné působení těchto sil pak vedlo k nalezení bodu, kde mohl aktér maximalizovat svoji slast, k dílčí rovnováze. Skutečnou matematiku ale Jevons do již známé teorie mezních užitečností zavedl tehdy, když mezní užitečnost definoval jako první derivaci celkové užitečnosti¹¹. Umožnil tak jednoduchou matematizaci chování spotřebitele.

Ač po Léonu Walrasovi a Williamu Jevonsovi následovalo mnoho ekonomů jako Alfred Marshall či John Hicks, kteří jejich poznatky značně rozšířili a přehodnotili, byli to právě oni, kteří propůjčili ekonomii dnešní podobu statické a značně matematizované vědní disciplíny.

S ohledem na matematizaci si bylo třeba reálný svět dále značně zjednodušovat, aby ho vůbec bylo možno následně vznikajícími modely pojmut. Stejně jako ve fyzice, která byla ekonomii vzorem a ve které docházelo k přijímání mnoha předpokladů, jako jsou ideální plyny či pohyb ve vakuu, si ekonomie počínala zejména v definici aktérů trhu.

To, co je v současné době největším trnem v oku kritiků tradiční ekonomie, bylo podrobováno kritice již od konce devatenáctého století. Ekonomie totiž obrátila metodu

⁹ Holman (2001), str. 191

¹⁰ Beinhocker (2007), str. 33

¹¹ Holman (2001), str. 165

presumpcí vzhůru nohama. Místo předpokladů realitu zjednodušujících přijala předpoklady realitu deformující. Místo ideálního plynu se rozhodla plynné skupenství zanedbat. Skupina fyziků účastníci se sympozia v Santa Fe byla tedy více než zaražena mírou aproximace, pokud se tomu tak dá ještě vůbec říkat, kterou ekonomie užívá zejména při definici chování jedince. Zcela racionální aktér disponuje veškerými potřebnými informacemi a je schopen si propočítat chování všech ostatních aktérů a veškeré přípustné budoucí scénáře. Je toto správná cesta, jak chování člověka pojmut? Jistě, bez těchto předpokladů nebudou dosavadní modely řešitelné a nebudou nám nabízet přesné predikce, kterých jsou v současné době schopny. Pokud ale tyto predikce nejsou konsistentní s realitou, bylo by na místě nechat prostor modelům, které se ekonomické jevy snaží alespoň vysvětlit, i když nejsou schopny jasné předpovědi. Za tímto účelem vznikají nové koncepty lidského chování beroucí v potaz omezenou racionalitu, mezi které patří zejména behaviorální ekonomie a behaviorální finance. Ty se samozřejmě také snaží pojmut chování skrze určitou aproximaci, bez které by se věda neobešla a bez které by byla jediným modelem reality realita samotná, činí tak však s cílem zjednodušit popisované jevy, nikoliv učinit matematický formalismus legitimním.

2.2 Ekonomie bez života

Druhým odkazem Walrasovy a Jevonsovy éry je již zmiňovaná statičnost. Jak již bylo mnohokrát zmíněno, oba hojně hledali inspiraci ve fyzice devatenáctého století. Snad důsledkem jejich omezených matematických dovedností či zkrátka dostupností studijních materiálů se zabývali výhradně stavem poznání prezentovaným v učebnicích uvozujících studium termodynamické fyziky. Jejím ústředním stavebním kamenem pak byl první termodynamický zákon neboli zákon zachování energie. Na jeho základě byly všechny fyzikální procesy chápány jako procesy v uzavřeném systému, kde se energie pouze přeměňuje, z potenciální na kinetickou, z kinetické na tepelnou a podobně. Jelikož energie uzavřeného systému je konstantní, každá energetická změna na jedné straně rovnice je vykompenzována adekvátní energetickou změnou na druhé straně rovnice, čímž dojde k opětovnému nastolení rovnováhy. Při formulování tohoto konceptu nelze opominout podobnost s vyčišťujícími se trhy. Cena se flexibilně přizpůsobí přebytečné poptávce či nabídce tak, aby nabídka a poptávka dospěly do nového rovnovážného stavu.

S tímto myšlenkovým základem je třeba udělat již pouze malý krok směrem k pojetí ekonomie jako uzavřeného systému, kde dochází k přemísťování a alokaci omezených zdrojů mezi účastníky trhu. Tedy k ekonomii takové, jakou ji známe dnes. Přístup, podle kterého se svět udržuje ve stálé rovnováze, byl konzistentní s tehdejšími znalostmi a umožnil jednoduše vysvětlit mnohé ekonomické procesy a jevy. Walrasovi a Jevonsovi tedy nelze zazlívat jeho aplikaci do svých modelů, lze ale jim i jejich následovníkům zazlívat, že když už se chtěli nechat inspirovat jiným vědním oborem, měli to udělat pořádně.

Zatímco si marginalisté pročítali základní učebnice fyziky, docházelo v jejich nevědomosti ke vcelku radikálnímu posunu v chápání komplexních systémů, kterými bychom mohli nazvat jak ekonomii, tak fyziku. Ekonomové se radostně vzhledli ve všeobecných a dílčích ekvilibriích, fyzikové naproti tomu vedle prvního termodynamického zákona dospívali k formulaci termodynamického zákona druhého. Zde se ale již ekonomie noří do vlastního světa a konzervuje se do podoby, v jaké ji nacházíme dnes.

Veličina zavedená společně s druhým termodynamickým zákonem, entropie, se může zdát jako pojem ekonomii vzdálený, ve skutečnosti ale tvoří nerozlučnou dvojici s obecně přijímaným a známým zákonem zachování energie. Dává totiž přírodním procesům směr. Zatímco pojetí zachování konstantní energie v uzavřeném systému nám poskytuje pouze statický pohled na věc, entropie mu dodává dynamický rozměr. Ve zjednodušené podobě by se dala vyjádřit jako míra nepořádku a chaosu v daném systému, přičemž, což je zásadní poznatek, podle druhého termodynamického zákona entropie stále roste a v celkovém měřítku nemůže klesnout. Každý systém přirozeně směřuje od pořádku k nepořádku, od řádu k chaosu. Jediným rovnovážným stavem, kterého tedy jakýkoliv systém může dosáhnout, je absolutní chaos. Pro ekonomiku jsou fyzikální zákony relevantní z toho důvodu, že se fakticky nachází v prostředí ovládaném přírodními zákony, a není tedy žádný důvod, proč by se jí měl vyhýbat právě druhý termodynamický zákon¹².

Pokud přijmeme entropii jako smysluplný koncept tak, jak ho již fyzika dávno přijala, musíme si logicky uvědomit, že se svět nevyskytuje v uspořádaném rovnovážném stavu, do kterého se po vychýlení stále navrácí, nýbrž je v permanentní nerovnováze. Chatrný pořádek neustále a nevyhnutelně směřuje k rovnovážnému,

¹² Beinhocker (2007)

konečnému a hlavně statickému nepořádku. Jinými slovy, tradiční ekonomové mají pravdu, že v dlouhém horizontu ekonomika dosáhne vyrovnaného stavu, tento stav nám ale již nebude mít co nabídnout. Známý výrok Johna Maynarda Keynesese „In the long run we are all dead“¹³ je zde více než namístě.

Pokud by tedy, jak již bylo zmíněno, měla ekonomie stavět na poznacích vycházejících z fyziky, měla by tak činit kontinuálně a nespokojit se s více než sto let starými teoriemi, jejichž statické vnímání reality jako by inspirovalo ekonomii ke stejnému přístupu k vlastnímu rozvoji. V tomto ohledu tedy zdá se, že je ji třeba předefinovat ze systému uzavřeného, který disponuje pouze omezenými zdroji, na systém otevřený. Otevřený systém totiž umožňuje uchopit ekonomiku jako systém vyvíjející se v čase, jako systém, který by ekonomii navrátil opominutou dynamiku. Uzavřený systém vyvažujících se sil je totiž v důsledku druhého termodynamického zákona odsouzen ke zkáze. Postupem času by entropie rostla a systém by se postupně rozpadal. Konvergoval by ke statickému nepořádku, přičemž by ztrácel svoji komplexitu a uspořádanost.

Je toto skutečně proces, kterým ekonomika v posledních staletích prochází, či spíše sledujeme narůstající komplexitu světového hospodářství? Rozpadá se světová ekonomika na malá chaotická uskupení, nebo je viditelný nárůst inovací, důmyslných modelů, struktur a míry organizace? Otevřený systém totiž umožňuje bojovat proti entropii, umožňuje vynakládáním dodatečné energie budovat řad a oddalovat rozpad. Tuto energii pak poskytují všichni účastníci ekonomických procesů, kteří svým konáním, interakcemi, inovacemi a novými produkty světové hospodářství zvyšují. Pouze v případě, kdy by do ekonomiky přestaly proudit nutné zdroje, výrobní faktory, v případě, kdy by byl složitý ekonomický komplex v některé své složce narušen tak, jak k tomu došlo za současné finanční krize, převládne entropie, systém se složí jako domeček z karet a ekonomika se přesune z bodu živého obchodování do klidového stavu bez ekonomické aktivity.

Pojetí světa jako komplexního a vyvíjejícího se systému je základem pro nový ekonomický směr označovaný jako komplexní ekonomie. Jejím cílem není zavrhnout veškeré poznatky tradiční ekonomie, nýbrž zvolit si realističtější předpoklady a zjistit, jaký vliv má tento nový přístup na vysvětlení jednotlivých ekonomických jevů a

¹³ Keynes (2000)

procesů. Za tímto účelem podrobuje tradiční ekonomii důkladnému rozboru, aby se následně mohla učit z jejích chyb.

3 Hypotéza efektivních trhů

Tradiční ekonomie se v průběhu času zaměřila na jednu specifickou část ekonomiky, na které aplikovala své předpoklady a poznatky a na které je dokonce ve výjimečných případech i testovala. Bylo tomu tak v důsledku snadno dostupných historických dat, hustoty naměřených dat současných a nakonec také v důsledku toho, že měla teoreticky nejlépe naplňovat ustanovené předpoklady. Tradiční ekonomie se zaměřila na finanční trhy. Ty jsou díky své povaze hojně monitorovány a zároveň by se mělo jednat o trhy velice efektivní. Stejně jako se ekonomie začala zajímat o finanční trhy, jejich účastníci se začali zajímat o ekonomii a implementovat její poznatky do svých strategií. Obecného uznání se tak dostalo teorii efektivních trhů, která se stala základem toho, jak bylo v posledních desetiletích na finanční trhy nahlíženo.

3.1 Počátek hypotézy

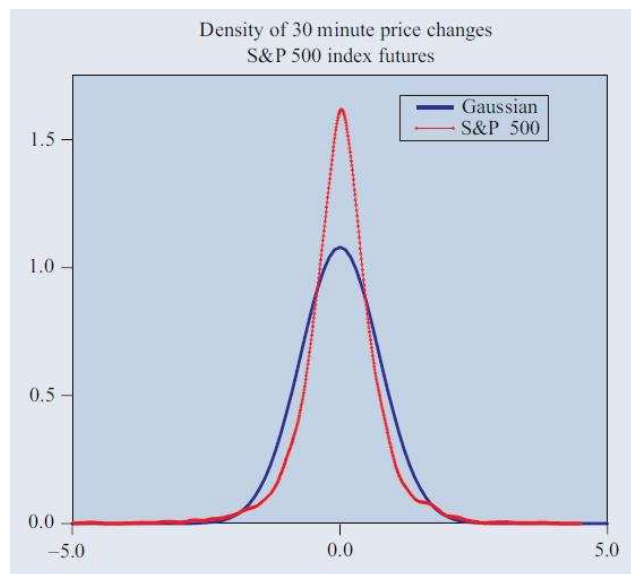
U jejího zrodu byl mezi jinými také Eugene F. Fama, z jehož disertační práce Fama (1965), kterou mimochodem vedl Benoit Mandelbrot¹⁴ (jehož výzkum ještě zmíníme) a její revize Fama (1970) se můžeme nejlépe dovědět, jak byla a je teorie efektivních trhů koncipována. Vše začalo již na počátku dvacátého století, kdy francouzský matematik Louis Bachelier roku 1900 napsal svou disertační práci „Théorie de la speculation“ (The Theory of Speculation), ve které jako první naznačil hypotézu náhodné procházky (random walk hypothesis). Bachelier tvrdil, že jednotlivé změny cen na finančních trzích jsou nezávislémi, stejně rozdělenými náhodnými veličinami, přičemž jejich rozdělení má konečný rozptyl. Jinými slovy tedy tvrdil, že cena finančních instrumentů se pohybuje v čase čistě náhodně.

Navíc pokud vezmeme v potaz dostatečně obsáhlý objem dat, za užití centrální limitní věty můžeme předpokládat, že tento náhodný pohyb cen je normálně rozdělen. Toto revoluční tvrzení však upadlo na několik následujících dekád v zapomnění, dokud s ním nezávisle na Bachelierovi znovu nepřišel M.F.M. Osborne. Proto se tento model náhodných cen začal označovat jako Bachelier-Osborne model. Po Osbornově znovuobjevení tohoto poznatku se mu věnovalo mnoho ekonomů a s jistými odchylkami se všichni shodli, že ceny jsou na finančních trzích rozděleny náhodně.

Prvním, kdo začal tento poznatek kritizovat, byl zmiňovaný Benoit Mandelbrot. V průběhu šedesátých let minulého století publikoval několik prací, ve kterých

¹⁴ <http://genealogy.math.ndsu.nodak.edu/id.php?id=81048> (staženo 20. 7. 2010)

poukazoval na to, že nejen změny cen nesledují gaussovu křivku, ale navíc se podle historických dat sdružují do celků. Jinými slovy rozdělení změn cen má delší, či tlustší konce než normální rozdělení, což znamená, že extrémní cenové výkyvy jsou mnohem pravděpodobnější, než jak by se podle normálního rozdělení mohlo očekávat. Co se týče sdružování cen, Mandelbrot poukazuje na jev, který se v literatuře popisuje jako přerušovaná rovnováha (punctuated equilibrium). Jedná se o proces, kdy jsou fáze klidu střídány fázemi prudkých změn, které se vyskytují v určitém časovém období. Změna cen tedy není zcela náhodná, ale vyskytuje se v určitých svazcích.



Obr. č. 1: Příklad leptokurtického rozdělení

Zdroj: Cont(2001)

3.2 Formulace hypotézy

Eugene F. Fama si byl závěry vedoucího své disertační práce vědom a zohlednil je při konstruování teorie efektivních trhů. Podle Fama (1965) je pohyb cen finančních instrumentů podle náhodné procházky založen na dvou hypotézách: 1) změny cen jsou na sobě nezávislé a 2) sledují určité pravděpodobnosti rozdělení, které nemusí být nutně normální. Zatímco specifické rozdělení zůstávalo nevyřešenou otázkou, na základě svých testů usuzoval, že vzájemná závislost změn cen je vskutku naprosto minimální, ve většině případů pak zcela absentuje.

Samotná hypotéza efektivních trhů pak tvrdí, že efektivní trhy v každém okamžiku zcela reflektují všechny dostupné informace ve svých cenách. To znamená, že ceny ideálně vždy odrážejí skutečnou hodnotu finančních instrumentů a umožňují tak efektivní alokaci kapitálu. Relevantními informacemi jsou pak všechny ty, které

dokážou ovlivnit cenu. Tyto informace, jakmile jsou vypuštěny, se podle hypotézy šíří natolik rychle, že jsou bez jakékoliv prodlevy okamžitě využity trhem a ceny se jim tedy bez jakéhokoliv zpoždění přizpůsobí. Analytické vyjádření nám pak nabízí Fama (1970):

$$E(p_{j,t+1} | \Phi_t) = [1 + E(r_{j,t+1} | \Phi_t)]p_{jt}$$

kde $p_{j,t+1}$ představuje cenu j -tého instrumentu v čase $t+1$, $r_{j,t+1}$ procentuální zhodnocení či znehodnocení j -tého instrumentu mezi časem t a $t+1$, Φ_t relevantní informaci v čase t a E reprezentuje očekávanou hodnotu uvedených veličin. Očekávané zhodnocení, které je podle Famy funkcí rizika daného finančního instrumentu, determinované relevantní informací je tedy podle tohoto modelu plně promítnuto do očekávané ceny v příštím období, která zároveň není determinována žádnou jinou veličinou.

Prakticky to tedy znamená, nejenže jsou všechny dostupné informace již v ceně promítnuty, ale zároveň to jsou právě pouze tyto informace, které určují budoucí cenu. Tento poznatek má dalekosáhlé důsledky. Zaprvé, pokud jsou všechny informace skutečně již promítnuty v cenách, bere hypotéza vítr z plachet všem investorům, kteří věří, že analýzou trhů jsou schopni získat znatelnou výhodu oproti investorům méně sofistikovaným. Znamená to tedy, že ani investiční či podílové fondy, které si udržují nákladné špičkové analytické týmy, nejsou schopny dlouhodobě vykazovat výnos vyšší, než je výnos celého trhu. Pokud k tomu přece jenom dojde, je to považováno za pouhé štěstí.

Ve skutečnosti však neexistuje jediný homogenní soubor dat, který skuteční investoři analyzují pro předpovídání chování trhů, nýbrž se zaměřují na rozdílné indikátory. Z toho důvodu také není efektivita trhů absolutní, ale má určitou míru.

