



IMS 2024/2025 Semestrální projekt
T3: Model ve finančnictví - Kryptoměnový trh

Tomáš Daniel xdanie14
Jakub Janšta xjanst02

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Autoři a zdroje	2
1.2	Ověření validity	2
2	Rozbor tématu a použitých metod/technologií	2
2.1	Popis použitých postupů	4
2.2	Popis původu použitých metod/technologií	4
3	Koncepce	4
4	Architektura simulačního modelu/simulátoru	6
4.1	Mapování abstraktního modelu na simulační	7
5	Podstata simulačních experimentů a jejich průběh	7
5.1	Postup experimentování	8
5.2	Experiment 1	8
5.3	Experiment 2	9
5.4	Experiment 3	11
5.5	Závěry experimentů	12
6	Shrnutí simulačních experimentů a závěr	12

1 Úvod

V této práci je řešena implementace modelu (*viz. (14), slajd 7*) simulujícího (*viz. (14), slajd 8*) volný trh na kterém jsou obchodovány kryptoměny. Cílem této práce je sestavit a analyzovat model, který dokáže predikovat vývoj cen jednotlivých kryptoměn na základě aktuálního stavu systému (*viz. (14), slajd 7*) a chování jeho jednotlivých účastníků.

Od představení vůbec první kryptoměny, Bitcoinu, světu v roce 2009 dodnes neznámým pseudonymem Satoshi Nakamoto(11), došlo vlivem kryptoměn k vytvoření zcela nového trhu, který do dnešní doby expandoval závratným tempem a nic nenaznačuje změnu tohoto trendu. Kromě enormní kapitálové expanze roste i popularita mezi veřejností a oblast kryptoměn se začíná stávat jedním z velkých politických témat, jak jsme mohli vidět v nedávných prezidentských volbách ve Spojených státech(18).

A právě i proto jsme se rozhodli pro zpracování této problematiky jinak velmi komplexního systému, jakým kryptoměnový trh bezesporu je.

Kryptoměnový trh je vysoce volatilní a ovlivňovaný mnoha faktory, jako jsou ekonomické události, změny v legislativě, technologické inovace ale i sociální trendy. Naše simulace si klade za cíl umožnit lepší pochopení, jak tyto faktory společně ovlivňují právě ceny kryptoměn.

Na základě modelu a simulačních experimentů bude ukázáno chování kryptoměnového trhu v různých podmínkách, přičemž simulace umožní zkoumat reakce trhu na specifické události a změny v chování účastníků trhu.

Přínos této práce spočívá v tvorbě konfigurovatelného modelu poskytující vhled do tohoto dynamického finančního odvětví. Pro zpracování modelu bylo nutné nastudovat chování a charakteristiky nejrozličnějších aktérů vstupujících do tohoto systému, jejich vzájemné vazby, vliv legislativy, technologií a chování finančních trhů. Výsledný model je zajímavý svou škálovatelností a konfigurovatelností.

1.1 Autoři a zdroje

Autory práce jsou Tomáš Daniel a Jakub Janšta, studenti bakalářského studijního programu na VUT FIT. Práce vznikla v rámci semestrálního projektu v předmětu *Modelování a simulace* v akademickém roce 2024/2025. Primárním zdrojem informací a poznatků, které sloužily k sestavení modelu a následným experimentům, byly odborné studie a články veřejně dostupné na internetu(19; 3; 17; 8; 4; 12; 2; 16; 15; 10; 20).

Vyjmá výše uvedených zdrojů jsme koncepci našeho modelu konzultovali s odborníkem na oblast kryptoměn Ing. Jan Zavřel¹, který je členem **NES@FIT - Výzkumná skupina počítačové sítě** a problematikou kryptoměn se dlouhodobě zabývá.

1.2 Ověření validity

Ověření validity (*viz. (14), slajd 37*) našeho modelu probíhalo experimentálně, každý z námi představených experimentů cílil na ukázkou jiné vlastnosti modelu a jeho chování, mající za cíl ukázat validitu modelu jako celku. Pro tyto účely sloužil primárně první experiment, jehož konfigurace počtu a typů entit měla za cíl reflektovat specifickou situaci na trhu, jenž měla očekávaný výstup, který jsme porovnali s výstupem našeho modelu.

