

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



NEUROEKONOMICKÉ A BEHAVIORÁLNO
EKONOMICKÉ MODELOVANIE

DIPLOMOVÁ PRÁCA

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

**NEUROEKONOMICKÉ A BEHAVIORÁLNO
EKONOMICKÉ MODELOVANIE**

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Študijný program: Ekonomicko-finančná matematika a modelovanie
Študijný odbor: 1114 Aplikovaná matematika
Školiace pracovisko: Katedra aplikovanej matematiky a štatistiky
Vedúci práce: doc. RNDr. Ján Boďa, CSc.



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Bc. Matúš Rako
Študijný program: ekonomicko-finančná matematika a modelovanie
(Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: matematika
Typ záverečnej práce: diplomová
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický

Názov: Neuroekonomické a behaviorálne ekonomické modelovanie
Neuroeconomic and behavioural economic modelling

Anotácia: Zostrojenie matematického modelu popisujúceho ekonomické rozhodovanie ako alternatívu k modelu teórie očakávaného užitku, vychádzajúc z aktuálnych poznatkov z oblasti psychológie a neurovedy.

Vedúci: doc. RNDr. Ján Boďa, CSc.
Katedra: FMFI.KAMŠ - Katedra aplikovanej matematiky a štatistiky
Vedúci katedry: prof. RNDr. Marek Fila, DrSc.
Dátum zadania: 12.11.2018

Dátum schválenia: 08.01.2019
prof. RNDr. Daniel Ševčovič, DrSc.
garant študijného programu

.....
študent

.....
vedúci práce

Abstrakt

RAKO, Matúš: Neuroekonomické a behaviorálno ekonomické modelovanie [Diplomová práca], Univerzita Komenského v Bratislave, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Katedra aplikovanej matematiky a štatistiky; školiteľ: doc. RNDr. Ján Boďa, CSc., Bratislava, 2020, 100s.

Predkladaná diplomová práca je zacielená na zostrojenie nového matematického modelu popisujúceho ekonomické rozhodovanie ako alternatívu k modelu teórie očakávaného úžitku – zaužívaného modelu v ekonómii. Vychádza z dôkladného analyzovania a následnej syntézy aktuálnych psychologických a neurovedeckých poznatkov vzťahujúcich sa k ekonomickému rozhodovaniu. Následne predstavuje návrh neuroeconomickeho modelu rozhodovania na báze týchto poznatkov. Záverečná časť práce je zacielená na analýzu zostrojeného modelu jeho aplikovaním na nezodpovedané psychologické fenomény a ekonomické paradoxy modelom teórie očakávaného úžitku a následnou konfrontáciou zostrojeného modelu nielen s modelom teórie očakávaného úžitku, ale aj s modelom kumulatívnej prospektivej teórie – zaužívaným modelom v behaviorálnej ekonómii. Práca má ambíciu zvýšiť povedomie ekonómov o neuroekonómii a behaviorálnej ekonómii a poukázať na ich potenciálny prínos pri objasňovaní iracionality ľudí v ekonomickom rozhodovaní.

Kľúčové slová: neuroekonómia, behaviorálna ekonómia, očakávaný úžitok, iracionalita

Abstract

RAKO, Matúš: Neuroeconomic and behavioural economic modelling [Master's Thesis], Comenius University in Bratislava, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Department of Applied Mathematics and Statistics; Supervisor: doc. RNDr. Ján Boda, CSc., Bratislava, 2020, 100p

The given master's thesis is aimed at creating a new mathematical model describing economic decision-making as an alternative to the model of the expected utility theory – commonly used in economics. It is based on a thorough analysis and subsequent synthesis of the current knowledge in psychology and neuroscience related to economic decision-making. Based on this knowledge, it presents a proposal of a neuroeconomic decision-making model. The final part of the thesis focuses on the analysis of the created model by applying it to unanswered psychological phenomena and economic paradoxes using the model of the expected utility theory, and subsequently confronting the created model not only with the model of the expected utility theory, but also with the model of the cumulative prospect theory – commonly used in behavioural economics. The thesis has the potential to raise awareness of neuroeconomics and behavioural economics among economists and to point towards their possible contribution to the clarification of people's irrationality in economic decision-making.

Keywords: neuroeconomics, behavioural economics, expected utility, irrationality

Obsah

Zoznam obrázkov	7
Zoznam tabuliek	8
Zoznam použitých skratiek a značiek	9
Úvod	10
1 Vývoj modelov popisujúcich ľudské rozhodovanie	12
1.1 Modely kalkulujúce s faktorom homo economicus	12
1.2 Modely kalkulujúce so subjektívnou pravdepodobnosťou	16
1.3 Modely ovplyvnené zoradením výsledkov	20
1.4 Modely konfiguračných váh	24
1.5 Modely kalkulujúce s faktorom lútosti	26
2 Afektívne a kognitívne procesy pri ekonomickom rozhodovaní	28
2.1 Časové diskontovanie	28
2.2 Afektívne averzie	31
2.2.1 Averzia voči riziku	31
2.2.2 Averzia voči strate	33
2.2.3 Averzia voči nejednoznačnosti	33
2.3 Ultimátna hra	34
2.4 Utopené náklady	36
3 Neuroekonomický model rozhodovania	38
3.1 Zosumarizovanie poznatkov neuroekonómie	38
3.2 Funkcie neurónového očakávaného úžitku	39
3.2.1 Funkcia neurónového očakávaného úžitku zo zisku	40
3.2.2 Funkcia neurónového očakávaného úžitku zo straty	44
3.2.3 Funkcie neurónovej očakávanej lútosti	45
3.3 Celková afektívna averzia	48
3.3.1 Kompenzačná prémie	49
3.3.2 Kognitívna reparácia a kontrola	56
3.4 Zostrojenie neuroekonomického modelu rozhodovania	57

4	Analýza modelu a porovnanie	59
4.1	Efekt averzie voči ľútosti	63
4.2	Allaisov paradox	65
4.3	Regulárna hra	69
4.4	Birnbaumov paradox	73
4.5	Tverského-Kahnemanov paradox	77
4.6	Ellsbergov paradox	83
4.7	Ultimátna hra	86
4.8	Efekt utopených nákladov	89
	Záver	93
	Zoznam použitej literatúry	96

Zoznam obrázkov

1.1	Náčrt funkcie váh	18
1.2	Neurónová aktivita ľavého a pravého striata v závislosti od pravdepodobnosti	19
1.3	Náčrt funkcie hodnoty	22
2.1	(A) Vzťah medzi neurónovou aktivitou jednotlivých oblastí mozgu a pravdepodobnosťou výberu rizikovej hry a (B) účinok neurónovej aktivity IFG na pravdepodobnosť výberu rizikovej hry	32
2.2	(A) Neurónová aktivita AI hráča 2 v ultimátnej hre a (B) kontrast neurónovej aktivity AI a DLPFC v nespravodlivých ponukách	35
3.1	Neuroekonomický model rozhodovania	58

Zoznam tabuliek

1.1	Allaisov paradox	15
1.2	Rozpísaný Allaisov paradox	16
1.3	Birnbaumov paradox	24
3.1	Zosumarizovanie poznatkov neuroekonómie	39
4.1	Hry s efektom averzie voči ľútosti	63
4.2	Ekvivalenty istoty hier s efektom averzie voči ľútosti	65
4.3	Hry Allaisovho paradoxu	65
4.4	Ekvivalenty istoty hier Allaisovho paradoxu	69
4.5	Regulárne hry	70
4.6	Ekvivalenty istoty regulárnych hier	73
4.7	Hry Birnbaumovho paradoxu	73
4.8	Ekvivalenty istoty hier Birnbaumovho paradoxu	77
4.9	Hry Tverského-Kahnemanovho paradoxu	77
4.10	Ekvivalenty istoty hier Tverského-Kahnemanovho paradoxu	83
4.11	Hry Ellsbergovho paradoxu	84
4.12	Ekvivalenty istoty hier Ellsbergovho paradoxu	85
4.13	Ultimátne hry	86
4.14	Ekvivalenty istoty ultimátnych hier	88
4.15	Hry s efektom utopených nákladov	89
4.16	Ekvivalenty istoty hier s efektom utopených nákladov	92

Zoznam použitých skratiek a značiek

ACC – anteriórny cingulárny kortex
AI – anteriórna inzula
BOLD – závislý od hladiny kyslíka v krvi
CESTA – Centrum strategických analýz
CSČ – Centrum spoločných činností
CSPV – Centrum spoločenských a psychologických vied
DLPFC – dorzolaterálny prefrontálny kortex
DMPFC – dorzomediálny prefrontálny kortex
et al. – a iní
EUR – euro
fMRI – funkčná magnetická rezonancia
FSVaZ – Fakulta sociálnych vied a zdravotníctva
GLM – zovšeobecnený lineárny model
IFG – inferiórny frontálny gyrus
napr. – napríklad
obr. – obrázok
PPC – posteriórny parietálny kortex
rTMS – repetitívna transkraniálna magnetická stimulácia
SAV – Slovenská akadémia vied
STL – Škola dopravy a logistiky
str. – strana
SWJTU – Juhozápadná univerzita Jiaotong
t. j. – to jest
tab. – tabuľka
tDCS – transkraniálna stimulácia jednosmerným prúdom
USD – americký dolár
UKF – Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre
ÚEP – Ústav experimentálnej psychológie

Úvod

„Bohatosť a pestrosť myslenia sa neutvára len na základe informovanosti z mnohých zdrojov, ale deje sa na základe zážitkovej úrovne, ktorú naše zmysly nie sú schopné presne spozorovať v prejavoch správania ľudí navonok. V mozgu sa myslenie prejavuje obrovskou rýchlosťou, ktorú často naše vnímanie nezaznamená u druhých, aj napriek tomu, že je ich rozhodovanie zásadne ovplyvňované. Niektí tomu hovoria náhoda, iní emócie, či podvedomie, cítenie a podobne.“ (Tomková, Ondrijová, 2018, str. 2)

Behaviorálna ekonómia a predovšetkým neuroekonómia sú pomerne nové medzi-odborové vedecké disciplíny. Napriek faktu, že ich prínos nie je v povedomí laickej, ale aj odbornej verejnosti na Slovensku dostatočne známy, v zahraničí zaznamenali dynamický rozvoj a pozoruhodné výsledky ocenené udelením dvoch cien Švédskej ríšskej banky za ekonomické vedy na pamiatku Alfreda Nobela. Prvá bola udelená psychológovi Danielovi Kahnemanovi *„za začlenenie poznatkov z výskumu v oblasti psychológie do ekonomickej vedy, najmä týkajúcich sa ľudského úsudku a rozhodovania za podmienok neistoty“* (podľa NobelPrize, 2019) v roku 2002 a druhá behaviorálnemu ekonómovi Richardovi H. Thalerovi *„za jeho prínos do behaviorálnej ekonómie“* (podľa NobelPrize, 2019) v roku 2017.

Kým behaviorálna ekonómia integruje *„psychologické fenomény do ekonomických modelov tak, aby tieto modely presnejšie a spoľahlivejšie predpovedali ľudské správanie“* (Lorko, 2018), predmetom bádania neuroekonómie je *„výskum neurobiologických korelátov a mechanizmov, ktoré sa uplatňujú pri ekonomickom rozhodovaní, predovšetkým výskum procesov vedúcich k rozhodovaniu a výberu, ktoré aplikuje do ekonomickej teórie“* (Hrubý, 2010, str. 167). Jej zásadný pokrok bol stimulovaný aplikáciou súčasných technológií ako fMRI, rTMS, tDCS a ďalších, umožňujúcich nielen identifikovať oblasti ľudského mozgu aktivovaných v procese ekonomického rozhodovania, ale aj kvantifikovať aktivitu neurónov v adekvátnych oblastiach mozgu, čo zásadnou mierou prispelo k objasneniu procesu ekonomického rozhodovania, v diametrálne odlišnej rovine.

Čo nás viedlo k výberu zvolenej témy? Práve pozorované psychologické fenomény a ekonomické paradoxy pri ekonomickom rozhodovaní a identifikácia príčin tohto ľudského správania boli prvotným impulzom nášho záujmu o behaviorálnu ekonómiu a neuroekonómiu. K podstatnému rozšíreniu nášho vnímania problematiky prispelo naštudovanie

množstva neurovedeckých štúdií snažiacich sa vysvetliť príčiny psychologických fenoménov a ekonomických paradoxov, nedostatočne objasnených modelom teórie očakávaného úžitku – zaužívaného modelu v ekonómii.

Zatiaľ čo behaviorálna ekonómia má už etablované základy matematického aparátu, ktorý ekonóm Vladimír Baláž načrtol vo svojej knihe „Riziko a neistota“ (Baláž, 2009), neuroekonómia je len v rovine neurovedeckých výskumov. Z tohto dôvodu naším cieľom bolo zostrojiť neuroekonomický model rozhodovania implikujúci poznatky neuroekonómie a schopný modelovať pozorované psychologické fenomény a ekonomické paradoxy. Tento cieľ sme dosiahli dôkladným analyzovaním a následnou syntézou aktuálnych psychologických a neurovedeckých poznatkov vzťahujúcich sa k ekonomickému rozhodovaniu, podľa ktorých sme si zadefinovali vlastné matematické funkcie a parametre popisujúce ekonomické rozhodovanie tvoriace náš model a jeho aplikáciou na pozorované psychologické fenomény a ekonomické paradoxy.

Našou snahou bolo vytvorením modelu zvýšiť povedomie ekonómov o potenciálnom prínose behaviorálnej ekonómie a neuroekonómie pri objasňovaní iracionality ľudí v ekonomickom rozhodovaní. V nasledujúcich kapitolách predkladáme čitateľovi náš pohľad na danú problematiku.

1 Vývoj modelov popisujúcich ľudské rozhodovanie

Nevyhnutnou súčasťou ekonomického bádania je snaha porozumieť ľudskému rozhodovaniu v ekonomických javoch. Takýto typ ľudského rozhodovania sa nazýva *ekonomické rozhodovanie* a rozumie sa pod ním „*hodnotenie rizík a odmien, ktoré sú spájané s rozličnými možnosťami voľby, a vo výbere najlepšieho možného postupu*“ (Sičáková-Beblavá, 2015, str. 15). Ekonomické rozhodovanie je ovplyvnené množstvom externých faktorov. Vplyv týchto „*sociálnych, kognitívnych a emocionálnych faktorov na ekonomické rozhodovania jednotlivcov a inštitúcií*“ (Encyclopaedia Beliana, 2017) je predmetom bádania behaviorálnej ekonómie, ktorá sa voči zaužívaným ekonomickým modelom, kalkulujúcich s faktorom fiktívneho „homo economicus“ - bytosti výlučne racionálnej, poznajúcej hodnoty pravdepodobností pre každé ekonomické rozhodnutie prenášajúce sa v systéme výlučne pomocou cenového mechanizmu na princípe aukcie bez možnosti výberu na základe osobných preferencií (Baláž, 2009, str. 20), vymedzuje postulátom, že ľudia sú obmedzene racionálni, a preto sa výlučne racionálne nerozhodujú.

Prvú kapitolu našej práce sme preto zamerali na vývoj matematického aparátu behaviorálnej ekonómie v kontexte aktuálnych poznatkov psychológie doplnených o zistenia neuroekonómie.

1.1 Modely kalkulujúce s faktorom homo economicus

Ekonomické rozhodnutia sú spojené s výberom spomedzi viacerých možností voľby. Možnosť implikujúca jednu alebo viacero výsledkov sme v našej práci označovali ako *hru*. V celej práci sme uvažovali len o diskrétnych hrách a nie kontinuálnych hrách, z dôvodu neschopnosti ľudského mozgu spracovať nekonečný počet výsledkov hry. Kladný výsledok určitej hry z pohľadu hráča sme označovali ako *zisk* a podľa výsledku viacerých experimentálnych neurovedeckých štúdií, realizovaných na zvieratách aj ľudských jedincoch (Knutson et al., 2003; Yacubian et al., 2006), je očakávanej výške zisku úmerný nárast neurónovej aktivity striata (prúžkovaného telesa) obsahujúci dopamínnergické neuróny. Hru len s nezápornými výsledkami sme označovali ako *pozitívnu hru*. Záporný výsledok určitej hry z pohľadu hráča sme označovali ako *stratu* a podľa výsledku viacerých experimentálnych neurovedeckých štúdií, realizovaných na zvieratách aj ľudských jedincoch (Breiter et al., 2001; Yacubian et al., 2006), je očakávanej

výške straty úmerný nárast neurónovej aktivity amygdaly aktivujúcej sa pri pocíťovaní strachu. Hru len s nekladnými výsledkami sme označovali ako *negatívnu hru*. Hru obsahujúcu kladné aj záporné výsledky sme označovali ako *regulárnu hru*. Každý výsledok určitej hry je podmienený určitou pravdepodobnosťou jeho realizácie vyjadrenou číslom v intervale 0 až 1 reprezentujúcim eventuálnu existenciu alebo absenciu nešpecifikovanej udalosti alebo javu.

Jednou z prvých teórií snažiacou sa matematicky stanoviť úroveň motivácie ekonomického rozhodovania bola *teória očakávanej hodnoty* vyjadrujúca hodnotu určitej hry práve prostredníctvom hodnôt výsledkov tejto hry a pravdepodobnosťami ich realizácií. Výstupom modelu uvedenej teórie je očakávaná hodnota vypočítaná pre určitú hru ako súčet súčinov objektívnych pravdepodobností a hodnôt možných výsledkov (Baláž, 2009, str. 42)

$$EV(G) = \sum_{i=1}^N p_i x_i,$$

kde EV je očakávaná hodnota hry G vypočítaná modelom teórie očakávanej hodnoty, p_i je objektívna pravdepodobnosť realizácie i -teho výsledku hry G , pričom platí

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1, p_i \in \langle 0; 1 \rangle,$$

x_i je hodnota i -teho výsledku hry G ,

N je celkový počet výsledkov hry G .

Definovanie očakávanej hodnoty umožnilo porovnávať možné výsledky rôznych rozhodnutí a na základe porovnania vyhodnotiť optimálny výsledok. Ľudia však majú rozdielne preferencie na individuálnej úrovni, v ekonómii vyjadrené termínom *úžitok*, ktorý má „*slúžiť na meranie psychologického rozmeru ekonomických veličín*“ (Baláž, 2009, str. 15). Ľudská snaha maximalizovať vlastný úžitok tvorí podstatu *teórie očakávaného úžitku*, zaužívanej ekonomickej teórie popisujúcej ekonomické rozhodovanie. Výstupom modelu uvedenej teórie je očakávaný úžitok vypočítaný pre určitú hru ako súčet súčinov objektívnych pravdepodobností a úžitkov z hodnôt možných výsledkov (Baláž, 2009, str. 44)

$$EU(G) = \sum_{i=1}^N p_i u(x_i),$$

kde EU je očakávaný úžitok hry G vypočítaný modelom teórie očakávaného úžitku,

p_i je objektívna pravdepodobnosť realizácie i -teho výsledku hry G , pričom platí

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1, p_i \in \langle 0; 1 \rangle,$$

$u(x_i)$ je rastúca funkcia užitočnosti z i -teho výsledku hry G s hodnotou x_i ,

N je celkový počet výsledkov hry G .

Najpreferovanejším tvarom *funkcie užitočnosti* je $u(x) = x^\alpha$, kde $\alpha > 0$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci zakrivenie funkcie. Štandardne je táto funkcia konkávna z dôvodu klesajúceho marginálneho úžitku ako dôsledok limit hladín hormónov a neurotransmiterov (Baláž, 2009, str. 61). V teórii očakávaného úžitku nie je marginálny úžitok nezávislý od averzie voči riziku. Hodnota parametra $\alpha \in (0; 1)$ preto v teórii očakávaného úžitku vyjadruje averziu voči riziku, hodnota parametra $\alpha = 1$ vyjadruje neutralitu voči riziku a hodnota parametra $\alpha > 1$ vyjadruje toleranciu voči riziku.

Teória očakávaného úžitku je založená na určitých základných axiómoch. Keďže tie sú uvádzané v odbornej literatúre divergentne, pridržovali sme sa knihy „Riziko a neistota“ od Vladimíra Baláža (Baláž, 2009, box 1.5) a aplikovali sme nasledujúce označovanie:

- Označenie $G \succ G'$ značí, že hra G je striktne preferovaná pred hrou G' , respektíve označenie $G \prec G'$ značí, že hra G' je striktne preferovaná pred hrou G .
- Označenie $G \sim G'$ značí, že hry G a G' sú indiferentné.
- Označenie $G \succsim G'$ značí, že buď hra G je striktne preferovaná pred hrou G' , alebo sú hry indiferentné, respektíve označenie $G \precsim G'$ značí, že buď hra G' je striktne preferovaná pred hrou G , alebo sú hry indiferentné.

Axiómy teórie očakávaného úžitku podľa Baláža (Baláž, 2009, box 1.5) sú:

Axióma 1 (Axióma kompletnosti)

„Pre akékoľvek dve hry G a G' platí buď $G \succsim G'$, alebo $G' \succsim G$.“

Axióma 2 (Axióma tranzitivity)

„Pre akékoľvek tri hry G , G' , G'' , ak $G \succsim G'$ a $G' \succsim G''$ platí, že $G \succsim G''$.“

Axióma 3 (Axióma kontinuity)

„Horné a dolné hranice preferencií voči hrám sú uzavreté, t. j. pre každú hru G existuje určitá pravdepodobnosť, že hráč bude indiferentný voči najlepšímu a najhoršiemu výsledku hry.“

Axióma 4 (Axióma monotónnosti)

„Hra, ktorá prisudzuje vyššiu pravdepodobnosť určitému preferovanému výsledku, bude preferovaná voči hre, ktorá prisudzuje nižšiu pravdepodobnosť preferovanému výsledku, ak ostatné výsledky v týchto hrách zostanú nezmenené.“

Axióma 5 (Axióma substitúcie)

„Ak je hráč indiferentný k dvom možným výsledkom, potom bude indiferentný k dvom hrám, ktoré mu tieto výsledky ponúkajú s rovnakou pravdepodobnosťou, ak sú tieto hry vo všetkých svojich ostatných vlastnostiach identické.“

Mnohé psychologické fenomény a ekonomické paradoxy však tieto axiomy teórie očakávaného úžitku porušujú. Najznámejší ekonomický paradox porušujúci axiomy teórie očakávaného úžitku je *Allaisov paradox* pomenovaný po ekonómovi Mauriceovi Allaisovi, ktorý v roku 1952 na vedeckom kolokviu v Paríži uskutočnil hypotetické experimenty uvedené v tab. 1.1.

Tab. 1.1: Allaisov paradox

Experiment 1.1				Experiment 1.2			
Hra 1.1		Hra 1.2		Hra 1.3		Hra 1.4	
Zisk [USD]	p [%]	Zisk [USD]	p [%]	Zisk [USD]	p [%]	Zisk [USD]	p [%]
1 000 000	100,00	1 000 000	89,00	0	89,00	0	90,00
		0	1,00	1 000 000	11,00		
		5 000 000	10,00			5 000 000	10,00

Zdroj: autor podľa (Baláž, 2009, tab. 1.3)

Keďže v oboch experimentoch obe hry s 89 % pravdepodobnosťou ponúkajú rovnaký výsledok, ako sme to rozpísali v tab. 1.2 na str. 16, a vo všetkých svojich ostatných vlastnostiach sú identické, podľa axiomy substitúcie, ak hráč preferoval hru 1.1 pred hrou 1.2 v experimente 1.1, mal by preferovať aj hru 1.3 pred hrou 1.4 v experimente 1.2, alebo ak hráč preferoval hru 1.2 pred hrou 1.1 v experimente 1.1, mal by preferovať aj hru 1.4 pred hrou 1.3 v experimente 1.2. Ukázalo sa, že kým v experimente 1.1 hráči preferovali hru 1.1, v experimente 1.2 preferovali hru 1.4, čím bola porušená axioma substitúcie (Baláž, 2009, str. 55).

Tab. 1.2: Rozpísaný Allaisov paradox

Experiment 1.1				Experiment 1.2			
Hra 1.1		Hra 1.2		Hra 1.3		Hra 1.4	
Zisk [USD]	p [%]	Zisk [USD]	p [%]	Zisk [USD]	p [%]	Zisk [USD]	p [%]
1 000 000	89,00	1 000 000	89,00	0	89,00	0	89,00
1 000 000	11,00	0	1,00	1 000 000	11,00	0	1,00
		5 000 000	10,00			5 000 000	10,00

Zdroj: autor podľa (Baláž, 2009, str. 55)

1.2 Modely kalkulujúce so subjektívnou pravdepodobnosťou

Význačným nedostatkom teórie očakávaného úžitku je ignorancia hier v podmienkach nejednoznačnosti, keď pravdepodobnosti reprezentujúce eventuálnu existenciu alebo absenciu nešpecifikovaných udalostí alebo javov nie sú známe. Hry v podmienkach nejednoznačnosti podnietili štatistika Leonarda J. Savagea k tvorbe *teórie subjektívneho očakávaného úžitku*, ktorá rozširuje teóriu očakávaného úžitku na rozhodovanie v podmienkach nejednoznačnosti nahradením objektívnej pravdepodobnosti subjektívnou pravdepodobnosťou vyplývajúcou z osobného úsudku jednotlivca na základe jeho názorov a minulých skúseností. Výstupom modelu uvedenej teórie je očakávaný úžitok vypočítaný pre určitú hru ako súčet súčinov subjektívnych pravdepodobností a úžitkov z hodnôt možných výsledkov (Baláž, 2009, str. 111)

$$SEU(G) = \sum_{i=1}^N \pi(E_i) u(x_i),$$

kde SEU je očakávaný úžitok hry G vypočítaný modelom teórie subjektívneho očakávaného úžitku,

$\pi(E_i)$ je subjektívna pravdepodobnosť realizácie i -tej udalosti E_i hry G , pričom platí

$$\sum_{i=1}^N \pi(E_i) = 1, \pi(E_i) \in \langle 0; 1 \rangle,$$

$u(x_i)$ je rastúca funkcia užitočnosti z i -teho výsledku hry G s hodnotou x_i ,

N je celkový počet výsledkov hry G .

Psychológ Ward Edwards skúmal model teórie subjektívneho očakávaného úžitku v Allaisovom paradoxe (Birnbbaum, 1999, str. 32). Keďže v Allaisovom paradoxe boli

objektívne pravdepodobnosti udalostí známe, subjektívne pravdepodobnosti by mali byť ich variáciou. V experimente 1.1 hráči preferovali hru 1.1, preto podľa modelu teórie subjektívneho očakávaného úžitku by mala platiť nerovnica (1.1)

$$\pi(1, 00)u(1\text{mil.}) > \pi(0, 89)u(1\text{mil.}) + \pi(0, 10)u(5\text{mil.}). \quad (1.1)$$

V experimente 1.2 hráči preferovali hru 1.4, preto podľa modelu teórie subjektívneho očakávaného úžitku by mala platiť nerovnica (1.2)

$$\pi(0, 10)u(5\text{mil.}) > \pi(0, 11)u(1\text{mil.}). \quad (1.2)$$

Po spojení nerovnic (1.1) a (1.2) do nerovnice (1.3)

$$\pi(1, 00)u(1\text{mil.}) > \pi(0, 89)u(1\text{mil.}) + \pi(0, 11)u(1\text{mil.}) \quad (1.3)$$

a následným predelením nerovnice (1.3) hodnotou $u(1\text{mil.})$ dostal Ward Edwards nerovnicu (1.4)

$$\pi(1, 00) > \pi(0, 89) + \pi(0, 11). \quad (1.4)$$

Ward Edwards nerovnicou (1.4) ukázal, že ak by platilo $\pi(1, 00) = 1$, potom subjektívne pravdepodobnosti komplementárnych udalostí nemusia dávať súčet 1 (Birnbau, 1999, str. 33). Navrhol preto *teóriu subjektívne váženého úžitku*, v ktorej uvažoval nahradiť subjektívne pravdepodobnosti *funkciou váh*, ktorá by objektívne pravdepodobnosti vážila nejakým kombinačným princípom (Birnbau, 1999, str. 33). Výstupom modelu uvedenej teórie je očakávaný úžitok vypočítaný pre určitú hru ako súčet súčinov vážených pravdepodobností a úžitkov z hodnôt možných výsledkov (Au, 2014, str. 3)

$$SEU(G) = \sum_{i=1}^N w(p_i) u(x_i),$$

kde SEU je očakávaný úžitok hry G vypočítaný modelom teórie subjektívneho očakávaného úžitku,

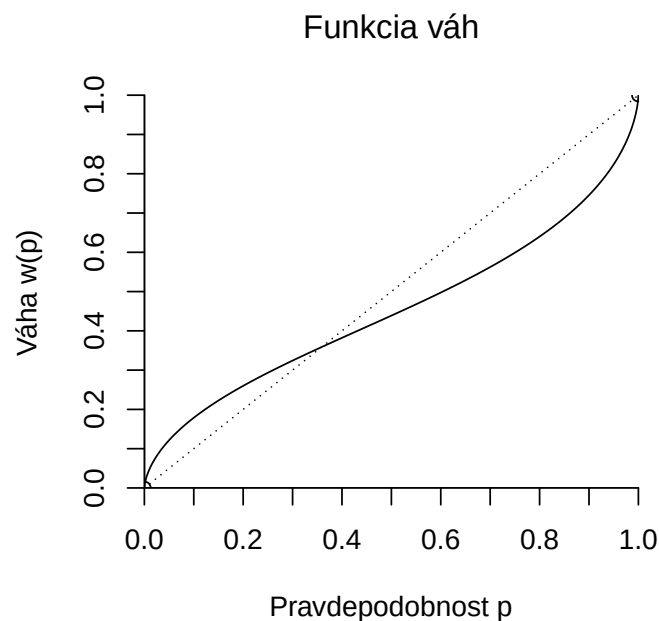
$w(p_i)$ je monotónna rastúca funkcia váh objektívnych pravdepodobností hry G , pričom platí

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N w(p_i) &\leq 1, w(p_i) \in \langle 0; 1 \rangle, w(0) = 0, w(1) = 1, \\ \sum_{i=1}^N p_i &= 1, p_i \in \langle 0; 1 \rangle, \end{aligned}$$

$u(x_i)$ je rastúca funkcia užitočnosti z i -teho výsledku hry G s hodnotou x_i ,
 N je celkový počet výsledkov hry G .