Trhy jsou slabě efektivní, pokud jsou do cen promítnuty již veškeré informace obsažené v minulých cenách. Mnoho obchodníků s finančními instrumenty se totiž snaží najít určité charakteristické obrazce v historickém vývoji cen, podle kterých by mohli určit cenu budoucí. Využívají takzvané technické analýzy a i podle hypotézy efektivních trhů ve své nejslabší podobě nemá tato analýza žádnou schopnost predikce.

V případě polo-silné efektivity obsahují současné ceny nejen historický vývoj, ale zároveň i všechny veřejně dostupné informace. Nyní není zbytečná pouze technická analýza, ale zároveň také fundamentální analýza, která se věnuje právě veškerým

dostupným informacím, jako jsou například roční výnosy emitenta akcie či rozhodnutí valné hromady o vyplacení dividendy.

V poslední, silné formě pak ceny reflektují nejen informace veřejné, ale i informace důvěrné. Tehdy již neexistuje žádná možnost, jak by mohl investor svou vlastní snahou přispět k výnosům vyšším, než jaké vykazuje celý trh¹⁵. Fama (1970) opět nabízí vyjádření:

$$x_{j,t+1} = p_{j,t+1} - E(p_{j,t+1} | \Phi_t)$$

$$E(x_{j,t+1} | \Phi_t) = 0$$

tedy, pokud nadefinujeme přebytečnou hodnotu $x_{j,t+1}$ j-tého instrumentu v čase $t+1$ jako rozdíl mezi skutečnou cenou instrumentu v čase $t+1$ a její očekávanou hodnotou podmíněnou informací v čase t , pak očekávaná hodnota této přebytečné hodnoty musí být na základě informace v čase t nulová. Jinými slovy tedy nelze očekávat a využít rozdíl mezi skutečnou a očekávanou cenou v následujícím období.

Zadruhé pak, pokud jsou nejen všechny informace již obsaženy v cenách, ale pokud to jsou navíc pouze právě informace, které determinují cenu v následujícím období, nikoli další parametry, jako například specifické chování investorů či jejich vzájemná interakce, ceny se pohybují zcela náhodně. Teorie náhodné procházky není žádným novým poznatkem, ale až hypotéza efektivních trhů se věnuje jejím příčinám. Těmi jsou tedy právě informace, které jsou jako nepředvídatelný jev považovány za zcela nahodilé a tedy jako jediná příčina pohybu cen implikují, že i ty se pohybují náhodně. Náhodná procházka cen je tak základním poznatkem hypotézy efektivních trhů, který ale podléhá některým restriktivním předpokladům natolik charakteristickým pro tradiční ekonomii.

3.3 Racionální investor

Tyto předpoklady shrnuje Fama (1970) takto: (i) na obchod s finančními instrumenty není třeba vynaložit žádné transakční náklady, (ii) každý investor má úplný přístup ke všem dostupným informacím, (iii) všichni investoři se shodují na vlivu jednotlivých informací na vývoj ceny a jejího rozdělení.

Tyto presumce se snaží určitým způsobem aproximovat realitu a v případě prvních dvou se to i relativně daří. Problém přichází s předpokladem posledním. Ten je v literatuře, zejména v té kritizující hypotézu efektivních trhů, vykládán jako požadavek

¹⁵ Fama (1970)

na plnou racionalitu účastníků trhu. Abychom ale nevkládali autorům hypotézy do úst něco, co sami netvrdí, preciznějším výkladem je předpoklad, že účastníci trhu mají racionální očekávání. Předpoklad racionálního očekávání je důležitý v tom ohledu, že aby mohly být veškeré dostupné informace reflektovány v cenách, je třeba investorů, kteří tak budou činit. Jedná se tedy o pojitko mezi efektivními trhy a chováním jejich účastníků.

Ti podle modelu racionálních očekávání berou v potaz veškeré dostupné informace. Tedy na základě těchto dat zjistí výnosnost a rizikovost jednotlivých investic a podle toho určí jejich aktuální cenu. Za předpokladu, že technická analýza je bezpředmětná již při slabé efektivitě trhů, se dá takovéto chování investora s racionálními očekáváním vyjádřit snahou o určení vnitřní hodnoty finančního instrumentu. Investor tak diskontuje veškeré budoucí výnosy z investice na její současnou hodnotu pomocí rizika, které ji přisuzuje. Mezi tyto budoucí výnosy se u akcie řadí dividenda a kapitálový zisk, tedy zhodnocení akcie samotné. Diskontování budoucích výnosů popisuje jednoduchý model

$$VH = \frac{D_1 + P_1}{(1 + K_e)}$$

$$VH = \frac{D_1}{(1 + K_e)} + \frac{D_2}{(1 + K_e)^2} + \frac{D_3}{(1 + K_e)^3} + \dots + \frac{D_n}{(1 + K_e)^n}$$

postupně pro 1 a n období, kde se n blíží k nekonečnu a kde D reprezentuje dividendu, P cenu a K_e požadovanou výnosovou míru. I když daná rovnice není nijak sofistikovaná, těžko si lze představit, že každý investor, i kdyby z dostupných informací určil přesné hodnoty potřebných veličin, by tyto hodnoty spořádaně dosadil, dospěl k vnitřní hodnotě a až podle ní určil svou investiční strategii. Dalo by se spíše předpokládat, že někteří investoři se budou chovat mnohem intuitivněji a nahodileji, než ukazuje tento model.

Teorie racionálních očekávání s tím ale počítá a tvrdí, že nepresumuje racionalitu každého jednotlivého účastníka trhu, ale racionalitu trhu jako celku. Jednotlivci jistě dělají chyby, tomu se nelze vyhnout, ale ve svých chybách by neměli být systematictí, tedy neměli by se vychylovat od správného odhadu jedním směrem. Pokud by někdo takový, kdo by systematicky chyboval, na trhu skutečně obchodoval, jeho sofistikovanější, racionální očekávání tvořící protivníci by jeho chyb využili a

z trhu ho vytlačili. Racionalita trhu tedy předpokládá převládající počet sofistikovaných obchodníků, kteří jsou schopni činnost těch pár méně sofistikovaných vykompenzovat.

Terčem útoků behaviorálních ekonomů a zároveň skutečných obchodníků na finančních trzích je právě tento předpoklad. Racionální očekávání se zdají být velice idealizujícím modelem, jak pojmout člověka. Ten sice nepředpokládá stoprocentní racionalitu účastníku, ale i tak jsou jeho nároky na jedince přehnané. Nejenže jsou potřebné výpočty pro stanovení predikce cen natolik komplexní, že by je běžný člověk nezvládl vypočítat, tak i množství relevantních informací je natolik obsáhlé, že by ho nedokázal zpracovat. Otázkou také není pouze míra racionality, ale i emocionální stránka investora. Podle poznatků behaviorální ekonomie tíhne člověk k předsudkům, přeceňování vlastních sil a přehnaným reakcím na přijaté informace¹⁶. Pokud nepřijmeme předpoklad, že se obchodníci chovají dostatečně racionálně, tedy nevstřebávají všechny dostupné informace a dělají systematické chyby, pak je logicky nevstřebávají ani trhy a jejich efektivita se stává diskutabilní.

3.4 Efektivita jako pojem

Právě proto také efektivita jako pojem prožila během své existence jistý vývoj. Pod kritikou hypotézy efektivních trhů se její význam poněkud změnil. Na přelomu šedesátých a sedmdesátých let minulého století ještě Fama tvrdí, že informace a pouze tato informace ovlivňuje cenu finančního instrumentu v následujícím období, tedy trhy vždy správně ohodnocují finanční instrumenty podle jejich vnitřní hodnoty. Konec dvacátého století však s sebou přinesl prudké poklesy akciových trhů v podobě Černého pondělí roku 1987 a Internetové bubliny konce devadesátých let, které zdánlivě neměly žádnou oporu v reálném světě, a tedy i otázky, nakolik se tržní ceny mohou odchylovat od vnitřní hodnoty instrumentů.

Odchýlit se mohou, připouští nakonec Burton G. Malkiel v publikaci Malkiel (2003) celých třicet let po vydání své knihy „A Random Walk Down Wall Street“¹⁷, která se stala základní učebnicí hypotézy efektivních trhů. Hypotézy se ale nevzdává a tvrdí, že existence spekulativních bublin s ní není v rozporu, jak tvrdí její kritici, nýbrž je sní zcela konzistentní. Kouzlo je ale právě v předefinování pojmu efektivita. Podle Malkiela totiž sofistikovanější investoři stále zpracovávali veškeré dostupné informace a tvořili racionální očekávání, problém byl ale v tom, že na akciový trh proudilo tolik

¹⁶ Kvalitní shrnutí představuje Barberis a Thaler (2003)

¹⁷ Malkiel (1996)

kapitálu v držbě nesofistikovaných investorů, že racionální investoři nebyli schopni dovést ceny zpět k jejich vnitřním hodnotám. Vedle toho také tvrdí, že i kdyby všichni investoři racionálně oceňovali akcie podle současné hodnoty očekávaných budoucích příjmů, tržní ceny by se také nemusely shodovat se skutečnými vnitřními hodnotami akcií¹⁸. Informace zpracované do racionálních očekávání mohou být totiž mylné, překvapivě aniž by si to racionální investoři uvědomili, tedy i jejich očekávání se nemusejí shodovat s realitou.

V důsledku jsou tedy podle Malkiela trhy efektivní, i když jsou instrumenty silně nadhodnoceny či podhodnoceny, jelikož sofistikovaní účastníci stále využijí všech obchodních příležitostí zákládajících se na dostupných informacích, byť mohou být nepravdivé. Zároveň se ale na trhu mohou vyskytovat nesofistikovaní investoři, kteří netvoří očekávání na základě všech dostupných informací, tedy netvoří racionální očekávání, tedy trhy jako celek se nechovají racionálně. Efektivita tedy již reprezentuje pouze schopnost rychle vstřebat nové informace za pomoci racionálních investorů. Podmínka, že to jsou pouze a jen tyto informace, které tvoří očekávanou budoucí cenu na základě očekávaných výnosů, jak tvrdil Fama, byla v hypotéze potlačena. Aby se tedy hypotéza efektivních trhů mohla vypořádat se spekuláčními bublinami, musela přisoudit důležitou roli nesofistikovaným investorům a zároveň připustit omezenou racionalitu těch sofistikovaných, kteří se i v souhrnu mohou v určitých situacích mýlit.

3.5 A Non-Random Walk

Nakonec ale bez ohledu na to, jak si efektivitu nadefinujeme, jasnou překážkou v cestě hypotézy efektivních trhů bylo zjištění ekonomů Andy Lo a Craig MacKinlay, že se ceny akciových trhů nechovají nahodile, tedy nesledují náhodnou procházku. Roku 1999 ve své trefně nazvané publikaci „A Non-Random Walk Down Wall Street“¹⁹ poukázali na to, že existuje zjevná korelace mezi cenami a časem a že rozptyl cen není konzistentní s teorií náhodné procházky. Pokud tedy pohyb cen finančních instrumentů skutečně není náhodný a zároveň nastávají situace, kdy racionální obchodníci nejsou schopni zcela využít příležitostí k arbitráži a navrátit tak cenu k rovnovážné vnitřní hodnotě, vzniká prostor polemizovat se základním poznatkem hypotézy efektivních trhů, tedy že nelze nalézt příležitost k dosažení výnosů vyšších, než jsou výnosy celého trhu.

¹⁸ Malkiel (2003)

¹⁹ Lo a MacKinlay (1999)

Nabízí se tedy možnost pojmout finanční trhy zcela novým způsobem. Nikoliv jako statický systém, který může být z rovnováhy vychýlen jen nepředvídanou informací a nad kterým věčně bdí racionální investoři, ale spíše jako dynamický a velice komplexní systém, o kterém jsme se bavili již v úvodu, ve kterém se setkávají strategie a preference neskutečného množství rozdílných agentů, kteří spolu neustále soupeří, navzájem na sebe reagují a každým svým činem dávají cenám nový směr. Pojmout tedy finanční trhy tak, jak ve skutečnosti vypadají.

4 Multiagentní modely

Dynamický a komplexní svět je ale pro tradiční ekonomii něco, s čím doposavad neměla žádné zkušenosti. Takový svět nezapadá do sofistikovaných rovnic následujících odkazu Léona Walrase a Williama Jevonse. Do rovnic, jejichž cílem je nalézt jedinečné řešení. Pokud tedy ale nemůžeme svět popsat pomocí analyticky řešitelných rovnic, jaká jiná metoda nám pro jeho uchopení zbývá? S řešením přichází agent-based computational finance (ACF). Konec dvacátého století je charakteristický dramatickým rozvojem výpočetní techniky, která umožňuje modelovat reálné procesy ve zlomku času, který by ve skutečnosti vyžadovaly. Dynamické problémy, systémy měnící se v čase, tedy již nemusíme zjednodušovat na problémy statické, nýbrž je můžeme simulovat a zkoumat, jak se čase vyvíjejí.

Zatímco tradiční ekonomie pro zjednodušení agregovala chování jednotlivců a nahradila je jedním reprezentantem, kterým je homo economicus, ACF umožňuje pojmout účastníky trhu jako heterogenní jedince, kteří mají rozdílné preference, strategie, bohatství i míru racionality ve smyslu míry tvorby racionálních očekávání. Tyto jedince pak nazývá agenty, odtud tedy agent-based computational finance. Každý agent na trhu se chová zcela samostatně a tedy i zcela podle svého uvážení reaguje na ekonomická data stejně jako na chování ostatních agentů, čímž vzniká analytickými modely nezachytitelná dynamika a komplexnost.

Mikroekonomický přístup k chování finančních trhů skrze heterogenní agenty je samozřejmě zcela závislý na tom, jak si chování agentů nadefinujeme. V případě ACF již nejsme omezeni nereálnými předpoklady, bez kterých by problém nebyl řešitelný, i přes to se ale míra realističnosti v jednotlivých modelech značně liší. Důvodem je to, že se jimi snažíme vysvětlit určité ekonomické jevy. Pokud bychom vytvořili model stejně komplexní jako svět samotný, jistě bychom dospěli k výstupům konzistentním s realitou, obsahoval by ale tolik rozdílných faktorů, že bychom nedokázali s určitostí říci, který z nich má daný ekonomický jev na svědomí. Proto je třeba místo neuvěřitelné komplexních modelů vytvářet modely co nejjednodušší, pokud jsou zároveň ještě schopny vysvětlit modelované jevy²⁰.

V tomto světle přistupuje každý autor každého modelu k pojetí agentů svou vlastní cestou. Ti se tak liší v pojetí preferencí a užitkových funkcí, ve strategiích, které na trhu užívají, v možnosti učení se z chyb vlastních i ostatních agentů, v míře sociální

²⁰ Farmer (1998), str. 5

interakce, omezené racionality či dokonce plné absence inteligence agentů. Výtečné shrnutí existujících modelů nabízí LeBaron (2006). Na následujících řádcích představím vybrané modely, které byly inspirací pro tuto práci a nastíním jejich hlavní charakteristiky a nedostatky.

4.1 SFI market

Nejznámějším modelem v oboru ACF je jistě Santa Fe Artificial Stock Market (SFI market), jehož autoři Brian Arthur a John Holland ho sestavili v rámci práce na půdě Institutu Santa Fe na počátku devadesátých let minulého století. Na celém projektu se finálně podílelo mnohem více lidí, přičemž jeden z nich, Blake LeBaron, nám poskytuje shrnutí celého modelu a poznatky z jeho vývoje²¹.

SFI market se vydává cestou zkoumání strategií, které jsou na finančních trzích užívány jednotlivými aktéry. V tomto ohledu tedy jeho autoři nechápali trhy pouze jako prostor, kde spolu soupeří jednotliví agenti, ale spíše jako prostor, kde spolu soupeří jednotlivé strategie, které jsou pak na základě své užitečnosti a přesnosti nadále užívány a replikovány do chování dalších investorů. V modelu tedy dochází k evolučnímu výběru těch nejlepších strategií, zatímco ty méně úspěšné jsou ignorovány.

Po vzoru tradiční ekonomie je i zde motivem nákupu akcií jak kapitálový, tak dividendový zisk. Agenti jsou však krátkozrací a jejich odhad budoucí ceny a dividendy se zaměřuje pouze na jedno následující období. Po zformování takového odhadu ho pak využijí ke zvolení poptávaného množství dané akcie. Jelikož agenti v modelu maximalizují CARA (constant absolute risk aversion) užitkovou funkci, poptávané množství akcie se řídí vztahem:

$$x_t^i = \frac{\hat{E}_t^i(p_{t+1} + d_{t+1}) - (1 + r_f)p_t}{\gamma \hat{\sigma}_{p+d,i}^2}$$

kde γ představuje koeficient averze k riziku, $\hat{\sigma}_{p+d,i}^2$ předpověď rozptylu $p+d$ a r_f bezrizikovou úrokovou míru. Nejzajímavější částí modelu je ale proces, jakým agenti dospívají ke svým odhadům. Základem každého odhadu je dvojice parametrů a a b , které určí předpověď součtu kapitálového a dividendového zisku pomocí jednoduché formule $\hat{E}(p_{t+1} + d_{t+1}) = a(p_t + d_t) + b$. Parametry a a b tedy zároveň definují jednotlivé investiční strategie.