2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

Při modelování (*viz. (14), slajd 8*) zkoumaného systému kryptoměnového trhu jsme vycházeli z následujících předpokladů a informací. V systému jsme identifikovali následující entity. Investory, kryptoměnové směnárny, těžaře, regulační úřady, resp. vládní aparát, technologické vývojáře, spekulativní

¹<https://www.fit.vut.cz/person/izavrel/contact/.cs#nav>

události a samotné kryptoměny.

Investoři společně s těžaři tvoří majoritní část entit, které se v systému vyskytují. Teorií a strategií investování se za bohatou historií finančnictví vyvinulo nespočet, stejně tak i typů investorů(16). Ve zkoumaném systému tyto typy investorů agregujeme do dvou charakteristických typů, dlouhodobých a krátkodobých investorů. Toto rozdělení vychází z naší osobní zkušenosti. Zatímco dlouhodobí investoři své kryptoměnové portfolio drží a nejsou tolik ovlivněni krátkodobou cenovou volatilitou dané mince, krátkodobí investoři se naopak z této volatility snaží získat co největší zisk a jsou proto mnohem aktivnější a angažovanější (dlouhodobí investoři odpovídají třetímu typu *The Long-Term Holder (HODLer)* a krátkodobí investoři druhému typu *The Day Trader* ze zdroje (16)).

Množství mincí, které investoři v rámci jedné iterace nakoupí či prodají jsme odvodili od průměrné hodnoty jedné provedené transakce kryptoměny Bitcoin, která se pohybuje kolem 84 \$ (1) a aktuální ceny jedné mince v systému (*current_price*). A tedy určení množství u investorů je následující:

$$\text{amount} = \frac{84}{\text{current_price}} \quad (1)$$

Těžaři v systému vystupují jako producenti nových vytěžených mincí, kterými zásobují trh. K tomuto využívají svůj dostupný výpočetní výkon v kombinaci s efektivitou těžby, která je pro každou minci specifická(2) a je předmětem konfigurace, neboť spočívá v řešení různě výpočetně náročných matematických úloh.

Technologičtí vývojáři v systému reprezentují nezanedbatelný pokrok a inovace na poli hardwaru, který je užíván pro těžbu kryptoměn těžaři. Tento pokrok spočívá zejména ve zvyšování výkonnosti GPU a CPU, které se v konečném důsledku výrazně podílejí na efektivitě a výpočetním výkonu těžebních strojů. Dle dostupných zdrojů jsou nové generace GPU čipů představovány přibližně ve dvouletých intervalech(19), oproti zhruba jednoletým intervalům mezi novými generacemi CPU(3).

Kryptoměnové směnárny v systému vystupují jako zprostředkovatelé obchodů mezi nakupujícími a prodávajícími, tj. investory a těžaři(15). Vyznačují se individuální výší poplatků za každou zprostředkovanou transakci a rovněž podléhají regulacím a zdanění ze strany vlády. Různé směnárny obchodují s různými kryptoměnami v rámci různých dostupných kvantit.

Vláda v systému prezentuje entitu, která zavádí omezení a regulace pro kryptoměnový trh. Určuje míru zdanění jednotlivých prováděných transakcí prostřednictvím směnárny, která je na počátku stanovena a v půlročních intervalech náhodně rozšířena o hodnotu na intervalu $<-1.2\%$, $+1.2\%$). Tento interval byl určen jako úměrné zjednodušení jinak komplexního tématu, jakým daně a daňová politika vlád je. Při zjištění prohřešků vůči legislativě ze strany směnárny může tuto směnárnu v krajním případě i uzavřít, což může způsobit významné změny v cenách a likviditě na dotčeném trhu.