Funkcia váh $w(p)$ je vo všeobecnosti nelineárna z dôvodu psychologicky preukázaného preváženia nízkych pravdepodobností a podváženia stredných a vysokých pravdepodobností (Kahneman, 2012, str. 333). Vzhľadom na to má funkcia váh tvar obráteného písmena S načrtnutá grafom na obr. 1.1.

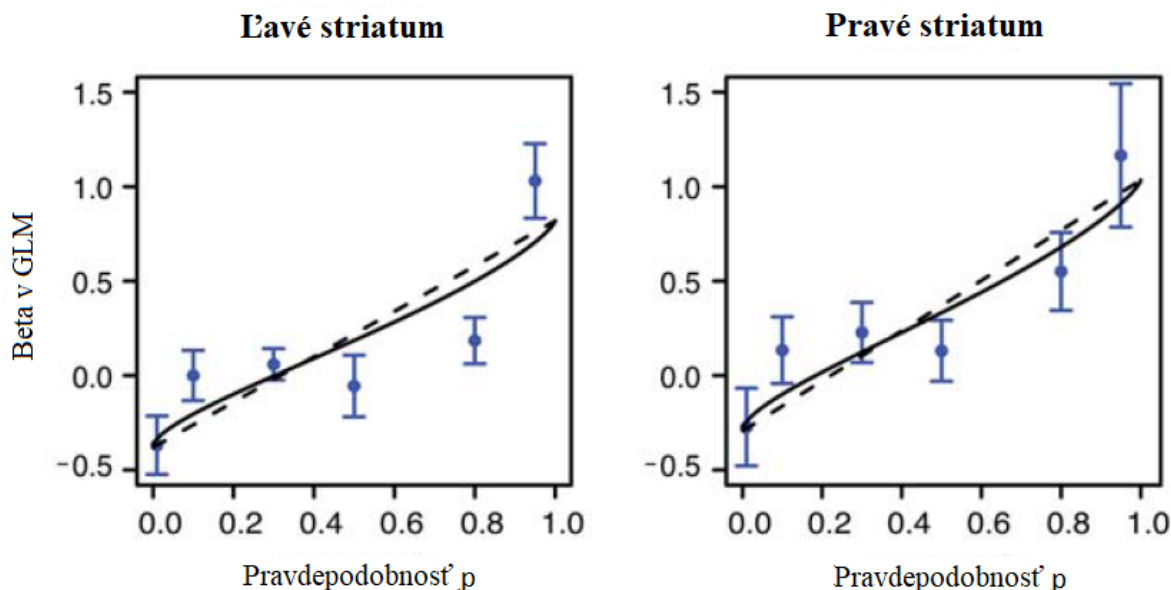
Obr. 1.1: Náčrt funkcie váh



Zdroj: autor

Preváženie nízkych pravdepodobností a podváženie stredných a vysokých pravdepodobností ziskov reflektuje podľa výsledkov experimentálnej neurovedeckej štúdie (Hsu et al., 2009) neurónová aktivita striata, znázornená modrou farbou na obr. 1.2 na str. 19. Čiernou súvislou čiarou je na obr. 1.2 znázornená funkcia váh. Graf neurónovej aktivity striata ilustruje činnosť striata prevažujúci nízke pravdepodobnosti a podvažujúci stredné a vysoké pravdepodobnosti. Neurónová aktivita striata teda vo všeobecnosti reflektuje subjektívnu očakávanú výšku zisku už pre násobenú subjektívnym vážením jeho realizácie (Tobler et al., 2007, str. 1626).

Obr. 1.2: Neurónová aktivita ľavého a pravého striata v závislosti od pravdepodobnosti



Zdroj: (Hsu et al., 2009, obr. 3C)

Jedným najpoužívanejším matematickým predpisom pre tvar funkcie váh je Tverského-Kahnemanov tvar (Baláž, 2009, str. 91)

$$w(p) = \frac{p^\gamma}{(p^\gamma + (1-p)^\gamma)^{\frac{1}{\gamma}}},$$

kde $p \in (0; 1)$ je objektívna pravdepodobnosť,

$\gamma \in (0; 1)$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci zakrivenie funkcie.

Používanie tohto tvaru funkcie má viacero užitočných matematických vlastností, akými sú jeden parameter, konkávne aj konvexné oblasti, nevyžadovaná rovnosť $w(0, 5) = 0, 5$ (Baláž, 2009, str. 91) a je v súčasnosti často prijímaným tvarom funkcie váh v behaviorálnej ekonómii, avšak vzhľadom k určitým limitom, nie je jediným tvarom funkcie pre popis vážených pravdepodobností, pretože nepripúšťa nezávislé špecifikovanie polohy a zakrivenia a má fixný bod, v ktorom sa hodnota objektívnej pravdepodobnosti rovná hodnote subjektívnej váhy rozhodnutia (Baláž, 2009, str. 105). Z dôvodu uvedených nevýhod boli vypracované diferentné typy funkcií pre popis váženia pravdepodobností. Najpoužívanejšie popísal Vladimír Baláž vo svojej knihe „Riziko a neistota“ (Baláž, 2009, str. 101-106), akým je aj dvojparametrový Prelecov tvar, ktorý pripúšťa možnosť nezávislého špecifikovania polohy a zakrivenia. Predpis dvojparametrového Prelecovho

tvaru funkcie váh je (Baláž, 2009, str. 105)

$$w(p) = e^{-\theta(-\ln p)^\gamma},$$

kde $p \in \langle 0; 1 \rangle$ je objektívna pravdepodobnosť,

$\gamma \in (0; 1)$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci zakrivenie funkcie,

$\theta > 0$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci eleváciu funkcie.

1.3 Modely ovplyvnené zoradením výsledkov

Psychologickými experimentmi sa preukázalo, že extrémne výsledky určitej hry upútajú ľudskú pozornosť výraznejšie ako neextrémne výsledky tejto hry, a to aj napriek nižšej pravdepodobnosti ich realizácie (Baláž, 2009, str. 159). Časť behaviorálnych ekonómov sa na základe zmieneného faktu prikláňa k názoru, že subjektívne váženie pravdepodobností závisí nielen od objektívnej pravdepodobnosti, ale aj od samotného zoradenia výsledkov určitej hry podľa ich absolútnych hodnôt výsledkov. Táto hypotéza viedla k tvorbe modelov, v ktorých namiesto jednoduchého použitia pravdepodobnostných váh na jednotlivé pravdepodobnosti výsledkov určitej hry, sa najprv zoradia výsledky podľa ich absolútnych hodnôt a na ten najextrémnejší sa aplikuje pravdepodobnostné váženie (Au, 2014, str. 3). Váženie ďalších pravdepodobností výsledkov tejto hry sa už odvíja od váhy najextrémnejšieho výsledku. Príkladom takéhoto modelu je *model poradového úžitku*, ktorého výstupom je očakávaný úžitok vypočítaný pre určitú pozitívnu hru so zoradenými výsledkami $x_1 \geq x_2 \geq \dots \geq x_N \geq 0$ (Au, 2014, str. 4)

$$RDU(G) = \sum_{i=1}^N \left[w^+(p_i + \dots + p_2 + p_1) - w^+(p_{i-1} + \dots + p_2 + p_1) \right] u(x_i),$$

kde RDU je očakávaný úžitok hry G vypočítaný modelom poradového úžitku,

$w_i^+ = w^+(p_i + \dots + p_2 + p_1)$ je monotónna rastúca funkcia váh objektívnych pravdepodobností hry G , pričom platí

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N w_i^+ &\leq 1, w_i^+ \in \langle 0; 1 \rangle, w^+(0) = 0, w^+(1) = 1, \\ \sum_{i=1}^N p_i &= 1, p_i \in \langle 0; 1 \rangle, \end{aligned}$$

$u(x_i)$ je rastúca funkcia užitočnosti z i -teho výsledku hry G s hodnotou x_i ,

N je celkový počet výsledkov hry G .

Analogicky je vypočítaný očakávaný úžitok pre určitú negatívnu hru so zoradenými výsledkami $0 \geq x_1 \geq x_2 \geq \dots \geq x_N$ (Au, 2014, str. 4)

$$RDU(G) = \sum_{i=1}^N \left[w^-(p_i + \dots + p_{N-1} + p_N) - w^-(p_{i-1} + \dots + p_{N-1} + p_N) \right] u(x_i),$$

kde RDU je očakávaný úžitok hry G vypočítaný modelom poradového úžitku,

$w_i^- = w^-(p_i + \dots + p_{N-1} + p_N)$ je monotónna rastúca funkcia váh objektívnych pravdepodobností hry G , pričom platí

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N w_i^- &\leq 1, w_i^- \in \langle 0; 1 \rangle, w^-(0) = 0, w^-(1) = 1, \\ \sum_{i=1}^N p_i &= 1, p_i \in \langle 0; 1 \rangle, \end{aligned}$$

$u(x_i)$ je rastúca funkcia užitočnosti z i -teho výsledku hry G s hodnotou x_i ,

N je celkový počet výsledkov hry G .

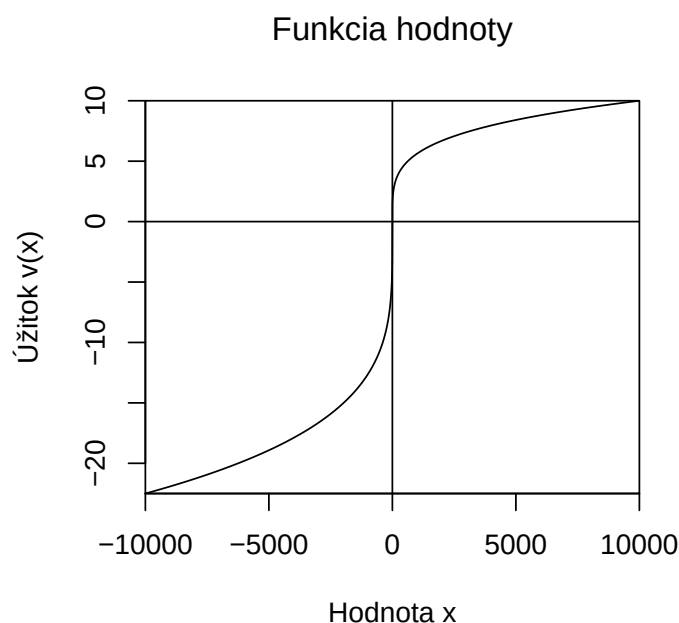
Princíp modelu poradového úžitku využili Amos Tversky a Daniel Kahneman aj vo svojej *kumulatívnej prospektovej teórii*, ktorá sa stala najznámejšou teóriou v behaviorálnej ekonómii, a ktorá bola rozhodujúcou váhou k udeleniu ceny Švédskej ríšskej banky za ekonomické vedy na pamiatku Alfreda Nobela Danielovi Kahnemanovi v roku 2002 (Baláž, 2009, box 1.7). Kumulatívna prospektová teória rozširuje model poradového úžitku na regulárne hry.

Kumulatívna prospektová teória má dva meritórne rozdiely od teórie očakávaného úžitku. Prvým meritórnym rozdielom kumulatívnej prospektovej teórie od teórie očakávaného úžitku je funkcia užitočnosti v kumulatívnej prospektovej teórii nazývaná *funkcia hodnoty*, ktorej tvar je načrtnutý grafom na obr. 1.3 na str. 22 so strmším sklonom v prípade strát ako v prípade ziskov, pretože sa u ľudí psychologickými experimentmi preukázala *averzia voči strate*, t. j. pociťovanie omnoho väčšej bolesti zo straty, ako radosti z ekvivalentnej hodnoty zisku (Baláž, 2009, str. 294; Kahneman, 2012, str. 303).

Amos Tversky s Danielom Kahnemanom psychologickými experimentmi zistili, že averzia voči strate v kombinácii so subjektívnym vážením pravdepodobností vedie k štvorzložkovému postoju hráčov k riziku v závislosti od situácie (Baláž, 2009, tab. 1.7; Kahneman, 2012, obr. 13), ktorý sme si pre účely našej práce nazvali *Tverského-Kahnemanov paradox*. Averzia voči strate v kombinácii s prevážením nízkych pravde-

podobností viedla podľa psychologických experimentov k tolerancii voči riziku v pozitívnych hrách z dôvodu nádeje na vysoký zisk a k averzii voči riziku v negatívnych hrách z dôvodu strachu z veľkej straty. Averzia voči strate v kombinácii s podvážením stredných a vysokých pravdepodobností viedla podľa psychologických experimentov k averzii voči riziku v pozitívnych hrách z dôvodu strachu zo sklamania, ale tolerancii voči riziku v negatívnych hrách z dôvodu nádeje na vyhnutie sa strate.

Obr. 1.3: Náčrt funkcie hodnoty



Zdroj: autor

Druhým meritórnym rozdielom kumulatívnej prospektovej teórie od teórie očakávaného úžitku bola implementácia referenčného bodu. *Referenčný bod* je „predchádzajúci stav, voči ktorému sa zisky a straty posudzujú“ (Kahneman, 2012, str. 302). V teórii očakávaného úžitku sa výsledky určitej hry porovnávajú podľa absolútnych hodnôt, preto tým referenčným bodom je hodnota 0. Dôsledkom je akákoľvek kladná hodnota považovaná za zisk a akákoľvek záporná hodnota považovaná za stratu. Psychologickými experimentmi sa preukázalo, že ľudia sa nerozhodujú podľa absolútnych hodnôt výsledkov hry, ale podľa zmeny voči ich referenčnému bodu (Baláž, 2009, str. 74). Vstupnou hodnotou do modelu kumulatívnej prospektovej teórie je teda rozdiel výsledku určitej hry od referenčného bodu hráča.

Matematický predpis funkcie hodnoty v modeli kumulatívnej prospektovej teórie so zahrnutou averziou voči strate a referenčným bodom je (Au, 2014, str. 4)

$$v(x_i - SQ) = \begin{cases} u^+(x_i - SQ), & \text{ak } x_i > SQ \\ -\lambda_L u^-(x_i - SQ), & \text{ak } x_i \leq SQ, \end{cases}$$

kde $v(x_i - SQ)$ je rastúca funkcia hodnoty rozdielu i -teho výsledku hry G s hodnotou x_i od referenčného bodu hráča s hodnotou SQ ,

$u^+(x_i - SQ)$ je rastúca funkcia užitočnosti pre zisky,

$u^-(x_i - SQ)$ je rastúca funkcia užitočnosti pre straty,

$\lambda_L \geq 1$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci váhu straty,

V kumulatívnej prospektovej teórii sú výsledky určitej hry zoradené podľa ich absolutnej hodnoty ako $x_1 \geq \dots \geq x_K \geq 0 \geq x_{K+1} \dots \geq x_N$, kde $0 \leq K \leq N$ a výstupom modelu zmienenej teórie je očakávaný úžitok vypočítaný pre takúto hru (Baláž, 2009, str. 88)

$$\begin{aligned} CPTU(G) = & \sum_{i=1}^K \left[w^+(p_i + \dots + p_1) - w^+(p_{i-1} + \dots + p_1) \right] v(x_i - SQ) \\ & + \sum_{i=K+1}^N \left[w^-(p_i + \dots + p_N) - w^-(p_{i-1} + \dots + p_N) \right] v(x_i - SQ), \end{aligned}$$

kde $CPTU$ je očakávaný úžitok hry G vypočítaný modelom kumulatívnej prospektovej teórie,

$w_i^+ = w^+(p_i + \dots + p_2 + p_1)$ a $w_i^- = w^-(p_i + \dots + p_{N-1} + p_N)$ sú monotónne rastúce funkcie váh objektívnych pravdepodobností hry G , pričom platí

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^K w_i^+ & \leq 1, w_i^+ \in \langle 0; 1 \rangle, w^+(0) = 0, w^+(1) = 1, \\ \sum_{i=K+1}^N w_i^- & \leq 1, w_i^- \in \langle 0; 1 \rangle, w^-(0) = 0, w^-(1) = 1, \\ \sum_{i=1}^N p_i & = 1, p_i \in \langle 0; 1 \rangle, \end{aligned}$$

$v(x_i - SQ)$ je rastúca funkcia hodnoty rozdielu i -teho výsledku hry G s hodnotou x_i od referenčného bodu hráča s hodnotou SQ ,

K je počet ziskových výsledkov hry G ,

$N \geq K$ je celkový počet výsledkov hry G .

1.4 Modely konfiguračných váh

Kumulatívna prospektová teória spôsobila revolúciu v behaviorálnej ekonómii svojím vysvetlením mnohých psychologických fenoménov pri ekonomickom rozhodovaní, avšak novšie psychologické experimenty uskutočnené pod vedením profesora psychológie Michaela H. Birnbauma poukázali na jej deficit. Medzi psychologickými experimentmi uskutočnenými pod vedením Michaela H. Birnbauma sú najznámejšie dva, ktoré sme si pre účely našej práce nazvali *Birnbaumov paradox*. V uvedenom paradoxe si hráči vyberali medzi dvomi urnami obsahujúcimi guľôčky rôznych farieb. Podľa vybranej farby bolo možné vyhrať určitú sumu peňazí. Hry sa hrali s časovým odstupom a uviedli sme ich v tab. 1.3. Podľa teórie očakávaného úžitku ako aj kumulatívnej prospektovej teórie, ak by si hráč vybral hru 1.5 v experimente 1.3, mal by si vybrať aj hru 1.7 v experimente 1.4, a ak si hráč vybral hru 1.6 v experimente 1.3, mal by si vybrať aj hru 1.8 v experimente 1.4 z dôvodu nepriameho predpokladu *princípu zlučovania*, t. j. zlúčenie výsledkov určitej hry alebo ich rozdelenie na viac výsledkov, nemení celkový úžitok z danej hry (Baláž, 2009, str. 160). Výsledky Birnbaumových experimentov však ukázali, že kým si 63 % hráčov v experimente 1.3 vybralo hru 1.6, v experimente 1.2 si až 80 % hráčov vybralo hru 1.7 (Baláž, 2009, str. 161).

Tab. 1.3: Birnbaumov paradox

Experiment 1.3				Experiment 1.4			
Hra 1.5		Hra 1.6		Hra 1.7		Hra 1.8	
Zisk [USD]	p [%]	Zisk [USD]	p [%]	Zisk [USD]	p [%]	Zisk [USD]	p [%]
100	85,00	100	85,00	100	85,00	100	95,00
50	10,00	100	10,00	50	15,00	7	5,00
50	5,00	7	5,00				

Zdroj: autor podľa (Baláž, 2009, str. 161)

Tieto a ďalšie podobné experimenty podnietili Michaela H. Birnbauma k tvorbe viacerých *modelov konfiguračných váh*, v ktorých jednotlivé výsledky určitej hry sa môžu zlučovať alebo rozdeľovať. Z hry s dvoma možnými výsledkami sa tak môže stať hra s tromi možnými výsledkami a naopak (Baláž, 2009, str. 159). Na rozdiel od nelineárneho váženia pravdepodobností používaného v kumulatívnej prospektovej teórii používajú modely konfiguračných váh konfigurácie jednotlivých výsledkov hry.

Reprezentatívnym modelom z tejto kategórie modelov s experimentálnou bázou tvoriacu psychologické experimenty s viac ako 11 000 účastníkmi (Baláž, 2009, str. 154) je *model transferu pozornosti*, v ktorom celkový úžitok z určitej hry sa vypočíta ako vážený priemer úžitkov jednotlivých výsledkov tejto hry v závislosti od pravdepodobnosti a poradia. Váha jednotlivých možných výsledkov tejto hry vyplýva z transferu pozornosti z jedného možného výsledku na druhý. Matematický aparát tohto modelu požíva pre celkový objem a smer prerozdelennej pozornosti špeciálny parameter δ_{TAX} , ktorý je kladný pre hráča s averziou voči riziku, t. j. keď sa pozornosť prenáša z výsledku hry G s vyššou hodnotou na výsledok hry G s nižšou hodnotou a záporný pre hráča s toleranciou voči riziku, t. j. keď sa pozornosť prenáša z výsledku hry G s nižšou hodnotou na výsledok hry G s vyššou hodnotou. Pri hodnote parametra $\delta_{TAX} = 0$ nedochádza k transferu pozornosti. Výstupom modelu transferu pozornosti je očakávaný úžitok vypočítaný pre určitú hru (Baláž, 2009, box 1.18)

$$TAXU(G) = \frac{\sum_{i=1}^N t(p_i)u(x_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^i [u(x_i) - u(x_k)] w(p_i, p_k, N)}{\sum_{i=1}^N t(p_i)},$$

kde $TAXU$ je očakávaný úžitok hry G vypočítaný modelom transferu pozornosti,

$w(p_i, p_k, N)$ je váha transferu z k -teho výsledku hry G na i -ty výsledok hry G definovaná predpisom

$$w(p_i, p_k, N) \begin{cases} \frac{\delta_{TAX} t(p_k)}{N+1}, & \text{ak } \delta_{TAX} > 0 \\ \frac{\delta_{TAX} t(p_i)}{N+1}, & \text{ak } \delta_{TAX} \leq 0, \end{cases}$$

$t(p) = p^\gamma$ je striktne monotónna funkcia pravdepodobnosti,

p_i je objektívna pravdepodobnosť realizácie i -teho výsledku hry G , pričom platí

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1, p_i \in \langle 0; 1 \rangle,$$

$\gamma \in (0; 1)$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci zakrivenie funkcie,

δ_{TAX} je reálny konštantný parameter vyjadrujúci objem a smer prerozdelennej pozornosti,

$u(x_i)$ je rastúca funkcia užitočnosti z i -teho výsledku hry G s hodnotou x_i ,

N je celkový počet výsledkov hry G .

1.5 Modely kalkulujúce s faktorom ľútosti

Nezávisle na modeloch pracujúcich so subjektívnou váhou pravdepodobností, akým bol aj model kumulatívnej prospektovej teórie, alebo modeloch konfiguračných váh, sa niektorí ekonómi snažili psychologické fenomény a ekonomické paradoxy pri ekonomickom rozhodovaní vysvetliť prostredníctvom *averzie voči ľútosti*, pretože ľútosť je silnejšou emóciou ako bolesť zo straty (Baláž, 2009, str. 304). Ľútosť je „*emócia vyplývajúca z pocitu, že sme neprijali správne rozhodnutie*“ (Baláž, 2009, str. 304) vystihnutá *nákladmi obetovanej príležitosti*, ktoré sú v ekonomickej teórii definované ako „*hodnota obetovaných statkov alebo stratených možností*“ (Vainiene et al., 2006), a teda je to „*bolesť generovaná pocitom zodpovednosti za stratu*“ (Baláž, 2009, str. 304), čoho dôsledkom je averzia voči ľútosti vnímaná intenzívnejšie ako averzia voči strate a jej efektom je kontrastná voľba medzi dvomi hrami v prípade, že by ich hráč posudzoval navzájom, ako keby ich posudzoval nezávisle na sebe. Averzia voči ľútosti vedie k uprednostňovaniu minimalizácie ľútosti pred maximalizáciou zisku (Baláž, 2009, str. 307) a má psychologickými výskumami signifikantne preukázaný vplyv na ekonomické rozhodnutia, obzvlášť pri investovaní na finančných trhoch (Baláž, 2009, str. 304-308), z dôvodu participácie na averzii voči riziku v pozitívnych hrách, avšak tolerancii voči riziku v negatívnych hrách.

Príčinou averzie voči ľútosti v ľudskom mozgu sa javí byť neurónová aktivita amygdaly, pretože amygdala je aktívna nielen v negatívnych hrách, ale aj v pozitívnych hrách (De Martino et al., 2006, str. 686; Roiser et al., 2009, str. 5988). Viacerými experimentálnymi neurovedeckými štúdiami (De Martino et al., 2006; Roiser et al., 2009) pre stredné a vysoké pravdepodobnosti bola zaznamenaná vyššia neurónová aktivita amygdaly po výbere bezrizikovej hry v kontraste k výberu rizikovej hry v pozitívnych hrách z dôvodu odmietnutia rizikovej hry, ale vyššia po výbere rizikovej hry v kontraste k výberu bezrizikovej hry v negatívnych hrách z dôvodu odmietnutia bezrizikovej hry. Neurónová aktivita amygdaly tak participuje na Tverského-Kahnemanovom paradoxe.

Reprezentatívnym modelom z tejto kategórie modelov je *model teórie ľútosti*, ktorý sa nesnažil nahradiť model teórie očakávaného úžitku, ale doplniť pridaním faktora očakávanej ľútosti. Model bol neskôr viacerými autormi upravený a príkladom zdokonalenej verzie tohto modelu je *rozšírený model teórie ľútosti* definovaný predpisom

$$ERTU(G) = \sum_{i=1}^N p_i R(u(x_i), u(\tilde{x})),$$

kde $ERTU$ je očakávaný úžitok hry G vypočítaný rozšíreným modelom teórie lútosti, p_i je objektívna pravdepodobnosť realizácie i -teho výsledku hry G , pričom platí

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1, p_i \in \langle 0; 1 \rangle,$$

$u(x_i)$ je rastúca funkcia užitočnosti z i -teho výsledku hry G s hodnotou x_i ,

$u(\tilde{x})$ je rastúca funkcia užitočnosti z výsledkov alternatívnej hry G' s hodnotou $\tilde{x}$,

N je celkový počet výsledkov hry G ,

$R(u(x_i), u(\tilde{x}))$ je rastúca *funkcia lútosti* definovaná predpisom (Ge, 2018, str. 7)

$$R(u(x_i), u(\tilde{x})) = \begin{cases} -\lambda_R [- (u(x_i) - u(\tilde{x}))]^\xi, & \text{ak } u(x_i) < u(\tilde{x}) \\ 0, & \text{ak } u(x_i) = u(\tilde{x}) \\ [u(x_i) - u(\tilde{x})]^\eta, & \text{ak } u(x_i) > u(\tilde{x}), \end{cases}$$

pre

$$u(\tilde{x}) = \rho \tilde{x}_{\max} + (1 - \rho) \tilde{x}_{\min},$$

kde ρ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci váhu, ktorú dávame najvyššiemu výsledku alternatívnej hry G' ,

$\tilde{x}_{\max}$ je hodnota najvyššieho výsledku alternatívnej hry G' ,

$\tilde{x}_{\min}$ je hodnota najnižšieho výsledku alternatívnej hry G' ,

$\lambda_R \geq 1$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci váhu lútosti,

$\xi > 0$ a $\eta > 0$ sú reálne konštantné parametre vyjadrujúce zakrivenie funkcie.

2 Afektívne a kognitívne procesy pri ekonomickom rozhodovaní

Daniel Kahneman vo svojej knihe „Thinking, Fast and Slow“ (Kahneman, 2012) publikovanej v roku 2011 analyzoval *teóriu duálnych procesov* popisujúcu prijímanie ekonomických rozhodnutí vychádzajúc zo svojich mnohoročných skúseností ako psychológ. Podľa Daniela Kahnemana sa na prijímaní ekonomických rozhodnutí zúčastňujú dva systémy, ktoré jednoducho označuje ako *Systém 1* a *Systém 2* (Kahneman, 2012, str. 26-27). Výskum afektívnych a kognitívnych procesov pri ekonomickom rozhodovaní v kontexte teórie duálnych procesov sa stal východiskom pre neuroekonómiu.

Systém 1 v teórii duálnych procesov reprezentujúci afektívne procesy pri ekonomickom rozhodovaní je „*rýchly, intuitívny a emocionálny*“ (Kahneman, 2012). „*Vďaka svojej automatickosti, ľahkosti fungovania a rýchlosti umožňuje Systém 1 pohotovo reagovať na bežné životné situácie i prijímať intuitívne riešenia pri mimoriadnych okolnostiach.*“ (Baláž, 2009, str. 171) Afektívne procesy pri ekonomickom rozhodovaní sú spojené okrem už zmieneného striata a amygdaly v predchádzajúcej kapitole aj s IFG a inzulárnym kortexom (predovšetkým s AI) aktivujúce sa pri znechutení (Mohr, Biele, Heekeren, 2010, str. 6617).

Systém 2 v teórii duálnych procesov reprezentujúci kognitívne procesy pri ekonomickom rozhodovaní je „*pomalý, rozvážny a logický*“ (Kahneman, 2012). „*Systém 2 pracuje pomalšie ako Systém 1, lebo analýza, abstrakcia a prijímanie logických úsudkov si vyžadujú viac času.*“ (Baláž, 2009, str. 172) Kognitívne procesy pri ekonomickom rozhodovaní sú spojené s DMPFC a ACC spracúvajúce riziko v kognitívnej rovine (Mohr, Biele, Heekeren, 2010, str. 6618) a DLPFC a PPC, ktoré sú spojené s kognitívnou kontrolou (Mohr, Biele, Heekeren, 2010, str. 6618).

2.1 Časové diskontovanie

Ekonomické rozhodovanie je okrem výšky očakávaných hodnôt jednotlivých výsledkov určitej hry a pravdepodobností ich realizácií ovplyvnené aj časom ich realizácií. Hráč z očakávanej hodnoty výsledku určitej hry realizovanej ihneď by nemusel mať rovnaký úžitok, ak by daný výsledok tejto hry bol realizovaný až o rok. Vzťahy medzi úžitkami v rôznych časoch realizácií výsledkov určitej hry popisujú *modely časového*

diskontovania prenásobujúce úžitok diskontným faktorom vyjadrujúci tento vzťah.

Prvý model časového diskontovania ekonóma Paula A. Samuelsona predložený v roku 1937 používal *exponenciálne diskontovanie* (Bačová, 2016, str. 14). Jeho model bol ďalšími ekonómami modifikovaný do rozličných podôb a exponenciálne diskontovanie sa tak zaužívalo v ekonomickej teórii. Príkladom diskontného faktora pre exponenciálne diskontovanie funkcie užitočnosti je (McClure et al., 2004, str. 504)

$$DF(\tau) = \delta^\tau,$$

kde $\delta \in (0; 1)$ je diskontná miera rovnaká bez ohľadu na to, kedy výsledky nastanú,

$\tau \geq 0$ je čas realizácie výsledku určitej hry.

Exponenciálne diskontovanie je časovo konzistentné, t. j. hodnoty klesajú konštantným tempom. Samuelsonov model exponenciálneho diskontovania však nevychádzal z empirických výskumov (Bačová, 2016, str. 14).