²¹ LeBaron (2005)

Každému agentovi je umožněno sledovat 100 různých investičních strategií, které v průběhu času ohodnocuje a užívá pouze ty nejpřesnější. Zároveň však s danou frekvencí vždy 20 nejméně používaných strategií vyřadí. Jako vstupní parametry pak tyto strategie užívají sérii ekonomických dat, jak fundamentálních, poměrů cen a dividend, tak technických, klouzavých průměrů. Formálně jsou strategie vyjádřeny jako vektory, jejichž délka závisí na množství vstupních parametrů. Pokud je parametrů například 10, prvních 10 pozic vektoru (nazvěme je bity) tvoří jeden ze znaků 1,0,# v závislosti na tom, zdali strategie daný vstupní parametr vyžaduje jako pravdivý, například aby byla cena vyšší než průměr cen za posledních 50 period, nepravdivý, či zdali tento parametr nebere v potaz. Na následujících bitech pak budou již zmiňované parametry a a b a nakonec σ^2 reprezentující přesnost dané strategie, tedy její užitečnost.

Princip evoluce se neprojevuje pouze ve výběru aplikovaných strategií, ale také v tvorbě strategií nových. Stejně jako v přírodě i v tomto modelu dochází k nahodilým mutacím, kdy jsou libovolné bity zaměněny znaky 1,0,#, přičemž nejméně používané strategie jsou zcela eliminovány a následně nahrazeny zcela novými. Ty vznikají na základě genetického algoritmu (genetic algorithm) výběrem dvou úspěšných strategií a zkombinováním jejich obsahu k vytvoření nového vektoru.

Po výběru nejlepší strategie a tedy i parametrů a a b je očekávaný budoucí výnos pouhou lineární funkcí současné ceny a dividendy. Poptávané množství dané akcie daného agenta je takto závislé pouze na současné ceně za předpokladu, že dividendy se pohybují náhodně. K určení ceny, za kterou se bude na trhu obchodovat, se SFI market opět vrací k tradiční ekonomii a pro její stanovení využívá Walrasova licitátora. Ten za předpokladu fixního množství akcií na trhu určí cenu tak, aby se trh zcela vyčistil a nabídka uspokojila poptávku.

V rané fázi SFI marketu byl oceňovací mechanismus postaven na formuli $p_{t+1} = p_t + \lambda(B_t - S_t)$, na základě které docházelo k problémům s tím, že v důsledku převisů nebyly poptávky a nabídky některých agentů plně uspokojovány, tedy trh zřídka kdy dosahoval rovnováhy. Vedle toho byl pak pohyb cen zcela závislý na parametru λ , který mohl být volen libovolně, přičemž výsledky simulací byly následně zcela odlišné. Walrasův licitátor tento problém snadno překonal.

SFI market je krásnou ukázkou toho, jak plně využít možnosti výpočetní techniky pro účely ACF zakomponováním evolučních algoritmů, nicméně na něm

můžeme shledat několik nedostatků. Jedním z nich je právě zmiňovaný licitátor, který vhodným zvolením ceny vyčistí trhy. Podle mého mínění se SFI market stále moc přidržuje poznatků tradiční ekonomie, jako by se jeho autoři báli naplno využít možnosti modelování dynamických problémů. Určením licitátora se vzdali možnosti pojmut trhy v jejich skutečné podobě, popsat je na základě skutečného oceňovacího mechanismu, který umožňuje, aby se tržní ceny pohybovaly daleko od své rovnovážné hodnoty.

Dále předpoklad, že předpověď budoucí ceny je tvořena pouze na základě lineární funkce ceny současné, je poněkud restriktivní a není zcela jasné, jak je či není schopen ovlivnit model jako celek. Nakonec pak ani evoluční algoritmus sám není úplně dokonalý. Tváří se jako model, který dává agentům možnost volně se rozhodovat, jaké strategie užití a na základě jakých vstupních dat svá investiční rozhodnutí učiní. Ve finále je ale soubor vstupních parametrů natolik omezený (v případě SFI marketu je fundamentálních i technických parametrů skutečně jen 10) a jejich výběr natolik determinuje následné chování agentů, že to je spíše autor modelu než evoluce, kdo tomuto chování dává směr. Navíc zcela nekontrolovatelná tvorba strategií možná svou komplexností dobře simuluje realitu, znemožňuje nám ale zkoumat, jaké mají tyto jednotlivé strategie vliv na chování trhů.

4.2 Farmerova nulová inteligence a Genoa market

Naprosto opačnou cestou se pak vydávají Farmer (2004) a Raberto (2001). Místo toho aby složitě definovali preference agentů, jejich chování, predikce a míru racionality, pojali je jednoduše zcela náhodně.

Farmer dokonce pojmenovává svou práci jako „The Predictive Power of Zero Intelligence in Financial Markets“, tedy užívá agentů s nulovou inteligencí. Tato publikace úplně nezapadá do oboru ACF, jelikož v ní uvedený model je vyjádřen zcela analyticky a nevyužívá počítačových simulací, i přes to stojí za zmínku, jelikož se jako jeden z mála věnuje popisu reálného oceňovacího mechanismu.

Tento mechanismus spočívá v kontinuálním režimu obchodování (continuous double auction), což je metoda, která je skutečně užívána na většině světových finančních trhů. Agent se tak při nákupu může rozhodnout, zdali si přeje vyřídit svou objednávku ihned za tržní cenu, tedy využije tržního příkazu (market order), či si stanoví limitní cenu, za kterou či lepší by chtěl svou objednávku vypořádat a rozhodne se tedy čekat, dokud k tomu nedojde, využije tedy limitního příkazu (limit order).

Nevypořádané limitní příkazy se tak časem akumulují, dokud nejsou vypořádané, či dokud nevyprší jejich platnost nebo dokud nejsou staženy zpět.

Farmer pak předpokládá dva druhy agentů, trpělivé a netrpělivé. Trpělivým nevadí počkat s vyřízením obchodu a skrze limitní příkaz se snaží dosáhnout příznivější ceny. Na druhé straně netrpěliví agenti potřebují vyřídit obchod ihned a pomocí tržního příkazu tak učiní za tržní cenu. Jednotlivé příkazy však přicházejí v čase zcela náhodně, stejně jako je náhodná jejich případná limitní cena. Základním poznatkem modelu je pak to, že zatímco trpěliví agenti díky skladovaným limitním příkazům vytvářejí na trhu likviditu a tím pádem i snižují volatilitu cen, jelikož čím více limitních příkazů existuje, tím menší bude dopad jednoho vyřízeného obchodu na změnu ceny, netrpěliví agenti naopak likviditu trhu snižují. Jejich vzájemný poměr tedy determinuje volatilitu trhů i velikost rozpětí mezi nejvyšší nákupní a nejnižší prodejní cenou na trhu, v jehož středu leží aktuální cena finančního instrumentu. Jsou to pak také právě nejvyšší nákupní a nejnižší prodejní cena, které jako jediné omezují nahodilé umístování limitních příkazů.

Model podle Raberta, nazvaný Genoa market, také užívá zcela náhodně se chovajících agentů. Ti jsou ale omezeni ve dvou směrech. Zaprvé se pohybují v prostředí omezených zdrojů, tedy celkové množství akcií i peněžních prostředků je předem dané. Zadruhé umísťují své příkazy k nákupu či prodeji v závislosti na historické volatilitě cen. Čím je volatilita vyšší, tím je i vyšší rozptyl umístovaných příkazů. Důsledkem je autokorelace volatility, tedy její sdružování do celků tak, jak to popsal již Mandelbrot.

Charakteristickým pro Genoa market je také oceňovací mechanismus. Trh je v každém období vyčištěn na základě průniku poptávkové a nabídkové křivky. Tyto křivky jsou odvozeny od všech registrovaných limitních příkazů, které agenti v minulosti podali. Průnikem křivek je zvolena cena pro následující období a zároveň jsou za ní vypořádané všechny příkazy, jejichž limitní cena to dovoluje. Všechny ostatní příkazy, které vypořádané nebyly, jsou z registru vymazány.

Klíčovým prvkem, který umožňuje modelu simulovat reálné trhy, je ale až sociální interakce mezi agenty. Genoa market je jedním z mála modelů, který se zabývá šířením názorů skrze sociální síť účastníků trhu. Každý agent má sám o sobě 50% pravděpodobnost, že bude akcie poptávat či nabízet. Na počátku každého období má ale každý pár agentů dále stejnou pravděpodobnost, že by mohli vytvořit seskupení. Nemusejí tak vznikat pouze páry, ale i větší celky čítající více než dva agenty, které se nadále mohou shlukovat do ještě větších celků. Účastníci těchto celků se pak již

nerozhodují samostatně, ale všichni zároveň buď akcie nakupují či prodávají. Je tak simulován proces toho, jak se na trhu šíří optimistická a pesimistická očekávání.

Přes to, že se Farmer a Rabert jako jedni z mála snaží co nejvěrněji simulovat mechanismus obchodování na finančních trzích, jejich modely jsou i v tomto ohledu značně nedokonalé. Berou sice v potaz existenci tržních a limitních příkazů, tu nejzajímavější věc ale, princip užívání těchto příkazů, nijak nerozvádějí a determinují ji pouhým náhodným chováním. Tento přístup je sice zajímavý v tom ohledu, že ukazuje, že mnoho charakteristik finančních trhů lze vysvětlit pouze jejich strukturou, nikoliv specifickým chováním agentů, na druhé straně si ale důvod umístění jednotlivých příkazů zaslouží podrobnější vysvětlení, než je pouhá trpělivost či netrpělivost agentů, jak uvádí Farmer. Vedle toho Genoa market stejně jako SFI market dělá krok zpět, když pro tvorbu ceny užívá svůj specifický oceňovací mechanismus vyčišťujícího se trhu, aniž by využila mechanismů, které se vyskytují na reálných trzích.

4.3 Chiarella, Iori a Perelló

Posledním modelem, který zmíním, zároveň ale nejvíce inspirujícím, je model popsáný v Chiarella, Iori a Perelló (2007). Ten kombinuje přístupy výše zmíněných simulovaných trhů (artificial markets), tedy užívá reálných obchodních mechanismů finančních trhů a zároveň se věnuje rozdílným investičním strategiím heterogenních agentů.

Stejně jako v mnoha jiných studiích zabývajících se heterogenními agenty se i zde setkáváme se třemi základními druhy obchodních strategií. Jedná se o fundamentální, technické a nahodilé agenty. Fundamentální agenti hledají na trhu vzhledem k vnitřní hodnotě podhodnocené akcie, které nakupují, zatímco nadhodnocené prodávají. Tito agenti mají nejbližší k pojetí racionálních agentů hypotézy efektivních trhů. Techničtí agenti se zaměřují na historické ceny a z jejich chování se snaží odvodit, jaký trend bude následovat v budoucnu. Nahodilí agenti se pak obchodování na finančních trzích účastní zcela náhodně, aniž by měli nějakou specifickou strategii.

V tomto modelu není agentům přidělena jedna z uvedených investičních strategií, nýbrž mohou využívat všechny tři současně. Každá ze strategií nabízí agentovi odhad budoucích výnosů dané akcie, přičemž ten užije lineární kombinace těchto odhadů k vytvoření odhadu vlastního. Pro každého agenta jsou tedy specifické parametry, které definují jeho náklonnost k jednotlivým strategiím. Ty jsou ale ve své

podstatě značně zjednodušené a příliš neodpovídají těm užívaným skutečnými investory.

Odhad fundamentální analýzy staví na všem agentům známé fundamentální hodnotě p^f , tedy vnitřní hodnotě akcie, a současné ceně akcie a užívá vztahu $\ln(p_t^f / p_t)$. Odhad technické analýzy pak průměruje výnosy akcie za určitý počet uplynulých období, který odpovídá investičnímu horizontu, který je každému agentovi vlastní. Pro zachování realismu je delší investiční horizont přisouzen těm agentům, kteří kladou větší důraz na fundamentální analýzu.

Podobný vztah je zachován i u averze k riziku jednotlivých agentů. Ta je vedle investičního horizontu druhou důležitou charakteristikou heterogenního chování, přičemž také roste spolu s oblíbeností fundamentální strategie. Ač se těmito kauzalitami snaží autoři modelu přiblížit reálnému světu, jejich opodstatněnost je vskutku diskutabilní a jedná se spíše o zcela svévolný předpoklad. Averze k riziku α je pak důležitá pro stanovení užitkové funkce agenta, jejíž vysvětlující proměnnou je hodnota bohatství W

$$U(W_t, \alpha) = -e^{-\alpha W_t}$$

přičemž bohatství je součtem finančních prostředků a držených akcií vynásobených jejich současnou hodnotou. Na základě této užitkové funkce si pak agent vybere optimální složení svého portfolia, neboli optimální počet držených akcií, který je dán

$$\pi(p) = \frac{\ln(\hat{p}_{t+\tau} / p)}{\alpha V_t p}$$

kde agent poměřuje očekávaný výnos akcie v průběhu investičního horizontu τ s očekávaným rizikem V_t plynoucím z investice, které je vyjádřeno jako rozptyl minulých výnosu podobně, jako tomu bylo v případě SFI marketu.

Podle uvedeného vzorce by se dalo předpokládat, že p reprezentuje současnou tržní cenu a agent jí tak pouze přizpůsobí své portfolio. Model se ale potřebuje vypořádat s možností umístění tržních a limitních příkazů, proto volí jiný přístup. Agent si před začátkem obchodování zcela náhodně určí libovolnou cenu, až zpětně si podle předchozího vzorce zvolí, kolik akcií by byl při této ceně ochoten držet a tedy i zdali bude nakupovat či prodávat. Za tuto cenu pak tedy i vloží limitní příkaz k nákupu či prodeji, který bude mít charakter příkazu tržního, pokud ho bude možno okamžitě spárovat.

Ačkoliv by měl být popis struktury kontinuálního režimu obchodování největší chloubou tohoto modelu, opět se setkáváme s přístupem, kdy je nejzajímavější část této struktury opomenuta. Nejenže jediným druhem příkazu je vlastně pouze příkaz limitní, ale motiv a pozice jeho umístění jsou zcela náhodné. Agent totiž vůbec nebere v potaz aktuální tržní cenu akcie, což je podle mého mínění naopak nejdůležitější parametr, podle kterého se investoři rozhodují. Stejně není rozhodnutí agenta obchodovat nijak podmíněno aktuálním děním na trhu, ale v každý časový okamžik má stejnou pravděpodobnost, že na trh vstoupí. Zdá se tedy, že žádný z uvedených modelů se nevěnuje procesu obchodování na finančních trzích tak zevrubně, jak by si zasloužil.

Co se ale jistě modelu vytknout nedá je fakt, že jako jeden z mála přichází se skutečně reálným oceňovacím mechanismem akciových trhů. Cena v každém období je jednoduše určena podle ceny, za kterou byl realizován poslední uskutečněný obchod. Je to opravdu takto jednoduché. Není třeba žádných složitých konstrukcí vyčišťujících se trhů, jelikož tento primitivní model určování cen je také tím modelem, který se na skutečných trzích užívá.

5 Simulace akciového trhu

Jak jsem ukázal na předchozích řádcích, obor ACF je stále ve svých počátcích a ještě si nenašel jasný směr, kterým by se v budoucnu mohl vydat. Jednotlivé modely se mezi sebou velice liší a jejich přístup ke zkoumání trhů není vůbec konsistentní. Vedle toho každý z nich obsahuje řadu nedostatků a prostor pro nově vznikající modely je tedy široký. V této kapitole proto představím mnou navrhovaný model, který se pokusí poučit z chyb modelů již existujících a použít jejich nejlepší aspekty. K jeho vytvoření byl využit programovací jazyk MATLAB, respektive jeho volně šiřitelná verze GNU Octave.

5.1 Charakteristiky trhů

Navrhnout a naprogramovat model simulující reálné trhy nemá smysl, dokud si neuvědomíme, jakých výsledků by měl model vlastně dosáhnout. Překonáním hypotézy efektivních trhů se vzdáváme představy trhů, jejichž výnosy následují Gaussovu křivku a v čase jsou zcela nezávislé. Otevírá se tak prostor pro empirické studie, jejichž poznatky již nejsou přehlíženy z titulu nekonzistence se stavem poznání současné ekonomie. Tyto studie jdou ve stopách Mandelbrotovy práce a poukazují na mnoho specifických charakteristik trhů, které dosud žádná ekonomická teorie nedovedla uspokojivě vysvětlit a pro které se vžilo označení „stylized facts“.

