

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomas RAMANAUSKAS

HETEROGENINIŲ BESIMOKANČIŲ
AGENTŲ SĄVEIKA PAGRĮSTAS
IMITACINIS AKCIJŲ RINKOS
MODELIAVIMAS

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

SOCIALINIAI MOKSLAI,
EKONOMIKA (04S)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Disertacija rengta 2005–2010 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Aleksandras Vytautas RUTKAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, socialiniai mokslai, ekonomika – 04S).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Ekonomikos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Romualdas GINEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, socialiniai mokslai, ekonomika – 04S).

Nariai:

prof. habil. dr. Juozas BIVAINIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, socialiniai mokslai, vadyba ir administravimas – 03S),

prof. dr. Vytautas BOGUSLAUSKAS (Kauno technologijos universitetas, socialiniai mokslai, ekonomika – 04S),

prof. dr. Birutė GALINIENĖ (Vilniaus universitetas, socialiniai mokslai, ekonomika – 04S),

prof. dr. Valentinas PODVEZKO (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, socialiniai mokslai, ekonomika – 04S).

Oponentai:

prof. habil. dr. Borisas MELNIKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, socialiniai mokslai, ekonomika – 04S),

prof. habil. dr. Rimvydas SIMUTIS (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T).

Disertacija bus ginama viešame Ekonomikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2010 m. birželio 9 d. 14 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2010 m. gegužės 7 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos „Technika“ 1759-M mokslo literatūros knyga.

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Tomas RAMANAUSKAS

STOCK MARKET SIMULATION BASED ON INTERACTION OF HETEROGENEOUS LEARNING AGENTS

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

SOCIAL SCIENCES,
ECONOMICS (04S)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2005–2010.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Aleksandras Vytautas RUTKAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Social Sciences, Economics – 04S).

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Economics at Vilnius Gediminas Technical University.

Chairman

Prof Dr Habil Romualdas GINEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Social Sciences, Economics – 04S).

Members:

Prof Dr Valentinas PODVEZKO (Vilnius Gediminas Technical University, Social Sciences, Economics – 04S),

Prof Dr Habil Juozas BIVAINIS (Vilnius Gediminas Technical University, Social Sciences, Management and Administration – 03S),

Prof Dr Vytautas BOGUSLAUSKAS (Kaunas University of Technology, Social Sciences, Economics – 04S),

Prof Dr Birutė GALINIENĖ (Vilnius University, Social Sciences, Economics – 04S).

Opponents:

Prof Dr Habil Rimvydas SIMUTIS (Vilnius University, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T),

Prof Dr Habil Borisas MELNIKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Social Sciences, Economics – 04S).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Economics in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 2 p. m. on 9 June 2010.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 7 May 2010.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

© Tomas Ramanauskas, 2010

Įvadas

Temos aktualumas. Sprogus turto kainų burbului, pasaulinės finansinės krizės akivaizdoje ypatingai išryškėjo požymiai, kad akademinėje finansų mokslo bendruomenėje įsigalėjusi neoklasikinė finansų teorija negali tinkamai paaiškinti vykstančių finansų rinkos procesų. Pagrindinė problema ta, kad standartinė teorija pagrįsta pernelyg griežtomis prielaidomis apie finansų rinkos efektyvumą, racionalųjį reprezentatyvųjį agentą ir Walras aukciono principu užtikrinamą rinkos pusiausvyrą. Finansų teoretikai vis labiau linksta prie sutarimo, kad siekiant paaiškinti standartinės teorijos požiūriu anomalinius rinkos procesus, veikiamai nepakaks į neoklasikinę analizę įtraukti išorinius rinkos iškraipymus ar racionalios elgsenos suvaržymus – didėja poreikis keisti visą teorinę paradigmą. Šiuo metu dar nėra tvirtai įsigalėjusių patenkinamų modeliavimo alternatyvų, tačiau sparti technologinė plėtra, specializuotos programinės įrangos tobulėjimas ir nauji imitacinio modeliavimo metodai leidžia formuotis perspektyviai finansinių tyrimų kryptčiai – agentais pagrįstam finansiniam modeliavimui (agent-based finance). Ši palyginti nauja imitacinių tyrimų sritis grindžiama požiūriu, jog finansų rinka yra kompleksinė, dideliu neapibrėžtumu pasižyminti sistema, kurios esminės savybės bei elgsenos dėsningumai kyla iš autonominės, t. y. nepriklausomos, daugelio heterogeninių investuotojų tarpusavio sąveikos. Taikant imitacinius agentais pagrįstus finansinius modelius, įmanoma tinkamai atsižvelgti į esmines finansų rinkos savybes bei nagrinėti rinkos procesus, kurių standartinė teorija iš viso nenagrinėjo.

Nagrinėjama mokslo problema. Viena iš svarbiausių finansų mokslo užduočių yra gilinti generatyvinį supratimą apie finansų rinkų funkcionavimą, t. y. paaiškinti, kokie pamatiniai veiksniai ir koku būdu lemia stebimos rinkos būsenos (ar pusiausvyros) susiformavimą. Vertinant bendriausiu lygmeniu, šiuo tyrimu siekiama prisidėti ieškant atsakymų į probleminius finansų mokslo klausimus: kokie yra baziniai finansų rinkos elementai, svarbiausi procesai ir esminiai investuotojų sprendimus lemiantys veiksniai, kokia yra rinkos institucinės sąrangos, individualių investuotojų sprendimų, investuotojų konkurencinės kovos ir jų tarpusavio sąveikos įtaka efektyviam rinkos funkcionavimui, kodėl formuojasi finansiniai burbulai ir pan. Konkretesniu lygmeniu, atsižvelgiant į neoklasikinės finansų teorijos bei esamų imitacinių modelių trūkumus, disertaciniame tyrime siekiama sukurti realistiškus finansų rinkos funkcionavimą paaiškinančius modelius, tinkamai įvertinančius tiek finansų rinkos kompleksiškumą, tiek individualią agentų adaptaciją bei tarplaikinius pasirinkimo sprendimus.

Tyrimo objektas. Pagrindinis tyrimo objektas yra akcijų rinka, analizuojama kaip kompleksinė sistema, sudaryta iš bazinių elementų (vertybinių popierių, prekybos infrastruktūros bei atomistinių heterogeninių investuotojų) ir juos siejančių procesų (prognozavimo, investavimo sprendimų priėmimo, prekybos vertybiniais popieriais, finansinių sąskaitų tvarkymo ir kt.). Taip pat analizuojamos bei lyginamos faktinės ir imitacinės rinkos savybės, tiriami tam tikri rinkos reiškiniai (pvz., finansinių burbulų formavimasis).

Tyrimo tikslas ir uždaviniai. Tyrimo tikslas yra:

- Pasiūlyti imitacinius finansų rinkos modelius, pagrįstus heterogeninių skatinamojo mokymosi agentų sąveika dideliu neapibrėžtumu pasižyminčioje aplinkoje.

- Imitacinių eksperimentų būdu tirti imitacinės rinkos savireguliacijos galimybes, jos efektyvumą, rinkos kainos formavimąsi, galimus finansinių burbulų formavimosi veiksnius bei susiformuojančias rinkos savybes (o šias savybes savo ruožtu lyginti su faktinės rinkos savybėmis, siekiant iš dalies įvertinti modelio pagrįstumą).

Siekiant tyrimo tikslo, sprendžiami šie uždaviniai:

1. Apibrėžti agentais pagrįsto finansinio modeliavimo sampratą ir pagrindinius principus, išanalizuoti pagrindinius skirtumus tarp standartinės neoklasikinės finansų teorijos ir agentais pagrįsto finansinio modeliavimo, trumpai apžvelgti imitacinio finansų rinkos modeliavimo literatūrą.
2. Išnagrinėti esminius skatinamojo mokymosi metodologijos principus ir įvertinti jos taikymo finansiniam modeliavimui probleminius aspektus.
3. Pasiūlyti conceptualų pagrindą (bazinį teorinį modelį) agentais pagrįstai finansų rinkos analizei, aptarti galimus agentų elgsenos principus ir rinkos procesus imitaciniuose modeliuose.
4. Sukurti glaustą agentais pagrįstą modelį ir imitacinių eksperimentų pagalba analizuoti susiformuojančias imitacinės rinkos savybes bei galimus finansinio burbulo susiformavimo veiksnius.
5. Pritaikyti šį modelį empiriniams duomenims, palyginti imitacinės rinkos savybes su faktinėmis akcijų rinkos savybėmis bei žinomais empiriniais dėsningumais.