Mnoho empirických výskumov preukázalo časovo nekonzistentné ekonomické rozhodovanie (Bačová, 2016, str. 16). Hráči sa inak správali v prípade okamžitých rozhodnutí a inak v prípade oneskorených rozhodnutí. Zaužívaným časovo nekonzistentným diskontovaním je *hyperbolické diskontovanie*. Príkladom diskontného faktora pre hyperbolické diskontovanie funkcie užitočnosti je (Bačová, 2016, str. 17)

$$DF(\tau) = \frac{1}{1 + \delta\tau},$$

kde $\delta \in (0; 1)$ je diskontná miera rovnaká bez ohľadu na to, kedy výsledky nastanú,

$\tau \geq 0$ je čas realizácie výsledku určitej hry.

Možnou príčinou časovo nekonzistentného ekonomického rozhodovania je impulzívnejšie správanie pri okamžitých rozhodnutiach a racionálnejšie správanie pri oneskorených rozhodnutiach. Časť neuroekonómov toto správanie vysvetľuje teóriou duálnych procesov. Kognitívny neurovedec Samuel M. McClure sa rozhodol preskúmať teóriu duálnych procesov v časovom diskontovaní a so svojím tímom zisťoval, ktoré oblasti mozgu sú aktívne pri okamžitých ziskoch a ktoré pri oneskorených ziskoch (McClure et al., 2004). Navrhli *Beta-Delta model*, kde β -systém reprezentuje Systém 1 v teórii duálnych procesov a δ -systém reprezentuje Systém 2 v teórii duálnych procesov. Záverom ich štúdie bolo zistenie, že určité oblasti mozgu ako striatum boli aktívnejšie v prípade okamžitých realizácií výsledkov určitej hry a iné oblasti mozgu ako

DLPFC boli aktívnejšie v prípade oneskorených realizácií výsledkov určitej hry. Beta-Delta model je reprezentovaný *kvázi-hyperbolickým diskontovaním*. Príkladom diskontného faktora pre kvázi-hyperbolické diskontovanie funkcie užitočnosti je (Baláž, 2009, str. 193)

$$DF(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{ak } \tau = 0 \\ \beta\delta^\tau, & \text{ak } \tau > 0, \end{cases}$$

kde $\beta \in (0; 1)$ je špeciálna (emocionálna) váha kladená na okamžité realizácie výsledkov určitej hry,

$\delta \in (0; 1)$ je diskontná miera rovnaká bez ohľadu na to, kedy výsledky nastanú,

$\tau \geq 0$ je čas realizácie výsledku určitej hry.

Avšak iná časť neuroekonómov sa prikláňa k názoru, že zvýšenou neurónovou aktivitou pri okamžitých realizáciách výsledkov určitej hry sa nepreukázalo, že mozog má oblasti obzvlášť citlivé na okamžité realizácie výsledkov určitej hry, ale preukázala sa len signalizácia vyššieho očakávaného úžitku z týchto okamžitých realizácií výsledkov danej hry v porovnaní s oneskorenými realizáciami výsledkov danej hry. Napríklad experimentálnou neurovedeckou štúdiou realizovanou neuroekonomom Paulom W. Glimcherom (Kable, Glimcher, 2007) sa potvrdili McClurove výsledky, avšak spochybnili jeho závery o dvoch odlišných systémoch procesov vyhodnocujúcich zvlášť okamžité realizácie výsledkov určitej hry a zvlášť oneskorené realizácie výsledkov určitej hry. Podľa Glimcherovho zistenia boli oblasti mozgu, ktoré boli aktívne v prípade okamžitých realizácií výsledkov určitej hry, aktívne v menšej miere aj v prípade oneskorených realizácií výsledkov určitej hry, čo signalizuje skôr len zníženie očakávaného úžitku s oneskoreným realizovaním výsledku tejto hry. Uvedenou neurovedeckou štúdiou sa zároveň potvrdili závery o nekonzistentnom časovom diskontovaní a zistila sa možnosť modelovať neurónovú aktivitu striata vo vzťahu k času realizácie výsledku určitej hry hyperbolickým diskontovaním. Rozdiel medzi diskontnou mierou odhadnutou neurónovou aktivitou striata a diskontnou mierou odhadnutou empirickým pozorovaním nebol signifikantný (Kable, Glimcher, 2007, obr. 6).

Kým štúdie McClurea a Glimchera sa zamerali na diskontovanie pozitívnych výsledkov určitej hry, analýza ďalších šiestich štúdií (Molouki, Hardisty, Caruso, 2019) zameraných aj na diskontovanie negatívnych výsledkov určitej hry ukázala signifikantne nižšiu mieru diskontovania negatívnych výsledkov v kontraste k pozitívnym výsledkom.

2.2 Afektívne averzie

Ekonomické rozhodovanie v sebe zahŕňa okrem kalkulácie očakávaných ziskov a strát aj kalkuláciu rizík. Riziko v kombinácii s ďalšími faktormi vyvoláva u ľudí rôzne averzie spojené s afektívnymi procesmi pri ekonomickom rozhodovaní. Tieto afektívne procesy sú súčasťou moderného neuroekonomického bádania spoločne s ich vzťahmi ku kognitívnym procesom pri ekonomickom rozhodovaní.

2.2.1 Averzia voči riziku

Hráči pri ekonomickom rozhodovaní sú často vystavení hrám s neistým výsledkom. Podľa profesora psychológie a neurovedy Briana Knutsona neistota vyvoláva emocionálne reakcie v mozgu. Pozitívne podnety vyvolávajú pozitívne emocionálne reakcie a neurónovú aktivitu v striate, záporné podnety vyvolávajú záporné emocionálne reakcie a neurónovú aktivitu v AI (Wu, Sacchet, Knutson, 2012, str. 3). Neurovedeckými experimentmi so svojím kolegom (Knutson, Kuhnen, 2005) zistili, že zvýšenie neurónovej aktivity striata viedlo k zvýšeniu tolerancie voči riziku. Naproti tomu zvýšenie neurónovej aktivity AI viedlo k zvýšeniu averzie voči riziku. Knutson svojimi experimentmi preukázal, že rôzne oblasti mozgu môžu mať rozdielny vplyv na pristupovanie k rizikovým hrám.

Ďalšie experimentálne neurovedecké štúdie (Christopoulos et al., 2009; Mohr, Biele, Heekeren, 2010) sa zamerali na výskum vplyvu rozdielnych oblastí mozgu na ekonomické rozhodovanie v rizikových hrách. Graf A na obr. 2.1 na str. 32 znázorňuje prínos jednotlivých oblastí mozgu k pravdepodobnosti výberu rizikovej hry, kde x -ová os reprezentuje neurónovú aktivitu jednotlivých oblastí mozgu vyjadrenú pomocou signálu BOLD a y -ová os reprezentuje pravdepodobnosť výberu rizikovej hry.

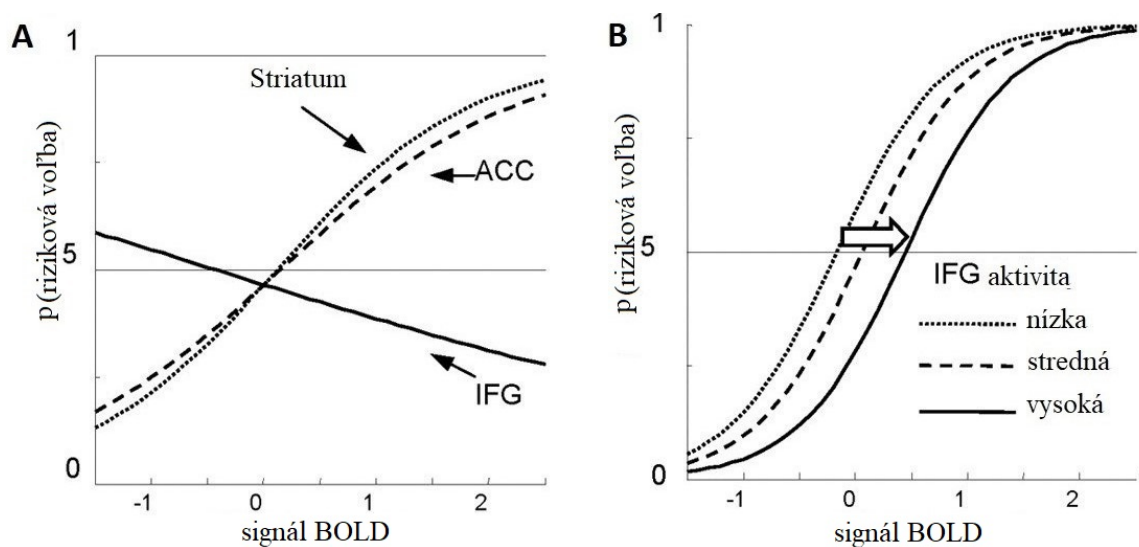
Čím je vyššia pravdepodobnosť výberu rizikovej hry, tým je vyššia tolerancia voči riziku. S toleranciou voči riziku pozitívne korelovala neurónová aktivita striata a ACC. Preukázanú pozitívnu koreláciu medzi neurónovou aktivitou striata a toleranciou voči riziku znázornenú grafom A na obr. 2.1 na str. 32 sme považovali len za dôsledok vzťahu medzi neurónovou aktivitou striata a očakávanou výškou zisku, pretože vyššou očakávanou výškou zisku sa zvyšuje atraktivnosť danej hry.

Podľa viacerých experimentálnych neurovedeckých štúdií (De Martino et al., 2006; Fukunaga, Purcell, Brown, 2018) ACC meria riziko objektívnym spôsobom, nesúvisí

však priamo s averziou alebo toleranciou voči riziku, ale signalizuje skôr rozdiel zvoleného rizikového rozhodnutia od preferovaného na základe minulých rozhodnutí. Rovnakú funkciu vo vzťahu k riziku ako ACC zastupuje podľa viacerých experimentálnych neurovedeckých štúdií (Venkatraman et al., 2009; Xue et al., 2009) aj DMPFC, ktorého neurónová aktivita nesúvisí s výberom konkrétneho typu určitej hry, ale s výberom hier nesúladnými s preferovanou rozhodovacou stratégiou. DMPFC bol v týchto štúdiách aktivovaný iba pri výbere rizikovej hry, pričom u hráčov so silnejšou preferenciou rizika, t. j. tolerantní voči riziku, bola nižšia úroveň neurónovej aktivity DMPFC pri výbere rizikovej hry v porovnaní s hráčmi s nižšou preferenciou rizika, t. j. averzní voči riziku.

S toleranciou voči riziku negatívne korelovala neurónová aktivita IFG. Graf B na obr. 2.1 znázorňuje účinok neurónovej aktivity IFG na pravdepodobnosť výberu rizikovej hry, kde x -ová os reprezentuje neurónovú aktivitu striata a ACC a y -ová os reprezentuje pravdepodobnosť výberu rizikovej hry. Vykreslené funkcie predstavujú neurónovú aktivitu IFG – nízku, strednú a vysokú. Čím vyššia je neurónová aktivita IFG, tým je potrebná vyššia kompenzácia neurónovej aktivity striata a/alebo ACC na zachovanie výberu rovnakej rizikovej hry ako pri nízkej neurónovej aktivite IFG.

Obr. 2.1: (A) Vzťah medzi neurónovou aktivitou jednotlivých oblastí mozgu a pravdepodobnosťou výberu rizikovej hry a (B) účinok neurónovej aktivity IFG na pravdepodobnosť výberu rizikovej hry



Zdroj: (Christopoulos et al., 2009, obr. 4B,C)

Kým AI a IFG spracúvajú riziko emocionálnym spôsobom a ACC a DMPFC spracúvajú riziko kognitívnym spôsobom, ani jedna z týchto oblastí mozgu nie je primárne zodpovedná za samotné rozhodnutie. Neuroekonóm Peter N. C. Mohr v metaanalýze neuroekonomických štúdií venujúcich sa riziku (Mohr, Biele, Heekeren, 2010) identifikoval oblasti mozgu aktívne nielen v prípade spracovania rizika, ale aj v prípade rozhodovania o riziku. Podľa uvedenej metaanalýzy sa AI síce zapája do spracovania emocionálneho rizika, DMPFC do spracovania kognitívneho rizika, avšak DLPFC a PPC zohrávajú špecifickú úlohu až po spracovaní rizika a sú zodpovedné za samotné rozhodnutie.

2.2.2 Averzia voči strate

Na averzii voči strate, respektíve na Tverského-Kahnemanovom paradoxe participuje podľa experimentálnej neurovedeckej štúdie (Zheng, Wang, Zhu, 2010) aj neurónová aktivita AI a IFG. Kým v prípade pozitívnych hier korelovala neurónová aktivita AI a IFG v uvedenej štúdii s averziou voči riziku, v prípade negatívnych hier korelovala neurónová aktivita AI a IFG v uvedenej štúdii s toleranciou voči riziku, čo sme vzhľadom na fakt, že AI a IFG sa aktivujú pri znechutení v prípade negatívnych hier, rozumeli skôr ako *averziu voči istote*. Neurónová aktivita AI a IFG bola vyššia po výbere bezrizikovej hry v kontraste k výberu rizikovej hry v pozitívnych hrách z dôvodu odmietnutia rizikovej hry, ale vyššia po výbere rizikovej hry v kontraste k výberu bezrizikovej hry v negatívnych hrách z dôvodu odmietnutia bezrizikovej hry. Pri nízkych hodnotách výsledkov hry sa hráči danej neurovedeckej štúdie rozhodli riskovať v oboch prípadoch typu hier.

Tverského-Kahnemanovo pozorovanie averzie voči strate sme vzhľadom na uvedené poznatky z neuroekonomie považovali za kombináciu averzie voči lútosti v pozitívnych aj negatívnych hrách, averzie voči riziku v pozitívnych hrách a averzie voči istote v negatívnych hrách.

2.2.3 Averzia voči nejednoznačnosti

Ekonom Daniel Ellsberg v roku 1961 publikoval sériu experimentov s dvomi urnami (Baláž, 2009, str. 115). V urne 1 bolo 100 červených a čiernych guľôčok neznámeho pomeru. V urne 2 bolo 50 červených a 50 čiernych guľôčok. Hrali sa štyri experimenty:

- V experimente 2.1 sa ťahalo z urny 1 a bola možnosť staviť na jednu farbu.
- V experimente 2.2 sa ťahalo z urny 2 a bola možnosť staviť na jednu farbu.
- V experimente 2.3 sa ťahalo z oboch urien a bola možnosť staviť na červenú guľôčku z jednej z urien.
- V experimente 2.4 sa ťahalo z oboch urien a bola možnosť staviť na čiernu guľôčku z jednej z urien.

Podľa teórie očakávanej užitočnosti, ak by boli hráči indiferentní v experimentoch 2.1 a 2.2, mali by byť indiferentní aj v experimentoch 2.3 a 2.4. Ukázalo sa, že kým v experimentoch 2.1 a 2.2 boli hráči indiferentní, v experimentoch 2.3 a 2.4 si zväčša vyberali možnosť staviť na guľôčku z urny 2. Tým boli porušené axiómy kompletnosti a monotónnosti teórie očakávaného úžitku, pretože ak si v experimente 2.3 hráči vybrali možnosť staviť na červenú guľôčku z urny 2, znamenalo by to, že očakávali v urne 1 viac čiernych ako červených guľôčok. Potom by si v hre 2.4 mali podľa teórie očakávaného úžitku vybrať možnosť staviť na guľôčku z urny 1 (Baláž, 2009, str. 115-117). Tieto experimenty sa stali po jeho tvorcovi známe ako *Ellsbergov paradox*.

Ellsbergov paradox je súčasťou hier v podmienkach nejednoznačnosti, keď pravdepodobnosti reprezentujúce eventúálnu existenciu alebo absenciu nešpecifikovaných udalostí alebo javov nie sú známe. Dôsledkom tohto paradoxu je *avergia voči nejednoznačnosti*, t. j. preferovanie jednoznačnosti pred nejednoznačnosťou (Baláž, 2009, str. 117). Príčina averzie voči nejednoznačnosti nesúvisí s funkciou užitočnosti, funkciou váh ani s averziou voči strate, pretože v týchto atribútoch nebol podľa nedávnej experimentálnej neurovedeckej štúdie (Attema, Bleichrodt, L'Haridon, 2018) zistený signifikantný rozdiel hier v podmienkach nejednoznačnosti od hier v podmienkach rizika. Príčinou averzie voči nejednoznačnosti v ľudskom mozgu sa javia byť rovnaké oblasti, ako oblasti spojené s rizikom, ktorých ale neurónová aktivita je silnejšia v prípade hier v podmienkach nejednoznačnosti v porovnaní s hrami v podmienkach rizika (Huettel et al., 2006, str. 767).

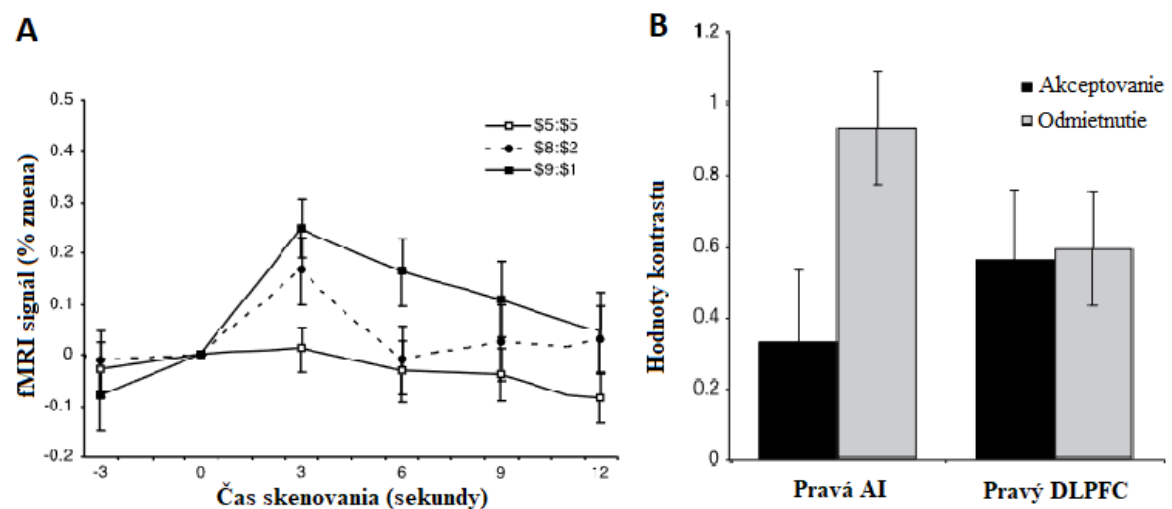
2.3 Ultimátna hra

Ultimátna hra je jeden z typov psychologických experimentov, ktorý je v priamom protiklade s racionálnym správaním. V uvedenej hre sú dvaja hráči a ponúknutá určitá

suma peňazí, napr. 100 EUR. Hráč 1 navrhne pomer, v akom si tieto peniaze rozdelí s hráčom 2. Ak by hráč 2 tento pomer akceptoval, obaja by dostali čiastku z tejto sumy peňazí podľa pomeru navrhnutým hráčom 1. Ak by ale hráč 1 tento pomer odmietol, ani jeden z hráčov by nič nedostal. Podľa teórie očakávaného úžitku by mal hráč 2 akceptovať akúkoľvek nenulovú čiastku, pretože aj 1 EUR je viac ako 0 EUR. Psychologickými experimentmi (Sanfey et al., 2003; Tomasino et al., 2013) sa však preukázala tendencia ľudí v pozícii hráča 2 odmietat nízke čiastky ako nespravodlivé.

Kognitívny psychológ Alan G. Sanfey analyzoval ultimátnu hru neurovedeckými metódami (Sanfey et al., 2003). Výsledky jeho experimentu znázorňuje obr. 2.2. Na grafe A obr. 2.2 je znázornená zmena neurónovej aktivity AI hráča 2 pre rôzne pomery rozdelenia peňazí navrhnuté hráčom 1. Na grafe B obr. 2.2 je znázornená neurónová aktivita pravej AI a pravého DLPFC hráča 2 vo všetkých nespravodlivých ponukách kategorizovaných podľa následného akceptovania alebo odmietnutia. Sanfeyov experiment ukázal na neurónovú aktivitu AI ako príčinu odmietnutia nespravodlivej ponuky.

Obr. 2.2: (A) Neurónová aktivita AI hráča 2 v ultimátnej hre a (B) kontrast neurónovej aktivity AI a DLPFC v nespravodlivých ponukách



Zdroj: (Sanfey et al., 2003, obr. 2E, 3B)

V uvedenej Sanfeyovej experimentálnej neurovedeckej štúdii bola pri nespravodlivých ponukách zvýšená aj neurónová aktivita ACC. Aktivácia ACC, ktorá sa podieľa na detekcii kognitívneho konfliktu, v tejto hre mohla odrážať konflikt medzi kognitívnymi a emocionálnymi motiváciami (Sanfey et al., 2003, str. 1757). Iné experimentálne

neurovedecké štúdie (Tomasino et al., 2013; Cheng et al., 2017) tiež potvrdili aktiváciu DMPFC a ACC v ultimátnej hre v prípade nespravodlivých ponúk u hráča 2, pričom vyššia bola práve v prípade akceptovania takejto ponuky.

Kým Alan G. Sanfey sa vo svojej experimentálnej neurovedeckej štúdii zamerlal na AI, sociálna neurovedkyňa Daria Knoch sa vo svojej experimentálnej neurovedeckej štúdii (Knoch et al., 2006) viac zamerala na DLPFC. Použila nízko-frekvenčnú rTMS na zníženie kortikálnej excitability, čím dočasne potlačila neurónovú aktivitu pravého DLPFC. Po potlačení neurónovej aktivity pravého DLPFC bola miera akceptácie nespravodlivých ponúk násobne vyššia ako u kontrolnej skupiny, a to aj napriek zachovaniu vnímania týchto ponúk u daných hráčov rovnako nespravodlivých ako u kontrolnej skupiny (Knoch et al., 2006, obr. 1). Rovnaký výsledok bol v inej nedávnej experimentálnej neurovedeckej štúdii (Speitel, Traut-Mattausch, Jonas, 2019) dosiahnutý aj použitím katodickej tDCS, ktorá rovnako znižuje kortikálnu excitabilitu, v tomto prípade pravého DLPFC.

V súlade so závermi metaanalýzy Petra N. C. Mohra sme mohli konštatovať, že neurónová aktivita AI odráža averziu voči nespravodlivej ponuke, avšak DLPFC kontroluje AI a je zodpovedný za rozhodovanie o akceptácii nespravodlivej ponuky. Ak by sa neurónová aktivita DLPFC potlačila, informácia poskytnutá AI by bola ignorovaná.

2.4 Utopené náklady

Utopené náklady sú „náklady, ktoré už boli vynaložené, teda vznikli a nemôžu byť súčasťou, či budúcou aktivitou spätne zvrátené“ (Bačová et al., 2012, str. 163). Z dôvodu nezvratnosti utopených nákladov by mali byť pri racionálnom rozhodovaní ignorované v ekonomickej kalkulácii. Empirickými štúdiami sa však preukázal signifikantný vplyv utopených nákladov na ekonomické rozhodovanie (Bačová et al., 2012, str. 11). Pri finančnom rozhodovaní sa efekt utopených nákladov prejavuje nepokračovaním v ziskovom projekte z dôvodu skreslenia výsledkov už utopenými nákladmi alebo pokračovaním v stratovom projekte v snahe vykompenzovať tieto náklady potencionálnym prínosom (Bačová et al., 2012, str. 11-12).

V mozgu bola s efektom utopených nákladov podľa nedávnej experimentálnej neurovedeckej štúdie (Fujino et al., 2016) spojená neurónová aktivita AI, IFG, ACC a DLPFC. Za rozhodujúcu oblasť mozgu vo vzťahu k efektu utopených nákladov sa

podľa uvedenej štúdie považovala AI. Neurónová aktivita AI vysoko korelovala v sile efektu utopených nákladov. Čím viac boli hráči ovplyvnení efektom utopených nákladov, tým bola neurónová aktivita AI vyššia, čo v kombinácii s averziou voči strate znamenalo neriskovanie v prípade pozitívnych hier a riskovanie v prípade negatívnych hier. Zvýšená neurónová aktivita ACC naznačovala kognitívny konflikt. Aktivita DLPFC ovplyvňovala veľkosť efektu utopených nákladov prostredníctvom kontroly AI a IFG, čoho dôkazom je aj záver inej nedávnej experimentálnej neurovedeckej štúdie (Bogdanov, Ruff, Schwabe, 2017), v ktorej sa po použití anodickej tDCS zvyšujúcej kortikálnu excitabilitu pravého DLPFC, čím sa dočasne stimulovala neurónová aktivita pravého DLPFC, zvýšil efekt utopených nákladov.

3 Neuroekonomický model rozhodovania

Cielom našej diplomovej práce bolo *zostrojiť nový matematický model popisujúci ekonomické rozhodovanie* ako alternatívu k modelu teórie očakávaného úžitku, ako aj k modelu kumulatívnej prospektovej teórie, ktorý sme si nazvali neuroekonomický model rozhodovania, pretože východiskom k zostrojeniu nášho modelu boli aktuálne psychologické a neurovedecké poznatky vzťahujúce sa k správaniu ľudí pri ekonomickom rozhodovaní.

K uskutočneniu nášho cieľa sme si vytýčili **čiastkové ciele**, ktoré sme dosiahli zrealizovaním nasledovných krokov:

1. Pre *reflektovanie neurónovej aktivity jednotlivých oblastí mozgu naším modelom* sme v predošlých kapitolách dôkladne analyzovali a následne v tejto kapitole spravili syntézu aktuálnych poznatkov zo psychológie a neurovedy vzťahujúcich sa k ekonomickému rozhodovaniu.
2. Pre *matematickú formuláciu nášho modelu* sme si v tejto kapitole zadefinovali vlastné matematické funkcie a parametre popisujúce ekonomické rozhodovanie na základe analyzovaných poznatkov z oblasti psychológie a neurovedy.
3. Pre *preukázanie schopnosti modelu modelovať psychologické fenomény a ekonomické paradoxy* sme v poslednej kapitole aplikovali náš model na dané psychologické fenomény a ekonomické paradoxy.

3.1 Zosumarizovanie poznatkov neuroekonómie

Pre dosiahnutie nášho čiastkového cieľa *reflektovanie neurónovej aktivity jednotlivých oblastí mozgu naším modelom* sme analyzovali poznatky zo psychológie a neurovedy vo vzťahu k ekonomickému rozhodovaniu v prvej a druhej kapitole. Zistené poznatky z neuroekonómie súvisiace s ekonomickým rozhodovaním sme zosumarizovali do tab. 3.1 na str. 39. Z dôvodu symetrie medzi kalkuláciou očakávaného úžitku zo zisku a zo straty sme predpokladali subjektívne váženie rozhodnutia o strate a časové diskontovanie straty amygdalou.

Tab. 3.1: Zosumarizovanie poznatkov neuroekonómie

Názov oblasti mozgu	Funkcia
Striatum	Kalkulácia očakávanej veľkosti úžitku zo zisku Subjektívne váženie rozhodnutia o zisku Časové diskontovanie zisku Tolerancia voči riziku pri zisku
Amygdala	Kalkulácia očakávanej veľkosti úžitku zo straty Subjektívne váženie rozhodnutia o strate Časové diskontovanie straty Averzia voči ľútosti
AI a IFG	Averzia voči riziku pri zisku Averzia voči istote pri strate Averzia voči nejednoznačnosti pri zisku Averzia voči nespravodlivým ponukám
DMPFC a ACC	Miera odchylnosti od preferovanej voľby
DLPFC a PPC	Rozhodovanie o riziku

Zdroj: autor

3.2 Funkcie neurónového očakávaného úžitku

Pre dosiahnutie nášho čiastkového cieľa *matematická formulácia nášho modelu* sme si zadefinovali vlastné matematické funkcie a parametre reflektujúce funkcie daných oblastí mozgu zosumarizovaných v tab. 3.1. Medzi kľúčovými funkciami ľudského mozgu pri ekonomickom rozhodovaní bola aj kalkulácia očakávaného úžitku z možných výsledkov určitej hry. Zostrojili sme a popísali matematické funkcie reflektujúce kalkuláciu očakávaného úžitku vzťahujúce sa k rozdielnym faktorom, ku ktorým bolo východiskovým poznatkom zistenie o rozličných oblastiach mozgu pre kalkuláciu úžitku vo vzťahu k zisku a vo vzťahu k strate, pričom na odlíšenie parametrov týkajúcich sa ziskov a týkajúcich sa strát sme použili indexáciu, kde index „+“ sme používali pre ziskové zmeny výsledkov určitej hry od referenčného bodu hráča a index „–“ sme používali pre stratové zmeny výsledkov určitej hry od referenčného bodu hráča.

3.2.1 Funkcia neurónového očakávaného úžitku zo zisku

Výsledkom našej analýzy experimentálnych neurovedeckých štúdií bolo zistenie, že nárast neurónovej aktivity striata bol úmerný s nárastom očakávanej výšky úžitku ziskového výsledku určitej hry, pravdepodobnosti jeho realizácie a času jeho realizácie. Na reflektovanie neurónovej aktivity striata sme si zadefinovali *funkciu neurónového očakávaného úžitku zo zisku*.

i) Závislosť od hodnoty zisku určitej hry v našej funkcii neurónového očakávaného úžitku zo zisku sme modelovali ovplyvnenú tromi faktormi:

1. Rozdielom absolútnej hodnoty zisku od referenčného bodu hráča z dôvodu psychologického pozorovania, že hráči kalkulujú len zmeny voči ich referenčnému bodu.
2. Konkávnou závislosťou medzi úžitkom z očakávanej výšky zisku a samotnou výškou zisku pri vysokých hodnotách ziskov vzhľadom na klesajúci marginálny úžitok z dôvodu limit hladín hormónov a neurotransmiterov, ktorú sme vyjadrili prostredníctvom reálneho konštantného parametra $\nu^+ \in \langle 0; 1 \rangle$ vyjadrujúceho zakrivenie funkcie a lineárnou závislosťou medzi úžitkom z očakávanej výšky zisku a samotnou výškou zisku pri nízkych hodnotách ziskov vzhľadom na konštantný marginálny úžitok, z dôvodu snahy získať prostriedky na naplnenie určitého štandardu hráča. Až po naplnení tohto určitého štandardu hráča by začal jeho marginálny úžitok klesať. Hranicu, od ktorej by začal marginálny úžitok hráča klesať, sme vyjadrili parametrom $\varepsilon^+ > 0$.
3. Zosilneným vnímaním očakávanej výšky zisku v prípade hráča s toleranciou voči riziku, ktoré sme vyjadrili prostredníctvom reálneho konštantného parametra $\lambda^+ > 0$ vyjadrujúceho sklon funkcie. Pre hráča s toleranciou voči riziku by bola hodnota tohto parametra vyššia ako 1.