Obecné shrnutí těchto charakteristik nabízí například Cont (2001), konkrétní potom Kulhánek (2009) či Kristoufek (2010), kteří se zaměřují na chování evropských akciových trhů. Z uvedených publikací lze tedy vyčíst, že mezi charakteristiky akciových trhů patří zejména tyto jevy:

- Výnosy trhu absentují autokorelaci. V důsledku toho nemá současný výnos žádný vliv na výnos budoucí, čímž se s ohledem na současnou cenu stává nepředvídatelným. Ve skutečnosti pak jistou míru autokorelace vykazují, ale pouze v případě zpoždění τ menšího než 15 minut. Na druhé straně pak autokorelaci vykazují týdenní či měsíční výnosy, nikoliv již ale natolik signifikantní. Pro měření autokorelace výnosů se užívá funkce

$$C(\tau) = \text{corr}(r(t, \Delta t), r(t + \tau, \Delta t))$$

- Volatilita výnosů se v čase sdružuje do celků. Tento jev se dá jednoduše vyjádřit tak, že velké změny cen jsou následovány dalšími velkými změnami, zatímco malé změny jsou následovány změnami malými. Trh tak průběžně střídá fáze

klidu a fáze vysoké volatility. Pro měření sdružování volatility se užívá autokorelace druhých mocnin výnosů či jejich absolutních hodnot

$$C(\tau) = \text{corr}(|r(t, \Delta t)|, |r(t + \tau, \Delta t)|)$$

- Výnosy mají leptokurtické rozdělení, neboli jejich rozdělení je špičatější nežli rozdělení normální a zároveň má širší konce. Prakticky je tedy oproti normálnímu rozdělení příliš mnoho výnosů akumulováno okolo střední hodnoty, znatelně méně jich je pak dále od střední hodnoty, případy extrémního růstu či propadu se pak ale zase vyskytují příliš často. Toto rozdělení je charakteristické pro výnosy v krátkém období, zatímco s prodlužujícím se horizontem se začínají chovat stále více normálně. K měření špičatosti se užívá čtvrtého standardizovaného centrálního momentu, tedy koeficientu nadměrné špičatosti (excess kurtosis), který při kladných hodnotách vykazuje špičatost vyšší než je špičatost normálního rozdělení

$$\kappa = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^4}{s^4} - 3$$

kde \bar{r} představuje střední hodnotu výnosů a s výběrovou směrodatnou odchylku výnosů.

- Výnosy se vedle špičatosti liší od normálního rozdělení i svojí šikmostí. Mají záporný koeficient šikmosti (skewness), což naznačuje, že levý konec rozdělení výnosů je delší než ten pravý. Jinými slovy dochází k větším extrémním propadům ceny oproti extrémním růstům. Koeficient šikmosti je jako třetí standardizovaný centrální moment vyjádřen jako

$$\kappa = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^3}{s^3}$$

kde \bar{r} představuje střední hodnotu výnosů a s výběrovou směrodatnou odchylku výnosů.

5.2 Model prospektů v kontinuálním režimu

Nyní již můžeme přistoupit k tvorbě samotného modelu, který by se měl pokusit výše zmíněné charakteristiky trhů simulovat a zároveň vysvětlit, které jevy k nim přispívají. Hlavním aspektem tohoto modelu je fakt, že není variací žádného již existujícího modelu a vydává se dosud téměř neprobádanou cestou reálných obchodních mechanismů a tržních struktur. Snaží se simulovat obchodování skrze knihu příkazů, do

kteří se stejně jako na skutečných trzích ukládají nevyřízené limitní příkazy a skrze kterou se setkává nabídka a poptávka investorů. K popsání chování agentů pak užívá poznatků behaviorální ekonomie a investičních strategií skutečných obchodníků na akciových trzích. Snahou modelu tak není stavět složité teoretické základy, ale jednoduše modelovat trh takový, jaký skutečně je se všemi jeho nedokonalostmi i nedokonalostmi jeho účastníků. Na následujících řádcích popíši podrobně jeho jednotlivé části,

5.2.1 Agenti

Základem každého modelu v oboru ACF jsou samozřejmě agenti. Jsou to právě oni, kteří mu dávají dynamiku a kteří svým obchodováním působí nejen na cenu akcie, ale změnou této ceny zároveň i jeden na druhého. Aby ale agent mohl obchodovat, musí k tomu mít nějakou motivaci. Touto motivací, pokud se nechová zcela náhodně, bývá užítková funkce, přičemž snaha o její maximalizaci determinuje jeho chování. Ani v tomto modelu tomu není jinak. Místo obvyklé CARA užítkové funkce ale volí zcela nový přístup k uchopení užitku běžného investora.

5.2.2 Prospektová teorie

Již před třiceti lety představili Kahneman a Tversky (1979) alternativní přístup k teorii očekávaného užitku a zavedli vlastní model, prospektovou teorii. Jejich cílem nebylo vytvořit další normativní teorii, která by měla sofistikovaný teoretický základ, jako spíše deskriptivní teorii, která by měla popisovat chování lidí čelících riskantním rozhodnutím tak, jak to dokládaly výsledky jejich rozsáhlého empirického výzkumu. Prospektová teorie se v průběhu následujících let stala obecně přijímaným modelem chování jedinců, a zdá se být i velice nadějným konceptem pro aplikaci na finančních trzích²².

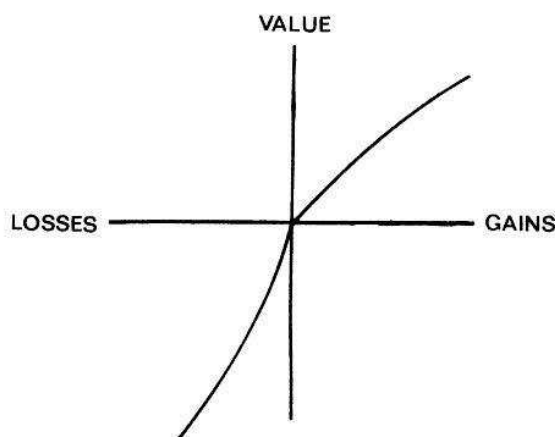
5.2.3 Averse ke ztrátám

Stavebním kamenem prospektové teorie je poznatek, že lidé nepožívají zisk a ztrátu o stejné velikosti stejnou změnou užitku. Zatímco podle teorie očekávaného užitku berou lidé ohled pouze na celkové bohatství, kterého jsou schopni dosáhnout, podle prospektové teorie je zajímavá i změna bohatství oproti určité dané hladině. Tato hladina je označována jako status quo a jedná se o určitý bod v čase, oproti kterému poměrujeme své zisky a ztráty. Toto pojetí plyne z empiricky zjištěné tendence lidí

²² Barberis a Thaler (2003)

pojímát čas jako diskretní oddělené celky, přičemž na začátku každého z nich začínáme s čistým štítem.

V praxi to pak znamená, že každou investici, každý nový obchodní den či každou sázku vnímáme jako novou příležitost ke zhodnocení či znehodnocení, k výhře či prohře, aniž bychom ji viděli v širším kontextu ostatních investic či sázek. Na začátku každého časového úseku, ať jsme v tom minulém bohatství rozmnožili či nikoliv, hodnotíme svůj užitek jako nulový. Vzhledem k této dané hladině pak pojmáme ztráty daleko bolestněji, než kolik radosti nám přinášejí výnosy. Explicitně řečeno je ztráta užítku ze ztráty bohatství vyšší než užitek získaný ze zisku stejné sumy. Kolikrát je tato ztráta vyšší, to bylo předmětem mnoha pokusů a podle Kahnemana a Tverskyho (1979) je tato míra přibližně $\lambda=2,25$. Tolikrát tedy cítíme silněji prohru nežli výhru. Tento jev se nazývá averze ke ztrátám a při formování chování jedinců se v důsledku projevuje tak, že nadefinujeme dvě odlišné užitkové funkce, kde jedna popisuje ztráty a druhá výnosy.



Obr. č. 2: Hodnotová funkce prospektové teorie

Zdroj: Kahneman a Tversky (1979)

5.2.4 Averze k riziku

Vedle averze ke ztrátám stojí již z teorie očekávaného užítku známá averze k riziku. Na jejím základě si člověk mezi sázkou a možností získání její očekávané hodnoty vybere raději tuto očekávanou hodnotu, neboli volí raději jistotu. Prospektová teorie ale přichází se zjištěním, že zatímco v případě zisků jsou lidé skutečně averzní k riziku, v případě ztrát riziko naopak vyhledávají. Pro zkoumání finančních trhů je tento poznatek důležitý v tom ohledu, že by mohl vysvětlit takzvaný dispoziční efekt

(disposition effect)²³. Existuje totiž dokumentace, že účastníci akciových trhů vykazují překvapivé chování, kdy akcie, které se od doby nákupu zhodnotily, prodávají daleko dříve než akcie, které prodělávají a které i přes jejich propadající se cenu drží ve svém portfoliu překvapivě dlouho.

Zdánlivě nevysvětlitelné chování, kdy se akcionáři zbavují výdělečných titulů a zarytě drží tituly prodělečné, by mohlo najít opodstatnění právě v prospektové teorii. Pokud je totiž investor averzní k riziku, po jistém výdělku raději volí jistotu, kterou mu poskytuje prodej akcie za tržní cenu. Pokud je ale již investor ve ztrátách a tím pádem i riziko vyhledává, bude preferovat držbu akcie před jejím prodejem s nadějí, že by se její cena mohla navrátit zpět nad cenu nákupní. Míra averze či vyhledávání rizika je pak pro výdělek i prodělek shodná a Kahneman s Tverským ji přisoudili hodnotu $\alpha=0,88$, přičemž pro hodnotovou funkci (value function), jak ji nazývají, zvolili předpis

$$v = \begin{cases} x^\alpha & \text{if } x \geq 0 \\ -\lambda(-x^\alpha) & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

5.2.5 Vyhlídky

Prospektová teorie je pak aplikována na případy, kdy člověk stojí před více sázkami, řekněme investičními rozhodnutími, přičemž každá z nich má dva možné výsledky, výhru a prohru. Z těchto sázek pak potřebuje vybrat tu, která mu přinese nejvyšší užitek. Postupně tedy každé výhře či prohře přiřadí hodnoty podle výše zmíněné hodnotové funkce, kterými je subjektivně ocení, a pak vypočítá užitek celé sázky zakládající se na pravděpodobnostech výskytu daných výsledků podle jednoduché formule

$$U = p_1v(x_1) + p_2v(x_2)$$

Po vypočtení užiteků jednotlivých sázek je pak mezi sebou může porovnat, či porovnat sázku se stanovenou sumou, která nepodléhá riziku a kterou by mohl získat, pokud by nechtěl sázet. Ve světě finančních trhů se tedy jedná o možnost držby akcie oproti možnosti jejího prodeje.

Původní prospektová teorie podle Kahnemana a Tverskyho (1979) navíc ještě zavádí jednu pomocnou funkci, podle které vnímají lidé potenciální riziko proměnlivě. Zatímco přeceňují výsledky s nízkou pravděpodobností, ty s pravděpodobností vysokou

²³ Barberis a Xiong (2009)

naopak podceňují. Tento aspekt lze ale z důvodu zjednodušení aplikace prospektové teorie na chování finančních trhů opominout²⁴.

5.2.6 Aplikace

A jaký vliv má tedy prospektová teorie na modelování finančních trhů? Představte si investora, který drží akcii a rozhoduje se, zdali ji prodá či nikoliv. Nejdříve odhadne, o kolik by se akcie mohla v následujícím období zhodnotit či znehodnotit a jaké jsou pravděpodobnosti těchto vyhlídek. Následně si vypočítá užitek, který mu toto riskantní držení akcie přinese a porovná ho s užtkem, který mu přinese suma získaná z jejího prodeje. Ke stejnému porovnávání jistoty a sázky pak dochází v případě, kdy se rozhoduje o nákupu akcie. V každém okamžiku je tedy schopen ohodnotit, jestli bude pro následující období akcii poptávat či nabízet.

Většina modelů v oboru ACF vychází z tradiční ekonomie a vedle kapitálového zisku bere v potaz i zisk dividendový. Současná situace s dividendami je taková, že zatímco v USA jsou vypláceny kvartálně a navíc vcelku pravidelně, takže je investor může zahrnout do svých očekávání, v Evropě se ustálilo vyplácení pouze jednou ročně a v případě českých titulů zároveň velice nesystematické. Dividendový výnos je pak pro investora spíše příjemným bonusem, nežli základním parametrem jeho chování. V důsledku toho i tento model dividendy zanedbává a upřednostňuje pouze kapitálový zisk.

5.2.7 Status quo

Jak již bylo zmíněno, důležitým aspektem prospektové teorie je zvolení vhodného statusu quo, tedy okamžiku, oproti kterému bude agent své výnosy či ztráty ohodnocovat. Zatímco racionální agent by chápal veškeré investice jako součást většího celku, v tomto modelu budeme předpokládat, že investoři na reálných trzích oceňují každou investici zvlášť, a proto pro ně bude statusem quo cena, za kterou akcii nakoupili. Pokud její cena po nákupu vzrostla, bude se agent pohybovat po konkávní křivce výnosů hodnotové funkce, pokud její cena naopak klesla, budoucí výkonnost bude brát z pohledu konvexní křivky ztrát hodnotové funkce.

Zatímco na prodej akcie bude mít největší vliv agentova averze k riziku či naopak jeho vyhledávání, v případě nákupu to bude spíše averze ke ztrátám, která bude determinovat jeho chování. Tehdy statusem quo není nákupní cena, nýbrž nulová hodnota. Pokud akcii nenakoupí, jeho bohatství se nezvýší ani nesníží, tímto

²⁴ Barberis a Xiong (2009)

rozhodnutím tedy dosáhne hodnoty nula. Pokud se ale do ní rozhodne investovat, na základě vývoje její ceny se v následujícím období ocitne buď v zisku, nebo ve ztrátě, míra averze ke ztrátám je tedy pro něj v tomto případě rozhodujícím parametrem.

5.2.8 Parametry modelu

Kahneman a Tversky zvolili přesné hodnoty pro averzi ke ztrátám i averzi k riziku, v tomto modelu pro zachování heterogenity agentů jsou jim hodnoty přiřazeny náhodně. V obou případech jsou parametry rovnoměrně rozděleny, a to pro averzi k riziku α na intervalu $\langle 0;1 \rangle$, pro averzi ke ztrátám λ na intervalu $\langle 1;4 \rangle$

Vedle těchto základních parametrů je agent také definován svým investičním horizontem. Na začátku obchodování na finančních trzích je první radou každého finančního konzultanta zvolit si právě tento investiční horizont, na jehož základě může následně investor uskutečňovat své investice. Pro účely modelu byl tento horizont zvolen v rozmezí 8 a 80 period, přičemž je agentům opět náhodně přidělen a tím zachována jejich dostatečná variabilita.

5.2.9 Technické zpracování

Z čistě technického hlediska je tedy každý agent definován sadou informací, kterou si s sebou nese v průběhu obchodování na modelovaném trhu. Vedle tří výše zmíněných parametrů do této sady dále patří informace o vlastnictví akcií, jejich případná nákupní cena, podané limitní příkazy, jejich limitní cena a čas, ve kterém byly podány a nakonec také obchodní strategie, jakou agent pro obchodování využívá. Jelikož stavebním kamenem MATLABu je práce s maticemi, jsou i sady těchto informací uchovávány v jedné velké matici. Zatímco každý řádek odpovídá jedné z charakteristických informací, každý její sloupec je vyčleněn jednotlivým agentům.

Na začátku každé periody je seznam agentů náhodně proházen, aby se k příležitosti obchodování dostávali vždy v rozdílném pořadí. Program pak již jednoduše prochází maticí podle jejích sloupců a podle nalezených informací určí, jak se daný agent zachová. Možnost zúčastnit se obchodování je pak agentovi poskytnuta vždy po daném počtu period závislém na jeho investičním horizontu. Důvodem k tomu je předpoklad, že investor s ročním investičním horizontem nepřehodnocuje investici v den následující po její realizaci, na rozdíl například od investora s týdenním investičním horizontem, nýbrž reaguje na dlouhodobější vývoj ceny akcie. Každému agentovi je pak pro zjednodušení povolena koupě a držba pouze jedné akcie.

5.2.10 Oceňovací mechanismus

Nejdůležitější částí modelu je pak proces, jakým se určuje cena akcie. Jelikož se model snaží popsat skutečné chování skutečných účastníků trhu, stejný přístup volí i v případě oceňovacího mechanismu. Není třeba vymýšlet žádné složité konstrukce, ale stačí se pouze podívat na jeden existující trh a převzít jeho vlastní mechanismus. Za tímto účelem volím Burzu cenných papírů Praha a její Burzovní pravidla²⁵. Články 14 jejich částí I. a VII. nás vedou ke stejnému zjištění, k jakému dospěl již Chiarella, Iori a Perelló (2007), tedy že aktuální cenou akcie v kontinuálním režimu, tedy v režimu, kde dochází k uzavírání obchodů na základě průběžného párování objednávek k nákupu či prodeji cenných papírů²⁶, je cena posledního realizovaného obchodu.

V modelu je tedy na začátku každého období tato cena zveřejněna a na jejím základě agenti ohodnotí své investiční příležitosti. Všichni na ni ale samozřejmě nezareagují stejně rychle a v průběhu postupného zadávání příkazů se bude i cena v průběhu periody postupně měnit. Na tyto změny ale agenti nemají možnost, řekněme, že ve skutečnosti nemají čas, reagovat a jejich chování ovlivní zase až konečná cena na začátku následující periody.

Hlavním aspektem dynamiky modelu jsou jeho heterogenní agenti. Vedle již zmíněných parametrů odlišujících jejich chování to pak jsou zejména investiční strategie, které determinují, jaký přístup k obchodování na akciovém trhu si zvolí. Tyto strategie určí nejen poptávku a nabídku, ale také typ příkazu a případně i jeho limitní cenu, který agent pro realizaci svého obchodu využije. V tomto ohledu se tedy model liší od všech předchozích, jelikož místo využití náhody simuluje celý proces, během kterého agenti vybírají a dávají své příkazy k obchodu. Sada strategií následuje ostatních studií v oboru ACF a obsahuje fundamentální, technické a nahodilé agenty. Jednotlivé strategie si nyní přiblížíme.