Tyrimo mokslinis naujumas. Šiame darbe pasiūlyti agentais pagrįsti finansiniai modeliai yra iš esmės nepriklausomo tyrimo rezultatas, jie turi nemažai novatoriškų savybių. Pasiūlytuose modeliuose individualiai agentų elgsenai skiriama geroai daugiau dėmesio negu daugelyje agentais pagrįstų modelių. Disertacijoje pasiūlytuose modeliuose riboto racionalumo agentai investicinius sprendimus grindžia ekonominiais argumentais, t. y. vertindami tikėtinus diskontuotus pajamų srautus bei lygindami alternatyvių investicijų grąžas. Jie taip pat siekia adekvačiai įvertinti ateitį dideliu neapibrėžtumu

pasižyminčioje aplinkoje bei atsižvelgia į kitų rinkos dalyvių veiksmų poveikį bendrai rinkos kainos dinamikai. Šis tyrimas agentais pagrįsto finansinio modeliavimo sritį praturtina ir kaip bandymas suartinti agentais pagrįstą finansinį modeliavimą su labiau tradiciniais požiūriais į finansų rinkų modeliavimą. Individo lygmens adaptacija, tarplaikinių sprendimų priėmimas bei ateities galimybes vertinanti agentų elgsena yra paremta skatinamojo mokymosi algoritmu (konkrečiau tariant, vadinamuoju Q-mokymusi), perimtu iš sistemos mokymosi (machine learning) literatūros. Tai yra vienas iš pirmųjų bandymų taikyti šiuos algoritmus imitacinės finansų rinkos modeliuose.

Tyrimo praktinė vertė. Siūlomi modeliai suteikia galimybes investuotojams ir ekonominės politikos formuotojams kokybiniu požiūriu nagrinėti finansinių burbulų formavimosi ypatumus bei eksperimentų būdu nagrinėti aktualių egzogeninių šokų poveikį finansų rinkai. Skatinamojo mokymosi agentais pagrįstas modeliavimas bei kai kurie šiame disertaciniame tyrime pasiūlyti modeliavimo principai taip pat gali būti naudingi nagrinėjant kitas finansų mokslo problemas (pavyzdžiui, finansinio portfelio valdymo, finansų sistemos stabilumo, indėlininkų panikos), kurias nepakankamai gerai paaiškina standartinė dedukcinė finansų teorija.

Ginamieji teiginiai

1. Neoklasikinė finansų teorija pagrįsta labai griežtomis prielaidoms ir daugiausia tiria pusiausvyros ryšius, tad iš esmės nėra tinkama suteikti išsamų generatyvinį finansų rinkos funkcionavimo paaiškinimą. Tam geriau tinka agentais pagrįstas finansinis modeliavimas, kuris deramai įvertina tai, kad rinkos kompleksiskumas, investuotojų heterogeniškumas, ribotas racionalumas ir inkduktivi investuotojų elgsena yra esminės rinkos savybės.
2. Pateiktas detalus teorinis agentais pagrįstas imitacinis finansų rinkos modelis, tinkamas teoriškai analizuoti akcijų rinkos kainų formavimosi, investicinių sprendimų priėmimo, investuotojų lūkesčių formavimosi, prekybos ir kitus esminius rinkos procesus.
3. Pateiktas glaustas, iš dalies kalibruotas su empiriniais duomenimis imitacinis modelis generuoja imitacinės rinkos gražos savybes, artimas faktinės rinkos savybėms ir žinomiems empiriniams dėsningumams.
4. Glaustoje modelio versijoje imitacinė rinka pasižymi savireguliacija, t.y. savaiminiu kompleksinės sistemos susiorganizavimu į kainos pusiausvyros būseną, o individuali agentų adaptacija ir jų evoliucinė atranka yra esminės sąlygos rinkos savireguliacijai įvykti.
5. Pasielkiant imitacinius modelius pasiūlyti finansinių burbulų formavimosi mechanizmai, susiję su pertekliniu pinigų kiekiu finansų sistemoje, klaidingų lūkesčių išgalėjimu bei konkurenciniu spaudimu siekti

trumpalaikės naudos iš numatomų kainų tendencijų besiformuojant kainų burbulams.

6. Skatinamojo mokymosi algoritmai yra konceptualiai tinkami modeliuoti induktyvią agentų elgseną imitacinėje finansų rinkoje, nepaisant to, kad šie algoritmai bendru atveju negali užtikrinti optimalios agentų elgsenos.

Tyrimo metodologija. Siekiant įgyvendinti tyrimo tikslą pasitelkta kompiuteriniu imitaciniu modeliavimu pagrįsta mokslinė analizė, aprašomoji statistinė analizė, ekonometrinis modeliavimas, ekonominių sprendimų priėmimo teorijos bei mašinų mokymosi tyrimų srities skatinamojo mokymosi algoritmas (vadinamasis Q-mokymasis).

Disertacinio tyrimo rezultatų aprobavimas. Disertacinio tyrimu pagrindu parengti trys moksliniai straipsniai, skaityti trys pranešimai tarptautinėse konferencijose ir seminaruose, disertacinis tyrimas buvo pristatomas doktorantų ir tyrėjų seminaruose.

1. Agentais pagrįstas finansinis modeliavimas kaip alternatyva įprastinei reprezentatyviojo agento paradigmam

Šiame skyriuje trumpai analizuojamos kai kurios svarbios įprasto neoklasikinio finansinio modeliavimo problemos bei aptariamas agentais pagrįstas modeliavimas, kuris, tikėtina, ateityje taps rimta alternatyva minėtam požiūriui. Darbe aptariami pamatiniai, tačiau tiek teoriniu požiūriu, tiek dėl empirinio tinkamumo abejotini neoklasikinių kapitalo rinkų teorijų postulatai bei prielaidos, taip pat nagrinėjami esminiai agentais pagrįsto modeliavimo bruožai bei vertinamas jo principinis tinkamumas modeliuoti finansų rinkas.

Neoklasikinėse finansų teorijose finansų rinka traktuojama kaip nepaprastai efektyvus kainos nustatymo mechanizmas. Neoklasikinė analizė abstrahuojasi nuo prekybos procesų modeliavimo, nes paprastai modeliuojama pusiausvyros būseną, t. y. pasiūlos ir paklausos balansą, pasiekusi rinka. Neoklasikinė analizė paprastai grindžiama racionalaus reprezentatyviojo agento egzistavimo prielaida. Tokia prielaida labai esmingai nulemia analizės pobūdį bei sumažina analizės laisvės laipsnį – dėl fiktyvaus reprezentatyviojo agento prielaidos modeliuojama investuotojo elgsena tampa dedukcinė (vienareikšmiškai išvedama matematiniais skaičiavimais), paties prekybos proceso modeliavimas tampa neįmanomas, o vertybinių popierių kainų dinamika nebegali būti siejama su investuotojų individualiais lūkesčiais, klaidomis, skirtingomis strategijomis ar skirtingais poreikiais. Akivaizdu, kad tikrovėje tobulas investuotojų racionalumas techniškai neįmanomas dėl lūkesčių deduktyvaus neapibrėžtumo (deductive indeterminacy), be to, visiškai

racionalios elgsenos siekimo kaštai būtų pernelyg dideli, tobulo racionalumo nepatvirtina nei mikroekonominiai, nei psichologiniai eksperimentiniai tyrimai. Finansų rinkos faktiškai pasižymi iš dalies savaimė besipildančiais lūkesčiais, kurie lemia įvairius galimus rinkos pusiausvyros lygius, nebūtinai susijusius su fundamentaliąja ekonomine verte¹. Yra daug empirinių anomalijų, t. y. empirinių dėsningumų, kurių nepaaiškina neoklasikinės finansų teorijos (pvz., akcijų viršpelnio mįslė, didesnis rinkų prognozuojamumas negu suderinama su efektyviosios rinkos hipoteze, perteklinis akcijų kainų kintamumas, gražos skirstinių ilgos uodegos, finansiniai burbulai, krizės ir t. t.).

Agentais pagrįstas finansinis modeliavimas remiasi požiūriu, kad finansų rinka yra kompleksinė dinaminė sistema, kurią sudaro heterogeniniai atomistiniai agentai, o jų tarpusavio sąveika ir individualus mokymasis lemia tam tikrą visos sistemos (rinkos) adaptaciją prie besikeičiančios aplinkos sąlygų, bet nebūtinai visišką efektyvumą rinkos lygmeniu. Agentais pagrįstas imitacinis modeliavimas yra orientuotas į šių kompleksinių sistemų dinamikos, jų stabilumo, susiformuojančių savybių² analizę.