Závislosť od hodnoty zisku určitej hry ovplyvnenú týmito faktormi sme vyjadrili rovnicou (3.1), v ktorej sme výrazom $\lambda^+ (\varepsilon^+ - \varepsilon^{+\nu^+})$ zaistili spojitosť medzi konštantným a klesajúcim marginálnym úžitkom, t. j.

$$\begin{aligned} NEUG(x_i^+) &= u^+(x_i^+) \\ &= \begin{cases} \lambda^+ (x_i^{+\nu^+} + \varepsilon^+ - \varepsilon^{+\nu^+}), & \text{ak } x_i^+ > \varepsilon^+ \\ \lambda^+ x_i^+, & \text{ak } x_i^+ \leq \varepsilon^+, \end{cases} \end{aligned} \quad (3.1)$$

pričom

$$x_i^+ = x_i^+(x_i, SQ) = \begin{cases} x_i - SQ, & \text{ak } x_i > SQ \\ 0, & \text{ak } x_i \leq SQ, \end{cases}$$

kde x_i je absolútna výška hodnoty i -teho výsledku tejto hry,

SQ je hodnota referenčného bodu hráča,

$\lambda^+ > 0$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci sklon funkcie,

$\nu^+ \in \langle 0; 1 \rangle$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci zakrivenie funkcie,

$\varepsilon^+ > 0$ je hodnota hranice zmeny konštantného marginálneho úžitku na klesajúci marginálny úžitok.

ii) Závislosť od pravdepodobnosti realizácie zisku určitej hry v našej funkcii neuró-nového očakávaného úžitku zo zisku sme modelovali ovplyvnenú tromi faktormi:

1. Nelineárnou závislosťou medzi objektívnou pravdepodobnosťou realizácie zisku a subjektívnou váhou v tvare obráteného písmena S načrtnutej na grafe obr. 1.1 na str. 18 z dôvodu psychologicky preukázaného preváženia nízkych pravdepodobností a podváženia stredných a vysokých pravdepodobností, ktorú sme vyjadrili prostredníctvom funkcie váh $w^+(p)$.

2. Zoradením výsledkov hry podľa ich absolútnych hodnôt výsledkov, pretože extrémne výsledky určitej hry upútajú ľudskú pozornosť výraznejšie ako neextrémne výsledky tejto hry, ktoré sme vyjadrili prostredníctvom princípu modelu poradového úžitku popísaného v kapitole 1.3 ako $w^+(p_i + \dots + p_1) - w^+(p_{i-1} + \dots + p_1)$ pre realizáciu i -teho výsledku určitej hry, pričom platí $x_1^+ > \dots > x_i^+ > \dots > x_K^+ \geq 0$.

3. Početnosťou výsledkov určitej hry, pretože početnejšie výsledky určitej hry upútajú ľudskú pozornosť výraznejšie ako menej početné výsledky tejto hry. Vychádzajúc z tohto predpokladu sme výsledky určitej hry do nášho modelu aplikovali ako dvojúrovňovo zoradené – najprv podľa početnosti výsledkov tejto hry počnúc najpočetnejším výsledkom a následne pre každú početnosť podľa ich absolútnych hodnôt výsledkov počnúc najvyššími hodnotami, t. j.

$$x_{1_m}^+ = \dots = x_{j_m}^+ > x_{j+1_m}^+ = \dots = x_{j+j_m}^+, \dots, x_{i_l}^+, \dots, x_{K_1}^+,$$

kde $m > 1$ je hodnota najvyššej početnosti,

$l < m$ je hodnota početnosti výsledkov s hodnotou x_i^+ ,

K je celkový počet ziskových výsledkov tejto hry.

Následne sme na takto zoradené výsledky tejto hry aplikovali princíp modelu poradového úžitku popísaného v kapitole 1.3 s tým, že na najpočetnejší výsledok s početnosťou aspoň 2 a s najvyššou hodnotou s touto početnosťou sme nami navrhnutým mechanizmom berúci do úvahy aj veľkosť subjektívnej váhy ostatných výsledkov preniesli časť tejto subjektívnej váhy ostatných výsledkov tejto hry vyjadrenú ako

$$\psi^{+(w^+(p_K+\dots+p_1)-w^+(p_j+\dots+p_1))},$$

kde $\psi^+ \in \langle 0; 1 \rangle$ je reálny konštantný parameter.

Závislosť od pravdepodobnosti realizácie zisku určitej hry ovplyvnenú týmito faktormi sme vyjadrili rovnicou (3.2)

$$\begin{aligned} NEUG(p_i) &= \pi^+(p_i) \\ &= \begin{cases} w_1^+, & \text{ak } i = 1 \wedge m = 1 \\ w_i^+ - w_{i-1}^+, & \text{ak } i \in \langle 2; K \rangle \wedge m = 1 \\ w_1^+ + (w_K^+ - w_j^+) \psi^{+(w_K^+ - w_j^+)}, & \text{ak } i = 1 \wedge m > 1 \\ w_i^+ - w_{i-1}^+, & \text{ak } i \in \langle 2; j \rangle \wedge m > 1 \\ (w_i^+ - w_{i-1}^+) \left(1 - \psi^{+(w_K^+ - w_j^+)} \right), & \text{ak } i \in \langle j+1; K \rangle \wedge m > 1, \end{cases} \end{aligned} \quad (3.2)$$

pre

$$x_{1_m}^+ = \dots = x_{j_m}^+ > x_{j+1_m}^+ = \dots = x_{j+j_m}^+, \dots, x_{i_l}^+, \dots, x_{K_1}^+,$$

kde $w_i^+ = w^+(p_i + \dots + p_2 + p_1)$ je monotónna rastúca funkcia váh objektívnych pravdepodobností tejto hry, pričom platí

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^K w_i^+ &\leq 1, w_i^+ \in \langle 0; 1 \rangle, w^+(0) = 0, w^+(1) = 1, \\ \sum_{i=1}^K p_i &= 1, p_i \in \langle 0; 1 \rangle, \end{aligned}$$

$\psi^+ \in \langle 0; 1 \rangle$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci mieru transferu subjektívnej váhy z menej početných možných výsledkov hry na najpočetnejší možný výsledok hry,

$x_i^+ \geq 0$ je hodnota i -teho ziskového výsledku určitej hry vyjadrená v rovnici (3.1),

$m > 1$ je hodnota najvyššej početnosti,

$l < m$ je hodnota početnosti výsledkov s hodnotou x_i^+ ,

K je celkový počet ziskových výsledkov tejto hry.

iii) Závislosť od času realizácie zisku určitej hry v našej funkcii neurónového očakávaného úžitku zo zisku sme modelovali prostredníctvom diskontného faktora vyjadrenú rovnicou (3.3)

$$NEUG(\tau_t) = DF^+(\tau_t), \quad (3.3)$$

kde $DF^+(\tau_t)$ je diskontný faktor v t -tom čase realizácie výsledku určitej hry $\tau_t \geq 0$.

Celkovo naša funkcia neurónového očakávaného úžitku zo zisku reflektujúca neurónovú aktivitu striata bola závislá od troch premenných vyjadrená rovnicami (3.1), (3.2) a (3.3), ktoré sme spojili do rovnice (3.4)

$$NEUG(x_{i,t}^+, p_{i,t}, \tau_t) = DF^+(\tau_t) \pi^+(p_{i,t}) u^+(x_{i,t}^+), \quad (3.4)$$

pričom

$$\begin{aligned} x_{i,t}^+ &= x_{i,t}^+(x_{i,t}, SQ) = \begin{cases} x_{i,t} - SQ, & \text{ak } x_{i,t} > SQ \\ 0, & \text{ak } x_{i,t} \leq SQ, \end{cases} \\ u^+(x_{i,t}^+) &= \begin{cases} \lambda^+ \left(x_{i,t}^{\nu^+} + \varepsilon^+ - \varepsilon^{\nu^+} \right), & \text{ak } x_{i,t}^+ > \varepsilon^+ \\ \lambda^+ x_{i,t}^+, & \text{ak } x_{i,t}^+ \leq \varepsilon^+, \end{cases} \\ \pi^+(p_{i,t}) &= \begin{cases} w_{1,t}^+, & \text{ak } i = 1 \wedge m = 1 \\ w_{i,t}^+ - w_{i-1}^+, & \text{ak } i \in \langle 2; K \rangle \wedge m = 1 \\ w_{1,t}^+ + (w_{K,t}^+ - w_{j,t}^+) \psi^+(w_{K,t}^+ - w_{j,t}^+), & \text{ak } i = 1 \wedge m > 1 \\ w_{i,t}^+ - w_{i-1,t}^+, & \text{ak } i \in \langle 2; j \rangle \wedge m > 1 \\ (w_{i,t}^+ - w_{i-1,t}^+) \left(1 - \psi^+(w_{K,t}^+ - w_{j,t}^+) \right), & \text{ak } i \in \langle j+1; K \rangle \wedge m > 1, \end{cases} \end{aligned}$$

pre

$$x_{1,t_m}^+ = \dots = x_{j,t_m}^+ > x_{j+1,t_m}^+ = \dots = x_{j+j,t_m}^+, \dots, x_{i,t_l}^+, \dots, x_{K,t_1}^+,$$

kde všetky parametre sú zhodné s parametrami v rovniciach (3.1), (3.2) a (3.3).

Pomocou funkcie neurónového očakávaného úžitku zo zisku sme vypočítali celkový očakávaný úžitok zo ziskov určitej hry bez afektívnych averzií rovnicou (3.5)

$$TNEUG = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^K NEUG(x_{i,t}^+, p_{i,t}, \tau_t), \quad (3.5)$$

kde $TNEUG$ je celkový očakávaný úžitok zo ziskov určitej hry bez afektívnych averzií,

T je celkový počet časov realizácie jednotlivých výsledkov tejto hry,

K je celkový počet ziskových výsledkov tejto hry,

$NEUG(x_{i,t}^+, p_{i,t}, \tau_t)$ je funkcia neurónového očakávaného úžitku zo zisku vyjadrená rovnicou (3.4).

3.2.2 Funkcia neurónového očakávaného úžitku zo straty

Výsledkom našej analýzy experimentálnych neurovedeckých štúdií bolo zistenie, že očakávaná výška stratového výsledku určitej hry nie je úmerná neurónovej aktivite striata ale amygdaly. Vychádzajúc z tohto poznatku sme na reflektovanie neurónovej aktivity amygdaly zadefinovali *funkciu neurónového očakávaného úžitku zo straty*, pričom výšku hodnoty straty určitej hry sme si označovali ako x^- , ktorú sme si zadefinovali ako $x^- = -x^+$, pre $x^+ < 0$, teda zisk napr. -100 EUR by bola strata +100 EUR. Zostrojenie funkcie neurónového očakávaného úžitku zo straty sme urobili analogicky ako zostrojenie funkcie neurónového očakávaného úžitku zo zisku a vyjadrili rovnicou (3.6), pričom bolesť zo straty sme pre účely našej práce označovali termínom *negatívny úžitok*.

Celkovo naša funkcia neurónového očakávaného úžitku zo straty reflektujúca neurónovú aktivitu amygdaly bola závislá od troch premenných vyjadrená rovnicou (3.6)

$$NEUL(x_{i,t}^-, p_{i,t}, \tau_t) = DF^-(\tau_t) \pi^-(p_{i,t}) u^-(x_{i,t}^-), \quad (3.6)$$

pričom

$$\begin{aligned} x_{i,t}^- &= x_{i,t}^-(x_{i,t}, SQ) = \begin{cases} 0, & \text{ak } x_{i,t} \geq SQ \\ SQ - x_{i,t}, & \text{ak } x_{i,t} < SQ, \end{cases} \\ u^-(x_{i,t}^-) &= \begin{cases} \lambda^-(x_{i,t}^{-\nu^-} + \varepsilon^- - \varepsilon^{-\nu^-}), & \text{ak } x_{i,t}^- > \varepsilon^- \\ \lambda^- x_{i,t}^-, & \text{ak } x_{i,t}^- \leq \varepsilon^-, \end{cases} \\ \pi^-(p_{i,t}) &= \begin{cases} w_{K+1,t}^-, & \text{ak } i = K+1 \wedge m = 1 \\ w_{i,t}^- - w_{i-1}^-, & \text{ak } i \in \langle K+2; N \rangle \wedge m = 1 \\ w_{K+1,t}^- + (w_{N,t}^- - w_{K+j,t}^-) \psi^{-(w_{N,t}^- - w_{K+j,t}^-)}, & \text{ak } i = K+1 \wedge m > 1 \\ w_{i,t}^- - w_{i-1,t}^-, & \text{ak } i \in \langle K+2; K+j \rangle \wedge m > 1 \\ (w_{i,t}^- - w_{i-1,t}^-) \left(1 - \psi^{-(w_{N,t}^- - w_{K+j,t}^-)}\right), & \text{ak } i \in \langle K+j+1; N \rangle \wedge m > 1, \end{cases} \end{aligned}$$

pre

$$x_{K+1,t_m}^- = \dots = x_{K+j,t_m}^- > x_{K+j+1,t_m}^- = \dots = x_{K+j+j,t_m}^-, \dots, x_{i,t_l}^-, \dots, x_{N,t_1}^-,$$

kde $w_{i,t}^+ = w^+(p_{i,t} + \dots + p_{K+1,t})$ a všetky parametre vyjadrujú to isté, ako ich náprotivky v rovnici (3.4) s tým rozdielom, že ich hodnoty sú špecifické pre straty.

Pomocou funkcie neurónového očakávaného úžitku zo straty sme vypočítali celkový očakávaný úžitok zo strát určitej hry bez afektívnych averzií rovnicou (3.7)

$$TNEUL = \sum_{t=0}^T \sum_{i=K+1}^N NEUL(x_{i,t}^-, p_{i,t}, \tau_t), \quad (3.7)$$

kde $TNEUL$ je celkový očakávaný úžitok zo strát určitej hry bez afektívnych averzií,

T je celkový počet časov realizácie jednotlivých výsledkov tejto hry,

K je celkový počet ziskových výsledkov tejto hry,

$N \geq K$ je celkový počet výsledkov tejto hry,

$NEUL(x_{i,t}^-, p_{i,t}, \tau_t)$ je funkcia neurónového očakávaného úžitku zo straty vyjadrená rovnicou (3.6).

3.2.3 Funkcie neurónovej očakávanej ľútosti

Zásadným zistením našej analýzy experimentálnych neurovedeckých štúdií bola neurónová aktivita amygdaly v pozitívnych hrách a jej rozdielna aktivita pre rizikové a bezrizikové pozitívne, ako aj negatívne hry, t. j. jej participácia na Tverského-Kahnemanovom paradoxe. Keďže averzia voči ľútosti sa v neurónovej aktivite amygdaly prejavovala iba pre odmietanie rizikovej hry v kontraste k bezrizikovej hre v prípade pozitívnych hier a iba pre odmietnutie bezrizikovej hry v kontraste k rizikovej hre v prípade negatívnych hier, modelovali sme zvlášť tieto dve situácie a neuvažovali sme nad averziou voči ľútosti v regulárnych hrách.

i) Pre pozitívne hry sme sa s hodnotou nákladov obetovanej príležitosti rozhodli kalkulovať iba pre tie výsledky, pri ktorých zmena voči referenčnému bodu po započítaní utopených nákladov by bola nižšia ako zmena všetkých výsledkov alternatívnej hry s nenulovou pravdepodobnosťou realizácie voči ich referenčnému bodu po započítaní ich utopených nákladov v rovnakom čase realizácie, a to ako rozdiel hodnoty zmeny najnižšieho výsledku alternatívnej hry a zmeny daného výsledku danej hry vyjadrený rovnicou (3.8)

$$\begin{aligned}
OC_i^+ &= OC_i^+ (x_i, SQ, SC, \tilde{x}_{\min}, \widetilde{SQ}, \widetilde{SC}) \\
&= \begin{cases} (\tilde{x}_{\min} - \widetilde{SQ} - \widetilde{SC}) - (x_i - SQ - SC), \\
\text{ak } (\tilde{x}_{\min} - \widetilde{SQ} - \widetilde{SC}) > (x_i - SQ - SC) \wedge \forall x_i \geq SQ \\
0, \text{ ak } (\tilde{x}_{\min} - \widetilde{SQ} - \widetilde{SC}) \leq (x_i - SQ - SC) \wedge \forall x_i \geq SQ \\
0, \text{ ak } \exists x_i < SQ, \end{cases} \quad (3.8)
\end{aligned}$$

kde OC_i^+ je výška nákladov obetovanej príležitosti pre pozitívny rozdiel i -teho výsledku určitej hry od referenčného bodu po odpočítaní utopených nákladov, x_i je absolútna výška hodnoty i -teho výsledku tejto hry, SQ je hodnota referenčného bodu hráča v tejto hre, SC je hodnota utopených nákladov tejto hry, $\tilde{x}_{\min}$ je najnižšia absolútna výška hodnoty alternatívnej hry, $\widetilde{SQ}$ je hodnota referenčného bodu hráča v alternatívnej hre, $\widetilde{SC}$ je hodnota utopených nákladov alternatívnej hry.

Vychádzali sme z predpokladu najintenzívnejšieho emocionálneho pocítania nákladov obetovanej príležitosti práve na tom rozdiel zisku, ktorý mohol byť istý v danom čase realizácie, ak by si hráč vybral alternatívnu hru. Z dôvodu naviazania nákladov obetovanej príležitosti na daný ziskový výsledok určitej hry sme použili pre ne subjektívnu váhu rovnakú ako pre daný výsledok. Pre odlíšenie od funkcie neurónového očakávaného úžitku zo straty sme si zadefinovali *funkciu neurónovej očakávanej lútosti zo zisku* tiež participujúcou na negatívnom úžitku vyjadrenou rovnicou (3.9)

$$NERG(OC_{i,t}^+, p_{i,t}, \tau_t) = DF^-(\tau_t) \pi^+(p_{i,t}) u^-(OC_{i,t}^+), \quad (3.9)$$

pričom

$$u^-(OC_{i,t}^+) = \begin{cases} \lambda^-(OC_{i,t}^{+\nu^-} - \varepsilon^- - \varepsilon^{-\nu^-}), & \text{ak } OC_{i,t}^+ > \varepsilon^- \\ \lambda^- OC_{i,t}^+, & \text{ak } OC_{i,t}^+ \leq \varepsilon^-, \end{cases}$$

kde $\pi^+(p_{i,t})$ je subjektívna pravdepodobnosť vyjadrená rovnicou (3.2),

$OC_{i,t}^+$ je výška nákladov obetovanej príležitosti vyjadrená rovnicou (3.8), ostatné parametre sú zhodné s parametrami v rovnici (3.6).

V hre s viac ako dvomi možnosťami by boli náklady obetovanej príležitosti prirodzene spojené s tou voľbou, z ktorej by bol najvyšší negatívny úžitok, vyjadrený rovnicou (3.10)

$$TNERG = \max \left\{ \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^K NERG_g \left(OC_{i,t}^+, p_{i,t}, \tau_t \right) \right\}_{g=1}^G, \quad (3.10)$$

kde $TNERG$ je celková očakávaná lútost zo ziskov,

T je celkový počet časov realizácie jednotlivých výsledkov tejto hry,

K je celkový počet ziskových výsledkov tejto hry,

G je počet alternatívnych hier,

$NERG_g \left(OC_{i,t}^+, p_{i,t}, \tau_t \right)$ je funkcia neurónovej očakávanej lútosti zo zisku z g -tej alternatívnej hry vyjadrená rovnicou (3.9).

ii) Pre negatívne hry sme s hodnotou týchto nákladov kalkulovali iba pre tie hry, pri ktorých zmena voči referenčnému bodu po započítaní utopených nákladov je vo všetkých výsledkoch tejto hry vyššia, ako zmena aspoň jedného výsledku alternatívnej hry s nenulovou pravdepodobnosťou realizácie voči jeho referenčnému bodu po započítaní jeho utopených nákladov v rovnakom čase realizácie, a to ako rozdiel hodnoty zmeny najnižšieho výsledku danej hry a hodnoty ι -tej zmeny výsledku alternatívnej hry, vyjadrený rovnicou (3.11)

$$\begin{aligned} OC_{\iota}^{-} &= OC_{\iota}^{-} \left(x_{\min}, SQ, SC, \tilde{x}_{\iota}, \widetilde{SQ}, \widetilde{SC} \right) \\ &= \begin{cases} (SQ - x_{\min} + SC) - (\widetilde{SQ} - \tilde{x}_{\iota} + \widetilde{SC}), \\ \quad \text{ak } (SQ - x_{\min} + SC) > (\widetilde{SQ} - \tilde{x}_{\iota} + \widetilde{SC}) \wedge x_{\min} \leq SQ \\ 0, \text{ ak } (SQ - x_{\min} + SC) \leq (\widetilde{SQ} - \tilde{x}_{\iota} + \widetilde{SC}) \wedge x_{\min} \leq SQ \\ 0, \text{ ak } x_{\min} > SQ, \end{cases} \quad (3.11) \end{aligned}$$

kde OC_{ι}^{-} je výška nákladov obetovanej príležitosti pre pozitívny rozdiel ι -teho výsledku alternatívnej hry od referenčného bodu po odpočítaní utopených nákladov,

$x_{\min}$ je najnižšia absolútna výška hodnoty výsledku tejto hry,

SQ je hodnota referenčného bodu hráča v tejto hre,

SC je hodnota utopených nákladov tejto hry,

$\tilde{x}_{\iota}$ je absolútna výška hodnoty ι -teho výsledku alternatívnej hry,

$\widetilde{SQ}$ je hodnota referenčného bodu hráča v alternatívnej hre,

$\widetilde{SC}$ je hodnota utopených nákladov alternatívnej hry.

Vychádzali sme z predpokladu najintenzívnejšieho emocionálneho pocítania nákladov obetovanej príležitosti práve na tom rozdiel straty, ktorý nemusel byť v danom čase realizácie, ak by si hráč vybral alternatívnu hru. Z dôvodu naviazania nákladov obetovanej príležitosti na daný výsledok alternatívnej hry sme použili pre ne subjektívnu váhu rovnakú ako pre daný výsledok. *Funkciu neurónovej očakávanej ľútosti zo straty* sme si zadefinovali rovnicou (3.12)

$$NERL\left(OC_{\iota,t}^-, p_{\iota,t}, \tau_t\right) = NEUL\left(OC_{\iota,t}^-, p_{\iota,t}, \tau_t\right), \quad (3.12)$$

kde $NEUL\left(OC_{\iota,t}^-, p_{\iota,t}, \tau_t\right)$ je funkcia neurónového očakávaného úžitku zo straty vyjadrená rovnicou (3.6),

$OC_{\iota,t}^-$ je výška nákladov obetovanej príležitosti vyjadrená rovnicou (3.11).

V hre s viac ako dvomi možnosťami súčasne by boli náklady obetovanej príležitosti prirodzene spojené s tou voľbou, z ktorej by bol najvyšší negatívny úžitok, vyjadrený rovnicou (3.13)

$$TNERL = \max \left\{ \sum_{t=0}^T \sum_{i=K+1}^N NERL_g\left(OC_{\iota,t}^-, p_{\iota,t}, \tau_t\right) \right\}_{g=1}^G, \quad (3.13)$$

kde $TNERL$ je celková očakávaná ľútosť zo strát,

T je celkový počet časov realizácie jednotlivých výsledkov tejto hry,

K je celkový počet ziskových výsledkov tejto hry,

$N \geq K$ je celkový počet výsledkov tejto hry,

G je počet alternatívnych hier,

$NERL_g\left(OC_{\iota,t}^-, p_{\iota,t}, \tau_t\right)$ je funkcia neurónovej očakávanej ľútosti zo straty z g -tej alternatívnej hry vyjadrená rovnicou (3.12).

3.3 Celková afektívna averzia

Významným prínosom doterajších neurovedeckých štúdií bolo zistenie o separátnych oblastiach ľudského mozgu aktívnych pri afektívnych averziách. Separátnym modelovaním afektívnych averzií a efektu marginálneho úžitku sa náš model zásadne odlišoval od iných modelov behaviorálnej ekonómie.

V ekonomickej teórii sa tieto afektívne averzie vyjadrujú viacerými spôsobmi. Pre účely našej práce sme pre ich vyjadrenie používali *ekvivalent istoty* definovaný ako „množstvo peňazí ponúknuté ako istá výhra, ktoré dá hráčovi presne ten istý úžitok ako

hra“ (Baláž, 2009, str. 49). V súvislosti s averziou voči riziku hráči za ochotu riskovať očakávajú *rizikovú prémiiu* definovanú ako „rozdiel medzi očakávanou hodnotou hry a ekvivalentom istoty“ (Baláž, 2009, str. 49).

3.3.1 Kompenzačná prémia

Výsledkom našej analýzy experimentálnych neurovedeckých štúdií bolo zistenie, že nárast neurónovej aktivity AI a IFG je úmerný s nárastom afektívnych averzií, averziou voči výške nespravodlivej ponuky v ultimátnej hre a výške utopených nákladov, preto sme tieto mozgové oblasti považovali za reprezentujúce celkovú afektívnu averziu.

Pod averziou voči niečomu sme rozumeli odchýlku úžitku z ekvivalentu istoty určitej hry od úžitku z nejakej hypotetickej hodnoty požadovanú hráčom, ktorú sme si pre účely našej práce nazvali *adekvátna hodnota*. Ak by bol úžitok z ekvivalentu istoty určitej pozitívnej hry nižší ako úžitok z kladnej adekvátnej hodnoty, na rozdiel od zmeny od referenčného bodu by to nebolo vnímané ako strata, ale ako nedostatočný zisk. Ak by bol negatívny úžitok z ekvivalentu istoty určitej negatívnej hry vyšší ako negatívny úžitok zo zápornej adekvátnej hodnoty, na rozdiel od zmeny od referenčného bodu by to nebolo vnímané ako strata, ale ako priveľká strata. V kontrastných prípadoch, keby bol úžitok z ekvivalentu istoty určitej pozitívnej hry vyšší ako úžitok z kladnej adekvátnej hodnoty, alebo keby bol negatívny úžitok z ekvivalentu istoty určitej negatívnej hry nižší ako negatívny úžitok zo zápornej adekvátnej hodnoty, tak by averzia nenastala, respektíve by averzia bola nulová. Rozdiel medzi úžitkom z kladnej adekvátnej hodnoty a úžitkom z ekvivalentu istoty v prípade pozitívnej hry a naopak, rozdiel medzi negatívnym úžitkom ekvivalentu istoty v prípade negatívnej hry a úžitkom zo zápornej adekvátnej hodnoty, sme pre účely našej práce nazvali *kompenzačná prémia*.

i) Pre pozitívne hry sme kompenzačnú premiu definovali predpisom

$$KP^+ = \begin{cases} UAV^+ - UCE^+, & \text{ak } UAV^+ > UCE^+ \\ 0, & \text{ak } UAV^+ \leq UCE^+, \end{cases}$$

kde KP^+ je hodnota kompenzačnej premie pre pozitívne hry,

UAV^+ je úžitok z adekvátnej hodnoty pozitívnej hry,

UCE^+ je úžitok z hodnoty ekvivalentu istoty pozitívnej hry.

Potom úžitok z kompenzačnej premie je ekvivalentný úžitku z rizikovej premie, t. j. rozdielu medzi úžitkom z očakávanej hodnoty hry v prípade neutrality voči riziku a

úžitkom z ekvivalentu istoty v prípade averzie voči riziku.

Riziková prémia však nemusí narastať konštantne. Podľa záveru neurovedeckej štúdie popísanej v kapitole 2.2.2 hráči v pozitívnych hrách pri nízkych hodnotách výsledkov pozitívnej hry riskovali, avšak pri vysokých hodnotách výsledkov pozitívnej hry už nie. Toto popísané správanie sme si vysvetlili nedostatočne vysokou rizikovou prémieou na to, aby úžitok z ekvivalentu istoty rizikovej hry bol pod úrovňou istého výsledku bezrizikovej alternatívy. Ak by riziková prémia rástla proporčne k pravdepodobnostiam a hodnotám možných ziskov, potom by bolo výsledné správanie rovnaké aj v prípade vysokých hodnôt výsledkov hry, čo však nebolo v danej štúdie pozorované. Logickým výstupom pre nás z toho bolo požadovanie proporčne vyššej rizikovej prémie v hrách s vyššími hodnotami ziskov v porovnaní s hrami s nižšími hodnotami ziskov. Riziková prémia je pevne definovaná ako rozdiel medzi očakávanou hodnotou a ekvivalentom istoty, preto ekvivalent istoty sa nezvyšuje proporčne k očakávanej hodnote. Na modelovanie úžitku z ekvivalentu istoty sme sa inšpirovali všeobecne známou rovnicou vyjadrujúcu očakávaný úžitok z ekvivalentu istoty

$$u(CE) = E(u(X)),$$

kde X je náhodná premenná reprezentujúca výsledky hry,

CE je ekvivalent istoty hry,

$u(x) = x^{\alpha^+}$ je funkcia užitočnosti, v ktorej $\alpha^+ \in \langle 0; 1 \rangle$ je reálny parameter vyjadrujúci averziu voči riziku v pozitívnej hre.