5.2.11 Nahodilí agenti

Nejméně sofistikovanými agenty jsou nahodilí agenti. V podstatě se nijak nezajímají o žádné relevantní informace, tedy ani o historický vývoj cen, ani o vnitřní hodnotu akcií. Svůj nákup či prodej si nijak nečasují a nezkoumají ekonomická data. V každém okamžiku si pouze představí dva scénáře. První představuje nárůst ceny akcie o určitou hodnotu, druhý její pokles o stejnou hodnotu.

²⁵ <ftp.pse.cz/Info.bas/Cz/Predpisy/> (staženo 20. 7. 2010)

²⁶ <ftp.pse.cz/Info.bas/Cz/Predpisy/> (staženo 20. 7. 2010)

Zatímco tedy většina ACF modelů nechá své agenty odhadnout přesnou cenu, na kterou v budoucím období cena vystoupá či klesne, tento model volí reálnější přístup, kde místo toho agenti přisuzují jednotlivým scénářům pravděpodobnost jejich realizace. I v reálném životě nemají investoři takové ambice, že by dokázali předpovědět, že cena akcie bude v následujícím období přesně 123,5 Kč, jako spíše pracují s různými alternativami a například zvažují jak je pravděpodobné, že za současné situace na trhu bude cena dále růst či naopak klesne.

Základním úkolem agentů je tedy v rámci jejich specifického investičního horizontu přisoudit jednotlivým scénářům pravděpodobnost výskytu. Agent zvažující nákup akcie tak učiní teprve tehdy, pokud považuje možnost nárůstu ceny za natolik pravděpodobnou, že při dosažení hodnot zisku a ztráty a jím odpovídajících pravděpodobností do užitečné funkce dosáhne hodnoty větší než nula. Nulový užitek totiž odpovídá rozhodnutí neinvestovat, jelikož na tom nemůže vydělat ani prodělat, a jakýkoliv kladný užitek je tedy pro agenta přínosem.

Stejně tak jedná agent, který akcii již drží. Ten na základě vyhlídek spojených s vlastnictvím akcie porovnává svůj užitek s možností jejího okamžitého prodeje, tedy s užitekem, který by mu přinesla suma, kterou by prodejem získal.

Podle zmíněného algoritmu tedy agent dospěje k rozhodnutí, zdali prodávat, nakupovat, či se obchodu neúčastnit. Pokud si zvolí nákup či prodej, musí se následně ještě rozhodnout, jakého typu příkazu k tomu využít. Tržní příkaz je pro něj v takovém případě sázka na jistotu. Riskantní vlastnictví akcie porovnává s aktuální tržní cenou a při využití tržního příkazu svůj obchod také za tuto tržní cenu zrealizuje. Je to tedy nejjednodušší prostředek, skrze nějž lze na akciovém trhu obchodovat.

Vedle toho se ale i v procesu nákupu či prodeje může agent rozhodnout riskovat. Vedle dlouhodobého horizontu, kterým je pro něj investiční horizont, agent hodnotí své možnosti v horizontu krátkodobém. Může sice například předpokládat, že v horizontu 80 period je vysoce pravděpodobné, že cena vzroste, naproti tomu si ale může být vědom, že tomuto vzestupu bude v horizontu 20 period předcházet naopak pokles. Jinými slovy tedy netvoří scénáře pouze pro dlouhé období, ale bere v potaz i volatilitu cen v nejbližší budoucnosti. V praxi to tedy znamená, že pokud se akcie dlouhodobě zhodnocuje, neznamená to, že by ji na této cestě nemohly potkat nějaké krátkodobé propady. A právě těchto propadů by mohl investor využít.

Pokud je agent již rozhodnut o nákupu akcie, bylo by bláhové nakoupit ji za současnou cenu, když by se v blízké budoucnosti mohla tato cena snížit. Existuje tu

tedy možnost výdělku v podobě levnějšího nákupu akcie. Pokud agent skutečně věří, že by mohla cena krátkodobě klesnout, využije limitního příkazu, jehož limitní cenu stanoví níže, než je současná cena tržní. Pokud cena skutečně klesne až k hranici jeho limitního příkazu, obchod se uskuteční a agent na tom vydělá. Pokud ale cena naopak vzroste, limitní příkaz nesplní svou funkci a agent bude muset následně akcii koupit za cenu vyšší, než jaké mohl dosáhnout před tím, než se rozhodl riskovat.

Zdali riskovat bude či nikoliv, k tomu opět slouží ohodnocení krátkodobých scénářů pravděpodobnostními hodnotami. Jestli cena krátkodobě klesne s dostatečnou pravděpodobností, má smysl riskovat, pokud ne, je lepší využít tržního příkazu. V případě prodeje je situace obdobná. Agent se tu ale snaží prodat akcii za co nejvyšší cenu, proto naopak sází na to, že se akcie krátkodobě zhodnotí. V matematickém formalismu lze popsaný problém vyjádřit jako porovnání dvou užiteků, tedy

$$p_1v(b) + p_2v(-b) \quad \text{a}$$

$$p_4(p_1v(b+a) + p_2v(-b+a)) + p_3(p_1v(b-a) + p_2v(-b-a))$$

kde p_1 a p_2 reprezentují pravděpodobnost zhodnocení a znehodnocení v dlouhém období, p_3 a p_4 pravděpodobnosti zhodnocení a znehodnocení v krátkém období a b a a rozpětí, o kolik se může akcie zhodnotit či znehodnotit v dlouhém a krátkém období. Definujme p_t jako tržní cenu, za kterou se mohl původně obchod bez rizika realizovat. $b+a$ pak vyjadřuje výdělek, kdy se akcie nejdříve propadla o a , následně pak ale dosáhla až ceny $p_t + b$, od nákupu pomocí limitního příkazu se tedy zhodnotila o $b+a$. Stejně tak $b-a$ vyjadřuje výdělek, kdy se agentovi naopak sázka nezdařila, cena nakonec vystoupala až na $p_t + b$, agent ale koupil akcii za $p_t + a$, dosáhl tedy zisku pouze $b-a$. Pro $-b+a$ a $-b-a$ to platí obdobně, zde pouze cena akcie finálně klesla na hodnotu $p_t - b$.

Hodnoty b a a představující rozpětí možného zhodnocení či znehodnocení následujících období ale nejsou v čase konstantní. Investor nemůže v každý okamžik předpokládat, že se cena akcie posune o stejnou konstantní hodnotu. Místo toho spíše počítá s volatilitou daného trhu v daném období a na jejím základě odhadne budoucí výnos. Pokud tedy trh právě prochází volatilní fází, bude i investor předpokládat možnost vysokého růstu nebo pádu cenu. V klidné fázi bude naopak pracovat s vyhlídkou pouze nepatrné změny ceny.

Proces, kterým agent převádí historickou volatilitu na očekávaný budoucí vývoj ceny, vychází z práce Barberis a Xiong (2009), která se jako jedna z mála také snaží aplikovat prospektovou teorii na chování investorů na akciových trzích. Autoři volí předpoklad, že investoři znají střední hodnotu a rozptyl ročních výnosů, tedy dlouhého období, na základě kterých volí hodnoty budoucího zhodnocení či znehodnocení v období krátkém. V případě našeho modelu si agenti vypočítají směrodatnou odchylku historických výnosů v závislosti na svém investičním horizontu. Jelikož je zajímavá pouze volatilita, nikoliv trend, střední hodnotu položí rovnu nule. Takto již hodnoty b a a jednoduše vyvodí ze vztahu

$$b = p(t)\sigma$$

$$a = p(t)\sqrt{(1 + \sigma^2)^{1/T} - 1}$$

kde σ představuje směrodatnou odchylku minulých výnosů a $T = 4$ četnost, s jakou agent kontroluje portfolio v průběhu investičního horizontu, tedy kolikrát je investiční horizont delší nežli horizont krátkodobý²⁷.

Při takto nastaveném modelu je pak tedy základní otázkou, podle čeho agenti volí pravděpodobnostní hodnoty jednotlivých scénářů, tedy co determinuje jejich poptávku po akciích. V případě nahodilých agentů jsou všechny odhady zcela náhodné, rovnoměrně rozdělené na intervalu $\langle 0,1;0,9 \rangle$, což reprezentuje absenci jakékoliv specifické investiční strategie.

5.2.12 Techničtí agenti

Druhou skupinou investorů jsou pak agenti využívající technické analýzy. I přes to, že základním poznatkem hypotézy efektivních trhů je to, že i v případě nejslabší efektivity trhů jsou všechny historické ceny inkorporovány do cen současných a technická analýza tedy nemá žádné opodstatnění, je mezi skutečnými investory velice hojně rozšířená. Ti se ve vývoji historických cen snaží najít určité obrazce, opakující se motivy nebo na základě statistickým metod určit trend, kterým se vývoj ceny akcie bude ubírat.

Nejčastější metodou technické analýzy jsou klouzavé průměry²⁸. Ty využívají souboru minulých cen sahajících stanovenou délku do minulosti. Nejrozšířenější a zároveň nejjednodušší jsou jednoduché klouzavé průměry. Ty pro každý časový okamžik vypočítají aritmetický průměr daného souboru minulých cen, přičemž po

²⁷ Barberis a Xiong (2009) a Příloha 2

²⁸ Revenda (1996)

dosazení těchto hodnot do grafu vznikne křivka klouzavého průměru. Čím více historických cen se pro klouzavý průměr využije, tím méně jeho hodnota reaguje na krátkodobé výkyvy cen a tím pádem reprezentuje vývoj dlouhodobějších trendů.

Každý investor využívá pro svá investiční rozhodnutí klouzavé průměry o rozdílné délce, obecně lze ale říci, že delší klouzavé průměry užívají investoři, kteří investují dlouhodobě. Proto i v našem modelu délka klouzavého průměru odpovídá agentově investičnímu horizontu.

Samotný klouzavý průměr ale pouze vyhlazuje výkyvy časové řady, není nám tedy schopen říci, jak se bude v budoucnu cena vyvíjet. K tomu slouží až interakce mezi dvěma rozdílnými klouzavými průměry, z nichž každý sahá rozdílně daleko do minulosti. Mnoho investorů věří, že pokud křivka krátkého klouzavého průměru protíná křivku dlouhého klouzavého průměru zespoda, ukazuje to na nástup nového trendu a jedná se tedy o správnou příležitost k investici.

Jelikož pro agenty v našem modelu není důležitá pouze víra ve vzestup nebo pokles ceny, ale zejména její míra, jeden časový okamžik nebádající k investici není dostačující. Na řadu tedy přichází Moving Average Convergence-Divergence (MACD). MACD sice v originále užívá exponenciálních klouzavých průměrů, jeho aplikace ne jednoduché klouzavé průměry ale nijak nepokřiví jeho smysl.

MACD v každý časový okamžik počítá rozdíl mezi krátkým a dlouhým klouzavým průměrem, přičemž tyto hodnoty vynáší do grafu. Výsledná křivka potom osciluje kolem nulové hodnoty. Pokud nulovou hodnotu protíná, signalizuje počátek nového trendu, čím dále se ale od ní nachází, tím silnější by trend měl být. Tato síla je tedy námi žádaná míra, s jakou agent bude věřit ve zhodnocení akcie.

Prakticky pak k formování pravděpodobnostních hodnot dochází tak, že si agent zvolí dva klouzavé průměry. Jeden z nich má délku odpovídající jeho investičnímu horizontu, druhý má délku poloviční. Agent dále prozkoumá, jak se hodnota MACD jeho klouzavých průměru vyvíjela v minulosti, přičemž se opět dívá tak daleko, jak je dlouhý jeho investiční horizont. Z těchto hodnot potom vybere maximální a minimální hodnotu.

Absolutně nemá hodnota MACD sama o sobě žádnou vypovídací hodnotu, proto je třeba ji poměřovat relativně k jejím historickým hodnotám. Pokud se současná hodnota rovná nebo přesahuje historickou maximální hodnotu, agent má dobrý důvod věřit ve vzestup akcie, přičemž této vyhlídce přiřazuje pravděpodobnost 0,9. Stejně tak pokud se rovná nebo je nižší než historická minimální hodnota, pravděpodobnost

propadu je opět 0,9. Uvnitř intervalu maxima a minima je ale situace zajímavější. Pokud křivka MACD protíná nulovou hodnotu, pak je pravděpodobnost vzestupu pouze 0,5. Čím více se ale od nulové hodnoty vzdaluje, pravděpodobnost vzestupu lineárně roste, dokud nedosáhne hodnoty 0,9, když křivka dosáhne historické maximální hodnoty MACD. Pro pravděpodobnost poklesu platí obdobná lineární závislost až do historické minimální hodnoty MACD. Pokud tedy v minulosti dosáhla maximální hodnota MACD hodnoty 1 a současná hodnota je rovna 0,5, agent přiřadí scénáři zhodnocení akcie pravděpodobnost 0,7.

Tímto procesem si tedy techničtí agenti mohou ohodnotit, do jaké míry věří v realizaci jednotlivých vyhlídek. Vedle realističnosti tohoto modelu je pak jeho hlavním přínosem to, že agenti nejsou v každém okamžiku povolání k obchodování se stejnou pravděpodobností stejně jako v SFI marketu, nýbrž v průběhu času na základě technických indikátorů počet obchodníků stále roste a klesá.

5.2.13 Fundamentální agenti

Poslední strategie užívaná heterogenními agenty se zakládá na fundamentální analýze. Tato analýza, jak již bylo zmíněno výše, se snaží určit vnitřní hodnotu akcie na základě dostupných relevantních informací. Její uživatelé ji pak porovnávají s tržními cenami jednotlivých akcií a na trhu hledají podhodnocené a nadhodnocené tituly. Hlavním předpokladem fundamentálních analytiků je fakt, že se tržní ceny v dlouhém období k této fundamentální hodnotě navrátí. Stejně jako v Chiarella, Iori a Perelló (2007) užívám zjednodušující předpoklad, že tato fundamentální hodnota je všem agentům známá a zároveň je konstantní.

Pravděpodobnost, jakou fundamentální agenti přisuzují možnosti, že se tržní cena navrátí k fundamentální hodnotě, závisí na tom, jak je od ní tržní cena vzdálená. Princip je tedy podobný jako v případě technických agentů, místo hodnoty MACD je ale využita cena akcie. V délce investičního horizontu je tedy v minulosti opět nalezena její maximální a minimální hodnota, přičemž pravděpodobnost opět lineárně roste mezi hodnotami 0,1 a 0,9 podle toho, kde se cena mezi historickým maximem a minimem nachází. Situace je rozdílná v tom ohledu, že zatímco vyšší hodnota MACD signalizovala vyšší pravděpodobnost růstu, v případě ceny je to naopak. Čím je totiž blíže své historické maximální hodnotě, tím pravděpodobnější je naopak scénář, podle kterého začne zase klesat a přibližovat se tak fundamentální hodnotě.

Za předpokladu znalosti fundamentální hodnoty má tak každý fundamentální agent představu, při jaké ceně by byl akcii ochoten koupit. Na základě své averze ke ztrátám si jednoduše vypočítá, jak vysokou pravděpodobnost zhodnocení akcie vyžaduje, jelikož agent s vyšší averzí vyžaduje vyšší jistotu investice, a tedy i určitý limit, pod který musí cena akcie klesnout, aby dosáhl kladného užitku, pokud by do ní investoval. Na pozici tohoto limitu pak jednoduše umístí limitní příkaz. Kdykoliv se však ocitne v situaci, že se tržní cena pohybuje pod tímto limitem, aniž by měl fundamentální agent podán limitní příkaz, nakoupí akcii okamžitě za tržní cenu. Pokud tedy cena akcie klesá, tito agenti ji svými limitními příkazy vkládají do cesty překážky a tím zpomalují její následující pokles.

V případě prodeje akcie se pak fundamentální agenti chovají poněkud opačně oproti ostatním. Při výběru způsobu prodeje je pro ně limitní příkaz naopak jistotou. Jelikož se podle nich cena akcie v dlouhém i krátkém období bude přibližovat fundamentální hodnotě, nemají možnost vydělat na krátkodobých změnách. Místo toho proto umisťují limitní příkazy k prodeji i v případě, kdy mají vůli akcii držet. Volí totiž takovou limitní cenu převyšující současnou tržní cenu, že pokud by akcii za ni skutečně prodali, dosáhli by užitku stejného či vyššího, než jaký užitek mají z držby akcie. Doufají tedy ve výskyt nějakého méně sofistikovaného investora, který by byl ochoten akcii i za takovou cenu koupit. Pokud k tomu ale nedojde a tržní cena se přiblíží fundamentální hodnotě natolik, že její následné zhodnocení již není dostatečně pravděpodobné, fundamentální agent se akcie zbaví za tržní cenu.

6 Výstup modelu

Výše již byla zmíněna některá specifika, která vykazují reálné akciové trhy a která stále čekají na jednotné teoretické vysvětlení. Mnoho modelů se pokoušelo tyto charakteristiky nasimulovat, každý ze svého unikátního úhlu pohledu, u žádného z nich ale nelze tvrdit, že se mu to zcela povedlo. Na následujících řádcích ukážu, že model popsany v této práci velice dobře naplňuje znaky akciových trhů a daří se mu je tak obstojně simulovat.