Esminis agentais pagrįsto modeliavimo elementas yra pats agentas. Plačiąja prasme agentas yra bet koks su imitacine aplinka sąveikaujantis modelio elementas, apimantis tam tikrą susijusių duomenų aibę ir elgsenos metodus. Šiam disertaciniam tyrimui aktualus agento darbinis apibrėžimas pateikiamas dirbtinio intelekto literatūroje, kurioje agentas apibrėžiamas kaip sistema, kuri yra tam tikros aplinkos dalis, su ja sąveikauja ir siekia konkrečių tikslų. Šiame darbe agentų interpretacija yra labai natūrali – jie atitinka finansinio turto valdytojus.

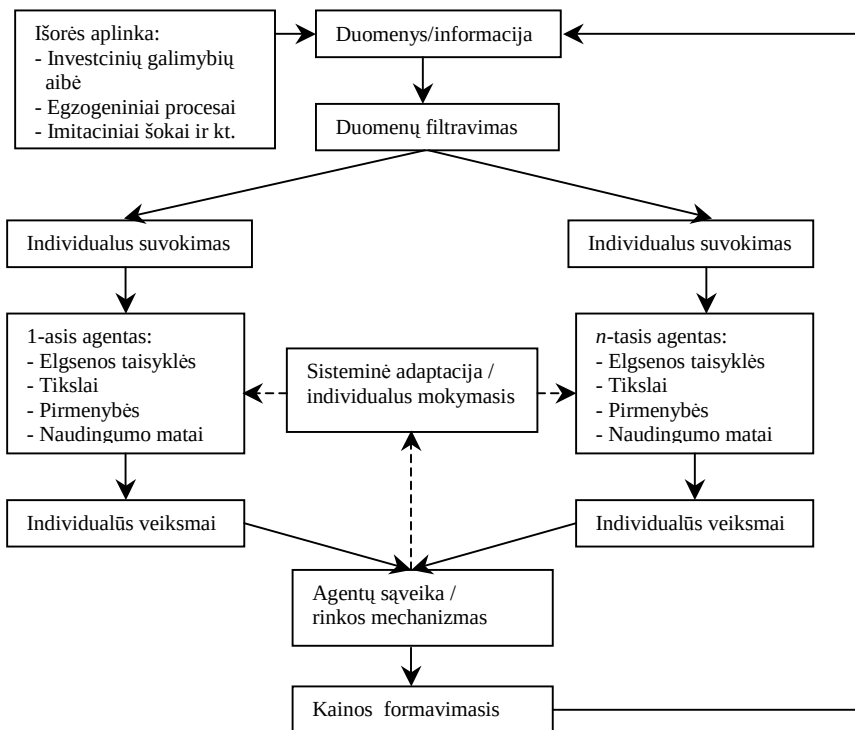
Viena iš imitacinių finansinių modelių svarbiausių savybių yra agentų heterogeniškumas: jie gali skirtis savo poreikiais, sugebėjimais, investicinėmis strategijomis, disponuojama informacija, finansiniu turtu ir kitomis savybėmis. Agentai yra riboto racionalumo. Jų tarpusavio sąveika yra autonominė, t. y. nėra fiktyvaus centrinio planuotojo ar Walras aukcionieriaus, tačiau gali egzistuoti sudėtinga infrastruktūra bei tarpusavio informacijos kaita. Galiausiai pažymėtina subtili imitacinės analizės pozicija tarp kitų mokslinio tyrimo metodų: imitacinė analizė nepateikia griežtų teorinių apibendrinimų iš tam tikrų prielaidų (kaip dedukcinė analizė) ir nėra taikoma siekiant rasti empirinių duomenų dėsningumus (kaip indukcinė analizė), tačiau ji leidžia gilinti sistemų funkcionavimo supratimą kontroliuojamų eksperimentų dėka.

¹ Kitaip tariant, gali formuotis vadinamieji „saulės dėmių“ pusiausvyros lygiai (sunspot equilibria), kurie pagal apibrėžimą nėra suderinami su efektyvios rinkos samprata.

² Susiformuojančios savybės (emergent properties) – tai savybės, būdingos rinkai kaip kompleksinei sistemai, tačiau nebūtinai būdingos pavieniams rinkos dalyviams.

2. Imitacinio akcijų rinkos modeliavimo galimybės

Šiame skyriuje apžvelgiami kai kurie imitacinio akcijų rinkos modeliavimo (artificial stock market modelling) principai bei aktualios problemos, su kuriomis susiduriama kuriant šiuos modelius, taip pat atlikta atranki imitacinio akcijų rinkos modeliavimo literatūros apžvalga.



1 pav. Baziniai dirbtinės akcijų rinkos modelių procesai

Supaprastinta imitacinių akcijų rinkos modelių svarbiausių procesų schema pateikta 1 paveiksle, ji taip pat tinkama ir disertaciniame tyrime pasiūlytų modelių procesams aprašyti. Pirmiausia vyksta informacijos iš išorės aplinkos filtravimas, kurio dėka agentai surenka informaciją apie jiems svarbius aplinkos aspektus. Agentų savybės lemia jo elgseną, t. y. kaip agentų priimti informaciniai signalai tampa individualiais veiksmais. Agentų tarpusavio sąveika vyksta rinkos institucijoje, ir vertybinio popieriaus rinkos kaina yra šios

sąveikos rezultatas. Jei modeliuose numatyta adaptacijos ir mokymosi galimybė, tai vertybinio popieriaus rinkos kaina ir kita informacija sukuria atgalinio ryšio signalus, į kuriuos reaguojant vyksta sistemos adaptacija bei galimai individualus agentų mokymasis. Adaptacija ar mokymasis keičia individualias agentų savybes ir gerina jų gebėjimą prisitaikyti prie kintančios aplinkos. Galiausiai rinkos kainos dinamika, kita pačios sistemos generuojama informacija bei nauja išorinė informacija papildo bendrą informacijos aibę, ir procesų ciklas kartojasi iš naujo.

Kalbant apie šių modelių kūrimo principus ir kylančias problemas, bene svarbiausia problema yra ta, kad nagrinėjami procesai yra tokie sudėtingi, jog kol kas dauguma šių modelių neišvengiamai pernelyg supaprastinta finansų rinką. Kitas labai svarbus aspektas yra individualių agentų elgsenos algoritmų pasirinkimas – dauguma jų yra pasiskolinti iš sistemos mokymosi literatūros, tačiau agentai taip pat gali elgtis vadovaudamiesi teorinių ekonominių modelių taisyklėmis, gali taikyti nekintančias subjektyvias taisykles ar net elgtis atsitiktinai. Ekonomikos ar psichologijos mokslas kol kas negali pasiūlyti vientisos ir išbaigtos teorijos, aprašančios riboto racionalumo investuotojų elgseną akcijų rinkoje. Dažniausiai agentų elgsena imitaciniuose akcijų rinkos modeliuose modeliuojama pasitelkiant evoliucinius paieškos algoritmus, kuriais siekiama užtikrinti bendros investicinių strategijų aibės plėtrą ir jų tobulėjimą.

Literatūros apžvalgoje aptariami modeliai skirstomi į dvi kategorijas: modelius, apimančius aiškiai nustatytomis taisyklėmis (hard-wired rules) pagrįstą elgseną, ir modelius, grindžiamus agentų mokymusi ir sisteminę adaptacija. Į pirmąją modelių grupę patenkantys modeliai paprastai taikomi analizuojant, kaip agentų heterogeniškumas lemia rinkos procesus ir susiformuojančias rinkos savybes. Antrosios kategorijos modeliai taipogi taikomi šiuo tikslu, tačiau pasitelkiant juos taip pat mėginama nagrinėti efektyvių investicinių strategijų kūrimo ypatumus bei strategijų stabilumą. Autoriaus žiniomis, Lietuvos mokslinėje literatūroje dar nėra pasiūlytų pilnos apimties imitacinės akcijų rinkos modelių, tačiau nemažai autorių tyrinėja glaudžiai susijusią akcijų rinkos problematiką: investavimo sprendimų principus, sisteminės rinkos savybes bei sąryšius tarp akcijų rinkos dinamikos ir ekonominių kintamųjų.