Potom úžitok z ekvivalentu istoty je očakávaná hodnota z úžitkov neistých výsledkov hry. Ekvivalent istoty v teórii očakávaného úžitku sme si potom vedeli vyjadriť ako

$$CE = \left(E(X^{\alpha^+}) \right)^{\frac{1}{\alpha^+}} = \left(\sum_{i=1}^N p_i x_i^{\alpha^+} \right)^{\frac{1}{\alpha^+}}.$$

Keďže sa ekvivalent istoty vyjadruje z hry po zohľadnení rizika, úžitok z hry obsahujúcej afektívne averzie sme vyjadrili rovnicou (3.14)

$$ATNEUG = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^K DF^+(\tau_t) \pi^+(p_{i,t}) u_A^+(x_{i,t}^+), \quad (3.14)$$

pričom

$$x_{i,t}^+ = x_{i,t}^+(x_{i,t}, SQ) = \begin{cases} x_{i,t} - SQ, & \text{ak } x_{i,t} > SQ \\ 0, & \text{ak } x_{i,t} \leq SQ, \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
u_A^+(x_{i,t}^+) &= \begin{cases} \lambda^+ \left(x_{i,t}^{+(\nu^+ - \alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+)} + \varepsilon^{+(1 - \alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+)} - \varepsilon^{+(\nu^+ - \alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+)} \right), & \text{ak } x_{i,t}^+ > \varepsilon^+ \\ \lambda^+ x_{i,t}^{+(1 - \alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+)}, & \text{ak } x_{i,t}^+ \leq \varepsilon^+, \end{cases} \\
\nu^+ &> \alpha_{ra}^+ + \alpha_{aa}^+, \\
\pi^+(p_{i,t}) &= \begin{cases} w_{1,t}^+, & \text{ak } i = 1 \wedge m = 1 \\ w_{i,t}^+ - w_{i-1}^+, & \text{ak } i \in \langle 2; K \rangle \wedge m = 1 \\ w_{1,t}^+ + (w_{K,t}^+ - w_{j,t}^+) \psi^{+(w_{K,t}^+ - w_{j,t}^+)}, & \text{ak } i = 1 \wedge m > 1 \\ w_{i,t}^+ - w_{i-1,t}^+, & \text{ak } i \in \langle 2; j \rangle \wedge m > 1 \\ (w_{i,t}^+ - w_{i-1,t}^+) \left(1 - \psi^{+(w_{K,t}^+ - w_{j,t}^+)} \right), & \text{ak } i \in \langle j+1; K \rangle \wedge m > 1, \end{cases}
\end{aligned}$$

pre

$$x_{1,t_m}^+ = \dots = x_{j,t_m}^+ > x_{j+1,t_m}^+ = \dots = x_{j+j,t_m}^+, \dots, x_{i,t_l}^+, \dots, x_{K,t_1}^+,$$

kde *ATNEUG* je celkový očakávaný úžitok zo ziskov určitej hry v podmienkach rizika a nejednoznačnosti,

$\alpha_{ra}^+ \in \langle 0; 1 \rangle$ je parameter vyjadrujúci averziu voči riziku v takejto hre,

$\alpha_{aa}^+ \in \langle 0; 1 \rangle$ je parameter vyjadrujúci averziu voči nejednoznačnosti v takejto hre, ostatné parametre sú zhodné s parametrami v rovnici (3.4).

Parameter α_{ra}^+ je nenulový len pre tie výsledky hry, ktorých pravdepodobnosť realizácie by bola nižšia ako 1. Parameter α_{aa}^+ je nenulový len pre tie výsledky hry, ktorých pravdepodobnosť realizácie by nebola známa. V prípade hry s istým výsledkom by platilo $\alpha_{ra}^+ = \alpha_{aa}^+ = 0$, a teda $ATNEUG = TNEUG$.

Pomocou celkového očakávaného úžitku z určitej pozitívnej hry v podmienkach rizika a nejednoznačnosti sme ekvivalent istoty takejto hry pre okamžitú realizáciu vyjadrili rovnicou (3.15)

$$CE^+ = \begin{cases} \left(\frac{ATNEUG}{\lambda^+} - \left(\varepsilon^{+(1 - \alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+)} - \varepsilon^{+(\nu^+ - \alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+)} \right) \right)^{\frac{1}{\nu^+ - \alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+}}, & \text{ak } \frac{ATNEUG}{\lambda^+} > \varepsilon^{+(1 - \alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+)} \\ \left(\frac{ATNEUG}{\lambda^+} \right)^{\frac{1}{1 - \alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+}}, & \text{ak } \frac{ATNEUG}{\lambda^+} \leq \varepsilon^{+(1 - \alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+)}, \end{cases} \quad (3.15)$$

kde jednotlivé parametre sú zhodné s parametrami v rovnici (3.14). Neurónový očakávaný úžitok z ekvivalentu istoty pozitívnej hry sme si potom vyjadrili rovnicou (3.16)

$$NEUCE^+ = NEUG(CE^+, 1, 0), \quad (3.16)$$

kde $NEUCE^+$ je neurónový očakávaný úžitok z ekvivalentu istoty pozitívnej hry,

$NEUG(CE^+, 1, 0)$ je funkcia neurónového očakávaného úžitku zo zisku vyjadrená rovnicou (3.4),

CE^+ je ekvivalent istoty pozitívnej hry vyjadrený rovnicou (3.15).

Do výpočtu sme nezahrnuli úžitok z nákladov obetovanej príležitosti, pretože ten nie je vyvolaný danou hrou, ale odmietnutím alternatívnej hry.

Utopené náklady negatívny úžitok z kompenzačnej prémie zvyšujú o ekvivalent úžitku hodnoty týchto utopených nákladov z dôvodu zvyšujúcej adekvátnej hodnoty v pozitívnej hre, respektíve podmienenia účasti hráča v tejto hre vykompenzovaním týchto nákladov. Utopené náklady boli v našom modeli výlučne spojené s tou možnosťou hry, ktorá ich vyvolala, ako výsledok našej logickej úvahy. Napríklad ak by hráč uvažoval o pokračovaní v projekte, do ktorého už vložil nejaké náklady, v prípade možnosti pokračovať by očakával kompenzáciu týchto nákladov, a ak by ich očakávaný zisk nepokryl, tak by v projekte nepokračoval. Avšak v prípade možnosti nepokračovať, by už o utopených nákladoch daného projektu neuvažoval. Neurónový úžitok z utopených nákladov sme počítali rovnicou (3.17) pomocou funkcie neurónového očakávaného úžitku zo straty uvedenej v rovnici (3.6)

$$NEUSC = NEUL(SC, 1, 0), \quad (3.17)$$

kde $NEUSC$ je neurónový očakávaný úžitok z utopených nákladov,

$NEUL(SC, 1, 0)$ je funkcia neurónového očakávaného úžitku zo straty vyjadrená rovnicou (3.6),

SC je hodnota utopených nákladov danej hry.

Kompenzačnú prémii sme potom pre pozitívnu hru počítali pomocou rovníc (3.5), (3.16) a (3.17) ako

$$KP^+ = \begin{cases} (TNEUG + NEUSC) - NEUCE^+, & \text{ak } (TNEUG + NEUSC) > NEUCE^+ \\ 0, & \text{ak } (TNEUG + NEUSC) \leq NEUCE^+, \end{cases}$$

kde KP^+ je hodnota kompenzačnej prémie pre pozitívne hry,

$TNEUG$ je celkový očakávaný úžitok zo ziskov určitej hry bez afektívnych averzií vyjadrený rovnicou (3.5),

$NEUSC$ je neurónový očakávaný úžitok z utopených nákladov vyjadrený rovnicou (3.17),

$NEUCE^+$ je neurónový očakávaný úžitok z ekvivalentu istoty pozitívnej hry vyjadrený rovnicou (3.16).

ii) Pre negatívne hry sme kompenzačnú prémii definovali predpisom

$$KP^- = \begin{cases} 0, & \text{ak } UAV^- \geq UCE^- \\ UCE^- - UAV^-, & \text{ak } UAV^- < UCE^-, \end{cases}$$

kde KP^- je hodnota kompenzačnej premie pre negatívne hry,

UAV^- je úžitok z adekvátnej hodnoty pre negatívne hry,

UCE^- je úžitok z hodnoty ekvivalentu istoty negatívnej hry.

Celkový očakávaný úžitok zo strát určitej hry v podmienkach rizika a nejednoznačnosti sme vyjadrili rovnicou (3.18)

$$ATNEUL = \sum_{t=0}^T \sum_{i=K+1}^N DF^-(\tau_t) \pi^-(p_{i,t}) u_A^-(x_{i,t}^-), \quad (3.18)$$

pričom

$$\begin{aligned} x_{i,t}^- &= x_{i,t}^-(x_{i,t}, SQ) = \begin{cases} 0, & \text{ak } x_{i,t} > SQ \\ SQ - x_{i,t}, & \text{ak } x_{i,t} \leq SQ, \end{cases} \\ u_A^-(x_{i,t}^-) &= \begin{cases} \lambda^- \left(x_{i,t}^{-(\nu^- - \alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-)} + \varepsilon^{-(1 - \alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-)} - \varepsilon^{-(\nu^- - \alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-)} \right), & \text{ak } x_{i,t}^- > \varepsilon^- \\ \lambda^- x_{i,t}^{-(1 - \alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-)}, & \text{ak } x_{i,t}^- \leq \varepsilon^-, \end{cases} \\ \nu^- &> \alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-, \\ \pi^-(p_{i,t}) &= \begin{cases} w_{K+1,t}^-, & \text{ak } i = K+1 \wedge m = 1 \\ w_{i,t}^- - w_{i-1}^-, & \text{ak } i \in \langle K+2; N \rangle \wedge m = 1 \\ w_{K+1,t}^- + (w_{N,t}^- - w_{K+j,t}^-) \psi^{-(w_{N,t}^- - w_{K+j,t}^-)}, & \text{ak } i = K+1 \wedge m > 1 \\ w_{i,t}^- - w_{i-1,t}^-, & \text{ak } i \in \langle K+2; K+j \rangle \wedge m > 1 \\ (w_{i,t}^- - w_{i-1,t}^-) \left(1 - \psi^{-(w_{N,t}^- - w_{K+j,t}^-)} \right), & \text{ak } i \in \langle K+j+1; N \rangle \wedge m > 1, \end{cases} \end{aligned}$$

pre

$$x_{K+1,t_m}^- = \dots = x_{K+j,t_m}^- > x_{K+j+1,t_m}^- = \dots = x_{K+j+j,t_m}^-, \dots, x_{i,t_1}^-, \dots, x_{N,t_1}^-,$$

kde $ATNEUL$ je celkový očakávaný úžitok zo strát určitej hry v podmienkach rizika a nejednoznačnosti,

$\alpha_{rt}^- \in \langle 0; 1 \rangle$ je parameter vyjadrujúci toleranciu voči riziku v takejto hre,

$\alpha_{at}^- \in \langle 0; 1 \rangle$ je parameter vyjadrujúci toleranciu voči nejednoznačnosti v takejto hre,

ostatné parametre sú zhodné s parametrami v rovnici (3.6).

Parameter α_{rt}^- je nenulový len pre tie výsledky hry, ktorých pravdepodobnosť realizácie by bola nižšia ako 1. Parameter α_{at}^- je nenulový len pre tie výsledky hry, ktorých pravdepodobnosť realizácie by nebola známa. V prípade hry s istým výsledkom by platilo $\alpha_{rt}^- = \alpha_{at}^- = 0$, a teda $ATNEUL = TNEUL$.

Pomocou celkového očakávaného úžitku z určitej pozitívnej hry v podmienkach rizika a nejednoznačnosti sme ekvivalent istoty takejto hry pre okamžitú realizáciu vyjadrili rovnicou (3.19)

$$CE^- = \begin{cases} \left(\frac{ATNEUL}{\lambda^-} - \left(\varepsilon^{-(1-\alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-)} - \varepsilon^{-(\nu^- - \alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-)} \right) \right)^{\frac{1}{\nu^- - \alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-}}, & \text{ak } \frac{ATNEUL}{\lambda^-} > \varepsilon^{-(1-\alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-)} \\ \left(\frac{ATNEUL}{\lambda^-} \right)^{\frac{1}{1-\alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-}}, & \text{ak } \frac{ATNEUL}{\lambda^-} \leq \varepsilon^{-(1-\alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-)}, \end{cases} \quad (3.19)$$

kde jednotlivé parametre sú zhodné s parametrami v rovnici (3.18). Neurónový očakávaný úžitok z ekvivalentu istoty negatívnej hry sme si potom vyjadrili rovnicou (3.20)

$$NEUCE^- = NEUL(CE^-, 1, 0), \quad (3.20)$$

kde $NEUCE^-$ je neurónový očakávaný úžitok z ekvivalentu istoty negatívnej hry,

$NEUL(CE^-, 1, 0)$ je funkcia neurónového očakávaného úžitku zo straty vyjadrená rovnicou (3.6).

CE^- je ekvivalent istoty negatívnej hry vyjadrený rovnicou (3.19).

Do výpočtu sme nezahrnuli úžitok z nákladov obetovanej príležitosti, pretože ten nie je vyvolaný danou hrou, ale odmietnutím alternatívnej hry.

V negatívnych hrách pociťovali hráči averziu voči istote ako dôsledok averzie voči strate. Logickou úvahou sme dospeli k záveru, že hráč by nechcel mať akúkoľvek stratu, a preto by bola jeho adekvátne hodnota nulová, t. j. $UAV^- = 0$. Kompenzačnú prémie sme z tohto dôvodu mohli modelovať ako ekvivalent istoty negatívnej hry.

Utopené náklady negatívny úžitok z kompenzačnej prémie zvyšujú o ekvivalent úžitku hodnote týchto utopených nákladov z dôvodu podmienenia neúčasti hráča v tejto hre nevykompenzovaním týchto nákladov. Utopené náklady pre negatívne hry boli v našom modeli analogicky ako pre pozitívne hry výlučne spojené s tou možnosťou hry, ktorá ich vyvolala. Kompenzačnú prémie sme potom pre negatívnu hru počítali pomocou rovníc (3.17) a (3.20) ako

$$KP^- = \begin{cases} 0, & \text{ak } 0 \geq (NEUCE^- + NEUSC) \\ (NEUCE^- + NEUSC), & \text{ak } 0 < (NEUCE^- + NEUSC), \end{cases}$$

kde KP^- je hodnota kompenzačnej prémie pre negatívne hry,

$NEUSC$ je neurónový očakávaný úžitok z utopených nákladov vyjadrený rovnicou (3.17),

$NEUCE^-$ je neurónový očakávaný úžitok z ekvivalentu istoty negatívnej hry vyjadrený rovnicou (3.20).

iii) Pri zovšeobecnení kompenzačnej prémie aj na regulárne hry by ekvivalent istoty takejto hry v podmienkach rizika a nejednoznačnosti bol ekvivalentný rovnici (3.15), ak by celkový úžitok regulárnej hry v podmienkach rizika a nejednoznačnosti bol kladný a ekvivalentný rovnici (3.19), ak by celkový úžitok regulárnej hry v podmienkach rizika a nejednoznačnosti bol záporný. Preto sme ekvivalent istoty regulárnej hry v podmienkach rizika a nejednoznačnosti definovali rovnicou (3.21)

$$CE = \begin{cases} \left(\frac{(ATNEUG - ATNEUL)}{\lambda^+} - \left(\varepsilon^{+(1-\alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+)} - \varepsilon^{+(\nu^+ - \alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+)} \right) \right)^{\frac{1}{\nu^+ - \alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+}}, & \text{ak } ATNEUG > ATNEUL \wedge \frac{(ATNEUG - ATNEUL)}{\lambda^+} > \varepsilon^{+(1-\alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+)} \\ \left(\frac{(ATNEUG - ATNEUL)}{\lambda^+} \right)^{\frac{1}{1-\alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+}}, & \text{ak } ATNEUG > ATNEUL \wedge \frac{(ATNEUG - ATNEUL)}{\lambda^+} \leq \varepsilon^{+(1-\alpha_{ra}^+ - \alpha_{aa}^+)} \\ \left(\frac{(ATNEUL - ATNEUG)}{\lambda^-} - \left(\varepsilon^{-(1-\alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-)} - \varepsilon^{-(\nu^- - \alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-)} \right) \right)^{\frac{1}{\nu^- - \alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-}}, & \text{ak } ATNEUG \leq ATNEUL \wedge \frac{(ATNEUL - ATNEUG)}{\lambda^-} > \varepsilon^{-(1-\alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-)} \\ \left(\frac{(ATNEUL - ATNEUG)}{\lambda^-} \right)^{\frac{1}{1-\alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-}}, & \text{ak } ATNEUG \leq ATNEUL \wedge \frac{(ATNEUL - ATNEUG)}{\lambda^-} \leq \varepsilon^{-(1-\alpha_{rt}^- - \alpha_{at}^-)}, \end{cases} \quad (3.21)$$

kde jednotlivé parametre sú zhodné s parametrami v rovniciach (3.15) a (3.19).

Kompenzačnú prémii pre regulárne hry sme definovali rovnicou (3.22)

$$KP = \begin{cases} (TNEUG + NEUSC) - NEUCE^+, & \text{ak } ATNEUG > ATNEUL \\ (NEUCE^- + NEUSC), & \text{ak } ATNEUG \leq ATNEUL, \end{cases} \quad (3.22)$$

kde KP je zovšeobecnená kompenzačná prémia pre regulárne hry,

$TNEUG$ je celkový očakávaný úžitok zo ziskov určitej hry bez afektívnych averzií vyjadrený rovnicou (3.5),

$NEUSC$ je neurónový očakávaný úžitok z utopených nákladov vyjadrený rovnicou (3.17),

$NEUCE^+$ je neurónový očakávaný úžitok z ekvivalentu istoty pozitívnej hry vyjadrený rovnicou (3.16),

$NEUCE^-$ je neurónový očakávaný úžitok z ekvivalentu istoty negatívnej hry vyjadrený rovnicou (3.20),

$ATNEUG$ je celkový očakávaný úžitok zo ziskov určitej hry v podmienkach rizika a nejednoznačnosti vyjadrený rovnicou (3.14),

$ATNEUL$ je celkový očakávaný úžitok zo strát určitej hry v podmienkach rizika a nejednoznačnosti vyjadrený rovnicou (3.18).

3.3.2 Kognitívna reparácia a kontrola

Výsledkom našej analýzy experimentálnych neurovedeckých štúdií bolo zistenie, že oblasti mozgu DMPFC a ACC slúžia na kognitívnu reparáciu celkovej afektívnej averzie reprezentujúcej neurónovou aktivitou AI a IFG. Signalizujú preto rozdiel zvolenej afektívnej hry (hry vyvolávajúcej afektívne averzie) od preferovanej hry, ktorý sme vnímali ako výšku ignorovanej celkovej afektívnej averzie, teda averzií, ktoré by hráč podstúpil napriek jeho preferenciám. Neurónovú aktivitu DMPFC a ACC sme zahrnuli do parametra σ , vyjadrujúci rozdiel zvolenej afektívnej hry od preferovanej hry. Maximálny rozdiel zvolenej afektívnej hry od preferovanej hry by tak mohol byť nanajvýš rovný celkovej afektívnej averzie v prípade, ak by sa hráč rozhodol úplne ignorovať svoju celkovú afektívnu averziu. Minimálny rozdiel zvolenej rizikovej hry od preferovanej hry by tak mohol byť rovný 0 v prípade, ak by bola preferovaná hra ekvivalentná hre bez celkovej afektívnej averzie. Vychádzajúc z týchto poznatkov sme si zadefinovali ohraničenie pre parameter $\sigma \in \langle 0; 1 \rangle$, kde $\sigma = 0$ znamená žiadne ignorovanie celkovej afektívnej averzie a $\sigma = 1$ znamená úplné ignorovanie celkovej afektívnej averzie.

Okrem kognitívnej reparácie sme výsledkom našej analýzy experimentálnej neurovedeckej štúdie zistili, že oblasti mozgu DLPFC a PPC slúžia na kognitívnu kontrolu celkovej afektívnej averzie. Vychádzajúc z doterajších neurovedeckých štúdií sme považovali tieto oblasti za rozhodujúce o miere akceptácie celkovej afektívnej averzie signalizovanej neurónovou aktivitou AI a IFG. Ich neurónovú aktivitu sme zahrnuli do parametra ϕ , ktorého ohraničenie je z doterajších neurovedeckých štúdií nejasné. Zníženie kortikálnej excitability pravého DLPFC podľa analyzovaných experimentálnych neurovedeckých štúdií zapríčinilo ignorovanie averzie voči výške nespravodlivej ponuky v ultimátnej hre, a naopak zvýšenie kortikálnej excitability pravého DLPFC zapríčinilo zvýšenie efektu utopených nákladov. Z tohto dôvodu sme uvažovali iba s ohraňeným $\phi \geq 0$, čo je prirodzené ohraňenie z fyzikálnych dôvodov, pretože neurónová aktivita nemôže byť záporná.

Úžitok z celkovej afektívnej averzie reflektujúcej neurónovú aktivitu AI a IFG ovplyvnenú neurónovou aktivitou DLPFC, PPC, DMPFC a ACC tiež participujúcou na negatívnom úžitku sme vyjadrili rovnicou (3.23)

$$TAA = KP(1 - \sigma)\phi, \quad (3.23)$$

kde TAA je výška úžitku celkovej afektívnej averzie,

KP je výška kompenzačnej prémie vyjadrená rovnicou (3.22),

$\sigma \in \langle 0; 1 \rangle$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci mieru ignorovania celkovej afektívnej averzie,

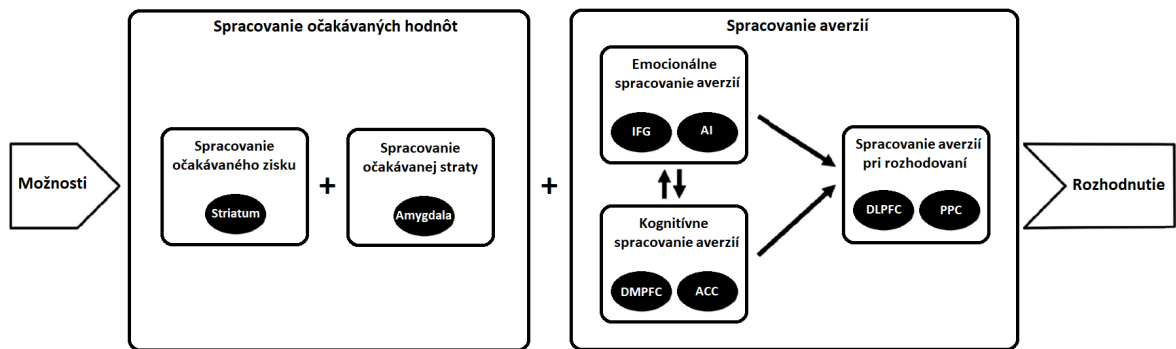
$\phi \geq 0$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci mieru akceptácie celkovej afektívnej averzie.

3.4 Zostrojenie neuroekonomického modelu rozhodovania

Naše zosumarizované zistenia analyzovaných experimentálnych neurovedeckých štúdií sme graficky znázornili na obr. 3.1 na str. 58, ktorý reprezentuje náš neuroekonomický model rozhodovania. V našom modeli by sa pri každom ekonomickom rozhodovaní zvlášť spracovali očakávané hodnoty a celková afektívna averzia. Pri spracovaní očakávaných hodnôt by bol očakávaný úžitok zo zisku spracovaný v striate, ktorú náš model reflektoval funkciou neurónového očakávaného úžitku zo zisku vyjadrenú rovnicou (3.4) a očakávaný úžitok zo straty a nákladov obetovanej príležitosti v amygdale,

ktorú náš model reflektoval funkciou neurónového očakávaného úžitku zo straty vyjadrenú rovnicou (3.6) a funkciami neurónovej očakávanej ľútosti vyjadrené rovnicami (3.9) a (3.12), ktoré participujú na negatívnom úžitku. Celková afektívna averzia by bola spracovaná oddelene od spracovaní očakávaných hodnôt, a to v AI a IFG vyjadrujúce celkovú afektívnu averziu, v DMPFC a ACC vyjadrujúce kognitívnu reparáciu celkovej afektívnej averzie a v DLPFC a PPC vyjadrujúce kognitívnu kontrolu celkovej afektívnej averzie. Neurónovú aktivitu všetkých týchto oblastí spracovávajúcich celkovú afektívnu averziu reflektuje náš model výpočtom negatívneho úžitku z celkovej afektívnej averzie vyjadrenú rovnicou (3.23).

Obr. 3.1: Neuroekonomický model rozhodovania



Zdroj: autor

Pre matematické popísanie nášho modelu sme negatívny úžitok vyjadrili prostredníctvom záporného znamienka. Celkový neurónový očakávaný úžitok z určitej hry voči alternatívnej hre sme našim modelom vypočítali rovnicou (3.24)

$$TNEU(G) = (TNEUG - TNERG) - (TNEUL + TNERL) - TAA, \quad (3.24)$$

kde $TNEU$ je celkový neurónový očakávaný úžitok z hry G voči alternatívnej hre,

$TNEUG$ je celkový očakávaný úžitok zo ziskov hry G bez afektívnych averzií vypočítaný rovnicou (3.5),

$TNERG$ je celková očakávaná ľútosť zo ziskov hry G vypočítaná rovnicou (3.10),

$TNEUL$ je celkový očakávaný úžitok zo strát hry G bez afektívnych averzií vypočítaný rovnicou (3.7),

$TNERL$ je celková očakávaná ľútosť zo strát hry G vypočítaná rovnicou (3.13),

TAA je úžitok celkovej afektívnej averzie hry G vypočítaný rovnicou (3.23).

4 Analýza modelu a porovnanie

Pre dosiahnutie nášho čiastkového cieľa *preukázanie schopnosti modelu modelovať psychologické fenomény a ekonomické paradoxy* sme náš neuroekonomický model rozhodovania analyzovali po aplikovaní na vybrané typy príkladov, ktoré model teórie očakávaného úžitku nedokázal modelovať. Túto analýzu sme rozšírili o porovnanie s modelom teórie očakávaného úžitku a modelom kumulatívnej prospektovej teórie. Jednotlivé modely sme navzájom porovnávali pomocou ekvivalentu istoty.

Pre účely našej práce sme sa rozhodli v našom modeli používať dvojparametrový Prelecov tvar funkcie váh z dôvodu možnosti zvlášť modelovať zakrivenie a zvlášť eleváciu, t. j.

$$w(p) = e^{-\theta(-\ln p)^\gamma},$$

kde $p \in (0; 1)$ je objektívna pravdepodobnosť,

$\gamma \in (0; 1)$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci zakrivenie funkcie,

$\theta > 0$ je reálny konštantný parameter vyjadrujúci eleváciu funkcie.

Pokiaľ sme neuviedli inak, predpokladali sme referenčný bod s hodnotou 0, t. j. $SQ = 0$ a žiadne utopené náklady, t. j. $SC = 0 \Rightarrow NEUSC = 0$ podľa rovnice (3.17). Hodnoty parametrov sme si v našom modeli zvolili nasledovne:

- Parametre $\varepsilon^+ = \varepsilon^- = 100\,000$, pretože sme túto hodnotu považovali za vyhovujúcu. Diferencovanie ε^+ a ε^- pre účely našej práce sme nepovažovali za potrebné.
- Parametre $\lambda^+ = \lambda^- = 1$ z dôvodu zjednodušenia. Diferencovanie λ^+ a λ^- pre účely našej práce sme nepovažovali za potrebné.
- Parametre $\nu^+ = \nu^- = 0,72$, pretože sme túto hodnotu považovali za vyhovujúcu. Diferencovanie ν^+ a ν^- pre účely našej práce sme nepovažovali za potrebné.
- Parametre $\psi^+ = \psi^- = 0,05$, pretože sme túto hodnotu považovali za vyhovujúcu. Diferencovanie ψ^+ a ψ^- pre účely našej práce sme nepovažovali za potrebné.
- Parametre $\gamma^+ = \gamma^- = 0,66$, čo sme si vypočítali ako vážený priemer hodnoty γ^+ pre jednoparametrový Prelecov tvar funkcie váh z rôznych štúdií zhrnutých v práci Adama Booijsa a jeho kolegov (Booij, van Praag, van de Kuilen, 2009, tab. 1). Diferencovanie γ^+ a γ^- pre účely našej práce sme nepovažovali za potrebné.

- Parametre $\theta^+ = \theta^- = 0,97$, pretože sme chceli, aby $w(0,4) \approx 0,4$, ako to naznačilo neurónová aktivita ľavého a pravého striata na obr. 1.2 na str. 19. Diferencovanie θ^+ a θ^- pre účely našej práce sme nepovažovali za potrebné.
- Parameter $\tau = 0$, pretože sme neanalyzovali náš model na príkladoch časového diskontovania z dôvodu, že rozdielnosť modelov v časovom diskontovaní ovplyvňuje len diskontný faktor, ktorého rôzne podoby už boli analyzované mnohými inými autormi (McClure et al., 2004; Kable, Glimcher, 2007; Bačová, 2016).
- Parametre $\alpha_{ra}^+ = \alpha_{rt}^- = 0,12$ v prípade, ak pravdepodobnosť realizácie by bola nižšia ako 1, čo sme odvodili z približnej hodnoty odhadnutej experimentálnym spôsobom Amosom Tverským a Danielom Kahnemanom pre exponent funkcie hodnoty modelu kumulatívnej prospektovej teórie reprezentujúci averziu voči riziku (Baláž, 2009, str. 94) ako $1 - \alpha_{ra}^+ = 0,88$. Diferencovanie α_{ra}^+ a α_{rt}^- pre účely našej práce sme nepovažovali za potrebné. Rovnakú hodnotu sme priradili aj parametrom, ktoré vyjadrujú averziu alebo toleranciu voči nejednoznačnosti, t. j. $\alpha_{aa}^+ = \alpha_{at}^- = 0,12$ v prípade, ak pravdepodobnosť realizácie by nebola známa.
- Parameter $\sigma = 0$, pretože sme predpokladali, že si hráči vyberú voľbu, ktorú preferujú vzhľadom na svoje preferencie.
- Parameter $\phi = 1$, pretože neurónová aktivita DLPFC sa signifikantne nemení s voľbou, ako je to znázornené na grafe B na obr. 2.2 na str. 35. Vplyv neurónovej aktivity DLPFC a PPC sa prejavuje až po použití rTMS alebo rDCS.