6.1 Heterogenní investoři

Nejdříve bych nastínil, jaké výstupy model obecně poskytuje, tedy jak se podle něj cena akcie vyvíjí v čase a jaké jsou její výnosy. Vývoj ceny je silně závislý na struktuře agentů, kteří na trhu obchodují, tedy na míře zastoupení jednotlivých investičních strategií. Situaci dokumentuje obr. č. 4.

Pokud na trhu necháme nejdříve obchodovat pouze nahodilé agenty, dalo by se očekávat, že se bude cena v čase pohybovat zcela náhodně a nebude vykazovat žádná specifika. Ve skutečnosti tomu tak ale není. Problém spočívá v tom, že pokud agenti disponují averzí ke ztrátám, značně to ovlivňuje jejich přístup k riziku.

Pokud agent nejdříve akcii drží a uvažuje o jejím prodeji, učiní tak v závislosti na averzi k riziku a na tom, jestli dosud prodělal či vydělal. Pokud vydělavá, požaduje například 60% pravděpodobnost zhodnocení akcie, aby si ji ponechal, pokud prodělavá, stačí mu 40% pravděpodobnost zhodnocení. Oba případy jsou oproti sobě symetrické a dalo by se tedy říci, že při dostatečném množství agentů požadují v průměru 50% pravděpodobnost zhodnocení, aby si akcii nechali. Naopak v 50% případů nebudou akcii chtít a nabídnou ji na trhu.

Naproti tomu pokud agent uvažuje o nákupu akcie, jeho averze ke ztrátám ho nutí požadovat pravděpodobnost zhodnocení vyšší než 50%. Pokud totiž vnímá silněji ztrátu nežli zisk, kladného užitku dosáhne pouze v případě, kdy bude moci v užitkové funkci přisoudit potenciálnímu zisku větší váhu oproti potenciální ztrátě. V případě averze ke ztrátám rovné 2,25 dosahuje tato hodnota přibližně 70%. Takový agent tedy bude poptávat akcii pouze ve 30% případů²⁹.

²⁹ Jednotlivé situace lze lehce propočítat díky kalkulátoru prospektové teorie na http://psych.fullerton.edu/mbirnbaum/calculators/cpt_calculator.htm

Jaký je důsledek takovéto situace je více než zřejmé. Jelikož je pravděpodobnost všech scénářů pro nahodilé agenty rovnoměrně rozdělena na intervalu $\langle 0,1;0,9 \rangle$, případů, kdy budou chtít agenti akcii prodat, bude více než případů, kdy ji budou chtít koupit, nabídka bude převyšovat poptávku a to se nutně musí projevit ve vývoji ceny. Jelikož tato nerovnováha bude přetrvávat v čase, cena bude dlouhodobě klesat. Jev je to na první pohled zarážející, nikterak ale nevybočuje z konceptu opatrných agentů podle Kahnemana a Tverskyho, kteří si příliš cení svého současného majetku.

Situace se ale mění, když na trh vstoupí fundamentální agenti. Ti věří v dlouhodobý návrat ceny zpět k fundamentální hodnotě a také tomu svým jednáním přispívají. Pokud se tedy cena příliš vzdálí od této hodnoty, fundamentální agenti ji nákupem či prodejem přivedou zase zpět. Jelikož i oni jsou ale averzní k riziku i ke ztrátám, cena výsledně neosciluje kolem fundamentální hodnoty, nýbrž kolem hodnoty o něco nižší. Důvodem je fakt, že v jisté vzdálenosti fundamentální hodnoty od ceny není následný růst ceny již dostatečně pravděpodobný a fundamentální agenti se tedy v této vzdálenosti přestanou na trhu angažovat.

S příchodem poslední skupiny, technických agentů, se pak pojí zejména zvýšená volatilita trhů. Ti díky vyhledávání trendů tyto trendy zároveň posilují a cena tak prochází daleko většími výkyvy než v předchozích případech. Vedle toho přispívají i k dalším charakteristickým jevům, které popisují následující řádky.

6.2 Charakteristiky simulovaného trhu

Abychom dodrželi pořadí výše uvedených charakteristik, začněme s autokorelací výnosů a sdružující se volatilitou. Tyto pojmy spolu velice úzce souvisí, jelikož, jak již bylo zmíněno, měřítkem sdružování volatility je autokorelace mocnin výnosů, či jejich absolutních hodnot. Pro potřeby této práce bude užíváno právě těchto absolutních hodnot, které, jak uvádí Cont (2001), by měly být nejvíce korelovány. Samotný výnos je pak podle ustálené praxe definován jako

$$r(t, \Delta t) = \ln(p(t + \Delta t) / p(t))$$

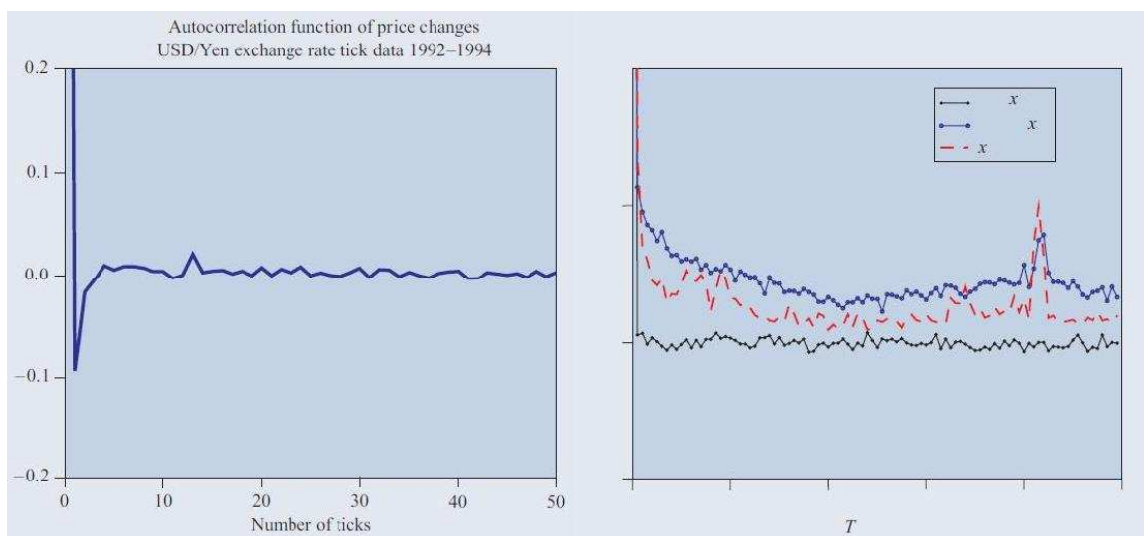
kde p představuje cenu akcie v uvedeném čase a Δt je horizontem výnosů, tedy obdobím, v jehož průběhu je výnos počítán. Lze tak pracovat například s denními, měsíčními nebo ročními výnosy.

6.2.1 Autokorelace výnosů a sdružování volatility

Cílem modelu je tedy dosáhnout stavu, kdy jsou korelovány absolutní hodnoty výnosů, zatímco výnosy samotné nikoliv. Dosáhnout absence autokorelace výnosů není

žádným velkým problémem a všechna stadia modelu v průběhu jeho tvorby ji vykazovala. Na druhé straně sdružující se volatilita je již problematičtějším fenoménem. Jedna z prvních podob modelu v sobě zahrnovala zjednodušující předpoklad, že agenti na následující období předpokládají vždy stejnou hodnotu, o kterou by se cena mohla zvýšit nebo snížit. Fakticky tak byly parametrům b a a přiřazeny konstantní hodnoty 2 a 1. V takovém případě se absolutní výnosy chovaly stejně jako výnosy samotné a v průběhu času mezi nimi nebyla žádná signifikantní korelace. Ta se dostavila až v případě, kdy se agenti začali zajímat o historickou volatilitu při tvorbě vyhlídek ohledně budoucího vývoje cen. Tehdy se začala volatilita vyskytovat v celcích, autokorelace absolutních výnosů byla pozitivní a v průběhu času se postupně snižovala, jak popisuje Cont (2001).

Tento fakt zobrazují obr. č. 5 a obr. č. 6 autokorelačních funkcí, které se zároveň věnují míře, v jaké ke sdružování volatility dochází. Je na nich zřejmě vidět, že je autokorelace absolutních výnosů úměrná počtu technických agentů, kteří se obchodování účastní. Pokud jsou z trhu zcela vyčleněni, autokorelace je téměř nulová. V případě ale, že jejich počet narůstá, její hodnota stále roste a vyskytuje se ve stále delších časových horizontech, neboli jsou mezi sebou korelovány absolutní výnosy v čase stále vzdálenější. Výnosy samotné pak vykazují silnou kladnou i zápornou autokorelaci pouze v krátkém časovém horizontu nejvýše 5 period, pro větší zpoždění pak oscilují kolem nuly. Autokorelace výnosů v krátkém horizontu je dokumentovaným jevem³⁰ a výstup modelu po srovnání s obr. č. 3 simuluje realitu velice přesvědčivě.



Obr. č. 3: Autokorelace výnosů a autokorelace absolutních výnosů na skutečných trzích

Zdroj: Cont (2001)

³⁰ Cont (2001)

6.2.2 Šikmost a špičatost

Ke stejným poznatkům dospějeme i při studiu špičatosti a šikmosti rozdělení výnosů. Jak již bylo řečeno, výnosy mají leptokurtické rozdělení. To je špičatější nežli rozdělení normální, má tedy ostřejší vrchol a delší konce. Jak moc se liší rozdělení výnosů od normálního nám napoví koeficient špičatosti, jehož skutečné hodnoty můžeme nalézt v práci Kulhánek (2009), která studuje charakteristiky akciových trhů členských států Evropské Unie a některých dalších zemí. Koeficient špičatosti v těchto případech dosahuje vždy kladných hodnot v rozmezí od 3,49 v případě Španělska do 31,85 v případě Islandu. Střední hodnota těchto koeficientů je 7,6, můžeme tedy s určitostí říci, že výnosy akciových trhů nejsou rozděleny normálně.

Výnosy simulované popisovaným modelem pak také vykazují kladnou nadměrnou špičatost, přičemž její hodnota opět stoupá s počtem technických agentů. To dokumentují obr. č. 7 a obr. č. 8. Koeficient špičatosti je nejnižší, v některých případech téměř nulový, při absenci technických agentů, jejichž přibývající počet koeficient postupně navyšuje a v případě výnosů s horizontem jediné periody dosahuje až k hodnotě 18.

Právě tento horizont výnosů je další důležitou proměnnou, která determinuje koeficient špičatosti. Zatímco přibývá s technickými agenty, postupně se snižuje s rostoucím obdobím, přes které výnosy počítáme. Jak dokumentuje obr. č. 7, bez závislosti na počtu technických agentů, pokud bereme v potaz výnosy stále delšího časového období, neboli ve skutečnosti bychom se pohybovali například od výnosů denních po výnosy týdenní, koeficient špičatosti se blíží nule a rozdělení výnosů se v tomto ohledu blíží normálnímu, stejně jak již bylo naznačeno výše v popisu charakteristik trhů.

Vedle špičatosti pak podle Kulhánek (2009) většina evropských i světových akciových trhů vykazuje zjevnou šikmost, přesněji mají záporný koeficient šikmosti. Střední hodnota tohoto koeficientu je $-0,94$ a rozdělení výnosů má tedy delší levý konec.

Obr. č. 9 a obr. č. 10 opět ukazují zmíněný fakt. S rostoucím horizontem výnosů se jejich rozdělení přibližuje rozdělení normálnímu a koeficient šikmosti roste od hodnot nižších než -1 směrem k nule. Tento nárůst je ale pomalejší než v případě koeficientu špičatosti a šikmost rozdělení výnosů tedy přetrvává i pro delší horizonty. Vliv technických agentů pak není natolik zjevný, jako v předchozích případech. Ti sice obecně k šikmosti přispívají, tato kauzalita ale není dodržena v každém jejich navýšení.

6.2.3 Vzájemná korelace rozpětí a volatility

Struktura modelu nám ale umožňuje testovat další zajímavé vztahy simulovaného trhu. Díky užití reálného obchodního systému, tedy kontinuálního režimu obchodování a možnosti umisťovat tržní a limitní příkazy, není problémem sledovat vývoj rozpětí nejlepších nabídek a poptávek. Zaměřím se zejména na vztah tohoto rozpětí s volatilitou ceny a pokusím ukázat, že rozpětí s volatilitou roste, jak tvrdí například Lawrence E. Harris (1994).

K tomuto účelu nám poslouží podobně jako v Zovko a Farmer (2002) vzájemná korelace mezi rozpětím $s(t)$ a volatilitou $v(t-\tau)$, kde τ vyjadřuje zpoždění. Rozpětí je pro každé období rozdílem mezi nejnižší nabízenou cenou prodeje akcie a nejvyšší nabízenou cenou nákupu akcie. Volatilita je pak stejně jako v případě sdružené volatility definována jako absolutní výnos.

Podle obr. č. 11 a obr. č. 12 je zřejmé, že jsou mezi sebou volatilita a rozpětí silně korelovány. Stejně jako v Zovko a Farmer (2002) je funkce vzájemných korelací vychýlena doprava. Rozpětí je tedy nejvíce korelováno s o několik period předcházející volatilitou. Dalo by se tedy říci, že volatilita ovlivňuje budoucí podobu rozpětí. Na druhé straně ale korelace dlouho přetrvává pro zpožďující se volatilitu. Jakákoliv změna rozpětí tedy sice znatelně méně, ale přece jenom zase nazpět ovlivňuje volatilitu výnosů po dobu několika desítek period.

Stejně jako v minulých případech pak narůstající počet agentů vzájemnou korelaci zvyšuje, zatímco prodlužující se horizont výnosů ji naopak snižuje a spolu s ním roste i počet přecházejících period, ve kterých má změna volatility na rozpětí vliv.

7 Závěr

Cílem práce bylo poukázat na chyby současného pojetí ekonomie a naznačit nový směr, kterým by se mohla v budoucnu vydat. Pohledem do minulosti poukázala na nedostatky, které se vyskytují v samotných základech tradiční ekonomie a kterých se budeme moci zbavit pouze radikálním přehodnocením celého jejího pojetí. V oblasti kritiky současných ekonomických poznatků se zaměřila na hypotézu efektivních trhů a ukázala, že se jedná o překonaný koncept a že existují modernější metody, jak k akciovým trhům přistupovat. Mezi tyto metody patří zejména simulace akciových trhů pomocí moderní výpočetní techniky. Byly takto představeny nejrůznější modely, které se každý po svém snaží pojímat jedinečnou problematiku popisu finančních trhů. Vedle toho byl vyvinut i model zcela nový, zakládající se na prospektové teorii behaviorální ekonomie a inkorporaci reálných obchodních mechanismů. Model si vedl překvapivě dobře a prošel všemi připravenými testy, zdali simuluje skutečné akciové trhy s dostatečnou přesností. Behaviorální ekonomie má tedy zřejmě v oblasti multiagentních modelů budoucnost a záleží na budoucím výzkumu, zdali to potvrdí. Zejména by bylo třeba podrobit model dalším zátěžovým testům, jelikož tato práce zdaleka neověřila přítomnost všech specifik akciových trhů.

Bibliografie

Publikace

Barberis, N.; Thaler, R. (2003): **A Survey of Behavioral Finance.**
NBER Working Paper no. W9222.

Barberis, N.; Xiong, W. (2009): **What Drives the Disposition Effect? An Analysis of a Long-Standing Preference-Based Explanation.**
The Journal of Finance, vol. 64, no. 2.

Beinhocker, E. D. (2007): **The Origin of Wealth – Evolution, Complexity, and the Radical Remaking of Economics.**
London: *Random House Business Books*.

Bezemer, D.J. (2009): **„No One Saw This Coming“: Understanding Financial Crisis Through Accounting Models.**
Munich Personal RePEc Archive

Chiarella, C.; Iori, G.; Perello, J. (2007): **The Impact of Heterogeneous Trading Rules on the Limit Order Book and Order Flows.**
London, City University, Department of Economics: *City University Discussion Papers* 08/04.

Cont, R. (2001): **Empirical Properties of Asset Returns: Stylized Facts and Statistical Issues.**
Quantitative Finance, vol. 1, pp. 223-236.

Fama, E. F. (1965): **The Behavior of Stock-Market Prices.**
The Journal of Business, vol. 38, no. 1, pp. 34-105.

Fama, E. F. (1970): **Efficient Capital Markets: A Review of Theory and Empirical Work.**
The Journal of Finance, vol. 25, no. 2, pp. 383-417.

Farmer, J.D. (1998): **Market Force, Ecology, and Evolution.**
Santa Fe Institute working paper 98.

Farmer, J. D.; Patelli, P.; Zovko, I. I. (2004): **The Predictive Power of Zero Intelligence in Financial Markets.**
PNAS, vol. 102 no. 6 2254-2259.

Harris, L.E. (1994): **Minimum Price Variations, Discrete Bid-Ask Spreads, and Quotation Sizes.**
The Review of Financial Studies (1986-1998).