Vzhledem k tomu, že neexistují reálné statistiky s touto informací, na základě analýzy ze článku(17) jsme stanovili přibližný počet existujících směnárny na 640. Dále již v tomto roce došlo k uzavření 47 směnárny(10), do konce roku lze předpokládat i další uzavření a proto jsme hodnotu zvedli na 50 uzavřených směnárny. Procentuálně jsme tedy pravděpodobnost uzavření směnárny stanovili na 8 % následovně:

$$\frac{50}{640} = 0.078 = 8\% \quad (2)$$

Spekulativní události, jako jsou tweety a vyjádření od vlivných osobností, mohou náhle zvýšit nebo snížit cenu kryptoměn, což vede k vysoké volatilitě trhu. Tyto události mívají často nepředvídatelný a krátkodobý charakter, ale výrazný dopad na trh. Charakteristickou postavou těchto spekulativních vyjádření se stal excentrický americký podnikatel, politik a nejbohatší muž planety Elon Musk. Konkrétně v jeho případě dokáže pouhý jeden jeho tweet zvednout cenu kryptoměny až o 16.9 % a naopak až o 11.8 % snížit, dle provedené studie(4) na kryptoměně Bitcoin.

Kryptoměny jsou v systému centrální entitou a reprezentují jednotlivé mince, jejichž cenový vývoj je sledován. Vývoj ceny mince je diktován nabídkou a poptávkou, kdy poptávku tvoří investoři a nabídku investoři společně s těžaři, kteří systém postupně zásobují novými mincemi. Každá mince je různě výpočetně náročná na těžbu(2), přičemž k těžbě je dostupné konečné množství mincí. Pro zjednodušení je cena mince vždy aktuální pro jeden celý den. Pro smysl běhu systému je zapotřebí alespoň jedna mince, avšak je možné, aby v systému současně figurovalo více mincí najednou, což je vhodné na pozorování cenových vývojů různých mincí za stejných podmínek, avšak různé mince se navzájem neovlivňují a vyvíjí se nezávisle na sobě.

2.1 Popis použitých postupů

Model byl implementován v programovacím jazyce C++, který je svou objektově orientovanou koncepcí ideální pro tvorbu systémových entit v podobě objektů příslušných tříd. Zároveň poskytuje možnost použití vyšších datových struktur, které náš model využívá, konkrétně *mapy* a *vektory*.

2.2 Popis původu použitých metod/technologií

Pro účely implementaci byly využity základní dostupné funkce a knihovny jazyka C++ ve standardu C++20². Jako překladač slouží program GCC³ a pro překlad utilita GNU Make⁴. Zároveň nosná část modelu využívá simulační knihovnu pro jazyk C++ SIMLIB(13) vyvíjenou na VUT FIT. Pro zpracovávání konfiguračního JSON souboru byla využita knihovna *JSON for Modern C++*(9).

Vyjma výše uvedených bylo při zpracovávání modelu čerpáno z první(5) a druhého(7) demonstračního cvičení a seminářů o projektech(6) v rámci předmětu *Modelování a simulace (IMS)*.

3 Koncepce

Architektura našeho programu vychází z faktů zmíněných v předchozí kapitole 2. Jednotlivý účastníci systému, tak jak jsou uváděny v předchozí kapitole, jsou v programu reprezentováni samostatnými třídami se specifickými atributy a vzájemnými vazbami.

Směnárna zprostředkovává dvě služby, nákup a prodej požadovaného množství zvolené kryptoměny. Každá směnárna obchoduje pouze s určitými kryptoměnami, jejichž seznam a také přidělený počet je stanoven na začátku simulace pomocí konfiguračního souboru. Dále si každá směnárna uchovává statistiky o počtech prodaných mincí stejně jako i výši transakčních poplatků, která je během chodu programu neměnná a vychází opět z konfiguračního souboru. K těmto individuálním poplatkům je přidána i fixní zdanění každé transakce ze strany státu. Kromě seznamu nabízených kryptoměn si každá směnárna rovněž uchovává i seznam všech investorů, kteří v simulaci figurují a to jednak pro účely statistiky, ale zejména pro distribuci oznámení o uzavření konkrétní směnární úřady. Rovněž pro každou obchodovanou kryptoměnu poskytuje údaj o zisku ze strany zákazníků, vyjádřený následovně:

²Přehled novinek standardu: <https://en.cppreference.com/w/cpp/20>

³Oficiální stránky <https://gcc.gnu.org>

⁴Oficiální stránky <https://www.gnu.org/software/make/>

$$\text{interest} = \frac{\text{aktuální počet}}{\text{počáteční počet}} \quad (3)$$

Výlučně prostřednictvím směnárů realizují své aktivity investoři v rámci vlastní třídy. Každý investor má svůj seznam kryptoměn a příslušný počáteční vlastněný počet, se kterými obchoduje a k nim korespondující úrovně, kdy danou kryptoměnu prodá či nakoupí. Při prodeji si investor vybírá nejlepší směnárnu dle výše transakčních poplatků, aby maximalizoval svůj výnos, při nákupu je tato směnárna zvolena náhodně za účelem rovnoměrnějšího rozložení vytíženosti jednotlivých směnárů.

Výpočet nakoupeného množství se řídí vztah popsáným v minulé kapitole 2 ovšem je vzato v potaz aktuální hodnota investorova sentimentu, nálady, která množství zvýší nebo sníží.

Algorithm 1 Rozhodování investora ohledně nákupu či prodeje mincí

```

1: for each coin in coins do
2:   current_price ← GetCurrentPrice(coin)
3:   thresholds ← GetThresholds(coin)
4:   if current_price > thresholds.sell_threshold then
5:     SellCoins(coin)
6:   else if current_price < thresholds.buy_threshold then
7:     BuyCoins(coin)
8:   end if
9: end for

```

Výše uvedený pseudokód demonstruje mechanismus dle kterého se investor rozhoduje, zda-li provede nákup či prodej.

Služby směnárů využívají taktéž kryptoměnoví těžaři. Těm je na počátku simulace přidělen z konfiguračního souboru seznam kryptoměn, které mají zájem těžit společně s aktuální výkonností vlastněného těžařského hardwaru a rychlostí těžby udávanou jako počet vytěžených mincí za hodinu. Těžař si v pravidelných denních intervalech na základě poměru ceny a efektivity těžby zvolí nejvhodnější kryptoměnu ze svého seznamu, kterou bude ten den těžit. Na konci dne vytěžené mince prodá směnárně, která s touto měnou obchoduje a která má nejnižší transakční poplatky, aby maximalizoval svůj zisk. Zisky pro jednotlivé měny jsou pro účely statistiky ukládány do mapy.

A právě výkonnost hardwaru užívaného pro těžbu kryptoměn se s časem a novou technologií či generací zlepšuje, resp. zvyšuje. K tomu slouží třída technologických vývojářů, která náhodně vybranému těžaři v pravidelných intervalech 1-2 let zvýší těžařskou výkonnost o danou hodnotu z konfiguračního souboru. Hranice tohoto intervalu představují intervaly mezi novými generacemi CPU (1 rok) a GPU (2 roky), jak je zmíněno v předchozí kapitole.

Nepředvídatelné a skokové změny cen jsou charakterizovány do vlastní třídy. Na základě konfiguračního souboru je tato třída navázána na jednu náhodně konkrétní kryptoměnu, jejíž cenu skokově mění v intervalu 2-8 měsíců. Tento interval byl stanoven na základě dolní a horní hranice mezi tweety Elona Muska, jak jsou znázorněny v grafu(12). Procentuální hodnota skokové změny ceny kryptoměny vychází z předchozího rozboru v kapitole 2. Na tuto skokovou změnu ceny reagují investoři zvýšením, nebo snížením úrovně svého sentimentu (nálady), která ovlivňuje množství mincí, které budou obchodovat.

V našem programu vystupuje vždy právě jedna vláda. Hlavním důvodem tohoto omezení je zamezit nadbytečnému dělení účastníků simulace do národností s individuální mírou zdanění kryptoměnových transakcí, která pro náš program není podstatná. Vláda v půlročních intervalech aktualizuje výši zdanění, která je náhodně generována na intervalu uvedeném v minulé kapitole. Zároveň se změnou zdanění vláda může přistoupit k uzavření některé ze směnárů. Míra pravděpodobnosti takového jevu

byla stanovena na 8 % (původ této hodnoty viz. předchozí kapitola).