V našom modeli sme ekvivalent istoty odvodili z hry s jednou možnosťou s istým výsledkom bez alternatívy. Ak by bol tento výsledok zisk, t. j. $TNEU(G) > 0$, potom dosadením do rovnice (3.24) by sme dostali

$$\begin{aligned}
TNEU(G) &= TNEUG - TAA = TNEUG - (TNEUG - NEUCE^+) = NEUCE^+ \\
\Rightarrow CE_{TNEU} &= \begin{cases} \left(\frac{TNEU(G)}{\lambda^+} - (\varepsilon^+ - \varepsilon^{+\nu^+}) \right)^{\frac{1}{\nu^+}}, & \text{ak } \frac{TNEU(G)}{\lambda^+} > \varepsilon^+ \\ \frac{TNEU(G)}{\lambda^+}, & \text{ak } \frac{TNEU(G)}{\lambda^+} \leq \varepsilon^+, \end{cases}
\end{aligned}$$

a ak by bol tento výsledok strata, t. j. $TNEU(G) < 0$, potom dosadením do rovnice (3.24) by sme dostali

$$TNEU(G) = -TNEUL - TAA = -TNEUL - NEUCE^- = -2NEUCE^-$$

$$\Rightarrow CE_{TNEU} = - \begin{cases} \left(-\frac{TNEU(G)}{2\lambda^-} - \left(\varepsilon^- - \varepsilon^{-\nu^-} \right) \right)^{\frac{1}{\nu^-}}, & \text{ak } -\frac{TNEU(G)}{2\lambda^-} > \varepsilon^- \\ -\frac{TNEU(G)}{2\lambda^-}, & \text{ak } -\frac{TNEU(G)}{2\lambda^-} \leq \varepsilon^-. \end{cases}$$

Avšak ekvivalent istoty z očakávaného úžitku vypočítaného naším modelom nebol ekvivalent istoty v pravom slova zmysle, pretože náš model, podobne, ako iné modely kalkulujúce s faktorom ľútosti, porušoval axiómu tranzitivity z dôvodu vyjadrenia úžitku nielen z určitej hry, ale aj z porovnania s alternatívnou hrou. Preto by nebolo možné nahradiť danú hru bezrizikovou hrou obsahujúcou len jeden výsledok v hodnote ekvivalentu istoty, pretože takáto hra by už mala diferentný úžitok voči alternatívnej hre. Ekvivalent istoty z očakávaného úžitku vypočítaného naším modelom vyjadruje hodnotu, z ktorej hráč pociťuje rovnaký úžitok, ak by k tejto hodnote neexistovala alternatíva. Teda, ak by hráč mal z istej straty -50 EUR voči alternatíve úžitok -110, rovnaký úžitok by mal napríklad z ekvivalentu istoty -55 EUR bez alternatívy. Porušenie axiómy tranzitivity sme si ukázali na prvom príklade v našej analýze.

V modeli teórie očakávaného úžitku sme použili tvar funkcie užitočnosti $u(x) = x^\alpha$, kde hodnotu parametra sme si zvolili $\alpha = 0,88$, čo je približná hodnota odhadnutá experimentálnym spôsobom Amosom Tverským a Danielom Kahnemanom (Baláž, 2009, str. 94). Po dosadení tvaru funkcie užitočnosti s danou hodnotou parametra do modelu teórie očakávaného úžitku sme ho vedeli upraviť do podoby

$$EU(G) = \sum_{i=1}^N p_i x_i^{0,88},$$

kde EU je očakávaný úžitok hry G vypočítaný modelom teórie očakávaného úžitku,

p_i je objektívna pravdepodobnosť realizácie i -teho výsledku hry G , pričom platí

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1, p_i \in \langle 0; 1 \rangle,$$

x_i je hodnota i -teho výsledku hry G ,

N je celkový počet výsledkov hry G .

Ekvivalent istoty sme v modeli teórie očakávaného úžitku vypočítali ako

$$CE_{EU} = EU^{\frac{1}{0,88}}(G),$$

V modeli kumulatívnej prospektovej teórie sme použili Tverského-Kahnemanov tvar funkcie váh

$$w(p) = \frac{p^\gamma}{(p^\gamma + (1-p)^\gamma)^{\frac{1}{\gamma}}}$$

a funkciu hodnoty v tvare

$$v(x_i) = \begin{cases} x^\alpha, & \text{ak } x_i > 0 \\ -\lambda_L x^\alpha, & \text{ak } x_i \leq 0, \end{cases}$$

kde hodnoty parametrov sme si zvolili $\alpha = 0,88$, $\lambda_L = 2,25$, $\gamma^+ = 0,61$ a $\gamma^- = 0,69$, čo boli približné hodnoty odhadnuté experimentálnym spôsobom Amosom Tverským a Danielom Kahnemanom (Baláž, 2009, str. 94). Po dosadení tvaru funkcie váh a tvaru funkcie hodnoty s danými hodnotami parametrov do modelu kumulatívnej prospektovej teórie sme ho vedeli upraviť do podoby

$$\begin{aligned} CPTU(G) = & \sum_{i=1}^K \left[\frac{(p_i + \dots + p_1)^{0,61}}{\left((p_i + \dots + p_1)^{0,61} + (1 - (p_i + \dots + p_1))^{0,61} \right)^{\frac{1}{0,61}}} \right. \\ & \left. - \frac{(p_{i-1} + \dots + p_1)^{0,61}}{\left((p_{i-1} + \dots + p_1)^{0,61} + (1 - (p_{i-1} + \dots + p_1))^{0,61} \right)^{\frac{1}{0,61}}} \right] x_i^{+-0,88} \\ & - 2,25 \sum_{i=K+1}^N \left[\frac{(p_i + \dots + p_N)^{0,69}}{\left((p_i + \dots + p_N)^{0,69} + (1 - (p_i + \dots + p_N))^{0,69} \right)^{\frac{1}{0,69}}} \right. \\ & \left. - \frac{(p_{i-1} + \dots + p_N)^{0,69}}{\left((p_{i-1} + \dots + p_N)^{0,69} + (1 - (p_{i-1} + \dots + p_N))^{0,69} \right)^{\frac{1}{0,69}}} \right] x_i^{-0,88}, \end{aligned}$$

pričom

$$\begin{aligned} x_i^+ = x_i^+(x_i, SQ) &= \begin{cases} x_i - SQ, & \text{ak } x_i > SQ \\ 0, & \text{ak } x_i \leq SQ, \end{cases} \\ x_i^- = x_i^-(x_i, SQ) &= \begin{cases} 0, & \text{ak } x_i \geq SQ \\ SQ - x_i, & \text{ak } x_i < SQ, \end{cases} \end{aligned}$$

kde $CPTU$ je očakávaný úžitok hry G vypočítaný modelom kumulatívnej prospektovej teórie,

p_i je objektívna pravdepodobnosť realizácie i -teho výsledku hry G , pričom platí

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1, p_i \in \langle 0; 1 \rangle,$$

x_i je absolútna výška hodnoty i -teho výsledku tejto hry,

SQ je hodnota referenčného bodu hráča,

K je počet ziskových výsledkov hry G ,

$N \geq K$ je celkový počet výsledkov hry G .

Ekvivalent istoty sme v modeli kumulatívnej prospektovej teórie vypočítali ako

$$CE_{CPTU} = \begin{cases} CPTU^{\frac{1}{0,88}}(G), & \text{ak } CPTU(G) > 0 \\ -\left(-\frac{CPTU(G)}{2,25}\right)^{\frac{1}{0,88}}, & \text{ak } CPTU(G) \leq 0. \end{cases}$$

4.1 Efekt averzie voči ľútosti

Najprv sme náš model analyzovali na hypotetickom príklade 4.1 uvedenom v tab. 4.1, na ktorom sme si ukázali porušenie axiómy tranzitivity efektom ľútosti.

Tab. 4.1: Hry s efektom averzie voči ľútosti

Príklad 4.1			
Hra 4.1		Hra 4.2	
Zisk	p [%]	Zisk	p [%]
20	100,00	50	60,00
		0	40,00

Zdroj: autor

Keďže hry v príklade 4.1 boli pozitívne, t. j. $\nexists x_i^- > 0$, podľa rovníc (3.7), (3.13) a (3.18) platilo

$$TNEUL = ATNEUL = TNERL = 0.$$

Celkový neurónový očakávaný úžitok pre hru 4.1 sme vypočítali podľa rovnice (3.24)

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4.1}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\ &= TNEUG - TNEUG + NEUCE^+ \\ &= NEUCE^+ = 20, \end{aligned}$$

kde $TNERG = 0$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu nesplnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{x}_{\min} = 0 \not\geq x_1^+ = 20 \Rightarrow OC_1^+ = 0,$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$NEUCE^+ = CE = ATNEUG = 20$$

podľa rovníc (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$p_1 = 1 \Rightarrow \alpha_{ra}^+ = \alpha_{aa}^+ = 0,$$

$$ATNEUG = 20 \leq \varepsilon^+ = 100000,$$

$$CE = 20 \leq \varepsilon^+ = 100000.$$

Rovnakým spôsobom sme postupovali pre výpočet celkového neurónového očakávaného úžitku pre hru 4.2 rovnicou (3.24)

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4.2}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\ &= TNEUG - TNERG - TNEUG + NEUCE^+ \\ &= -TNERG + NEUCE^+ = -9,27 + 24,64 = 15,37, \end{aligned}$$

kde $TNERG = u^+(20)(w^+(1,00) - w^+(0,60)) = 20 \left(1 - e^{-0,97(-\ln 0,60)^{0,66}}\right) = 9,27$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{x}_{\min} = 20 \not> x_1^+ = 50 \Rightarrow OC_1^+ = 0,$$

$$\tilde{x}_{\min} = 20 > x_2^+ = 0 \Rightarrow OC_2^+ = 20 - 0 = 20,$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$ATNEUG = u_A^+(50)w^+(0,60) = 50^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,60)^{0,66}} = 16,78,$$

$$NEUCE^+ = CE = ATNEUG^{\frac{1}{1-0,12}} = 24,64$$

podľa rovníc (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\alpha_{ra}^+ = 0,12, \quad \alpha_{aa}^+ = 0,$$

$$ATNEUG = 24,64 \leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118,86,$$

$$CE = 24,64 \leq \varepsilon^+ = 100000.$$

Postupne sme vypočítali ekvivalenty istoty najprv s efektom averzie voči lútosti a potom bez neho, t. j. ekvivalenty istoty z $TNEU + TNERG$, ktoré sme spolu s ekvivalentmi istoty modelu očakávaného úžitku a modelu kumulatívnej prospektovej

teórie zapísali do tab. 4.2. Na rozdiel od zvyšných modelov náš model ponúka možnosť byť aplikovateľný aj na situácie, v ktorých hráč zmení svoje rozhodnutie na základe očakávanej ľútosti vyvolanej alternatívnou hrou, vďaka porušeniu axiómy tranzitivity, pretože ak by sme nahradili obe hry ich ekvivalentmi istoty bez zahrnutia averzie voči ľútosti, t. j. keby sme ich posudzovali nezávisle na sebe, z hry 4.2 by mal hráč vyšší úžitok ako z hry 4.1. Ak by sa však posudzovali navzájom, averzia voči ľútosti by spôsobila preferovanie hry 4.1 pred hrou 4.2 zo strachu z nesprávneho rozhodnutia.

Tab. 4.2: Ekvivalenty istoty hier s efektom averzie voči ľútosti

	Ekvivalenty istoty s ľútosťou		Ekvivalenty istoty bez ľútosti	
	Hra 4.1	Hra 4.2	Hra 4.1	Hra 4.2
CE_{EU}	20,00	27,98	20,00	27,98
CE_{CPTU}	20,00	21,40	20,00	21,40
CE_{TNEU}	20,00	15,37	20,00	24,64

Zdroj: autor

4.2 Allaisov paradox

Aplikovali sme náš model aj na Allaisov paradox zložený z príkladov 4.2 a 4.3 uvedených v tab. 4.3. Experimentálne sa zistilo, že kým v príklade 4.2 hráči preferovali hru 4.3, v príklade 4.3 preferovali hru 4.6.

Tab. 4.3: Hry Allaisovho paradoxu

Príklad 4.2				Príklad 4.3			
Hra 4.3		Hra 4.4		Hra 4.5		Hra 4.6	
Zisk	p [%]	Zisk	p [%]	Zisk	p [%]	Zisk	p [%]
1 000 000	100,00	5 000 000	10,00	1 000 000	11,00	5 000 000	10,00
		1 000 000	89,00	0	89,00	0	90,00
		0	1,00				

Zdroj: autor podľa (Baláž, 2009, tab. 1.3)

Z dôvodu pozitívnosti hier v príkladoch 4.2 a 4.3, t. j. $\nexists x_i^- > 0$, podľa rovníc (3.7), (3.13) a (3.18) platilo

$$TNEUL = ATNEUL = TNERL = 0.$$

V príklade 4.2 sme celkový neurónový očakávaný úžitok pre hru 4.3 vypočítali rovnicou (3.24)

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.3}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\
&= TNEUG - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= NEUCE^+ = 116911, 89,
\end{aligned}$$

kde $TNERG = 0$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu nesplnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{x}_{\min} = 0 \not\geq x_1^+ = 1000000 \Rightarrow OC_1^+ = 0,$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$\begin{aligned}
ATNEUG &= TNEUG = 1000000^{0,72} + 100000 - 100000^{0,72} = 116911, 89, \\
CE &= \left(ATNEUG - \left(100000 - 100000^{0,72} \right) \right)^{\frac{1}{0,72}} = 1000000, \\
NEUCE^+ &= CE^{0,72} + 100000 - 100000^{0,72} = 116911, 89
\end{aligned}$$

podľa rovníc (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\begin{aligned}
p_1 = 1 &\Rightarrow \alpha_{ra}^+ = \alpha_{aa}^+ = 0, \\
ATNEUG = 116911, 89 &> \varepsilon^+ = 100000, \\
CE = 1000000 &> \varepsilon^+ = 100000.
\end{aligned}$$

Rovnakým spôsobom sme postupovali pre výpočet celkového neurónového očakávaného úžitku pre hru 4.4 rovnicou (3.24)

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.4}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\
&= TNEUG - TNERG - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= -TNERG + NEUCE^+ \\
&= -5321, 01 + 116443, 41 = 111122, 40,
\end{aligned}$$

kde

$$\begin{aligned}
TNERG &= u^+(1000000)(w^+(1, 00) - w^+(0, 99)) \\
&= \left(1000000^{0,72} + 100000 - 100000^{0,72} \right) \left(1 - e^{-0,97(-\ln 0,99)^{0,66}} \right) \\
&= 5321, 01
\end{aligned}$$

podľa rovnice (3.10) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{x}_{\min} = 1000000 \not\geq x_1^+ = 5000000 \Rightarrow OC_1^+ = 0,$$

$$\tilde{x}_{\min} = 1000000 \not\geq x_2^+ = 1000000 \Rightarrow OC_2^+ = 0,$$

$$\tilde{x}_{\min} = 1000000 > x_3^+ = 0 \Rightarrow OC_3^+ = 1000000 - 0 = 1000000,$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$\begin{aligned} ATNEUG &= u_A^+(5000000)w^+(0, 10) + u_A^+(1000000)(w^+(0, 99) - w^+(0, 10)) \\ &= \left(5000000^{0,72-0,12} + 100000^{1-0,12} - 100000^{0,72-0,12}\right) e^{-0,97(-\ln 0,10)^{0,66}} \\ &\quad + \left(1000000^{0,72-0,12} + 100000^{1-0,12} - 100000^{0,72-0,12}\right) * \\ &\quad * \left(e^{-0,97(-\ln 0,99)^{0,66}} - e^{-0,97(-\ln 0,10)^{0,66}}\right) \\ &= 28025, 41, \\ CE &= \left(ATNEUG - \left(100000^{1-0,12} - 100000^{0,72-0,12}\right)\right)^{\frac{1}{0,72-0,12}} = 968993, 81, \\ NEUCE^+ &= CE^{0,72} + 100000 - 100000^{0,72} = 116443, 41 \end{aligned}$$

podľa rovníc (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\begin{aligned} \alpha_{ra}^+ &= 0, 12, & \alpha_{aa}^+ &= 0, \\ ATNEUG &= 28025, 41 > \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118, 86, \\ CE &= 968993, 81 > \varepsilon^+ = 100000. \end{aligned}$$

Analogický postup sme zvolili aj pre výpočet celkových očakávaných úžitkov z hier 4.5 a 4.6 v príklade 4.3

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4.5}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\ &= TNEUG - TNEUG + NEUCE^+ \\ &= NEUCE^+ = 17704, 24, \end{aligned}$$

kde $TNERG = 0$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu nesplnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{x}_{\min} = 0 \not\geq x_1^+ = 1000000 \Rightarrow OC_1^+ = 0,$$

$$\tilde{x}_{\min} = 0 \not\geq x_2^+ = 0 \Rightarrow OC_2^+ = 0,$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$\begin{aligned}
ATNEUG &= u_A^+(1000000)w^+(0, 11) \\
&= \left(1000000^{0,72-0,12} + 100000^{1-0,12} - 100000^{0,72-0,12}\right)e^{-0,97(-\ln 0,11)^{0,66}} \\
&= 5474,04, \\
CE &= ATNEUG^{\frac{1}{1-0,12}} = 17704,24, \\
NEUCE^+ &= CE = 17704,24
\end{aligned}$$

podľa rovníc (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\begin{aligned}
\alpha_{ra}^+ &= 0,12, & \alpha_{aa}^+ &= 0, \\
ATNEUG = 5474,04 &\leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118,86, \\
CE = 17704,24 &\leq \varepsilon^+ = 100000,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.6}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\
&= TNEUG - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= NEUCE^+ = \mathbf{21260,71},
\end{aligned}$$

kde $TNERG = 0$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu nesplnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\begin{aligned}
\tilde{x}_{\min} = 0 &\not\geq x_1^+ = 5000000 \Rightarrow OC_1^+ = 0, \\
\tilde{x}_{\min} = 0 &\not\geq x_2^+ = 0 \Rightarrow OC_2^+ = 0,
\end{aligned}$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$\begin{aligned}
ATNEUG &= u_A^+(5000000)w^+(0, 10) \\
&= \left(5000000^{0,72-0,12} + 100000^{1-0,12} - 100000^{0,72-0,12}\right)e^{-0,97(-\ln 0,10)^{0,66}} \\
&= 6430,85, \\
CE &= ATNEUG^{\frac{1}{1-0,12}} = 21260,71, \\
NEUCE^+ &= CE = 21260,71
\end{aligned}$$

podľa rovníc (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\begin{aligned}
\alpha_{ra}^+ &= 0,12, & \alpha_{aa}^+ &= 0, \\
ATNEUG = 6430,85 &\leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118,86, \\
CE = 21260,71 &\leq \varepsilon^+ = 100000.
\end{aligned}$$

Vypočítané ekvivalenty istoty z hier v príkladoch 4.2 a 4.3 spoločne s ekvivalentmi istoty modelu očakávaného úžitku a modelu kumulatívnej prospektovej teórie sme zapísali do tab. 4.4. Výstup nášho modelu bol v súlade s experimentálnym pozorovaním na rozdiel od zvyšných modelov. Dôvod, prečo model kumulatívnej prospektovej teórie nedokázal dobre modelovať Allaisov paradox, bol v hodnote parametra α . Amos Tversky a Daniel Kahneman odhadli hodnoty svojich parametrov na základe niekoľkých experimentov, medzi ktorými boli aj hry na princípe Allaisovho paradoxu. Avšak ich experimenty boli s nízkymi hodnotami výsledkov daných hier, a preto na rozdiel od nášho modelu, zachytili len averziu voči riziku a nie efekt klesajúceho marginálneho úžitku. Aby ich model dokázal modelovať aj Allaisov paradox v pôvodnom znení, musel by ich parameter mať hodnotu $\alpha \leq 0,24$.

Tab. 4.4: Ekvivalenty istoty hier Allaisovho paradoxu

	Príklad 4.2		Príklad 4.3	
	Hra 4.3	Hra 4.4	Hra 4.5	Hra 4.6
CE_{EU}	1 000 000	1 349 927,31	81 409,20	365 263,58
CE_{CPTU}	1 000 000	1 577 101,58	156 215,32	740 752,68
CE_{TNEU}	1 000 000	637 196,40	17 704,24	21 260,71
Pozorovanie	✓	✗	✗	✓

Zdroj: autor

4.3 Regulárna hra

Amos Tversky a Daniel Kahneman odvodili priebeh funkcie hodnoty v kumulatívnej prospektovej teórii z niekoľkých experimentov, medzi ktorými boli aj regulárne hry. Dva príklady na regulárne hry, príklady 4.4 a 4.5, sme uviedli v tab. 4.5 na str. 70. V hrách 4.8 a 4.10 mali hráči za úlohu určiť veľkosť zisku tak, aby boli voči hrám 4.7 a 4.8 indiferentní, respektíve voči hrám 4.9 a 4.10 indiferentní. Správny model popisujúci ekonomické rozhodovanie by preto mal pre obe hry vypočítať približne rovnaký ekvivalent istoty.

Keďže všetky hry v tab. 4.5 boli regulárne, platilo $TNERG = TNERL = 0$ a mohli sme postupovať rovnakým spôsobom výpočtu celkového neurónového úžitku pre všetky hry vychádzajúc z rovnice (3.24)

Tab. 4.5: Regulárne hry

Príklad 4.4				Príklad 4.5			
Hra 4.7		Hra 4.8		Hra 4.9		Hra 4.10	
Zisk	p [%]	Zisk	p [%]	Zisk	p [%]	Zisk	p [%]
50	50,00	112	50,00	150	50,00	301	50,00
-20	50,00	-50	50,00	-50	50,00	-125	50,00

Zdroj: autor podľa (Baláž, 2009, tab. 1.9)

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.7}) &= TNEUG - TNEUL - TAA \\
&= TNEUG - TNEUL - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= -TNEUL + NEUCE^+ = -9,34 + 10,75 = 1,41,
\end{aligned}$$

kde $TNEUL = u^-(20)w^-(0,5) = 20e^{-0,97(-\ln 0,50)^{0,66}} = 9,34$ podľa rovnice (3.7),
pretože $x_2^- = 20 < \varepsilon^- = 100000$,

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), pretože

$$\begin{aligned}
ATNEUG &= u_A^+(50)w^+(0,50) = 50^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,50)^{0,66}} = 14,60, \\
ATNEUL &= u_A^-(20)w^-(0,50) = 20^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,50)^{0,66}} = 6,52
\end{aligned}$$

podľa rovníc (3.14) a (3.18), keďže $\forall p_i < 1$, avšak známych pravdepodobností realizácie $\Rightarrow \alpha_{aa}^+ = \alpha_{at}^- = 0$, teda $ATNEUG > ATNEUL$, kde

$$\begin{aligned}
CE &= (ATNEUG - ATNEUL)^{\frac{1}{1-0,12}} = 10,75, \\
NEUCE^+ &= CE = 10,75
\end{aligned}$$

podľa rovníc (3.16) a (3.21), keďže

$$\begin{aligned}
\alpha_{ra}^+ &= \alpha_{rt}^- = 0,12, & \alpha_{aa}^+ &= \alpha_{at}^- = 0, \\
(ATNEUG - ATNEUL) &= 8,08 \leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118,86, \\
CE &= 10,75 \leq \varepsilon^+ = 100000,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.8}) &= TNEUG - TNEUL - TAA \\
&= TNEUG - TNEUL - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= -TNEUL + NEUCE^+ = -23,35 + 21,84 = -1,51,
\end{aligned}$$

kde $TNEUL = u^-(50)w^-(0, 5) = 50e^{-0,97(-\ln 0,50)^{0,66}} = 23,35$ podľa rovnice (3.7),
pretože $x_2^- = 50 < \varepsilon^- = 100000$,

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), pretože

$$ATNEUG = u_A^+(112)w^+(0, 50) = 112^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,50)^{0,66}} = 29,69,$$

$$ATNEUL = u_A^-(50)w^-(0, 50) = 50^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,50)^{0,66}} = 14,60$$

podľa rovníc (3.14) a (3.18), keďže $\forall p_i < 1$, avšak známych pravdepodobností realizácie $\Rightarrow \alpha_{aa}^+ = \alpha_{at}^- = 0$, teda $ATNEUG > ATNEUL$, kde

$$CE = (ATNEUG - ATNEUL)^{\frac{1}{1-0,12}} = 21,84,$$

$$NEUCE^+ = CE = 21,84$$

podľa rovníc (3.16) a (3.21), keďže

$$\alpha_{ra}^+ = \alpha_{rt}^- = 0,12, \quad \alpha_{aa}^+ = \alpha_{at}^- = 0,$$

$$(ATNEUG - ATNEUL) = 15,09 < \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118,86,$$

$$CE = 21,84 < \varepsilon^+ = 100000,$$

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4.9}) &= TNEUG - TNEUL - TAA \\ &= TNEUG - TNEUL - TNEUG + NEUCE^+ \\ &= -TNEUL + NEUCE^+ = -23,35 + 36,65 = 13,30, \end{aligned}$$

kde $TNEUL = u^-(50)w^-(0, 5) = 50e^{-0,97(-\ln 0,50)^{0,66}} = 23,35$ podľa rovnice (3.7),
pretože $x_2^- = 50 < \varepsilon^- = 100000$,

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), pretože

$$ATNEUG = u_A^+(150)w^+(0, 50) = 112^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,50)^{0,66}} = 38,39,$$

$$ATNEUL = u_A^-(50)w^-(0, 50) = 50^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,50)^{0,66}} = 14,60$$

podľa rovníc (3.14) a (3.18), keďže $\forall p_i < 1$, avšak známych pravdepodobností realizácie $\Rightarrow \alpha_{aa}^+ = \alpha_{at}^- = 0$, teda $ATNEUG > ATNEUL$, kde

$$CE = (ATNEUG - ATNEUL)^{\frac{1}{1-0,12}} = 36,65,$$

$$NEUCE^+ = CE = 36,65$$

podľa rovníc (3.16) a (3.21), keďže

$$\alpha_{ra}^+ = \alpha_{rt}^- = 0,12, \quad \alpha_{aa}^+ = \alpha_{at}^- = 0,$$

$$(ATNEUG - ATNEUL) = 23,79 \leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118,86,$$

$$CE = 36,65 \leq \varepsilon^+ = 100000,$$

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.10}) &= TNEUG - TNEUL - TAA \\
&= TNEUG - TNEUL - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= -TNEUL + NEUCE^+ = -58,37 + 62,70 = 4,33,
\end{aligned}$$

kde $TNEUL = u^-(125)w^-(0,5) = 125e^{-0,97(-\ln 0,50)^{0,66}} = 58,37$ podľa rovnice (3.7),
pretože $x_2^- = 125 < \varepsilon^- = 100000$,

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), pretože

$$\begin{aligned}
ATNEUG &= u_A^+(301)w^+(0,50) = 301^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,50)^{0,66}} = 70,86, \\
ATNEUL &= u_A^-(125)w^-(0,50) = 125^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,50)^{0,66}} = 32,70
\end{aligned}$$

podľa rovníc (3.14) a (3.18), keďže $\forall p_i < 1$, avšak známych pravdepodobností realizácie $\Rightarrow \alpha_{aa}^+ = \alpha_{at}^- = 0$, teda $ATNEUG > ATNEUL$, kde

$$\begin{aligned}
CE &= (ATNEUG - ATNEUL)^{\frac{1}{1-0,12}} = 62,70, \\
NEUCE^+ &= CE = 62,70
\end{aligned}$$

podľa rovníc (3.16) a (3.21), keďže

$$\begin{aligned}
\alpha_{ra}^+ &= \alpha_{rt}^- = 0,12, & \alpha_{aa}^+ &= \alpha_{at}^- = 0, \\
(ATNEUG - ATNEUL) &= 38,16 \leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118,86, \\
CE &= 62,70 \leq \varepsilon^+ = 100000.
\end{aligned}$$

V ďalšom kroku sme vypočítali absolútny rozdiel ekvivalentov istoty oboch hier v príkladoch 4.4 a 4.5, ktoré sme spolu s ekvivalentmi istoty nášho modelu, modelu očakávaného úžitku a modelu kumulatívnej prospektivej teórie zapísali do tab. 4.6 na str. 73. V oboch príkladoch dokázal náš model o trochu horšie modelovať ekonomické rozhodovanie ako model kumulatívnej prospektivej teórie, ale výrazne lepšie ako model teórie očakávaného úžitku. Trochu vyšší rozdiel nášho modelu od modelu kumulatívnej prospektivej teórie bol spôsobený nastavenými hodnotami parametrov. Hodnoty parametrov modelu kumulatívnej prospektivej teórie boli odvodené priamo z experimentov, ktorých súčasťou boli aj tieto dva príklady na rozdiel od hodnôt parametrov nášho modelu. Náš model však nevyžadoval špeciálny parameter λ_L , ktorým by zvýšil váhu straty, na rozdiel od modelu kumulatívnej prospektivej teórie.

Tab. 4.6: Ekvivalenty istoty regulárnych hier

	Príklad 4.4			Príklad 4.5		
	Hra 4.7	Hra 4.8	Rozdiel	Hra 4.9	Hra 4.10	Rozdiel
CE_{EU}	11,61	23,61	12,00	39,61	67,77	28,16
CE_{CPTU}	-0,45	-2,59	2,14	3,02	-4,05	7,07
CE_{TNEU}	1,41	-0,76	2,17	13,31	4,33	8,98
Pozorovanie	$\sim$	$\sim$	0,00	$\sim$	$\sim$	0,00

Zdroj: autor

4.4 Birnbaumov paradox

Birnbaumov paradox vyplýval z experimentov, ktoré Michael H. Birnbaum realizoval pri tvorbe modelov konfiguračných váh. Dané experimenty uvádzame v tab. 4.7, v ktorých výsledky sme už zoradili dvojúrovňovo pre náš model, t. j. najprv podľa početnosti výsledkov danej hry počnúc najpočetnejším výsledkom a následne pre každú početnosť podľa ich absolútnych hodnôt výsledkov počnúc najvyššími hodnotami. Experimentálne sa zistilo, že kým v príklade 4.6 hráči preferovali hru 4.12, v príklade 4.7 preferovali hru 4.13.