Holman, R. a kol. (2001): **Dějiny ekonomického myšlení.**
Praha: *C.H.Beck*, 2.vydání.

Kahneman, D.; Tversky, A. (1979): **Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk.**

Econometrica, vol. 47, no. 2, pp. 263-292.

Keynes, J.M. (2000): **A Tract on Monetary Reform.**

New York: *Prometheus Books*.

Křištofuk, L. (2010): **Long-Range Dependence in Returns and Volatility of Central European Stock Indices.**

Bulletin of the Czech Econometric Society, vol. 17, issue 27.

Kulhánek, L. (2009): **Komparace volatility akciových trhů v Evropské unii.**

Ostrava: 7. mezinárodní konference Finanční řízení podniků a finančních institucí.

LeBaron, B. (2005): **Building the Sante Fe Artificial Stock Market.**

Waltham (MA), International Business School, Brandeis University: *Technical report*.

LeBaron, B. (2006): **Agent-Based Computational Finance**, in Tesfatsion, L.; Judd, K.L.:

Handbook of Computational Economics .

Elsevier, chapter 24, pp. 1187-1233.

Lo, Andrew W.; MacKinlay A. Craig (1999): **A Non-Random Walk Down Wall Street.**

Princeton: *Princeton University Press*.

Malkiel, B.G. (1996): **A Random Walk Down Wall Street.**

London: *W.W. Norton & Company Ltd.*

Malkiel, B. G. (2003): **The Efficient Market Hypothesis and Its Critics.**

Journal of Economic Perspectives, vol. 17, no. 1, pp. 59-82.

Raberto, M.; Cincotti, S.; Focardi, S.M.; Marchesi, M. (2001): **Agent-Based Simulation of a Financial Market.**

Physica A, vol. 299, no. 1.

Revenda, Z.; Mandel, M.; Kódera, J.; Musílek, P.; Dvořák, P.; Brada, J. (1996):

Peněžní ekonomie a bankovníctví.

Praha: *Management Press*.

Zovko, I.; Farmer, J. D. (2002): **The Power of Patience: A Behavioral Regularity in Limit Order Placement.**

Quantitative Finance, vol. 2, pp. 387-392.

Internetové odkazy

http://www.nytimes.com/2008/11/02/magazine/02wwln-Q4-t.html?_r=1&partner=permalink&exprod=permalink

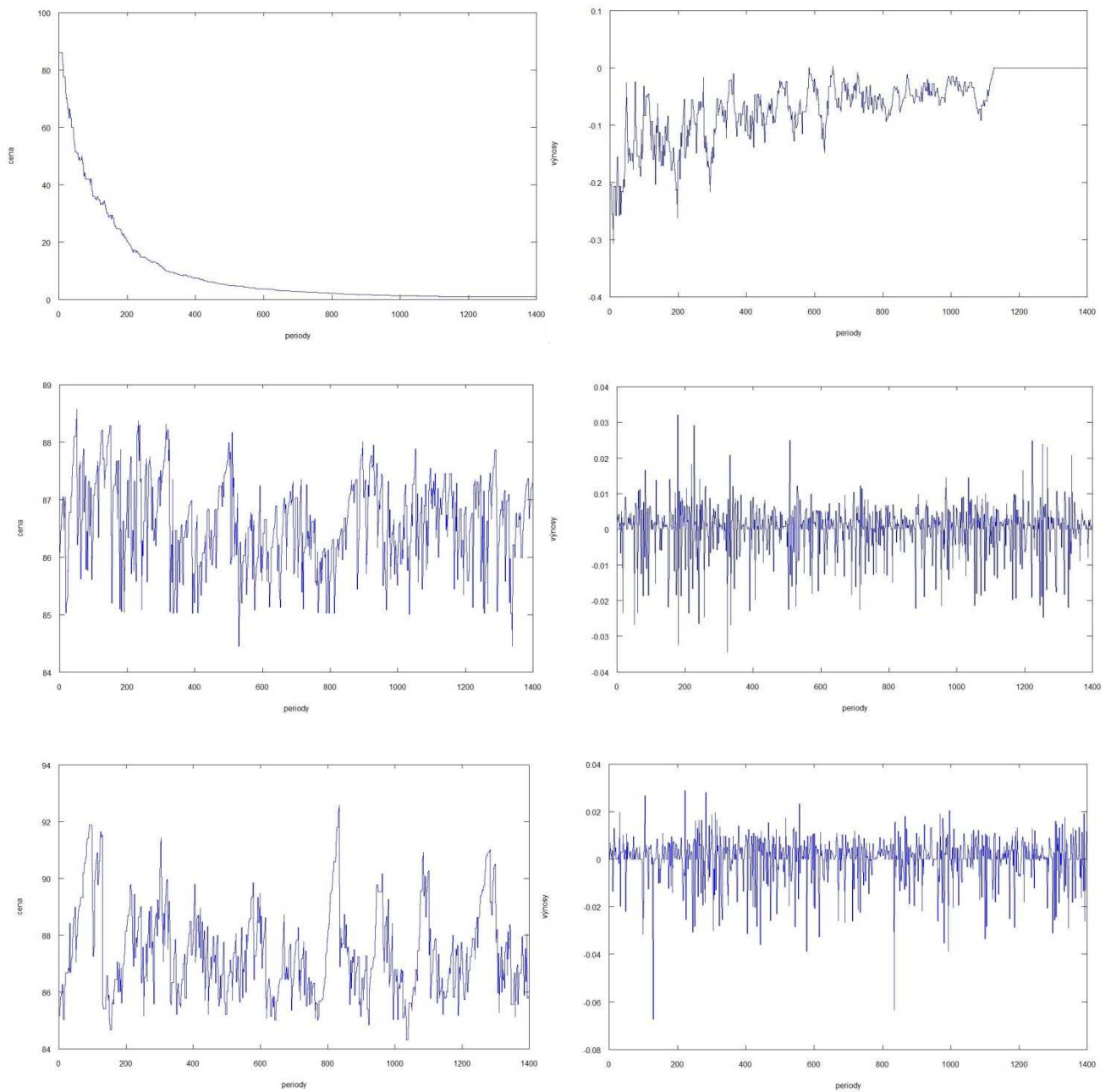
<http://www.bloomberg.com/apps/news?pid=newsarchive&sid=ah5qh9Up4rIg>

<http://genealogy.math.ndsu.nodak.edu/id.php?id=81048>

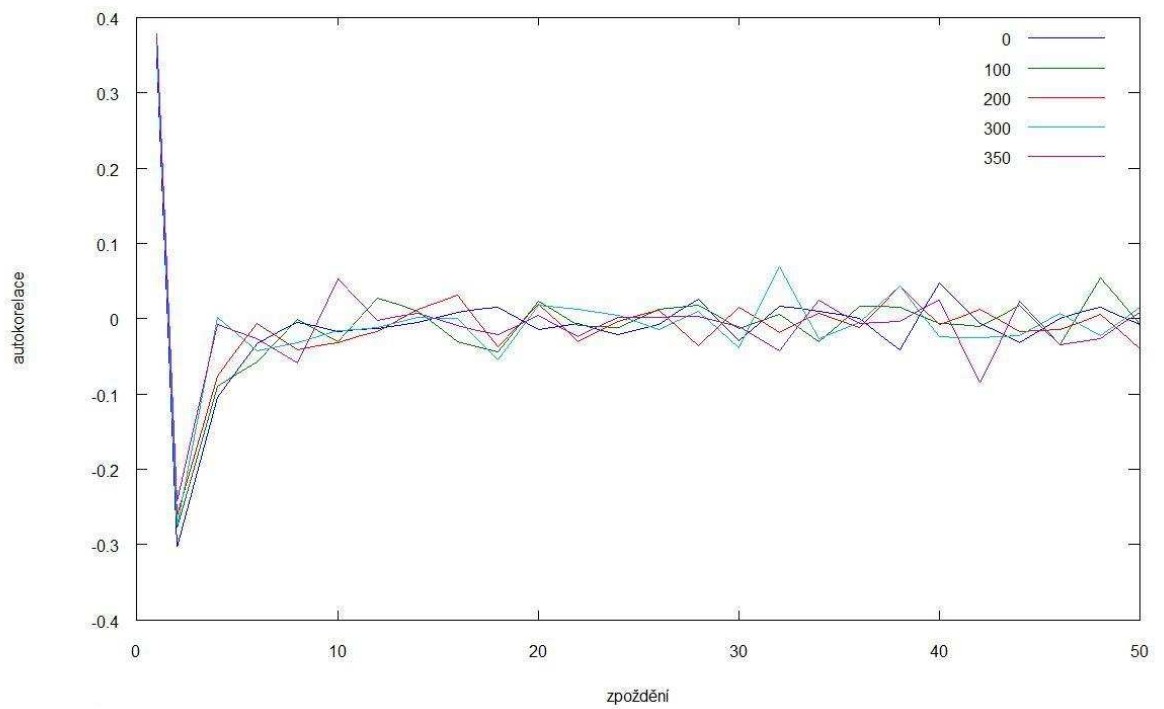
<ftp.pse.cz/Info.bas/Cz/Predpisy/>

http://psych.fullerton.edu/mbirnbaum/calculators/cpt_calculator.htm

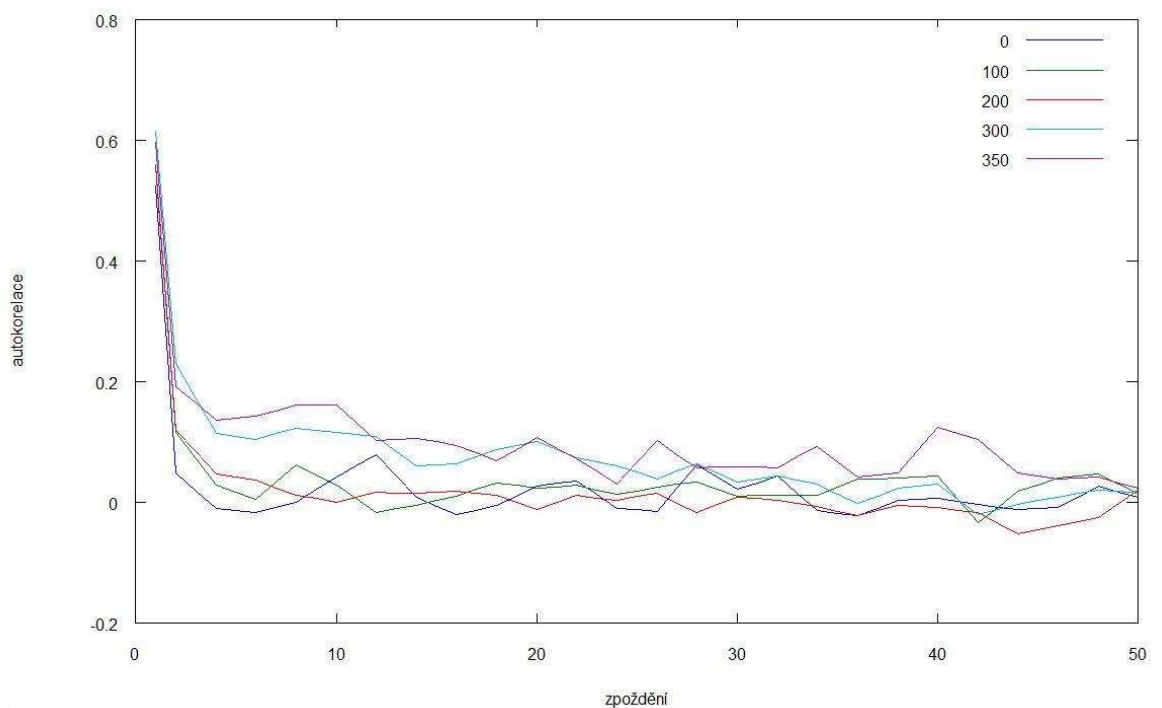
Příloha 1



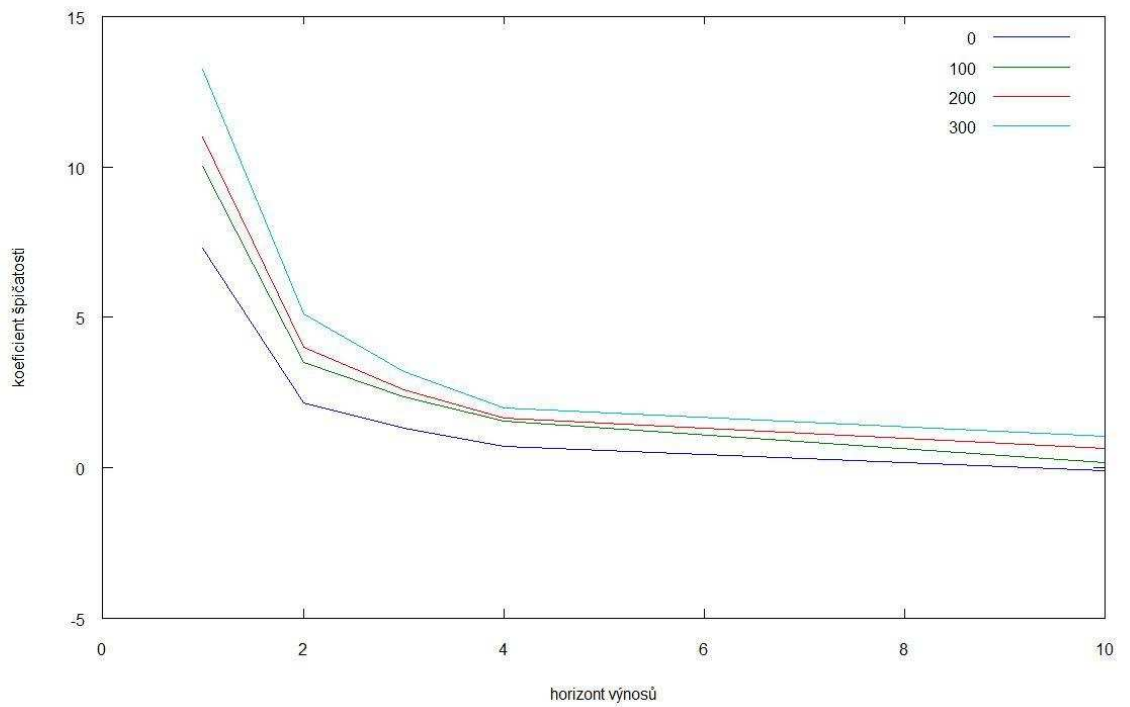
Obr. č. 4: Na levé straně jsou grafy vývoje cen, na pravé straně jim odpovídající výnosy. Grafy nahoře představují situaci, kdy se na trhu vyskytuje pouze 200 nahodilých agentů. V grafech uprostřed k nim bylo přidáno 400 fundamentálních agentů. V grafech dole pak byli navíc doplněni 200 technickými agenty. Horizont výnosů je roven 4.



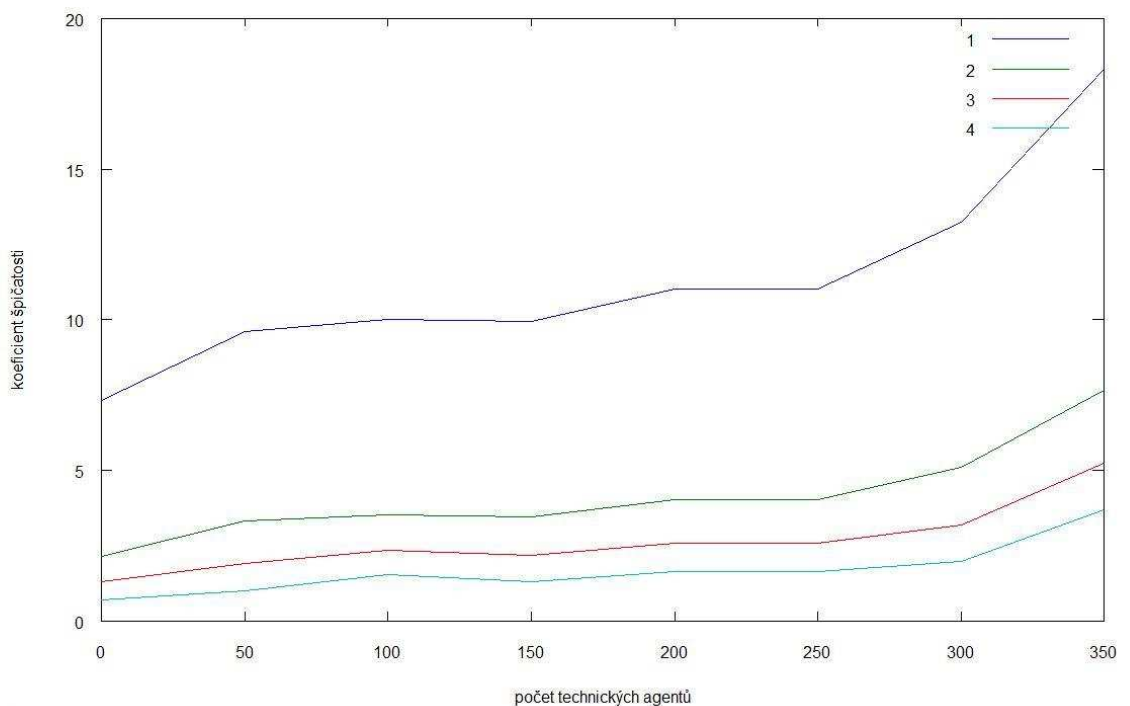
Obr. č. 5: Graf autokorelační funkce výnosů. Pro výnosy byl použit horizont v délce 4 period. Jednotlivé křivky představují rozdílné počty technických agentů. Testy byly prováděny s konstantním počtem 400 fundamentálních agentů a 50 nahodilých agentů.