Stěžejním prvek programu je třída reprezentující samotnou kryptoměnu. Ta je na počátku simulace inicializována hodnotami z konfiguračního souboru, konkrétně:

1. Unikátní jméno
2. Počáteční cenu
3. Percentuální efektivitu těžby, která vyjadřuje náročnost vytěžení nové mince těžařem
4. Celkový počet mincí, které se v simulaci budou nacházet
5. Aktuální počet mincí, které jsou již v oběhu, t.j. jsou vytěžené, vlastněné investory nebo směnárnami
6. Počet mincí, které jsou určené pro vytěžení (`celkový_počet_mincí - počet_mincí_již_v_oběhu`)

Na tuto třídu se mimo jiné obracejí těžaři, kteří interakcí s ní symbolizují vytěžení daného počtu nových mincí. Pokud je požadovaný počet mincí ze strany těžaře menší, než dostupný počet mincí pro vytěžení, je mu tento požadovaný objem vrácen a počet mincí o tuto hodnotu snížen, v opačném případě je těžaři vrácen počet 0.0.

Vyjma správy těžení kryptoměny v hodinových intervalech aktualizuje svou současnou cenu. Vztah pro výpočet vychází ze článku(20), který byl upraven a rozšířen o proměnné *demand* a *sentiment*⁵ a má následující tvar:

$$price+ = \left(\left(\frac{time}{693} \right)^{5.526} \times 10^{((0.9998^{time}) \times (2 \times |\sin(2.983 \sqrt[4]{time-0.57})| - 1)^2 - 1) \times sentiment} \right) \times demand[\$] \quad (4)$$

kde:

- *price*: Aktuální cena
- *time*: Aktuální simulační čas [počet dní od počátku simulace]
- *demand*: Hodnota vyjadřující poptávku po této kryptoměně
- *sentiment*: Hodnota sentimentu, resp. nálady, napříč investory na trhu

Poptávka po konkrétní kryptoměně (*demand*) je vyjádřena jako poměr počtu mincí, které cirkulují v oběhu a celkového počtu mincí. Kromě toho jsou ze všech směnáren, které tuto minci obchodují zjištěny aktuální úroveň poptávky po této měně a ty jsou zprůměrovány do proměnné *sentiment*. Výpočet se řídí stejným způsobem, tedy poměrem počtu dostupných mincí na směnárně vůči jejich celkovému přiřazenému počtu na počátku simulace.

4 Architektura simulačního modelu/simulátoru

Architektura simulátoru je navržena tak, že po spuštění se postupně vykonají experimenty 1 až 5, které vypíší statistiky svých jednotlivých účastníků na standardní výstup. Kromě toho je do výstupního souboru *price_vals* zaznamenán denní vývoj cen jednotlivých kryptoměn, které v simulaci vystupují. Výpočet aktuální ceny kryptoměny obstarává metoda *UpdatePrice()* ze třídy *Coin* za použití vztahu uvedeného výše.

⁵Toto rozšíření probíhalo iterativně experimentováním.

Samotnému spuštění simulace předchází zpracování konfiguračního JSON souboru *sim_config.json*, prostřednictvím kterého jsou do simulace vloženi účastníci konkrétního typu s nadefinovanými atributy. Omezení a pravidla pro korektní formát tohoto souboru lze nalézt v *README.md*. Toto zpracování má na starosti metoda *InitSimulation()* třídy *ConfigHandler*.

4.1 Mapování abstraktního modelu na simulační

V této sekci ukážeme mapování tříd implementovaných v adresáři *entities/* na entity vystupující v konceptuálním modelu (viz. (14), slajd 48).

Třída	Entita v konceptuálním modelu	Implementační soubory
Coin	Kryptoměna	crypto_coin.[cpp/h]
Exchange	Kryptoměnová směnárna	crypto_exchange.[cpp/h]
Investor	Investor	crypto_investor.[cpp/h]
CryptoMiner	Těžař kryptoměn	crypto_miner.[cpp/h]
ElonTweet	Spekulativní události a skokové změny cen	elon_tweet.[cpp/h]
Government	Vláda, úřady	government.[cpp/h]
TechDeveloper	Technologické inovace	tech_devs.[cpp/h]

Tabulka 1: Přehled tříd a jejich mapování

Třída *Coin*, která reprezentuje obchodovanou kryptoměnu je modelována jako *Proces* (viz. (14), slajd 174), jejichž atributy jsou přejaté z konfiguračního souboru.