3. Skatinamasis mokymasis akcijų rinkos modeliavimo kontekste

Šiame skyriuje nagrinėjamas vienas iš sistemos mokymosi (machine learning) literatūroje pateikiamų mokymosi algoritmų bei analizuojamos galimybės jį pritaikyti finansiniuose modeliuose. T. y. standartinis skatinamojo mokymosi algoritmas, kurio bazinę versiją pasiūlė Watkins (1989) ir kuris

paprastai vadinamas Q-mokymusi (Q-learning). Praktiškai taikant šį algoritmą disertaciniame tyrime, jam pritaikoma standartinė leidimosi gradiento kryptimi tiesinė aproksimacija.

Šis mokymosi algoritmas gana retai taikomas ekonominiuose uždaviniuose, tačiau jo pasirinkimą šiame disertaciniame tyrime lėmė ekonominiu požiūriu patrauklūs Q-mokymosi algoritmo baziniai principai, kurie atrodo conceptualiai labai tinkami modeliuoti investicinę elgseną. Veikdamas tam tikroje aplinkoje, skatinamojo mokymosi agentas imasi konkrečių veiksmų bei iš aplinkos gauna su šiais ar ankstesniais veiksmais susijusius paskatinimo signalus (reinforcement signals) ir tada atitinkamai koreguoja savo veiksmų strategiją, siekdamas optimizuoti bendrą paskatinimo signalų srautą ilgu laikotarpiu. Panašiai ir standartinis ekonominis agentas renka investicinę strategiją, vartojimo ar gamybos planą, siekdamas maksimizuoti savo ilgo laikotarpio naudingumo funkciją. Sprendžiamos problemos yra labai giminingos, tačiau skatinamojo mokymosi uždavinyje nedaroma griežta prielaida, kad agentas žino aplinką aprašantį modelį – skatinamojo mokymosi agentas siekia įvertinti aplinkos būsenų kaitos tikimybes (state transition probabilities), sąveikaudamas su aplinka. Pažymėtina, kad skatinamojo mokymosi algoritmas yra daug geriau negu paprasti adaptyvaus mokymosi algoritmai pritaikytas spręsti vadinamąją priešastinio poveikio paskirstymo laike problemą (temporal credit assignment problem), t. y. patenkinus tam tikras technines sąlygas skatinamasis mokymasis suteikia galimybę rasti veiksmus, kurie agentams leidžia siekti strateginių tikslų net jei tie veiksmi duoda nepalankius rezultatus trumpu laikotarpiu.

Q-mokymosi algoritmas remiasi konkrečia su Bellman optimalumo savybe susijusia strategijos atnaujinimo taisykle (back-up rule):

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow (1 - \alpha) \underbrace{Q(s_t, a_t)}_{\text{Ankstesnis } Q(s_t, a_t) \text{ įvertis}} + \alpha \underbrace{(r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a))}_{\text{Naujas } Q(s_t, a_t) \text{ įvertis}}. \quad (1)$$

Čia s_t žymi aplinkos būseną laiko momentu t , a_t yra veiksmas, kurį agentas atliko t momentu, o r_{t+1} yra iš aplinkos gautas paskatinimo signalas, susijęs su ką tik atliktais ir galimai ankstesniais veiksmis. Parametras α žinomas kaip mokymosi greičio parametras, o γ yra ateities paskatinimo signalų diskontavimo parametras. Funkcija $Q(s_t, a_t)$, paprastai vadinama veiksmo vertės funkcija (action-value function) arba tiesiog Q-funkcija, yra aplinkos būsenoje s_t atlikto veiksmo a_t sąlyginės vertės matas, darant prielaidą, kad toliau bus laikomasi veiksmų strategijos π . Konkrečiau tariant, Q-funkcija yra sąlyginė tikėtina diskontuoto aplinkos paskatinimo signalų srauto vertė:

$$Q^{\pi}(s, a) = E_{\pi} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} \mid s_t = s, a_t = a \right\}. \quad (2)$$

Taigi, strategijos atnaujinimo taisyklė (1) aprašo procesą, kuriuo atnaujinama veiksmo, atlikto esant tam tikrai aplinkos būsenai, sąlyginės vertės įvertis $Q(s_t, a_t)$. Bazinis algoritmo žingsnių aprašymas padeda interpretuoti (1) lygtį: 1) agentas atlieka veiksmą a_t , patenka iš aplinkos būsenos s_t į s_{t+1} ir gauna iš aplinkos paskatinimo signalą r_{t+1} , 2) agentas įvertina, kiek rezultatinė aplinkos būseną yra palanki siekti strateginių tikslų (techniškai kalbant, vykdo Q-funkcijos vertės vieno periodo maksimizavimą), 3) pasinaudodamas Bellman optimalumo savybe agentas retrospektyviai atnaujiną ankstesnę būsenos ir veiksmo poros (s_t, a_t) vertę, ją apskaičiuodamas kaip svertinį senojo ir naujojo įverčio vidurkį (žr. (1) lygtį). Jei, galiojant tam tikroms techninėms prielaidoms, agentas laikosi vadinamosios ε -godžios strategijos (ε -greedy strategy), t. y. dažniausiai atlieka veiksmus, kurie lemia lokalų Q-funkcijos maksimumą, tačiau retkarčiais atlieka eksperimentinius (atsitiktinius) veiksmus, ir jei būsenų ir veiksmų poros išbandomos pakankamai daug kartų, strategijos atnaujinimo taisyklė (1) garantuoja optimalios strategijos radimą.

Vis dėlto skatinamojo mokymosi algoritmų taikymo galimybes ženkliai sumenkina vadinamoji „daugiamatiškumo prakeiksmo“ („curse of dimensionality“) problema, pavyzdžiui, investicinės aplinkos neįmanoma aprašyti vienu kintamuoju s bei nerealu daryti prielaidą, kad agentas galėtų daugelį kartų patirti kiekvieną aplinkos būseną. Tad norint taikyti šiuos algoritmus praktikoje, būtina taikyti įvairias aproksimacijas bei agentų sukauptos patirties apibendrinimus. Disertaciniame tyrime taikoma standartinė tiesinė leidimosi gradiento kryptimi aproksimacija, t. y. aplinkos būseną atspindi tiesinė kelių kintamųjų kombinacija bei įvykdomi tam tikri techniniai strategijos atnaujinimo taisyklės pakeitimai.

Dėl nestacionarios multiagentinės aplinkos nebegalioja Q-mokymosi algoritmo optimalumo garantijos. Vis dėlto šiame darbe pasiūlytuose modeliuose nesiekama rasti optimalių investavimo strategijų (ir jų egzistavimas apskritai kvestionuotinas), o pirmiausia ieškoma konceptualiai tinkamos individualių agentų elgsenos, tad skatinamojo mokymosi strategijų optimalumo garantijų nebuvimas neatrodo esminė problema. Be to, skatinamąjį mokymąsi šiuo atveju palengvina evoliucinė agentų atranka, ribota strateginė jų sąveika ir kitos pasiūlytų modelių ypatybės.

Svarbi disertacinio tyrimo idėja yra kaip pritaikyti skatinamojo mokymosi algoritmą investuotojų elgsenai imitacinėje akcijų rinkoje aprašyti. Veikdami finansų rinkoje investuotojai stebi rinkos būseną s , kurią aprašo tokie kintamieji

kaip akcijų kaina, palūkanų normos, fundamentalios vertės įverčiai ir pan. Kiekvieną prekybos sesiją jie atlieka veiksmą a , t. y. priima sprendimą keisti individualius akcijos priimtinos kainos įverčius. Pasitelkdami elementarią ekonominę logiką, palyginę savo akcijų vertės suvokimą su rinkos kaina, investuotojai vykdo prekybą konkurencinėje rinkoje ir kaip jų tarpusavio sąveikos rezultatas prekybos proceso metu susiformuoja rinkos kaina. Rinkos kainos pokytis investuotojams atneša finansinį pelną arba nuostolį – su juo susijęs trumpalaikio paskatinimo signalas r . Pagal skatinamojo mokymosi algoritmą savo investicijas valdantys investuotojai siekia maksimizuoti naudą iš investicijų ilgu laikotarpiu. Fundamentalus pastebėjimas yra tas, kad neadekvačiai akcijų vertę įvertinantys investuotojai patiria neigiamus paskatinimo signalus ir keičia savo elgseną arba praranda turtą (bankrutuoja), ir dėl to sumenksta jų įtaka apsprendžiant rinkos kainą. Tokiu būdu vyksta tinkamos rinkos kainos paieškos (price discovery) procesas, atsiranda rinkos savireguliacijos požymiai bei didėja rinkos funkcionavimo efektyvumas. Vis dėlto konkrečiau įvertinti, kaip keičiasi rinkos kaina ir kokios yra tokios finansų rinkos susiformuojančios savybės įmanoma tik atliekant imitacinius eksperimentus su konkrečiais modeliais.