Tab. 4.7: Hry Birnbaumovho paradoxu

Príklad 4.6				Príklad 4.7			
Hra 4.11		Hra 4.12		Hra 4.13		Hra 4.14	
Zisk	p [%]	Zisk	p [%]	Zisk	p [%]	Zisk	p [%]
50	10,00	100	85,00	100	85,00	100	95,00
50	5,00	100	10,00	50	15,00	7	5,00
100	85,00	7	5,00				

Zdroj: autor podľa (Baláž, 2009, str. 161)

Keďže hry v príkladoch 4.6 a 4.7 boli pozitívne, t. j. $\nexists x_i^- > 0$, podľa rovníc (3.7), (3.13) a (3.18) platilo

$$TNEUL = ATNEUL = TNERL = 0.$$

V príklade 4.6 sme celkový neurónový očakávaný úžitok pre hru 4.11 vypočítali rovnicou (3.24)

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.11}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\
&= TNEUG - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= NEUCE^+ = 84, 38,
\end{aligned}$$

kde $TNERG = 0$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu nesplnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\begin{aligned}
\tilde{x}_{\min} = 7 \not\geq x_1^+ = 50 &\Rightarrow OC_1^+ = 0, \\
\tilde{x}_{\min} = 7 \not\geq x_2^+ = 50 &\Rightarrow OC_2^+ = 0, \\
\tilde{x}_{\min} = 7 \not\geq x_3^+ = 100 &\Rightarrow OC_3^+ = 0,
\end{aligned}$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$\begin{aligned}
ATNEUG &= u_A^+(50) \left(w^+(0, 10) + \left(w^+(1, 00) - w^+(0, 15) \right) 0,05^{(w^+(1,00)-w^+(0,15))} \right) \\
&\quad + u_A^+(50) \left(w^+(0, 15) - w^+(0, 10) \right) \\
&\quad + u_A^+(100) \left(w^+(1, 00) - w^+(0, 15) \right) \left(1 - 0,05^{(w^+(1,00)-w^+(0,15))} \right) \\
&= 50^{1-0,12} \left(1 - e^{-0,97(-\ln 0,15)^{0,66}} \right) 0,05^{\left(1 - e^{-0,97(-\ln 0,15)^{0,66}} \right)} \\
&\quad + 50^{1-0,12} e^{-0,97(-\ln 0,15)^{0,66}} \\
&\quad + 100^{1-0,12} \left(1 - e^{-0,97(-\ln 0,15)^{0,66}} \right) \left(1 - 0,05^{\left(1 - e^{-0,97(-\ln 0,15)^{0,66}} \right)} \right) \\
&= 49, 56,
\end{aligned}$$

$$NEUCE^+ = CE = ATNEUG^{\frac{1}{1-0,12}} = 84, 38$$

podľa rovníc (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\begin{aligned}
\alpha_{ra}^+ &= 0, 12, & \alpha_{aa}^+ &= 0, \\
ATNEUG = 49, 56 &\leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118, 86, \\
CE = 84, 38 &\leq \varepsilon^+ = 100000.
\end{aligned}$$

Postup sme zachovali aj pre hru 4.12

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.12}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\
&= TNEUG - TNERG - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= -TNERG + NEUCE^+ = -1, 74 + 95, 84 = 94, 10,
\end{aligned}$$

kde

$$\begin{aligned}
TNERG &= u^+(43) \left(w^+(1, 00) - w^+(0, 95) \right) \left(1 - 0,05^{(w^+(1,00) - w^+(0,95))} \right) \\
&= 43 \left(1 - e^{-0,97(-\ln 0,95)^{0,66}} \right) \left(1 - 0,05^{(1 - e^{-0,97(-\ln 0,95)^{0,66}})} \right) \\
&= 1,74
\end{aligned}$$

podľa rovnice (3.10) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\begin{aligned}
\tilde{x}_{\min} = 50 &\not\geq x_1^+ = 100 \Rightarrow OC_1^+ = 0, \\
\tilde{x}_{\min} = 50 &\not\geq x_2^+ = 100 \Rightarrow OC_2^+ = 0, \\
\tilde{x}_{\min} = 50 &> x_3^+ = 7 \Rightarrow OC_3^+ = 50 - 7 = 43,
\end{aligned}$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$\begin{aligned}
ATNEUG &= u_A^+(100) \left(w^+(0, 85) + \left(w^+(1, 00) - w^+(0, 95) \right) 0,05^{(w^+(1,00) - w^+(0,95))} \right) \\
&\quad + u_A^+(100) \left(w^+(0, 95) - w^+(0, 85) \right) \\
&\quad + u_A^+(7) \left(w^+(1, 00) - w^+(0, 95) \right) \left(1 - 0,05^{(w^+(1,00) - w^+(0,95))} \right) \\
&= 100^{1-0,12} \left(1 - e^{-0,97(-\ln 0,95)^{0,66}} \right) 0,05^{(1 - e^{-0,97(-\ln 0,95)^{0,66}})} \\
&\quad + 100^{1-0,12} e^{-0,97(-\ln 0,95)^{0,66}} \\
&\quad + 7^{1-0,12} \left(1 - e^{-0,97(-\ln 0,95)^{0,66}} \right) \left(1 - 0,05^{(1 - e^{-0,97(-\ln 0,95)^{0,66}})} \right) \\
&= 55,43,
\end{aligned}$$

$$NEUCE^+ = CE = ATNEUG^{\frac{1}{1-0,12}} = 95,84$$

podľa rovníc (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\begin{aligned}
\alpha_{ra}^+ &= 0,12, & \alpha_{aa}^+ &= 0, \\
ATNEUG = 55,43 &\leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118,86, \\
CE = 95,84 &\leq \varepsilon^+ = 100000.
\end{aligned}$$

Následne sme prešli rovnakým postupom k výpočtu celkových očakávaných úžitkov z hier 4.13 a 4.14 v príklade 4.7

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.13}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\
&= TNEUG - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= NEUCE^+ = 86,95,
\end{aligned}$$

kde $TNERG = 0$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu nesplnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{x}_{\min} = 7 \not\geq x_1^+ = 50 \Rightarrow OC_1^+ = 0,$$

$$\tilde{x}_{\min} = 7 \not\geq x_2^+ = 100 \Rightarrow OC_2^+ = 0,$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$\begin{aligned} ATNEUG &= u_A^+(100)(w^+(0, 85) + u_A^+(50) (w^+(1, 00) - w^+(0, 85))) \\ &= 100^{1-0,12} e^{-0,97(-\ln 0,85)^{0,66}} + 50^{1-0,12} (1 - e^{-0,97(-\ln 0,85)^{0,66}}) \\ &= 50,88, \end{aligned}$$

$$NEUCE^+ = CE = ATNEUG^{\frac{1}{1-0,12}} = 86,95$$

podľa rovníc (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\alpha_{ra}^+ = 0,12, \quad \alpha_{aa}^+ = 0,$$

$$ATNEUG = 50,88 \leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118,86,$$

$$CE = 86,95 \leq \varepsilon^+ = 100000,$$

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4,14}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\ &= TNEUG - TNERG - TNEUG + NEUCE^+ \\ &= -TNERG + NEUCE^+ = -5,49 + 87,00 = 81,51, \end{aligned}$$

kde $TNERG = u^+(43)(w^+(1, 00) - w^+(0, 95)) = 43 (1 - e^{-0,97(-\ln 0,95)^{0,66}}) = 5,49$
podľa rovnice (3.10) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{x}_{\min} = 50 \not\geq x_1^+ = 100 \Rightarrow OC_1^+ = 0,$$

$$\tilde{x}_{\min} = 50 > x_2^+ = 7 \Rightarrow OC_2^+ = 50 - 7 = 43,$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$\begin{aligned} ATNEUG &= u_A^+(100)w^+(0, 95) + u_A^+(7) (w^+(1, 00) - w^+(0, 95)) \\ &= 100^{1-0,12} e^{-0,97(-\ln 0,95)^{0,66}} + 7^{1-0,12} (1 - e^{-0,97(-\ln 0,95)^{0,66}}) \\ &= 50,90, \end{aligned}$$

$$NEUCE^+ = CE = ATNEUG^{\frac{1}{1-0,12}} = 87,00$$

podľa rovníc (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\alpha_{ra}^+ = 0,12, \quad \alpha_{aa}^+ = 0,$$

$$ATNEUG = 50,90 \leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118,86,$$

$$CE = 87,00 \leq \varepsilon^+ = 100000.$$

Do tab. 4.8 sme zapísali vypočítané ekvivalenty istoty naším modelom, ako aj ekvivalenty istoty vypočítané modelom očakávaného úžitku a modelom kumulatívnej prospektovej teórie. Výstup nášho modelu bol v súlade s experimentálnym pozorovaním na rozdiel od zvyšných modelov, ktoré predpokladali princíp zlučovania.

Tab. 4.8: Ekvivalenty istoty hier Birnbaumovho paradoxu

	Príklad 4.6		Príklad 4.7	
	Hra 4.11	Hra 4.12	Hra 4.13	Hra 4.14
CE_{EU}	92,25	94,88	92,25	94,88
CE_{CPTU}	82,23	79,05	82,23	79,05
CE_{TNEU}	84,38	95,84	86,95	81,51
Pozorovanie	✗	✓	✓	✗

Zdroj: autor

4.5 Tverského-Kahnemanov paradox

Tverského-Kahnemanov paradox vyplýval z realizovaných experimentov Amosa Tverského a Daniela Kahnemana pri tvorbe ich teórie, ktoré sme uviedli v tab. 4.9. Podľa ich pozorovania, kým v príklade 4.8 hráči preferovali hru 4.15 a v príklade 4.9 preferovali hru 4.17, v príklade 4.10 preferovali hru 4.20 a v príklade 4.11 preferovali hru 4.22.

Tab. 4.9: Hry Tverského-Kahnemanovho paradoxu

Príklad 4.8				Príklad 4.9			
Hra 4.15		Hra 4.16		Hra 4.17		Hra 4.18	
Zisk	p [%]	Zisk	p [%]	Zisk	p [%]	Zisk	p [%]
3 000	100,00	4 000	80,00	5 000	0,10	5	100,00
		0	20,00	0	99,90		
Príklad 4.10				Príklad 4.11			
Hra 4.19		Hra 4.20		Hra 4.21		Hra 4.22	
Strata	p [%]	Strata	p [%]	Strata	p [%]	Strata	p [%]
3 000	100,00	4 000	80,00	5 000	0,10	5	100,00
		0	20,00	0	99,90		

Zdroj: autor podľa (Baláž, 2009, str. 64, 79)

V príkladoch 4.8 a 4.9 boli hry pozitívne, t. j. $\#x_i^- > 0$, podľa rovníc (3.7), (3.13) a (3.18) platilo

$$TNEUL = ATNEUL = TNERL = 0.$$

Naopak, v príkladoch 4.10 a 4.11 boli hry negatívne, t. j. $\#x_i^+ > 0$, podľa rovníc (3.5), (3.10) a (3.14) platilo

$$TNEUG = ATNEUG = TNERG = 0.$$

Zamerali sme sa najprv na výpočet celkových neurónových očakávaných úžitkov pre pozitívne hry v príkladoch 4.8 a 4.9 vychádzajúc z rovnice (3.24)

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4.15}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\ &= TNEUG - TNEUG + NEUCE^+ \\ &= NEUCE^+ = 3000, \end{aligned}$$

kde $TNERG = 0$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu nesplnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{x}_{\min} = 0 \not\geq x_1^+ = 3000 \Rightarrow OC_1^+ = 0,$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$NEUCE^+ = CE = 20$$

podľa rovníc (3.15) a (3.16), keďže

$$p_1 = 1 \Rightarrow \alpha_{ra}^+ = \alpha_{aa}^+ = 0,$$

$$ATNEUG = 3000 \leq \varepsilon^+ = 100000,$$

$$CE = 3000 \leq \varepsilon^+ = 100000,$$

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4.16}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\ &= TNEUG - TNERG - TNEUG + NEUCE^+ \\ &= -TNERG + NEUCE^+ \\ &= -907,90 + 2655,68 = 1747,78, \end{aligned}$$

kde

$$\begin{aligned}
TNERG &= u^+(3000)(w^+(1, 00) - w^+(0, 80)) \\
&= 3000 \left(1 - e^{-0,97(-\ln 0,80)^{0,66}}\right) = 907,90
\end{aligned}$$

podľa rovnice (3.10) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\begin{aligned}
\tilde{x}_{\min} = 3000 &\not> x_1^+ = 4000 \Rightarrow OC_1^+ = 0, \\
\tilde{x}_{\min} = 3000 &> x_2^+ = 0 \Rightarrow OC_2^+ = 3000 - 0 = 3000,
\end{aligned}$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$\begin{aligned}
ATNEUG &= u_A^+(4000)w^+(0, 80) = 4000^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,80)^{0,66}} = 1031,04, \\
NEUCE^+ &= CE = ATNEUG^{\frac{1}{1-0,12}} = 2655,68
\end{aligned}$$

podľa rovníc(3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\begin{aligned}
\alpha_{ra}^+ &= 0,12, & \alpha_{aa}^+ &= 0, \\
ATNEUG = 1031,04 &\leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118,86, \\
CE = 2655,68 &\leq \varepsilon^+ = 100000,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{TNEU}(G_{4,17}) &= (\mathbf{TNEUG} - \mathbf{TNERG}) - \mathbf{TAA} \\
&= \mathbf{TNEUG} - \mathbf{TNERG} - \mathbf{TNEUG} + \mathbf{NEUCE}^+ \\
&= -\mathbf{TNERG} + \mathbf{NEUCE}^+ = -4,84 + 96,58 = 91,74,
\end{aligned}$$

kde $TNERG = u^+(5)(w^+(1, 000) - w^+(0, 001)) = 5 \left(1 - e^{-0,97(-\ln 0,001)^{0,66}}\right) = 4,85$
 podľa rovnice (3.10) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\begin{aligned}
\tilde{x}_{\min} = 5 &\not> x_1^+ = 5000 \Rightarrow OC_1^+ = 0, \\
\tilde{x}_{\min} = 5 &> x_2^+ = 0 \Rightarrow OC_2^+ = 5 - 0 = 5,
\end{aligned}$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$\begin{aligned}
ATNEUG &= u_A^+(5000)w^+(0, 001) = 5000^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,001)^{0,66}} = 55,81, \\
NEUCE^+ &= CE = ATNEUG^{\frac{1}{1-0,12}} = 96,58
\end{aligned}$$

podľa rovníc (3.15) a (3.16), keďže

$$\begin{aligned}
\alpha_{ra}^+ &= 0,12, & \alpha_{aa}^+ &= 0, \\
ATNEUG = 55,81 &\leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118,86, \\
CE = 96,58 &\leq \varepsilon^+ = 100000,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.18}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\
&= TNEUG - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= NEUCE^+ = 5,
\end{aligned}$$

kde $TNERG = 0$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu nesplnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{x}_{\min} = 0 \not\geq x_1^+ = 5 \Rightarrow OC_1^+ = 0,$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$NEUCE^+ = CE = 5$$

podľa rovníc (3.15) a (3.16), keďže

$$p_1 = 1 \Rightarrow \alpha_{ra}^+ = \alpha_{aa}^+ = 0,$$

$$ATNEUG = 5 \leq \varepsilon^+ = 100000,$$

$$CE = 5 \leq \varepsilon^+ = 100000.$$

Potom sme vypočítali celkové neurónové očakávané úžitky pre negatívne hry v príkladoch 4.10 a 4.11 vychádzajúc z rovnice (3.24)

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.19}) &= -(TNEUL + TNERL) - TAA \\
&= -TNEUL - TNERL - NEUCE^- \\
&= -3000 - 907,90 - 3000 = -6907,90,
\end{aligned}$$

kde $TNEUL = 3000$ podľa rovnice (3.7), pretože $x_1 = 3000 < \varepsilon^- = 100000$,

$$TNERL = u^-(3000)(w^-(1,00) - w^-(0,80)) = 3000 \left(1 - e^{-0,97(-\ln 0,80)^{0,66}}\right) = 907,90$$

podľa rovnice (3.13) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.11)

$$x_{\min} = 3000 \not\geq \tilde{x}_1^- = 4000 \Rightarrow OC_1^- = 0,$$

$$x_{\min} = 3000 > \tilde{x}_2^+ = 0 \Rightarrow OC_2^- = 3000 - 0 = 3000,$$

$TAA = KV = NEUCE^-$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$NEUCE^- = CE = 3000$$

podľa rovníc (3.19) a (3.20), keďže

$$p_1 = 1 \Rightarrow \alpha_{rt}^- = \alpha_{at}^- = 0,$$

$$ATNEUL = 3000 \leq \varepsilon^- = 100000,$$

$$CE = 3000 \leq \varepsilon^- = 100000,$$

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.20}) &= -(TNEUL + TNERL) - TAA \\
&= -TNEUL - NEUCE^- \\
&= -2789,47 - 2655,68 = -5445,15,
\end{aligned}$$

kde $TNEUL = u^-(4000)w^-(0,80) = 4000e^{-0,97(-\ln 0,80)^{0,66}} = 2789,47$ podľa rovnice (3.7), pretože $x_1 = 4000 < \varepsilon^- = 100000$,
 $TNERL = 0$ podľa rovnice (3.13) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.11)

$$x_{\min} = 0 \not\geq \tilde{x}_1^- = 3000 \Rightarrow OC_1^- = 0,$$

$TAA = KV = NEUCE^-$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$\begin{aligned}
ATNEUL &= u_A^-(4000)w^-(0,80) = 4000^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,80)^{0,66}} = 1031,04, \\
NEUCE^- &= CE = ATNEUL^{\frac{1}{1-0,12}} = 2655,68
\end{aligned}$$

podľa rovníc (3.18), (3.19) a (3.20), keďže

$$\begin{aligned}
\alpha_{rt}^- &= 0,12, & \alpha_{at}^- &= 0 \\
ATNEUL = 1031,04 &\leq \varepsilon^{-1-\alpha_{rt}^+} = 25118,86, \\
CE = 2655,68 &\leq \varepsilon^- = 100000,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.21}) &= -(TNEUL + TNERL) - TAA \\
&= -TNEUL - NEUCE^- \\
&= -155,08 - 96,58 = -251,66,
\end{aligned}$$

kde $TNEUL = u^-(5000)w^-(0,001) = 5000e^{-0,97(-\ln 0,001)^{0,66}} = 155,08$ podľa rovnice (3.7), pretože $x_1 = 5000 < \varepsilon^- = 100000$,
 $TNERL = 0$ podľa rovnice (3.13) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.11)

$$x_{\min} = 0 \not\geq \tilde{x}_1^- = 5 \Rightarrow OC_1^- = 0,$$

$TAA = KV = NEUCE^-$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$\begin{aligned}
ATNEUL &= u_A^-(5000)w^-(0,001) = 5000^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,001)^{0,66}} = 55,81, \\
NEUCE^- &= CE = ATNEUL^{\frac{1}{1-0,12}} = 96,58
\end{aligned}$$

podľa rovníc (3.18), (3.19) a (3.20), keďže

$$\begin{aligned}\alpha_{rt}^- &= 0,12, & \alpha_{at}^- &= 0 \\ ATNEUL &= 55,81 \leq \varepsilon^{-1-\alpha_{rt}^+} = 25118,86, \\ CE &= 96,58 \leq \varepsilon^- = 100000,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}TNEU(G_{4.22}) &= -(TNEUL + TNERL) - TAA \\ &= -TNEUL - TNERL - NEUCE^- \\ &= -5 - 4,84 - 5 = -14,84,\end{aligned}$$

kde $TNEUL = 5$ podľa rovnice (3.7), pretože $x_1 = 5 < \varepsilon^- = 100000$,

$$TNERL = u^-(5)(w^-(1,000) - w^-(0,001)) = 5 \left(1 - e^{-0,97(-\ln 0,001)^{0,66}}\right) = 4,84$$

podľa rovnice (3.13) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.11)

$$\begin{aligned}x_{\min} = 5 &\not> \tilde{x}_1^- = 5000 \Rightarrow OC_1^- = 0, \\ x_{\min} = 5 &> \tilde{x}_2^+ = 0 \Rightarrow OC_2^- = 5 - 0 = 5,\end{aligned}$$

$TAA = KV = NEUCE^-$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$NEUCE^- = CE = 5$$

podľa rovníc (3.19) a (3.20), keďže

$$\begin{aligned}p_1 = 1 &\Rightarrow \alpha_{rt}^- = \alpha_{at}^- = 0, \\ ATNEUL &= 5 \leq \varepsilon^- = 100000, \\ CE &= 5 \leq \varepsilon^- = 100000.\end{aligned}$$

Všetky výsledky príkladov 4.8 až 4.11 sme porovnali pomocou ekvivalentov istoty uvedených v tab. 4.10 na str. 83 spoločne s vypočítanými ekvivalentmi istoty modelu očakávaného úžitku a modelu kumulatívnej prospektovej teórie. Vo všetkých hrách dokázal náš model približne rovnako dobre modelovať ekonomické rozhodovanie ako model kumulatívnej prospektovej teórie v súlade s experimentálnym pozorovaním na rozdiel od modelu očakávaného úžitku.

Tab. 4.10: Ekvivalenty istoty hier Tverského-Kahnemanovho paradoxu

	Príklad 4.8		Príklad 4.9	
	Hra 4.15	Hra 4.16	Hra 4.17	Hra 4.18
CE_{EU}	3 000,00	3 104,09	1,95	5,00
CE_{CPTU}	3 000,00	2 270,08	40,55	5,00
CE_{TNEU}	3 000,00	1 747,78	91,74	5,00
Pozorovanie	✓	✗	✓	✗

	Príklad 4.10		Príklad 4.11	
	Hra 4.19	Hra 4.20	Hra 4.21	Hra 4.22
CE_{EU}	-3 000,00	-3 104,09	-1,95	-5,00
CE_{CPTU}	-3 000,00	-2 533,08	-21,93	-5,00
CE_{TNEU}	-3 453,95	-2 722,58	-125,83	-7,42
Pozorovanie	✗	✓	✗	✓

Zdroj: autor

4.6 Ellsbergov paradox

Podľa experimentálnych neurovedeckých štúdií (Preuschoff, Bossaerts, Quartz, 2006; Tobler et al., 2007) je neistota najväčšia vtedy, keď všetky možné výsledky určitej hry hráči očakávajú s rovnakou pravdepodobnosťou. Preto sme sa rozhodli modelovať v Ellsbergovom paradoxe neistotu pomocou subjektívnej váhy pravdepodobnosti $w^+(p_1) = w^+(p_2) = 0,5$ pre červené a čierne guľôčky v urne 2. Potom Ellsbergove hry sme mohli prepísať do tab. 4.11 na str. 84, kde sme si zadali potenciálny zisk v hodnote 100 pre každú hru. Experimentálne sa zistilo, že kým v príkladoch 4.12 a 4.13 boli hráči indiferentní voči hram, v príkladoch 4.14 a 4.15 preferovali hry 4.28 a 4.30.

Všetky hry uvedené v tab. 4.11 na str. 84 boli pozitívne, t. j. $\nexists x_i^- > 0$, a ich najnižšie výsledky mali všetky hodnotu 0, preto vo všetkých príkladoch by podľa rovníc (3.7), (3.10), (3.13), (3.18) platilo

$$TNEUL = ATNEUL = TNERL = TNERG = 0,$$

a teda sme mohli počítat celkové neurónové očakávané úžitky hier ako nezávislé. Vzhľadom na to sme mali len dva typy hier – jeden typ so známymi pravdepodobnosťami a jeden typ s odhadnutými váhami pravdepodobností.

Tab. 4.11: Hry Ellsbergovho paradoxu

Príklad 4.12				Príklad 4.13			
Hra 4.23		Hra 4.24		Hra 4.25		Hra 4.26	
Zisk	$w^+(p)$ [%]	Zisk	$w^+(p)$ [%]	Zisk	p [%]	Zisk	p [%]
100	50,00	100	50,00	100	50,00	100	50,00
0	50,00	0	50,00	0	50,00	0	50,00

Príklad 4.14				Príklad 4.15			
Hra 4.27		Hra 4.28		Hra 4.29		Hra 4.30	
Zisk	$w^+(p)$ [%]	Zisk	p [%]	Zisk	$w^+(p)$ [%]	Zisk	p [%]
100	50,00	100	50,00	100	50,00	100	50,00
0	50,00	0	50,00	0	50,00	0	50,00

Zdroj: autor

Obrátili sme našu pozornosť najprv na výpočet celkových neurónových očakávaných úžitkov hier so známymi pravdepodobnosťami podľa rovnice (3.24)

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.25}) &= TNEU(G_{4.26}) = TNEU(G_{4.28}) = TNEU(G_{4.30}) \\
&= TNEUG - TAA = TNEUG - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= NEUCE^+ = 42,09,
\end{aligned}$$

kde $TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$\begin{aligned}
ATNEUG &= u_A^+(100)w^+(0,50) = 100^{1-0,12}e^{-0,97(-\ln 0,50)^{0,66}} = 26,87, \\
NEUCE^+ &= CE = ATNEUG^{\frac{1}{1-0,12-0,12}} = 42,09
\end{aligned}$$

podľa rovníc (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\begin{aligned}
\alpha_{ra}^+ &= 0,12, & \alpha_{aa}^+ &= 0, \\
ATNEUG = 26,87 &\leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+} = 25118,86, \\
CE = 42,09 &\leq \varepsilon^+ = 100000.
\end{aligned}$$

Následne sme prešli k hrám s odhadnutými váhami pravdepodobností

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.23}) &= TNEU(G_{4.24}) = TNEU(G_{4.27}) = TNEU(G_{4.29}) \\
&= TNEUG - TAA = TNEUG - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= NEUCE^+ = 40,17,
\end{aligned}$$

kde $TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$ATNEUG = u_A^+(100)0,50 = 100^{(1-0,12-0,12)}0,50 = 16,56,$$

$$NEUCE^+ = CE = ATNEUG^{\frac{1}{1-0,12-0,12}} = 40,17$$

podľa rovníc (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\begin{aligned} \alpha_{ra}^+ &= 0,12, & \alpha_{aa}^+ &= 0,12, \\ ATNEUG = 16,56 &\leq \varepsilon^{+1-\alpha_{ra}^+-\alpha_{aa}^+} = 6309,57, \\ CE = 40,17 &\leq \varepsilon^+ = 100000. \end{aligned}$$

Porovnanie vypočítaných ekvivalentov istoty z celkových neurónových úžitkov z hier vrátane ekvivalentov istoty modelu očakávaného úžitku a modelu kumulatívnej prospektivej teórie sme zapísali do tab. 4.12. Výstup nášho modelu bol v súlade s experimentálnym pozorovaním na rozdiel od zvyšných modelov. Model kumulatívnej prospektivej teórie dokonca modeloval ekonomické rozhodnutie inverzne, ako bolo experimentálne pozorovanie, a to z dôvodu subjektívneho váženía pravdepodobností v kombinácii s nemožnosťou vyjadriť averziu voči nejednoznačnosti.

Tab. 4.12: Ekvivalenty istoty hier Ellsbergovho paradoxu

	Príklad 4.12		Príklad 4.13	
	Hra 4.23	Hra 4.24	Hra 4.25	Hra 4.26
CE_{EU}	45,49	45,49	45,49	45,49
CE_{CPTU}	45,49	45,49	37,38	37,38
CE_{TNEU}	40,17	40,17	42,09	42,09
Pozorovanie	~	~	~	~
	Príklad 4.14		Príklad 4.15	
	Hra 4.27	Hra 4.28	Hra 4.29	Hra 4.30
CE_{EU}	45,49	45,49	45,49	45,49
CE_{CPTU}	45,49	37,38	45,49	37,38
CE_{TNEU}	40,17	42,09	40,17	42,09
Pozorovanie	✗	✓	✗	✓

Zdroj: autor

4.7 Ultimátna hra

Uvažovali sme dve ultimátne hry s počiatočnou hodnotou 100 a navrhovaným pomerom v hre 4.31 úplne spravodlivým 50:50 a v hre 4.33 úplne nespravodlivým 99:1 uvedených v tab. 4.13. Experimentálne sa zistilo, že kým v príklade 4.16 hráči preferovali hru 4.31, v príklade 4.17 preferovali hru 4.34.

Tab. 4.13: Ultimátne hry

Príklad 4.16				Príklad 4.17			
Hra 4.31		Hra 4.32		Hra 4.33		Hra 4.34	
Zisk	p [%]	Zisk	p [%]	Zisk	p [%]	Zisk	p [%]
50	100,00	0	100,00	1	100,00	0	100,00

Zdroj: autor

Kompenzačnú prémiiu v našom modeli sme v prípade ultimátnej hry vypočítali priamo z jej definície. Predpokladali sme, že adekvátna hodnota by bola rovná spravodlivej hodnote, t. j. 50 % danej sumy peňazí, ktorú by mal hráč 1 rozdeliť, pretože to je hodnota, pri ktorej by hráč 2 nemal žiadnu averziu, čoho dôkazom je aj neurónová aktivita AI znázornená na grafe A obr. 2.2 na str. 35. Potom úžitok z adekvátnej hodnoty sme vedeli vypočítať rovnicou (4.1)

$$UAV^+(s_1, s_2) = NEUG\left(\frac{1}{2}(s_1 + s_2), 1, 0\right), \quad (4.1)$$

kde s_1 je suma peňazí, ktorú si hráč 1 navrhol pre seba,

s_2 je suma peňazí, ktorú hráč 1 navrhol pre hráča 2,

$NEUG\left(\frac{1}{2}(s_1 + s_2), 1, 0\right)$ je funkcia neurónového očakávaného úžitku zo zisku vyjadrená rovnicou (3.4).

Čím menší podiel by hráč 1 ponúkol hráčovi 2 na tejto sume peňazí, tým by táto suma bola nižšia voči jeho očakávanej adekvátnej hodnote, a preto túto hodnotu by bol s vyššou pravdepodobnosťou odmietal. Istou voľbou pre hráča 2 je v ultimátnej hre suma, ktorú hráč 1 ponúkne hráčovi 2, t. j. s_2 , čo sme vedeli vyjadriť rovnicou (3.16). Dosadením rovníc (4.1) a (3.16) do definície kompenzačnej premie sme dostali rovnicu (4.2)

$$KP^+ = \begin{cases} NEUG\left(\frac{1}{2}(s_1 + s_2), 1, 0\right) - NEUCE^+(s_2), & \text{ak } s_1 > s_2 \\ 0, & \text{ak } s_1 \leq s_2, \end{cases} \quad (4.2)$$

kde s_1 je suma peňazí, ktorú si hráč 1 navrhol pre seba,

s_2 je suma peňazí, ktorú hráč 1 navrhol pre hráča 2,

$NEUG\left(\frac{1}{2}(s_1 + s_2), 1, 0\right)$ je funkcia neurónového očakávaného úžitku zo zisku vyjadrená rovnicou (3.4),

$NEUCE^+(s_2)$ je funkcia neurónového očakávaného úžitku z ekvivalentu istoty pre pozitívnu hru vyjadrená rovnicou (3.16).