Třída *Exchange* reprezentuje kryptoměnovou směnárnou a je modelována jako *Facility* (viz. (14), slajd 183). Výlučný přístup byl zvolen z důvodu zamezení souběžnému konkurenčnímu přístupu vícero ke sdíleným zdrojům, jakými je například instance třídy *Coin*. Rovněž přejímá atributy z konfiguračního souboru.

Třída *Investor* je taktéž modelována jako *Proces*, který provádí interakce se směnárnami a kryptoměnami.

Třída *CryptoMiner* je z důvodu opakovaného provádění v rámci simulace také modelována jako *Proces*.

Třída *ElonTweet*, i zde je z důvodu opakování při běhu simulace zvoleno modelování formou *Procesu*.

Třída *Government* představující vládu, která zavádí zdanění a případně uzavírá směnárnou je z důvodu své cyklické povahy rovněž modelována jako *Proces*.

Třída *TechDeveloper*, která zvyšuje výkon těžařských strojů se opakuje v daném časovém intervalu a proto je modelována jako *Proces*.

Pro generování pseudonáhodných hodnot pro účely jednotlivých tříd (náhodná doba neaktivity, volba indexu ve vektoru, hodnota o kterou se zvedne daň apod.) je použita metoda *Uniform* a *Random* (viz. (14), slajd 170).

5 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Experimenty byly prováděny za účelem predikce vývoje cen zúčastněných kryptoměn v různých podmínkách trhu a ukázání chování jednotlivých účastníků a zajímavých stavů, které mohou nastat. A právě za tímto účelem je nezbytné uplatnit náš model, abychom mohli jinak komplexní problematiku finančnictví vhodně abstrahovat a experimentovat s ní.