Disertacijoje pasiūlyti imitaciniai finansų rinkos modeliai vieni iš pirmųjų bandymų agentų elgseną grįsti skatinamojo mokymosi algoritmu, tačiau literatūroje yra pavyzdžių, kai skatinamojo mokymosi algoritmai buvo sėkmingai pritaikyti investicinio portfelio valdymo, valiutos kursų prognozavimo, kainų nustatymo prekių rinkose bei kitiems atvejams nagrinėti.

4. Bazinis imitacinis akcijų rinkos modelis

Disertacijos 4 skyriuje aprašomas originalus teorinis imitacinis akcijų rinkos modelis, kuris (kaip disertacijos 5 skyriuje pateikiama glausta, iš dalies empiriškai kalibruota modelio versija) sukurtas pasitelkiant matematinio programavimo paketą MATLAB (versija R2007a). Šis modelis yra generatyvinio rinkos funkcionavimo paaiškinimo pagalbinis instrumentas, kuris sukurtas vadovaujantis požiūriu, kad rinkos kaip sudėtingos kompleksinės sistemos veikimą prasminga nagrinėti „iš apačios į viršų“ („bottom-up“ approach). Taigi, daromos prielaidos apie rinkos struktūrą, bazinius jos elementus, individualių agentų elgsenos principus, prekybos įgyvendinimo mechanizmą ir agentų sąveikos taisykles, o inicijavus agentų sąveiką imitacinė rinka kaip kompleksinė, dinamiškai išbaigta sistema toliau vystosi savarankiškai, ir galima tirti susiformuojančias rinkos savybes bei atlikti kontroliuojamus eksperimentus.

Imitacinės rinkos struktūra ir baziniai elementai. Finansų rinkoje veikia daug (modeliuotojo pasirenkamas skaičius) heterogeninių skatinamojo mokymosi agentų, ir kiekvienas iš jų aktyviai valdo savo investicinį portfelį, siekdamas kuo didesnės ilgalaikės investicinės grąžos. Agentai skiriasi sukaupta patirtimi, investicinėmis strategijomis, turto lygiu, tačiau visų elgsenos principai analogiški. Kaip ir daugelyje finansų rinkos modelių, modeliuojama rinka yra labai paprasta. Faktiškai yra tik dvi investavimo galimybės: rizikinga investicija, t. y. teisę į stochastinius dividendus suteikiančios vienos rūšies akcijos, kurių kainą nulemia agentų tarpusavio sąveika, bei trumpalaikis, vieno laikotarpio banko indėlis, uždirbantis iš anksto žinomas palūkanas; į jį automatiškai nukreipiamos visos nepanaudotos lėšos. Prekybos sesijų skaičius tarp dividendų išmokų yra pasirenkamas modeliuotojo.

Dividendų prognozavimas. Kiekvienas agentas prognozuoja dividendus, kuriuos generuoja agentams nežinomas egzogeninis, stochastinis, galimai nestacionarus procesas. Pradiniam etape kiekvienas agentas tiesiog skaičiuoja dividendų praeities realizacijų eksponentinį vidurkį $d_{i,y}^{EWMA}$:

$$d_{i,y}^{EWMA} = \lambda_1 \cdot d_y + (1 - \lambda_1) d_{i,y-1}^{EWMA}. \quad (3)$$

Čia d_y žymi dividendus, y yra dividendų išmokėjimo laikotarpis (metai), o λ_1 yra eksponentinio išlyginimo daugiklis. Kadangi eksponentinis praeityje išmokėtų dividendų vidurkis bendru atveju yra akivaizdžiai netinkamas būsimų dividendų įvertis, individualūs dividendų lūkesčiai $d_{i,y+n}^e$ (n periodų į priekį) gaunami šiuos vidurkius koreguojant individualiais dividendų koregavimo daugikliais $a_{i,y}^{div}$:

$$d_{i,y+n}^e = d_{i,y}^{EWMA} \cdot a_{i,y}^{div}. \quad (4)$$

Dividendų koregavimo daugikliai palaipsniui kinta skatinamojo mokymosi proceso metu.

Fundamentaliosios vertės ir priimtinos ribinės kainos skaičiavimas. Šiame etape agentai individualius tikėtinos fundamentaliosios vertės įverčius $v_{i,y}^{fund}$ apskaičiuoja, tikėtinus ateities dividendų srautus diskontuodami pasitelkiant rizikai neutralią diskonto normą (t. y. nerizikingos investicijos palūkanas $\bar{r}$):

$$v_{i,y}^{fund} = d_y + \frac{d_{i,y+1}^e}{1+\bar{r}} + \dots + \frac{d_{i,y+n}^e}{(1+\bar{r})^n} + \frac{d_{i,y+n}^e / \bar{r}}{(1+\bar{r})^{n+1}}. \quad (5)$$

Investuotojų akcijų vertės suvokimą gali reikšmingai įtakoti tokie veiksniai kaip individuali tolerancija rizikai ar vyraujantis kitų investuotojų požiūris į akcijos vertę, tad individualūs fundamentaliosios vertės įverčiai vėlgi koreguojami agentų mokymosi proceso metu:

$$v_{i,t}^{reserve} = v_{i,t}^{EWMA} \cdot a_{i,t}^p. \quad (6)$$

Čia $v_{i,t}^{reserve}$ yra individuali priimtina ribinė kaina (reservation price) prekybos sesijos t metu, $v_{i,t}^{EWMA}$ – eksponentiškai išlygintas fundamentaliosios vertės individualus įvertis, o $a_{i,t}^p$ yra individualus kainos koregavimo daugiklis nustatomas skatinamojo mokymosi proceso metu.

Individualių prekybos sprendimų priėmimas pagal nustatytas taisykles.

Turėdami individualius akcijos vertės įverčius $v_{i,t}^{reserve}$, investuotojai gali juos palyginti su vidutine akcijos rinkos kaina per paskutiniąją prekybos sesiją, ir nuspręsti, ar, jų nuomone, akcija rinkoje nėra pervertinta arba nepakankamai įvertinta. Investuotojai elgiasi pagal paprastą ekonominę taisyklę:

Jei individualus akcijos vertės įvertis didesnis už praėjusios prekybos sesijos rinkos kainą ($v_{i,t}^{reserve} > p_{t-1}$) ir prekybos sesijos pradžioje turimų piniginių lėšų suma $m_{i,t}^0$ yra pakankama, tai agentas biržai pateikia ribinį pavedimą pirkti vieną akciją už kainą, nedidesnę nei $p_{i,t}^q$; jei $v_{i,t}^{reserve} < p_{t-1}$ ir prekybos sesijos pradžioje disponuojamų akcijų skaičius $h_{i,t}^0$ yra teigiamas, tai biržai pateikiamas ribinis pavedimas parduoti vieną akciją už kainą, nemažesnę nei $p_{i,t}^q$.

Faktinė pavedime nurodoma kaina $p_{i,t}^q$ skiriasi nuo individualaus investuotojo suvokiamos akcijos vertės $v_{i,t}^{reserve}$, kadangi siekiama pasinaudojant rinkos likvidumu sudaryti sandorį kuo palankesne sau kaina. Kartu investuotojas sprendžia pasirinkimo problemą: kuo palankesnę jam ribinę kainą jis nurodo pavedime, tuo mažesnė to pavedimo įgyvendinimo tikimybė. Atskiros, modelio aprašyme detalizuotos techninės procedūros metu kiekvienas agentas empiriškai įvertina sėkmingo sandorio tikimybės kiekvienai galimai ribinės pavedimo kainos alternatyvai ir pasirenka tą kainą, kuri turėtų lemti didžiausią prognozuojamą agento turto lygį prekybos sesijos pabaigoje.