Celkové neurónové očakávané úžitky z hier v príkladoch 4.16 a 4.17 sme vypočítali pomocou rovnice (3.24) nasledovne

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4.31}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\ &= NEUG(50, 1, 0) \\ &\quad - \left(NEUG\left(\frac{1}{2}(50 + 50), 1, 0\right) - NEUCE^+(50) \right) \\ &= 50 - (50 - 50) = 50, \end{aligned}$$

kde $TNEUG = NEUG(50, 1, 0) = 50$ podľa rovníc (3.4) a (3.5), pretože

$$s_2 = 50 \leq \varepsilon^+ = 100000,$$

$TNERG = 0$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu nesplnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{s}_{\min} = 0 \not\geq s_2 = 50 \Rightarrow OC^+ = 0,$$

$TAA = KP^+$ vyjadrené rovnicou (4.2), kde $NEUG\left(\frac{1}{2}(50 + 50), 1, 0\right) = 50$ podľa rovnice (3.4) a $NEUCE^+(50) = 50$ podľa rovnice (3.16),

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4.32}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\ &= -TNERG = -50, \end{aligned}$$

kde $TNERG = u^+(50)w^+(1, 00) = 50$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{s}_{\min} = 50 > s_2 = 0 \Rightarrow OC^+ = 50 - 0 = 50,$$

$$OC^+ = 50 \leq \varepsilon^+ = 100000,$$

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4.33}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\ &= NEUG(1, 1, 0) \\ &\quad - \left(NEUG\left(\frac{1}{2}(99 + 1), 1, 0\right) - NEUCE^+(1) \right) \\ &= 1 - (50 - 1) = -48, \end{aligned}$$

kde $TNEUG = NEUG(1, 1, 0) = 1$ podľa rovníc (3.4) a (3.5), pretože

$$s_2 = 1 \leq \varepsilon^+ = 100000,$$

$TNERG = 0$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu nesplnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{s}_{\min} = 0 \not\geq s_2 = 1 \Rightarrow OC^+ = 0,$$

$TAA = KP^+$ vyjadrené rovnicou (4.2), kde $NEUG\left(\frac{1}{2}(99+1), 1, 0\right) = 50$ podľa rovnice (3.4) a $NEUCE^+(1) = 1$ podľa rovnice (3.16),

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4.34}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\ &= -TNERG = -1, \end{aligned}$$

kde $TNERG = u^+(1)w^+(1, 00) = 1$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{s}_{\min} = 1 > s_2 = 0 \Rightarrow OC^+ = 1 - 0 = 1,$$

$$OC^+ = 1 \leq \varepsilon^+ = 100000.$$

Následne vypočítané ekvivalenty istoty spolu s ekvivalentmi istoty modelu očakávaného úžitku a modelu kumulatívnej prospektovej teórie, v ktorom sme uvažovali referenčný bod s hodnotou 50, zapísali do tab. 4.14. Výstup nášho modelu bol v súlade s experimentálnym pozorovaním na rozdiel od zvyšných modelov. Modelu kumulatívnej prospektovej teórie nepomohla ani zmena referenčného bodu.

Tab. 4.14: Ekvivalenty istoty ultimátnych hier

	Príklad 4.16		Príklad 4.17	
	Hra 4.31	Hra 4.32	Hra 4.33	Hra 4.34
CE_{EU}	50,00	0,00	1,00	0,00
CE_{CPTU}	0,00	-50,00	-49,00	-50,00
CE_{TNEU}	50,00	-25,00	-24,00	-0,50
Pozorovanie	✓	✗	✗	✓

Zdroj: autor

Uvažovali sme aj o použití nízko-frekvenčnej rTMS, alebo katodickej tDCS na zníženie kortikálnej excitability pravého DLPFC, čím by sa dočasne potlačila neurónová aktivita pravého DLPFC. V takomto prípade by hodnota parametra vyjadrujúceho mieru

akceptácie celkovej afektívnej averzie ϕ bola nižšia ako 1. V krajnom prípade by bola hodnota tohto parametra $\phi = 0$. Potom by sme celkový neurónový očakávaný úžitok v hre 4.33 vypočítali podľa rovníc (3.23) a (3.24)

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4.33}) &= TNEUG - TNERG - KP * \phi \\ &= 1 - (50 - 1) * 0 = 1 > -1, \end{aligned}$$

čo by spôsobilo akceptovanie aj nespravodlivej ponuky hráčom 2.

4.8 Efekt utopených nákladov

Viera Bačová viedla experiment s hrami, medzi ktorými boli hry obsahujúce utopené náklady (Bačová et al., 2012, str. 176). Dve z týchto hier sa v tomto experimente líšili iba utopenými nákladmi a uviedli sme ich v tab. 4.15, v ktorých všetky výsledky boli realizované s pravdepodobnosťou $p = 1$. Experimentálne sa zistilo, že kým v príklade 4.18 hráči preferovali hru 4.35, v príklade 4.19 preferovali hru 4.38 z dôvodu ovplyvnenia rozhodnutia utopenými nákladmi.

Štandardné náklady sme v týchto príkladoch považovali za referenčný bod. Keďže hry v príklade 4.1 boli pozitívne, t. j. $\#x_i^- > 0$, podľa rovníc (3.7), (3.13) a (3.18) platilo

$$TNEUL = ATNEUL = TNERL = 0.$$

Tab. 4.15: Hry s efektom utopených nákladov

Príklad 4.18				
Hra 4.35			Hra 4.36	
Utopené náklady	Náklady	Zisk	Náklady	Zisk
0	1,97	10,09	0	2,27

Príklad 4.19				
Hra 4.37			Hra 4.38	
Utopené náklady	Náklady	Zisk	Náklady	Zisk
9,72	1,97	10,09	0	2,27

Zdroj: autor podľa (Bačová et al., 2012, tab. 3)

V príklade 4.18 sme celkový neurónový očakávaný úžitok pre hru 4.35 vypočítali rovnicou (3.24)

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.35}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\
&= TNEUG - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= NEUCE^+ = 8,12,
\end{aligned}$$

kde $TNERG = 0$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu nesplnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{x}_{\min} = 2,27 \not\geq x_1 - SQ = 10,09 - 1,97 = 8,12 \Rightarrow OC_1^+ = 0,$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$NEUCE^+ = CE = ATNEUG = TNEUG = 10,09 - 1,97 = 8,12$$

podľa rovníc (3.5), (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\begin{aligned}
p_1 = 1 &\Rightarrow \alpha_{ra}^+ = \alpha_{aa}^+ = 0, \\
x_1 - SQ = 8,12 &\leq \varepsilon^+ = 100000, \\
ATNEUG = 8,12 &\leq \varepsilon^+ = 100000, \\
CE = 8,12 &\leq \varepsilon^+ = 100000.
\end{aligned}$$

Rovnakým spôsobom sme postupovali pre výpočet celkového neurónového očakávaného úžitku pre hru 4.36 rovnicou (3.24)

$$\begin{aligned}
TNEU(G_{4.36}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\
&= TNEUG - TNERG - TNEUG + NEUCE^+ \\
&= -TNERG + NEUCE^+ = -5,85 + 2,27 = -3,58,
\end{aligned}$$

kde $TNERG = u^+(5,85)w^+(1,00) = 5,85$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\begin{aligned}
\tilde{x}_{\min} - \widetilde{SQ} &= 10,09 - 1,97 = 8,12 > x_1^+ = 2,27 \\
&\Rightarrow OC_1^+ = 10,09 - 1,97 - 2,27 = 5,85,
\end{aligned}$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$NEUCE^+ = CE = ATNEUG = TNEUG = 2,27$$

podľa rovníc (3.5), (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$\begin{aligned} p_1 = 1 &\Rightarrow \alpha_{ra}^+ = \alpha_{aa}^+ = 0, \\ ATNEUG = 2,27 &\leq \varepsilon^+ = 100000, \\ CE = 2,27 &\leq \varepsilon^+ = 100000. \end{aligned}$$

Analogický postup sme zvolili aj pre výpočet celkových očakávaných úžitkov z hier 4.37 a 4.38 v príklade 4.19

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4.37}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\ &= TNEUG - TNERG \\ &\quad - TNEUG - NEUSC + NEUCE^+ \\ &= -TNERG - NEUSC + NEUCE^+ \\ &= -3,87 - 9,72 + 8,12 = -5,47, \end{aligned}$$

kde $TNERG = u^+(3,87)w^+(1,00) = 3,87$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu splnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{\min} = 2,27 &> x_1 - SQ - SC = 10,09 - 1,97 - 9,72 = -1,6 \\ \Rightarrow OC_1^+ &= 2,27 - (-1,6) = 3,87, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} TAA = KV &= TNEUG - NEUSC - NEUCE^+ \text{ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde} \\ NEUCE^+ &= CE = ATNEUG = TNEUG = x_1 - SQ = 10,09 - 1,97 = 8,12, \\ NEUSC &= 9,72 \end{aligned}$$

podľa rovníc (3.5), (3.14), (3.15), (3.16) a (3.17) keďže

$$\begin{aligned} p_1 = 1 &\Rightarrow \alpha_{ra}^+ = \alpha_{aa}^+ = 0, \\ x_1 - SQ = 8,12 &\leq \varepsilon^+ = 100000, \\ ATNEUG = 8,12 &\leq \varepsilon^+ = 100000, \\ CE = 8,12 &\leq \varepsilon^+ = 100000, \\ SC = 9,72 &\leq \varepsilon^+ = 100000, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} TNEU(G_{4.38}) &= (TNEUG - TNERG) - TAA \\ &= TNEUG - TNEUG + NEUCE^+ \\ &= NEUCE^+ = 2,27, \end{aligned}$$

kde $TNERG = 0$ podľa rovnice (3.10) z dôvodu nesplnenia podmienky v rovnici (3.8)

$$\tilde{x}_{\min} - \widetilde{SQ} - \widetilde{SC} = 10,09 - 1,97 - 9,72 = -1,60 \not\geq x_1^+ = 2,27 \Rightarrow OC_1^+ = 0,$$

$TAA = KV = TNEUG - NEUCE^+$ podľa rovníc (3.22) a (3.23), kde

$$NEUCE^+ = CE = ATNEUG = TNEUG = 2,27$$

podľa rovníc (3.14), (3.15) a (3.16), keďže

$$p_1 = 1 \Rightarrow \alpha_{ra}^+ = \alpha_{aa}^+ = 0,$$

$$ATNEUG = 2,27 \leq \varepsilon^+ = 100000,$$

$$CE = 2,27 \leq \varepsilon^+ = 100000.$$

Následne sme vypočítali ekvivalenty istoty, ktoré sme spolu s ekvivalentami istoty modelu očakávaného úžitku a modelu kumulatívnej prospektovej teórie, v ktorom sme uvažovali o hodnote štandardných nákladov spolu s utopenými nákladmi ako o hodnote referenčného bodu, zapísali do tab. 4.16. Výstup nášho modelu bol v súlade s experimentálnym pozorovaním na rozdiel od modelu očakávaného úžitku. Aj keď model kumulatívnej prospektovej teórie tiež správne modeloval dané hry, na rozdiel od nášho modelu neukazuje ľútosť z nesprávneho výberu, ktorú by hráči mali, keby si v príklade 4.18 vybrali hru 4.36 namiesto hry 4.35.

Tab. 4.16: Ekvivalenty istoty hier s efektom utopených nákladov

	Príklad 4.18		Príklad 4.19	
	Hra 4.35	Hra 4.36	Hra 4.37	Hra 4.38
CE_{EU}	8,12	2,27	8,12	2,27
CE_{CPTU}	8,12	2,27	-1,60	2,27
CE_{TNEU}	8,12	-1,79	-2,74	2,27
Pozorovanie	✓	✗	✗	✓

Zdroj: autor

Záver

Prioritným cieľom diplomovej práce bolo zostrojenie nového matematického modelu popisujúceho ekonomické rozhodovanie ako alternatívu k modelu teórie očakávaného úžitku – zaužívaného modelu v ekonómii. Špecifikáciu nášho modelu sme dosiahli vytýčením čiastkových cieľov: reflektovanie neurónovej aktivity jednotlivých oblastí mozgu našim modelom, matematická formulácia nášho modelu a preukázanie schopnosti modelu modelovať psychologické fenomény a ekonomické paradoxy.

V prvých dvoch kapitolách našej práce sme rámcovo popísali vývoj matematického aparátu modelov popisujúcich ekonomické rozhodovanie vychádzajúcich z experimentálnych psychologických výskumov počnúc modelmi kalkulujúcimi s faktorom homo economicus, medzi ktoré sa klasifikuje aj model teórie očakávaného úžitku, pokračujúc modelmi kalkulujúcimi so subjektívnou pravdepodobnosťou, modelmi ovplyvnenými zoradením výsledkov, modelmi konfiguračných váh až po modely kalkulujúce s faktorom ľútosti, doplnené o zistenia aktuálnych neurovedeckých štúdií vo vzťahu k nim. Následne sme analyzovali afektívne a kognitívne procesy v mozgu pri ekonomickom rozhodovaní na základe aktuálnych neurovedeckých štúdií a vytýčili sme hlavné psychologické fenomény a ekonomické paradoxy v ekonomickom rozhodovaní, ktoré model teórie očakávaného úžitku nedokázal objasniť. Takými fenoménmi a paradoxmi boli Allaisov paradox, Birnbaumov paradox, Tverského-Kahnemanov paradox, Ellsbergov paradox, časové diskontovanie, averzia voči ľútosti, averzia voči strate, ultimátna hra a efekt utopených nákladov.

V tretej kapitole sme sa venovali zostrojeniu vlastného neuroekonomického modelu rozhodovania. Pre vytvorenie nášho neuroekonomického modelu rozhodovania sme potrebovali zadať vlastné matematické funkcie a parametre. Tie sme zadefinovali v súlade s výsledkami psychologických a neurovedeckých štúdií z prvých dvoch kapitol. Zvlášť sme modelovali psychologické fenomény spojené so striatom, amygdalou a oblasťami mozgu podieľajúcimi sa na afektívnych a kognitívnych procesoch pri ekonomickom rozhodovaní. Pre modelovanie neurónovej aktivity striata sme si zadefinovali funkciu neurónového očakávaného úžitku zo zisku vyjadrenú rovnicou (3.4), obsahujúcu referenčný bod, efekt marginálneho úžitku, subjektívne váženie pravdepodobností na základe zoradenia podľa početnosti výsledkov určitej hry, počnúc najpočetnejším výsledkom a následne pre každú početnosť podľa ich absolútnych hodnôt výsledkov

počnúc najvyššími hodnotami, zahrňujúcou i časové diskontovanie. Pre modelovanie neurónovej aktivity amygdaly sme si zadefinovali viacero funkcií. Funkciu neurónového očakávaného úžitku zo straty vyjadrenú rovnicou (3.6) analogicky ako funkciu neurónového očakávaného úžitku zo zisku a funkcie neurónovej očakávanej ľútosti vyjadrené rovnicami (3.9) a (3.12) implikujúce averziu voči ľútosti. Pre modelovanie afektívnych averzií sme si zaviedli pojem kompenzačná prémie vyjadrený rovnicou (3.22), pomocou ktorého sme modelovali celkovú afektívnu averziu vyjadrenú rovnicou (3.23), ktorá bola akýmsi zovšeobecneným vyjadrením afektívnych averzií vrátane averzie voči riziku, averzie voči strate, averzie voči nejednoznačnosti, averzie voči nespravodlivej ponuke v ultimátnej hre, efektu utopených nákladov a ovplyvnená ďalšími parametrami vyjadrujúcimi kognitívnu reparáciu a kontrolu. Následne sme celkový neurónový očakávaný úžitok z určitej hry voči alternatívnej hre vypočítaný naším modelom vyjadrili rovnicou (3.24).

Na záver sme aplikovaním nášho modelu na špecifické typy ekonomických rozhodnutí preukázali v tabuľkách 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10, 4.12, 4.14 a 4.16 schopnosť modelu modelovať aj typy ekonomických rozhodnutí, ktoré nielen model teórie očakávaného úžitku nedokáže modelovať, ale aj model kumulatívnej prospektovej teórie – zaužívaný model v behaviorálnej ekonómii. Avšak nevýhodou nášho modelu oproti iným modelom bolo priveľké množstvo parametrov z dôvodu kvalitnejšieho modelovania ekonomického rozhodovania. Mnohé z týchto parametrov, ako λ^- , σ alebo ϕ , boli skôr len teoretické parametre z dôvodu zovšeobecnenia a reálne sme ich v našej analýze nepoužívali. Rozhodnutie o ich prípadnom využití, alebo vyradení z modelu by si vyžadovalo hlbšie neurovedecké štúdie. Iné parametre v našom modeli sa prejavovali len v špecifických prípadoch, ako napríklad parameter λ^+ prejavujúci sa len v prípade zdôraznenia tolerance voči riziku v pozitívnych hrách, parametre ν^+/ν^- prejavujúce sa len v prípade vysokých hodnôt výsledkov určitej hry, parametre ψ^+/ψ^- prejavujúce sa len v prípade početnosti nejakého výsledku vyššej ako 1, alebo parametre $\alpha_{aa}^+/\alpha_{at}^-$ prejavujúce sa len v prípade hier v podmienkach nejednoznačnosti, čo urobilo náš model dynamickejším. Kým v iných modeloch by sa v takých špecifických prípadoch musela meniť hodnota určitých parametrov, náš model dokázal všetky analyzované typy ekonomických rozhodnutí modelovať s vopred danými jednotnými hodnotami parametrov. Tieto parametre by sa mimo týchto špecifických prípadov neprejavovali, čo zásadne zjednodušuje aplikovateľnosť nášho modelu.

Prínosom práce boli okrem zostrojenia modelu schopného lepšie modelovať psychologické fenomény a ekonomické paradoxy ako iné modely aj určité črty nášho modelu, ako rozlišovanie medzi klesajúcim marginálnym úžitkom a averziou voči riziku, separátne modelovanie očakávaných hodnôt výsledkov a afektívnych averzií, zovšeobecnenie afektívnych averzií do kompenzačnej prémie, čím sa zásadne odlíšil od iných modelov s potenciálom vzniku nového typu modelov modelujúcich ekonomické rozhodovanie a stal sa akýmsi prienikom medzi modelmi ovplyvnenými zoradením výsledkov, modelmi konfiguračných váh a modelmi kalkulujúcimi s faktorom lútosti. Hlavným prínosom pre autora bolo oboznámenie sa nielen so psychologickými fenoménmi a ekonomickými paradoxmi vyskytujúcimi sa pri ekonomickom rozhodovaní, ale aj s príčinami tohto iracionálneho správania sa ľudí na úrovni ľudského mozgu.

Prípadné rozšírenie práce by bolo možné hneď v niekoľkých oblastiach. V neurovede by boli rozšírením práce ďalšie experimenty lepšie vyjasňujúce funkciu alebo prípadné vyradenie parametrov λ^- , σ a ϕ z nášho modelu, a taktiež komplexnejšie porozumenie o vplyve neurónovej aktivity jednotlivých oblastí mozgu na ekonomické rozhodovanie. V psychológii by bolo rozšírením práce objav ďalších psychologických fenoménov a ekonomických paradoxov potrebných zakomponovať do nášho modelu, ak by náš model v súčasnej podobe nebol schopný ich modelovať. V matematike by bolo rozšírením práce zjednodušiť náš model pre praktickejšie aplikovanie do ekonomickej teórie. A v ekonómii by bolo rozšírením práce už samotné aplikovanie nášho modelu do ekonomickej teórie.

Zoznam použitej literatúry

- Attema A. E., Bleichrodt H., L'Haridon O. 2018: *Ambiguity preferences for health*, Health Economics 27 (2018), 1699-1716, dostupné na internete (4.4.2020):
<https://doi.org/10.1002/hec.3795>
- Au G. 2014: pt: *An R package for Prospect Theory*, dokumentácia, University of Melbourne, Melbourne, 2014, dostupné na internete (17.2.2020):
<https://mran.microsoft.com/snapshot/2014-09-08-1746/web/packages/pt/vignettes/pt-vignette.pdf>
- Báčová V. et al. 2012: *Rozhodovanie a usudzovanie III.: Aspekty, javy, aplikácie*, monografia, ÚEP CESTA SAV, Bratislava, 2012
- Báčová V. 2016: *Modely časového diskontovania v rozhodovaní: Ako hodnotíme súčasné a budúce výhody*, prednáška, ÚEP CSPV SAV, Bratislava, 2016, In Sarmány-Schuller I., Pilárik L., Gallová I.: *Rozhodovanie v kontexte kognície, osobnosti a emócií V.*, zborník príspevkov, FSVaZ UKF, Nitra, 2016, 11-19
- Baláž V. 2009: *Riziko a neistota*, VEDA, Bratislava, 2009
- Birnbaum M. H. 1999: *The Paradoxes of Allais, Stochastic Dominance, and Decision Weights*, In Shanteau J., Mellers B. A., Schum D. A.: *Decision Science and Technology: Reflections on the Contributions of Ward Edwards*, Kluwer Academic Publishers, New Your, 1999, 27-52
- Bogdanov M., Ruff Ch. C., Schwabe L. 2017: *Transcranial Stimulation Over the Dorsolateral Prefrontal Cortex Increases the Impact of Past Expenses on Decision-Making*, Cerebral Cortex 27 (2017), 1094-1102, dostupné na internete (8.2.2020):
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhv298>
- Booij A. S., van Praag B. M. S., van de Kuilen G. 2009: *A Parametric Analysis of Prospect Theory's Functionals for the General Population*, Working Paper no. 4117, Institute of Labor Economics, Bonn, 2009, dostupné na internete (3.4.2020):
<http://ftp.iza.org/dp4117.pdf>
- Breiter H. C. et al. 2001: *Functional Imaging of Neural Responses to Expectancy and Experience of Monetary Gains and Losses*, Neuron 30 (2001), 619-639, dostupné na

internete (25.12.2019):

[https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(01\)00303-8](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(01)00303-8)

De Martino B. et al. 2006: *Frames, Biases, and Rational Decision-Making in the Human Brain*, Science 313 (2006), 684-687, dostupné na internete (27.12.2019):

<https://doi.org/10.1126/science.1128356>

Encyclopaedia Beliana 2017: *behaviorizmus*, Encyklopedický ústav CSC SAV, 1999, aktualiz. v 2017, dostupné na internete (19.10.2019):

<https://beliana.sav.sk/heslo/behaviorizmus>

Fujino J. et al. 2016: *Neural mechanisms and personality correlates of the sunk cost effect*, Scientific Reports 6 (2016), 33171, dostupné na internete (8.2.2020):

<https://doi.org/10.1038/srep33171>

Fukunaga R., Purcell J. R., Brown J. W. 2018: *Discriminating Formal Representations of Risk in Anterior Cingulate Cortex and Inferior Frontal Gyrus*, Frontiers in Neuroscience 12 (2018), 553, dostupné na internete (31.12.2019):

<https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00553>

Ge Q. 2018: *Research on Retailer Pricing Based on Extended Regret Theory in E-commerce Environment*, preprint, STL SWJTU, Chengdu, 2018, dostupné online (19.4.2020):

<https://doi.org/10.20944/preprints201811.0125.v1>

Hrubý R. 2010: *Neuroekonómia – neuroveda v ekonómii*, Psychiatria – Psychoterapia – Psychosomatika 3 (2010), 167-171, dostupné na internete (15.8.2019):

<http://www.psychiatria-casopis.sk/psychiatria/archiv-cisel/archiv/obsah-cisla-3/2010/povodna-praca/neuroekonomia-neuroveda-ekonomii.html>

Hsu M. et al. 2009: *Neural Response to Reward Anticipation under Risk Is Nonlinear in Probabilities*, The Journal of Neuroscience 29 (2009), 2231-2237, dostupné na internete (19.10.2019):

<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5296-08.2009>

Huettel S. A. et al. 2006: *Neural Signatures of Economic Preferences for Risk and Ambiguity*, Neuron 49 (2006), 765-775, dostupné na internete (4.4.2020):

<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.01.024>

Cheng X. et al. 2017: *Anterior insula signals inequalities in a modified Ultimatum*

Game, Neuroscience 348 (2017), 126-134, dostupné na internete (31.12.2019):

<https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.02.023>

Christopoulos G. I. et al. 2009: *Neural Correlates of Value, Risk, and Risk Aversion Contributing to Decision Making under Risk*, The Journal of Neuroscience 29 (2009), 12574-12583, dostupné na internete (28.12.2019):

<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2614-09.2009>

Kable J. W., Glimcher P. W. 2007: *The neural correlates of subjective value during intertemporal choice*, Nature Neuroscience 10 (2007), 1625-1633, dostupné na internete (25.12.2019):

<https://doi.org/10.1038/nn2007>

Kahneman D. 2012: *Myšlení rychlé a pomalé*, Jan Melvil Publishing, Brno, 2012

Knoch D. et al. 2006: *Diminishing Reciprocal Fairness by Disrupting the Right Prefrontal Cortex*, Science 314 (2006), 829-932, dostupné na internete (19.10.2019):

<https://doi.org/10.1126/science.1129156>

Knutson B. et al. 2003: *A region of mesial prefrontal cortex tracks monetarily rewarding outcomes: characterization with rapid event-related fMRI*, NeuroImage 18 (2003), 263-272, dostupné na internete (19.10.2019):

[https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(02\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(02)00057-5)

Knutson B., Kuhnen C. M. 2005: *The Neural Basis of Financial Risk Taking*, Neuron 47 (2005), 763-770, dostupné na internete (25.12.2019):

<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.08.008>

Lorko M. 2018: *Behaviorálna ekonómia*, článok, 2018, dostupné na internete (19.10.2019):

<https://lorko.sk/behavioralna-ekonomia>

McClure S. M. et al. 2004: *Separate Neural Systems Value Immediate and Delayed Monetary Rewards*, Science 306 (2004), 503-507, dostupné na internete (22.10.2019):

<https://doi.org/10.1126/science.1100907>

Mohr P. N. C., Biele G., Heekeren H. R. 2010: *Neural Processing of Risk*, The Journal of Neuroscience 30 (2010), 6613-6619, dostupné na internete (28.12.2019):

<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0003-10.2010>

Molouki S., Hardisty D. J., Caruso E. M. 2019: *The Sign Effect in Past and Future Dis-*

- counting, *Psychological Science* 30 (2019), 1674-1695, dostupné na internete (13.4.2020):
<https://doi.org/10.1177/0956797619876982>
- NobelPrize 2019: *All Prizes in Economic Sciences*, Nobel Media AB, 2019, dostupné na internete (22.10.2019):
<https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-prizes-in-economic-sciences>
- Preuschoff K., Bossaerts P., Quartz S. R. 2006: *Neural Differentiation of Expected Reward and Risk in Human Subcortical Structures*, *Neuron* 51 (2006), 381-390, dostupné na internete (19.10.2019):
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.06.024>
- Roiser J. P. et al. 2009: *A Genetically Mediated Bias in Decision Making Driven by Failure of Amygdala Control*, *The Journal of Neuroscience* 29 (2009), 5985-5991, dostupné na internete (26.12.2019):
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0407-09.2009>
- Sanfey A. G. et al. 2003: *The Neural Basis of Economic Decision-Making in the Ultimatum Game*, *Science* 300 (2003), 1755-1758, dostupné na internete (19.10.2019):
<https://doi.org/10.1126/science.1082976>
- Sičáková-Beblová E. 2015: *Behaviorálne základy verejnej politiky*, učebnica, Univerzita Komenského, Bratislava, 2015
- Speitel C., Traut-Mattausch E., Jonas E. 2019: *Functions of the right DLPFC and right TPJ in proposers and responders in the ultimatum game*, *Social Cognitive and Affective Neuroscience* 14 (2019), 263-270, dostupné na internete (30.12.2019):
<https://doi.org/10.1093/scan/nsz005>
- Tobler P. N. et al. 2007: *Reward Value Coding Distinct From Risk Attitude-Related Uncertainty Coding in Human Reward Systems*, *Journal of Neurophysiology* 97 (2007), 1621-1632, dostupné na internete (19.10.2019):
<https://doi.org/10.1152/jn.00745.2006>
- Tomasino B. et al. 2013: *Framing the ultimatum game: the contribution of simulation*, *Frontiers in Human Neuroscience* 7 (2013), 337, dostupné na internete (31.12.2019):
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00337>
- Tomková A., Ondrijová I. 2018: *Podstata a prínosy neuroekonómie*, *Journal of Global*

Science 3 (2018), dostupné na internete (9.5.2020):

<http://jogsc.com/pdf/2018/2/podstata.pdf>

Vainiene R. et al. 2006: *Náklady obetovanej príležitosti – Opportunity costs (fr.)*, Štandardizovaný medzinárodný slovník ekonomických pojmov a organizácií, 2006, dostupné na internete (7.3.2020):

<http://ekonomika.oldweb-sulik.sk/ekonomicky-slovník/naklady-obetovanej-prilezitosti-opportunity-costs>

Venkatraman V. et al. 2009: *Separate Neural Mechanisms Underlie Choices and Strategic Preferences in Risky Decision Making*, Neuron 62 (2009), 593-602, dostupné na internete (31.12.2019):

<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2009.04.007>

Wu C. C., Sacchet M. D., Knutson B. 2012: *Toward an affective neuroscience account of financial risk taking*, Frontiers in Neuroscience 6 (2012), 159, dostupné na internete (19.10.2019):

<https://doi.org/10.3389/fnins.2012.00159>

Xue G. et al. 2009: *Functional Dissociations of Risk and Reward Processing in the Medial Prefrontal Cortex*, Cerebral Cortex 19 (2009), 1019-1027, dostupné na internete (31.12.2019):

<https://doi.org/10.1093/cercor/bhn147>

Yacubian J. et al. 2006: *Dissociable Systems for Gain- and Loss-Related Value Predictions and Errors of Prediction in the Human Brain*, The Journal of Neuroscience 26 (2006), 9530-9537, dostupné na internete (19.10.2019):

<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2915-06.2006>

Zheng H., Wang X. T., Zhu L. 2010: *Framing effects: Behavioral dynamics and neural basis*, Neuropsychologia 48 (2010), 3198-3204, dostupné na internete (29.12.2019):

<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.06.031>