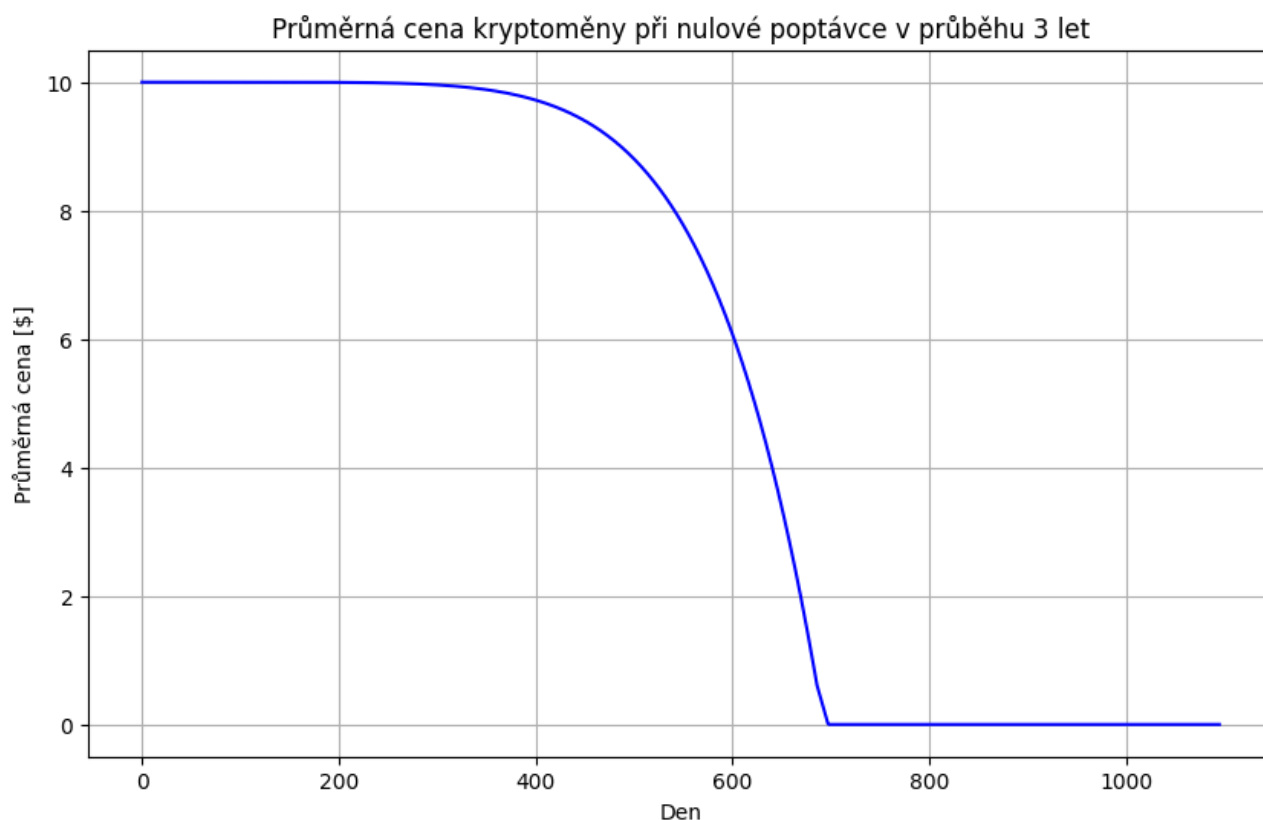
5.1 Postup experimentování

Experimenty probíhaly postupně, tak jak byly vloženy do vstupní množiny. Vzhledem k tomu, že v simulaci vystupují náhodné a nedeterministické jevy, jako jsou skokové změny cen či způsob volby směnárny investory a těžaři, každý experiment se prováděl pětikrát za sebou a v následující kapitole budou prezentovány průměry zjištěných hodnot a veličin v rámci jednotlivých experimentů. Následně budou nasbírané hodnoty cen kryptoměn přiloženy ke každému z experimentů prostřednictvím grafů pro lepší přehlednost. Zbylé údaje a hodnoty účastníků formou tabulky.

5.2 Experiment 1

Primárním cílem prvotního experimentu bylo ověření validity modelu na scénáři s očekávaným vývojem ceny. Scénář je následující, v simulaci existuje jedna kryptoměna s názvem *coin1*, dále zde vystupuje jedna směnárna, dva investoři, každý zastupuje jeden ze dvou typů investorů (t.j. dlouhodobí a krátkodobí) a jeden kryptoměnový těžař. Na počátku simulace je nastavena cena této kryptoměny na 10 \$, ovšem ani investoři ani těžaři ji nemají ve svých seznamech měn, se kterými by měli cokoliv provádět, ať už je těžit či s nimi obchodovat, to logicky vede na nulovou poptávku na trhu a dle tržní logiky by cena takové mince měla postupně klesat až na hodnotu rovnou 0 \$. Délka simulace je nastavena na 3 roky.

Výsledek vývoje ceny kryptoměny je vidět na grafu níže.



Obrázek 1: Graf průměrné ceny sledované kryptoměny v rámci prvního experimentu při nulové poptávce.

Atribut	Průměrná hodnota
Počáteční cena mince	10.000 \$
Finální cena mince	0.000 \$
Počet obchodníků (investorů) pro tuto minci	0
Vládní zdanění na kryptoměny	4.302 %
Počet prodaných mincí směnárnou	0.000