Prekybos procesas centralizuotoje biržoje. Ribiniai pirkimo ir pardavimo pavedimai apdorojami centralizuotoje prekybos biržoje. Prekybos procesas vyksta realistišku, vadinamuoju dvigubo aukciono principu: konkuruoja ir pirkėjai, ir pardavėjai, konkurencingiausi pavedimai įvykdomi pirmiausia, o nekonkurencingi pavedimai gali likti neįvykdyti. Agentai neturi informacijos apie kitų agentų sprendimus, pavedimai paduodami visi tuo pačiu metu – strateginės agentų sąveikos šiuo atveju nėra. Vidutinė prekybos sesijos rinkos kaina apskaičiuojama kaip sudarytų sandorių kainų vidurkis. Po prekybos sesijos atitinkamai atnaujinamos visų agentų finansinės sąskaitos, atsižvelgiant į sukauptas palūkanas, akcijų rinkos kainų pokyčius ir pan. – tai leidžia įvertinti agentų veiklos finansinį rezultatą ir transformuoti jį į paskatinimo signalus.

Individualus mokymasis ir sisteminio lygmens adaptacija. Agentų skatinamajam mokymuisi įgyvendinti skiriamas atskiras modelio blokas. Kaip minėta, skatinamojo mokymosi procesai aktualūs dviem atvejais: siekiant laipsniškai koreguoti dividendų prognozes bei fundamentalios vertės įverčius. Pirmuoju atveju skatinamasis signalas (tiksliau, bausmė) yra kvadratinė prognozės paklaida su minuso ženklu, o antruoju – logaritmuota investicinio portfelio grąža. T. y. agentai prognozuodami dividendus siekia daryti kuo mažiau sisteminių klaidų bei siekia koreguoti rizikai neutralius fundamentaliosios vertės įverčius taip, kad ilgu laikotarpiu maksimizuotų savo turtą.

Modeliuotojo pasirinkimu mokymosi procesai modelyje gali būti sustiprinti 1) sudarant galimybes agentams dalintis patirtimi, 2) įgyvendinant evoliucinę atranką ar 3) leidžiant atsitiktinę prekybą (noise trading). Patirties sklaida šiame modelyje modeliuojama labai paprastai – reguliariai palyginami atsitiktinai suporuotų agentų sukaupti skatinamieji signalai ir su tam tikra tikimybe mažiau sėkmingas agentas perima sėkmingesniojo patirtį. Jei pasirenkama evoliucinės atrankos galimybė, tam tikras mažiausiai sėkmingų agentų skaičius priverstas palikti sistemą („bankrutuoja“), o jų vietą užima nauji agentai, turintys geriausių agentų savybes. Aktyvuotos atsitiktinės prekybos atveju mažiausiai sėkmingi agentai tiesiog nekreipia dėmesio į savo sukauptą patirtį ir ima mokytis iš naujo. Šie sisteminio lygmens evoliuciniai adaptacijos pasirinkimai skirti padidinti sistemos realistiškumą, veikimo efektyvumą, paveikti agentų toleranciją rizikai ir sudaryti galimybes įdomesnei sistemos dinamikai. Pavyzdžiui, indukuotas nenoras būti mažiausiai sėkmingais investuotojais (nekonkurencingais turto valdytojais), burbulo formavimosi metu gali paskatinti prisidėti prie burbulo formavimo perkant tą vertybinį popierių ir tokiu būdu toliau keliant jo kainą – taip jų investicinio portfelio grąža neatsilieka nuo vidutinės rinkos grąžos.

Imitaciniai eksperimentai. Su modeliu atliktų imitacinių eksperimentų metu buvo keičiami parametrai, lemiantys skatinamojo mokymosi, agentų tarpusavio sąveikos bei dividendus generuojančius procesus, siekiant įvertinti šių modelio nustatymų poveikį rinkos savireguliacijai, efektyvumui ir sisteminio lygmens dinamikai. Pagrindiniai šių eksperimentų rezultatai apibendrinami disertacijos santraukos išvadų dalyje.

5. Imitacinis akcijų rinkos modelis, iš dalies adaptuotas empirinei analizei

Disertacijos 5 skyriuje pristatoma gana esmingai pakeista, glaustesnė ir daliniam empiriniam kalibravimui tinkama imitacinio akcijų rinkos modelio versija. Pasitelkiant šį modelį nagrinėjamos rinkos savireguliacijos galimybės ir galimi finansinio burbulo formavimosi veiksniai. Taip pat lyginamos imitacinės rinkos grąžos savybės su faktinės rinkos grąžos savybėmis ir su žinomais empiriniais dėsningumais. Modelis taikomas siekiant gilinti generatyvinį supratimą apie pastarųjų kelių dešimtmečių svarbius finansinio burbulo formavimosi ir sprogo epizodus (JAV akcijų rinkos pavyzdžiu).

Toliau aptariami pagrindiniai šio modelio skirtumai nuo bazinio modelio.

Įmonės pelnų prognozavimas. Stebėdami įmonės pelno kitimo dinamiką, agentai bando elementariais ateitiškais būdais įvertinti, ar stebimi pokyčiai yra trumpalaikio pobūdžio, ar nulemti ilgalaikio (tiesinio) trendo, ir iš to siekia susidaryti lūkesčius apie tolesnes pelno perspektyvas. Ekonometrinio paklaidų korekcijos modelio pagrindu, kiekvienas agentas sudaro ilgo laikotarpio ekonometrinę lygtį:

$$y_q = \beta_{1,i}^{LR} + \beta_{2,i}^{LR} \cdot q + \varepsilon_{i,q}^{LR}, \quad (7)$$

kur y_q žymi grynąjį įmonės pelną ketvirtį q , $\beta_{1,i}^{LR}$ ir $\beta_{2,i}^{LR}$ žymi individualius regresijos koeficientus, o $\varepsilon_{i,q}^{LR}$ yra regresijos liekana. Trumpu laikotarpiu pelno pokytį Δy_q galima prognozuoti remiantis paskutinėmis stebėtomis tendencijomis Δy_{q-1} arba tikėtis, kad pelno rodiklis vėl artės prie ilgalaikio trendo ir mažins atotrūkį nuo jo ($\varepsilon_{i,q-1}^{LR}$):

$$\Delta y_q = \beta_{1,i}^{SR} \Delta y_{q-1} + \beta_{2,i}^{SR} \varepsilon_{i,q-1}^{LR} + \varepsilon_{i,q}^{SR}. \quad (8)$$

Labai svarbus aspektas yra tas, kad daroma prielaida, jog agentai ima skirtingą duomenų imtį tai pačiai ekonometrinei lygčiai sudaryti. T. y. skiriasi požiūriai į prognozęms aktualios istorinės informacijos kiekį. Modelyje sudaryta galimybė agentams keistis šiais požiūriais, priklausomai nuo agentų finansinių rezultatų –

tokiu būdu siekiama pailiustruoti vieno iš galimų burbulų formavimosi veiksmų veikimą (įvykus dideliems duomenų eilučių pokyčiams, daugėja investuotojų, manančių, kad ima reikštis naujos tendencijos, ankstesnė informacija nebesvarbi, ir taip susidaro palanki terpė burbulams formuotis).

Individualus akcijų vertės suvokimas. Vertindami akcijų vertę, agentai didesnę svarbą teikia rinkoje vyraujančiai nuomonei. Šiame modelyje (6) lygtis pakeičiama taip:

$$v_{i,t}^{reserve} = \frac{v_{i,t}^{fund}}{v_{i,t-1}^{fund}} \cdot p_{t-1} \cdot (1 + a_{i,t}). \quad (9)$$

Tad laikoma, kad individualius akcijų vertės įverčius lemia ankstesnės prekybos sesijos rinkos kaina, fundamentalių veiksmų pokyčiai, be to, kiekvienas įvertis koreguojamas skatinamojo mokymosi proceso metu.

Kainų ribiniuose pavedimuose nustatymas. Šioje modelio versijoje pageidaujamos kainos nustatymas pavedimuose yra iš esmės supaprastintas, laikant, kad agentai pasirenę sudaryti sandorius jų suvokiama ribine priimtina kaina $v_{i,t}^{reserve}$ arba palankesne kaina.

Disponavimas akcijomis. Sprendimų priėmimo procesai supaprastinti darant prielaidą, kad agentai gali turėti ne daugiau kaip vieną akciją.