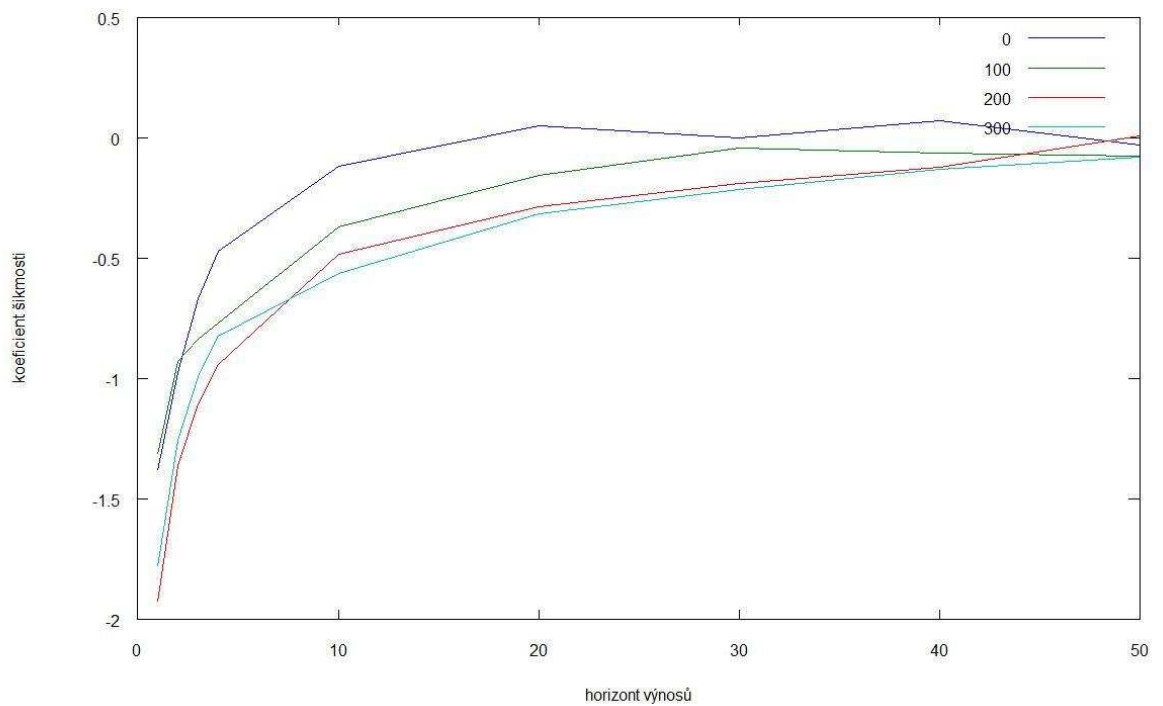
Obr. č. 6: Graf autokorelační funkce absolutních výnosů. Pro výnosy byl použit horizont v délce 4 period. Jednotlivé křivky představují rozdílné počty technických agentů. Testy byly prováděny s konstantním počtem 400 fundamentálních agentů a 50 nahodilých agentů.



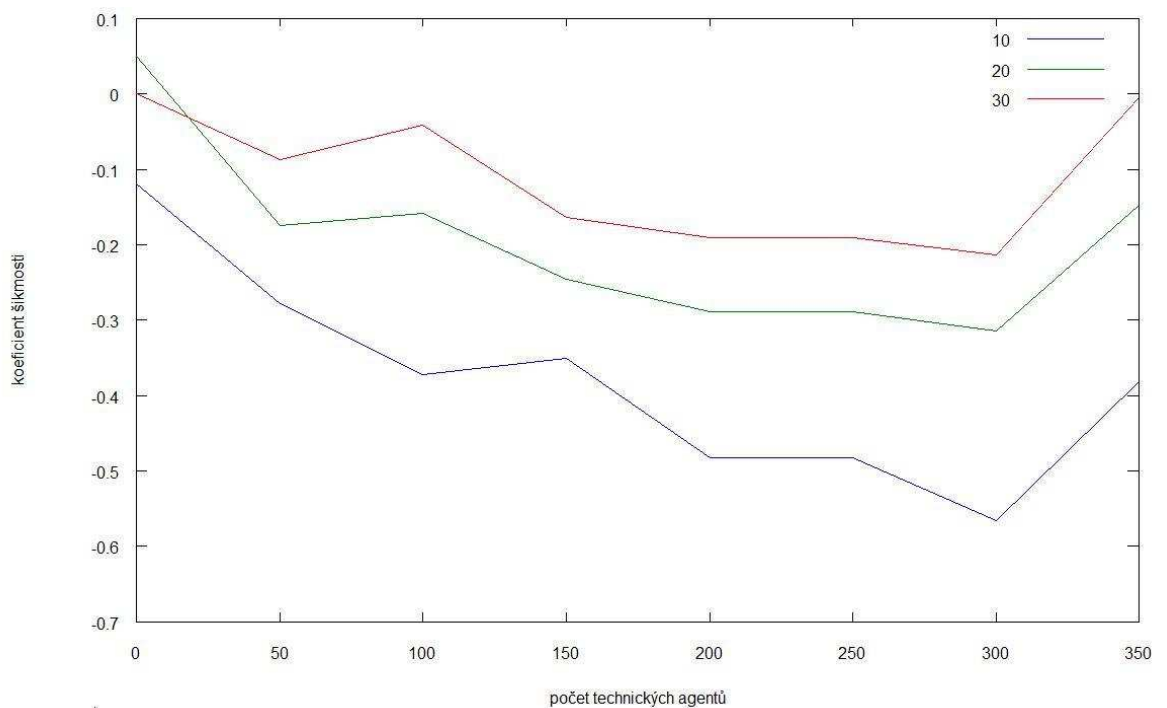
Obr. č. 7: Graf vývoje koeficientu špičatosti rozdělení výnosů v závislosti na rostoucím horizontu výnosů. Jednotlivé křivky představují rozdílné počty technických agentů. Testy byly prováděny s konstantním počtem 400 fundamentálních agentů a 50 nahodilých agentů.



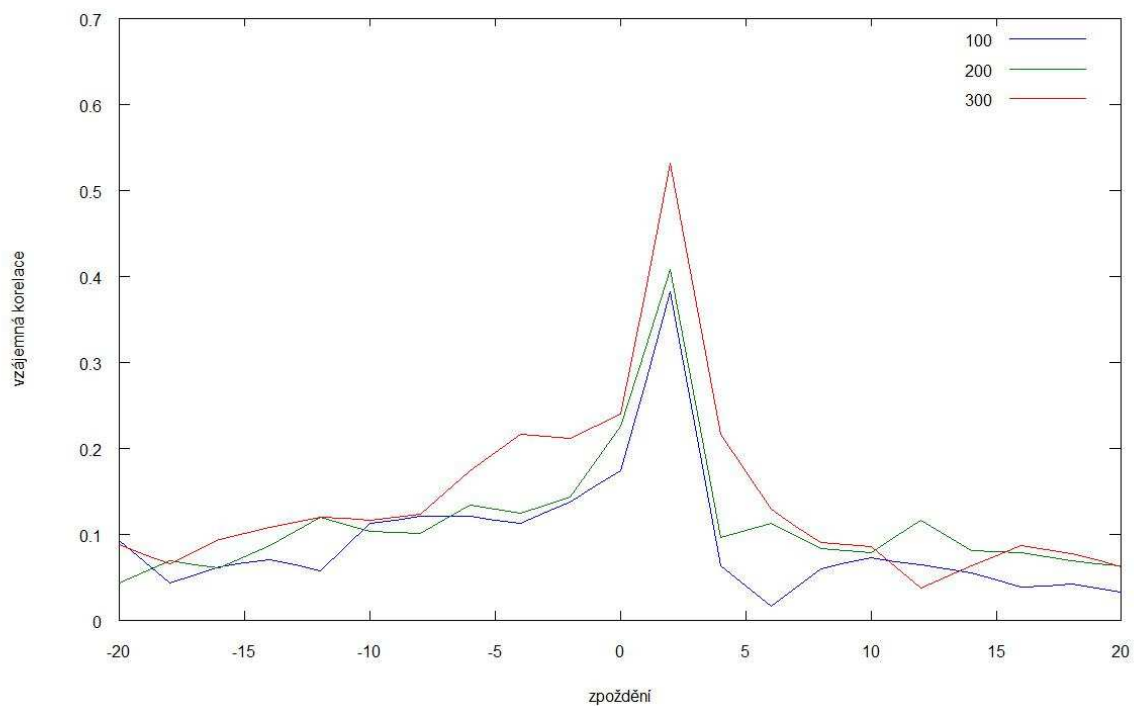
Obr. č. 8: Graf vývoje koeficientu špičatosti rozdělení výnosů v závislosti na rostoucím počtu technických agentů. Jednotlivé křivky představují rozdílné horizonty výnosů. Testy byly prováděny s konstantním počtem 400 fundamentálních agentů a 50 nahodilých agentů.



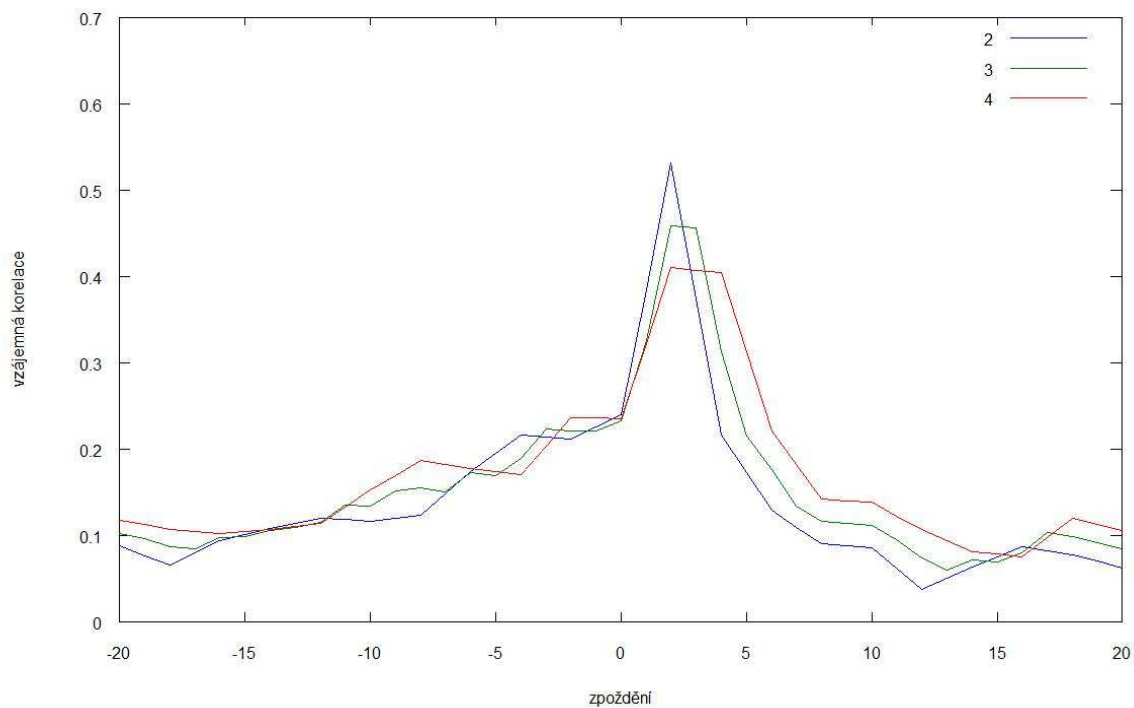
Obr. č. 9: Graf vývoje koeficientu šikmosti rozdělení výnosů v závislosti na rostoucím horizontu výnosů. Jednotlivé křivky představují rozdílné počty technických agentů. Testy byly prováděny s konstantním počtem 400 fundamentálních agentů a 50 nahodilých agentů.



Obr. č. 10: Graf vývoje koeficientu šikmosti rozdělení výnosů v závislosti na rostoucím počtu technických agentů. Jednotlivé křivky představují rozdílné horizonty výnosů. Testy byly prováděny s konstantním počtem 400 fundamentálních agentů a 50 nahodilých agentů.



Obr. č. 11: Graf vzájemné korelační funkce rozpětí a volatility. Pro absolutní výnosy byl použit horizont v délce 3 period. Jednotlivé křivky představují rozdílné počty technických agentů. Testy byly prováděny s konstantním počtem 400 fundamentálních agentů a 50 nahodilých agentů.



Obr. č. 12: Graf vzájemné korelační funkce rozpětí a volatility. Jednotlivé křivky představují rozdílné horizonty absolutních výnosů. Testy byly prováděny s konstantním počtem 400 fundamentálních agentů, 300 technických a 50 nahodilých agentů.

Příloha 2

Podle Barberis a Xiong (2009) agenti předpokládají, že v souhrnu mají oba krátkodobé prospekty zhodnocení R_u i znehodnocení R_d akcie stejnou pravděpodobnost $p = 0,5$. V takovém případě je

$$\text{a) } \mu = \left(\frac{R_u + R_d}{2} \right) \quad \text{b) } \mu = \left(\frac{R_u + R_d}{2} \right)^T$$

a) μ střední hodnota výnosu jedné periody

b) μ střední hodnota výnosu jednoho roku

kde T je počet investičních period v jednom roce, během kterých dochází ke krátkodobým zhodnocením a znehodnocením.

Podobný vztah nachází i pro rozptyl

$$\text{c) } \mu^2 + \sigma^2 = \left(\frac{R_u^2 + R_d^2}{2} \right) \quad \text{d) } \mu^2 + \sigma^2 = \left(\frac{R_u^2 + R_d^2}{2} \right)^T$$

jehož odvození sám nepopisuje, ale pro dostatečnou deskripci modelu by bylo na místě. Proto jej nyní uvedu.

Na základě vzorce pro rozptyl

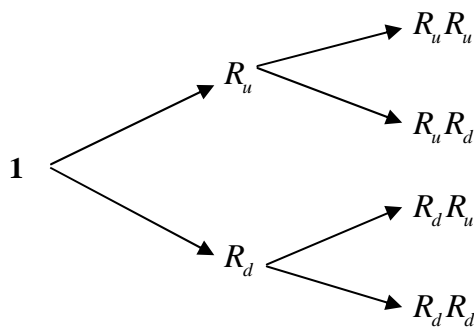
$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 p_i - \mu^2$$

se pomocí

$$\mu^2 + \sigma^2 = R_u^2 \frac{1}{2} + R_d^2 \frac{1}{2} = \frac{R_u^2 + R_d^2}{2}$$

dostáváme ke vzorci c) a nacházíme vztah pro rozptyl výnosu jedné periody.

Rozptyl více period si ukážeme na příkladu $T = 2$. V takovém případě může dojít ke čtyřem rozdílným scénářům, kde například $R_u R_d$ představuje zhodnocení akcie doprovázené následným znehodnocením, přičemž každý z nich má stejnou pravděpodobnost $p = 0.25$.



Rozptyl dvou investičních period je potom roven

$$\sigma^2 = (R_u R_u)^2 \frac{1}{4} + (R_u R_d)^2 \frac{1}{4} + (R_d R_u)^2 \frac{1}{4} + (R_d R_d)^2 \frac{1}{4} - \mu^2$$

a pomocí

$$\mu^2 + \sigma^2 = \frac{1}{4} [(R_u^2)^2 + 2(R_u R_d)^2 + (R_d^2)^2]$$

$$\mu^2 + \sigma^2 = \frac{1}{4} (R_u^2 + R_d^2)^2$$

$$\mu^2 + \sigma^2 = \left(\frac{R_u^2 + R_d^2}{2} \right)^2$$

docházíme ke vzorci d) pro $T = 2$. Pro T větší než 2 je postup obdobný.

Za užití vzorců b) a d) se pak Barberis a Xiong (2006) dostávají k předpisům

$$R_u = \mu^{1/T} + \sqrt{(\mu^2 + \sigma^2)^{1/T} - (\mu^2)^{1/T}}$$

$$R_d = \mu^{1/T} - \sqrt{(\mu^2 + \sigma^2)^{1/T} - (\mu^2)^{1/T}}$$

Jelikož náš model předpokládá, že $R_u = R_d$ a $\mu = 1$, zhodnocení či znehodnocení bude rovno

$$R = 1 \pm \sqrt{(1 + \sigma^2)^{1/T} - 1}$$

a čistý výnos nebo ztráta bude

$$r = \sqrt{(1 + \sigma^2)^{1/T} - 1}$$

Pro spočtení možného výkyvu ceny b ($T=1$) a a ($T=4$) pak již pouze stačí aktuální cenu vynásobit tímto potenciálním čistým výnosem či ztrátou a dostaneme

$$b = p(t) \sqrt{(1 + \sigma^2) - 1} = p(t) \sigma$$

$$a = p(t) \sqrt{(1 + \sigma^2)^{1/4} - 1}$$