Imitaciniai eksperimentai. Su šiuo modeliu atlikti dvejopo pobūdžio imitaciniai eksperimentai. Pirmiausia nagrinėtos imitacinės rinkos savireguliacijos galimybės – tuo tikslu buvo analizuojama, ar kontroliuojamoje stacionarioje išorinėje aplinkoje analizuojama sistema gali nuo skirtingų pradinių kainų lygių konverguoti į panašų kainų lygmenį bei kaip šie procesai priklauso nuo svarbių modelio parametrų. Empiriniuose eksperimentuose modelis kalibruotas su empiriniais JAV akcijų rinkos S&P 500 indekso duomenimis, apimančiais 21 metų laikotarpį nuo 1988 m. iki 2008 m., siekiant gauti kokybinio pobūdžio išvalgas apie šiuo laikotarpiu stebėtus finansinius burbulus bei siekiant palyginti imitacinės rinkos gražos savybes su faktinėmis S&P 500 indekso savybėmis. Disertacijos 5 skyriuje taip pat trumpai aptariamas minėtu laikotarpiu stebėtas pasaulinis informacinių technologijų (vadinamasis „dot com“) finansinis burbulas bei su nekilnojamojo turto ir kredito bumu siejamas finansinis burbulas.

Bendrosios išvados

1. Pasiūlytas originalus imitacinis akcijų rinkos modelis. Jo pagrindu taip pat sukurtas glaustesnis, dalinai su empiriniais duomenimis kalibruotas imitacinis akcijų rinkos modelis. Pasiūlyti modeliai vertingi kaip pagrindas

vykdyti generatyvinei finansų rinkos procesų analizei bei kaip imitacinės analizės instrumentas, o papildomai modifikavus, jie gali būti taikomi praktiniuose finansinio portfelio valdymo uždaviniuose.

2. Skatinamojo mokymosi metodai (konkrečiau, Q-mokymosi algoritmas) pritaikyti investuotojų elgsenai aprašyti imitacinės akcijų rinkos modeliuose. Disertaciniame tyrime pagrįstas konceptualus šių algoritmų tinkamumas ekonominiams uždaviniams nagrinėti.

3. Pasiūlytų imitacinių rinkų susiformuojančios savybės nepatvirtina neoklasikinės finansų teorijos postulatų apie visišką informacinę finansų rinkos efektyvumą bei homogeninę investuotojų elgseną.

4. Baziniame imitaciniame modelyje akcijos rinkos kaina iš esmės atspindi diskontuotą ateities dividendų vertę, tačiau galimi ilgi akcijų pervertinimo ir nepakankamo įvertinimo epizodai.

5. Baziniame modelyje individualus mokymasis ir populiacijos lygmens adaptacija (evoliucinė agentų atranka) yra esminės prielaidos efektyviam imitacinės rinkos funkcionavimui. Vien institucinė aplinka, pavyzdžiui, centralizuota birža, pagrįsta dvigubo aukciono sistema, negali užtikrinti efektyvaus rinkos funkcionavimo.

6. Baziniame modelyje rinkos savireguliacijos galimybės ir savaiminė tinkamos rinkos kainos paieška yra silpnai išreikšta. Jei individualūs agentai klaidingai suvokia fundamentaliąją vertę, imitacinėje rinkoje nenusistovi tikrąją akcijų vertę atspindinti kaina. Tai rodo rinkos dalyvių subjektyvių požiūrių ir lūkesčių svarbą bendrai rinkos dinamikai.

7. Bazinio modelio imitacinėje rinkoje nustatytas teigiamas sąryšis tarp akcijų gražos ir likvidumo (t. y. pinigų kiekio sistemoje) pokyčių. Yra požymių, kad egzogeniniai šokai investuotojų disponuojamoms lėšoms sukelia stiprius akcijų kainos pokyčius.

8. Antrojo modelio eksperimentai kontroliuojamoje aplinkoje patvirtina imitacinės rinkos savireguliacijos galimybes – atliekant eksperimentus su ta pačia fundamentaliąją verte, tačiau skirtingais pradiniais rinkos kainų lygiais, rinkos kaina konverguoja į panašų lygį.

9. Imitacinės rinkos finansinės gražos esminės statistinės savybės gerai atitinka faktines S&P 500 indekso gražos savybes bei žinomus empirinius dėsningumus. Imitacinės rinkos kainos dinamika pasižymi retkarčiais pasitaikančiais dideliais šuoliais. Atmetus šiuos pavienius stebėjimus, imitacinės rinkos graža pasiskirsčiusi ne pagal normalųjį, o ilgomis uodegomis pasižymintį statistinį skirstinį, ji nėra reikšmingai autokoreliuota bei pasižymi kintamumo santalkomis (volatility clustering).

10. Su empiriniais JAV duomenimis dalinai kalibruotos imitacinės rinkos dinamika pasižymi finansiniais burbulais, pasireiškiančiais praktiškai tuo pačiu

metu kaip ir faktinėje rinkoje, bet imitacinės rinkos kainos dinamikos struktūriniai lūžiai yra didesni negu faktinės rinkos. 2008 m. sprogdus akcijų kainų burbului, imitacinėje rinkoje iš karto formavosi naujas burbulas, t. y. modelio rezultatai patvirtino didelį spaudimą faktinėms akcijų kainoms. 2009 m. JAV akcijų rinka išties patyrė vieną didžiausių kilimų šalies istorijoje.

11. Empirinė analizė ir empiriškai kalibruoto modelio rezultatai patvirtina, kad informacinių technologijų burbulas buvo daugiau susijęs su nepagrįstais įmonių pelnų lūkesčiais, o su nekilnojamojo turto ir kredito bumu susijusį finansinį burbulą labiau lėmė palanki realiųjų palūkanų normų aplinka.

12. Pasiūlyti imitaciniai modeliai iliustruoja keletą finansinio burbulo susiformavimo mechanizmų: (1) perteklinis pinigų kiekis rinkoje (perteklinis likvidumas), (2) dėl investuotojų komunikacijos ypatumų rinkoje išplintančios įmonių perspektyvų vertinimo klaidos („bandos instinktai“) ir (3) paskatos neatsilikti nuo kitų rinkos dalyvių, ypač išryškėjančios, kai formuojasi finansiniai burbulai, o vertybinių popierių kainų kilimo tendencijos tampa gana aiškios („trendo išnaudojimas“).

Tomo Ramanausko mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Ramanauskas, T. 2008. Agent-Based Financial Modelling as an Alternative to the Standard Representative-Agent Paradigm, *Monetary Studies* 2: 5–21.

Rutkauskas, A. V.; Ramanauskas, T. 2009. Agent-Based Stock Market Simulation Model, *Intellectual Economics* 2 (6): 83–95.

Ramanauskas, T. 2009. Empirical Version of an Artificial Stock Market Model, *Monetary Studies* 1: 5–26.

Trumpos žinios apie autorių

Tomas Ramanauskas gimė 1978 m. rugpjūčio 26 d. Vilniuje. Jis yra baigęs Vilniaus universiteto ekonomikos bakalauro studijas (finansų specializacija) bei vienerius metus tęsė ekonomikos magistro studijas minėtame universitete. Vėliau magistro studijas tęsė Pietų Danijos universitete ir baigęs pilną dviejų metų programą 2003 m. įgijo ekonomikos mokslo magistro laipsnį (Master of Science in Economics). 2005–2010 m. jis vykdė doktorantūros studijas Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Tomas Ramanauskas dirbo privačioje audito kompanijoje auditoriaus asistentu ir finansininku, vėliau Finansų ministerijoje vyriausioju ekonomistu. Nuo 2003 m. jis dirba Lietuvos banke – šiuo metu yra Ekonominių tyrimų skyriaus vyriausiasis ekonomistas. Tomas Ramanauskas yra maždaug dešimties mokslinių straipsnių įvairiomis makroekonominėmis ir finansinėmis temomis bei analitinių straipsnių žiniasklaidoje autorius.

STOCK MARKET SIMULATION BASED ON INTERACTION OF HETEROGENEOUS LEARNING AGENTS

Research motivation. Against the background of a global financial crisis and increasingly anomalous market behaviour, the neoclassical financial theory is seemingly losing its explanatory power and there is mounting evidence that the paradigm shift might be necessary. Unfortunately, there are no satisfactory alternatives yet but, with growing computing power, modelling possibilities expand and new promising frontiers of research emerge. One of them could be agent-based computational finance. Agent-based financial models take account of some fundamental features inherent for the real world financial markets, such as systemic complexity, agent heterogeneity, bounded rationality and complex interaction of agents.

Research problem. One of the major tasks of the financial research in general is to enhance our generative understanding of the actual functioning of financial markets. Within the scope of artificial stock market modelling, the research problem can be articulated through a number of generally unanswered questions: what are the crucial elements and processes of financial markets, what are the main drivers behind investors' decisions, what are emergent properties of the simulated market and how they conform with actual market properties and stylised empirical facts, what can be said about the formation and stability of market equilibrium, how and why financial bubbles form, etc.

Object of research. The main object of this study is the stock market, seen as a complex system constituted of basic elements (securities, trading infrastructure and atomistic heterogeneous investors) and process flows (forecasting, investment decision making, trade execution, maintenance of financial records, etc.). More specifically, we explore the possibilities to use specific simulation models as tools to generate economically interesting and adequate systemic behaviour, to analyse the properties of the actual stock market and to explain certain market phenomena (e. g. bubble formation).

Goal of the Dissertation. The goal of the Dissertation is twofold:

- Propose agent-based artificial stock market (ASM) models, based on inductive, competitive reinforcement-learning behaviour of atomistic heterogeneous agents in highly uncertain environment.
- Use the models as a structured framework for the analysis of market self-regulation abilities, efficiency, determinants of price formation and investors' attitude to risk, emergent properties of the financial market and possible determinants of asset price bubbles.

Research tasks. In this work we set up the following research tasks:

1. Present main concepts and principles of agent-based modelling, discuss the main differences between the standard neoclassical financial theories and the agent-based approach and provide an overview of the literature on the artificial stock market modelling.
2. Present the main principles of the reinforcement learning methodology and discuss issues related to its implementation in the context of financial modelling.
3. Develop a conceptual framework for the agent-based analysis of the artificial stock market, discuss behavioural principles and market processes in the simulation model.
4. Develop a parsimonious version of the agent-based model of the stock market populated by heterogeneous reinforcement-learning agents, conduct simulation experiments, analyse emergent properties of the simulated market and determine possible drivers behind financial bubble formation.
5. Calibrate the model to empirical financial data and compare simulated market's properties to those of the actual stock market and to stylised empirical properties.

Research methodology. This research relies on simulation-based scientific enquiry, descriptive statistics, econometric modelling, theories of economic decision making, and the reinforcement learning algorithm (Q-learning) taken from the machine learning research.

Scientific novelty of research. The proposed approach to the ASM modelling is quite independent and has a number of novel features. We strive to overcome some of the abovementioned problems of agent-based modelling without sacrificing their merits, and this requires seeking a good balance between systemic adaptation (through competition) and individual adaptive behaviour. For this purpose we put considerably stronger emphasis on economic behaviour of individual agents than in most agent-based models. In our research, boundedly rational agents base their decisions on economic considerations, such as estimation of discounted earnings and comparison of returns on different investment strategies, and pursue forward-looking behaviour in highly uncertain environment. They also take account of the uncertain impact of other market participants' actions on the market price.

Individual adaptation, intertemporal decision making and forward-looking (non-myopic) behaviour in the multi-agent setting is governed by reinforcement learning technique borrowed from the field of machine learning. To our knowledge, our work is one of the first attempts to apply the reinforcement learning techniques in an ASM model.

Practical importance. Though theoretical in essence, the proposed models have some practical value in that enable investors and policy makers to gain qualitative insights about bubble formation mechanisms and examine the effects of interesting shocks to the stylised simulated financial market. Reinforcement learning techniques and some other ideas from the current research can be extended for application in different financial research areas, such as the analysis of portfolio management, stability of financial systems, bank runs and financial panic, etc.

Defended statements of the Dissertation

1. The neoclassical financial theory is based on restrictive assumptions and focuses on equilibrium relationships, and thereby it fails to provide generative explanation of financial market functioning. In contrast, agent-based financial modelling is better suited for this purpose as it recognises that systemic complexity, investor heterogeneity, bounded rationality and inductive behaviour are salient features of financial markets.
2. The proposed basic ASM model can serve as a plausible framework for generative analysis of financial market processes, such as price determination, making of trading decisions, expectations formation, etc.
3. The proposed calibrated model version is capable of generating the artificial stock market with simulated returns properties closely matching actual financial data and stylised properties of stock market returns.
4. The simulated market in the calibrated model version has a tendency of self-organisation, i. e. transition of the complex system to the state of equilibrium price; individual adaptation and evolutionary selection are crucial for this sort of systemic behaviour in the model.
5. The proposed models can be used to demonstrate that plausible financial bubble formation mechanisms include excess liquidity, contagious earnings forecast errors and competitive pressures to reap short-term benefits from foreseeable price trends during bubble formation episodes.
6. Reinforcement learning is conceptually suitable for modelling agents' inductive behaviour in an artificial stock market model, even though it cannot guarantee optimal behavioural strategies.

Structure of the Dissertation. The Dissertation is comprised of introduction, five main chapters, chapter for general conclusions and discussion of results, list of references, list of author's publications and four appendices. In Chapter 1 we give a general discussion about agent-based financial models as an alternative and a complement to standard financial theories. A brief ASM literature review and presentation of some specific ASM design issues are provided in Chapter 2. Chapter 3 is devoted to the intuitive presentation of basic principles of the standard reinforcement learning and contains discussion

on its relevance in the context of financial modelling. In Chapter 4 we spell out the general analytical framework of the simulation model and conduct some simulation exercises. Chapter 5 contains a parsimonious, partly suitable for empirical calibration version of the model and simulation results.

General conclusions

1. An original ASM model is proposed. Based on it, a parsimonious partially calibrated model version is developed. The proposed models provide a basic framework for the generative analysis of financial market processes. The proposed agent-based modelling framework can be further modified for use in practical portfolio management applications.

2. Previously little explored possibilities to employ reinforcement learning algorithms (more specifically, Q-learning) in ASM models are implemented. In this work we provide arguments for the conceptual relevance of these behavioural algorithms in the domain of economic problems.

3. Emergent properties of the proposed artificial stock markets are in discord with the neoclassical financial theory's postulates on informational efficiency and homogeneous agent behaviour.

4. The market price of the stock in the basic version of the model broadly in line with fundamentals but over- or under-valuation runs are sustained for prolonged periods.

5. In the basic version of the model both individual learning and adaptation at the population level (more specifically, evolutionary selection) are essential for ensuring any efficiency of the market. The institutional setting alone, such as the centralised exchange based on the double auction trading, cannot ensure effective functioning of the market.

6. Market self-regulation ability in the basic version of the model is found to be weak. Even in the case of activated adaptive learning, the market does not correct itself from erroneously perceived fundamentals if they are in the vicinity of actual fundamentals, which underscores the importance of market participants' subjective beliefs for the market price dynamics.

7. Experiments with the basic model confirm a positive relationship between stock returns and changes in liquidity – there are indications that exogenous shocks to investors' cash holdings lead to strong changes in the market price of the stock.

8. Experiments with the refined model in the controlled environment confirm market's self-regulation abilities, as different initial market prices tend to converge to similar levels associated with the same underlying fundamentals.

9. Basic statistical properties of simulated market returns closely correspond to known stylised properties of stock returns and actual properties of S&P 500 index returns. Simulated stock price dynamics displays occasional

jumps but, apart from that, simulated returns have a non-normal leptokurtic distribution, they are not significantly autocorrelated and possess the property of volatility clustering.

10. In the case when the model is calibrated to the U.S. financial data, the simulated market exhibits boom-and-bust behaviour and the timing of these booms and busts largely corresponds to actual developments, though simulated structural breaks seem to be more abrupt than the actual breaks. Following the burst of the bubble in 2008, the simulated market exhibited immediate strong tendency to reinflate the bubble, which followed in actual data with a small lag.

11. A simple empirical analysis and model results also confirm the different nature of the last two global asset bubbles – the technology bubble is more related to unjustified earnings expectations, whereas in the recent asset bubble episode the real interest rate environment played a larger role.

12. The proposed ASM models demonstrate several plausible mechanisms of financial bubble formation: they include excess liquidity, earnings forecast errors that get dispersed owing to specific agent communication (“herd instincts”) and competitive pressures to concentrate on short-term gains against the backdrop of bubble episodes (“trend riding”).

Tomas RAMANAUSKAS

HETEROGENINIŲ BESIMOKANČIŲ AGENTŲ SĄVEIKA
PAGRĮSTAS IMITACINIS AKCIJŲ RINKOS MODELIAVIMAS

Daktaro disertacijos santrauka
Socialiniai mokslai, ekonomika (04S)

Tomas RAMANAUSKAS

STOCK MARKET SIMULATION BASED ON INTERACTION OF
HETEROGENEOUS LEARNING AGENTS

Summary of Doctoral Dissertation
Social Sciences, Economics (04S)

2010 04 28. 1,75 sp. I. Tiražas 70 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Biznio mašinų kompanija“,
J. Jasinskio g. 16a, 01112 Vilnius