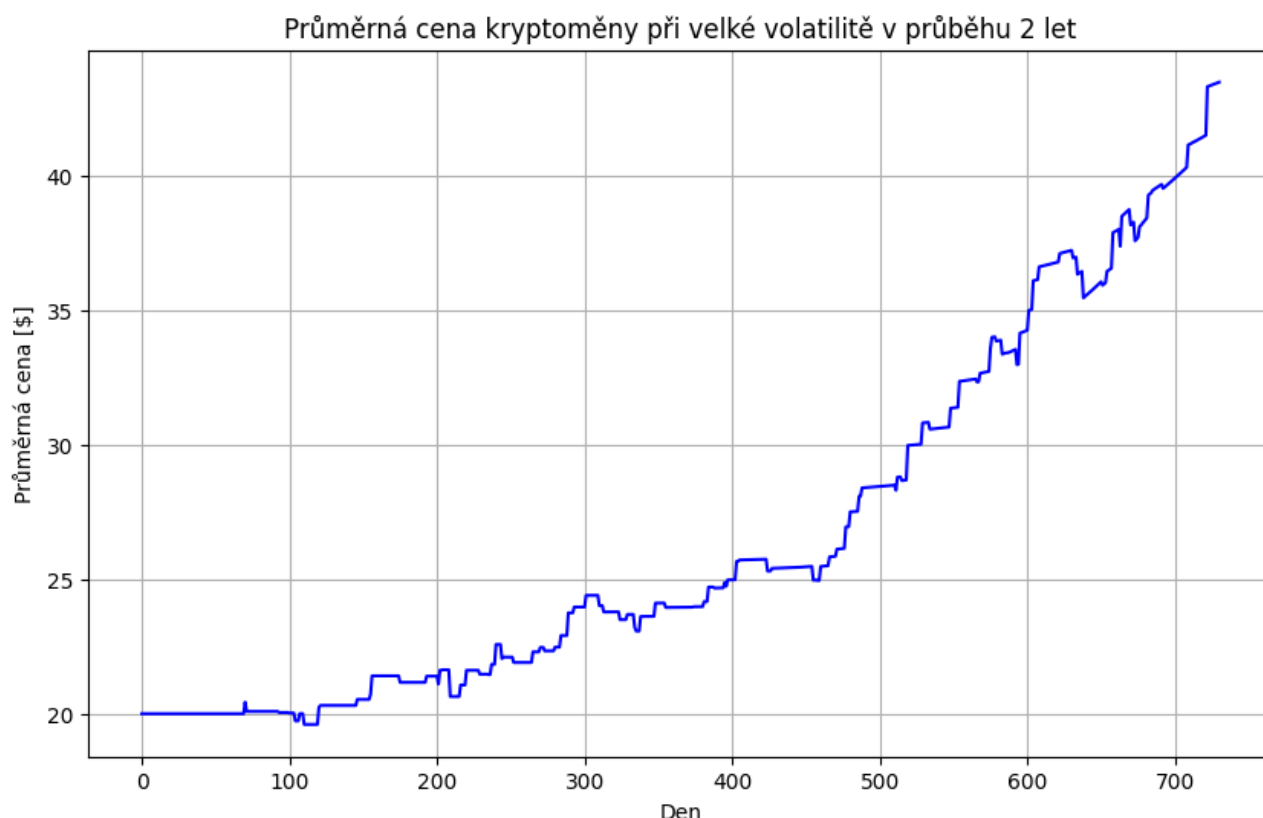
Tabulka 2: Výčet zajímavých hodnot shromážděných od účastníků simulace

Z výsledného grafu můžeme vidět jasný trend kontinuálního poklesu ceny kryptoměny z důvodu nulové poptávky na trhu, což potvrzuje i nulový počet prodaných mincí v jediné existující směnárně. Vše dohromady odpovídá předpokladu uvedeném na začátku experimentu.

5.3 Experiment 2

V rámci druhého experimentu se pokusíme ukázat vliv, který mají regulační úřady a zejména spekulativní události na cenu kryptoměny. V simulaci bude opět vystupovat jedna kryptoměna *coin1* s počáteční cenou 20 \$, čtyři investoři (od každého typu po dvou), jeden kryptoměnový těžař, entita reprezentující regulační úřady, resp. vládu s vysokým 10 % zdaněním a větší množství entit, konkrétně pět, které bude reprezentovat skokové změny ceny. Délka simulace je nastavena na 2 roky. Kompletní konfigurace tohoto experimentu je uložena v souboru *high_volatility.json*.

Výsledek vývoje ceny kryptoměny je vidět na grafu níže.



Obrázek 2: Graf průměrné ceny sledované kryptoměny v rámci druhého experimentu při vyvolaných skokových cenových změnách.

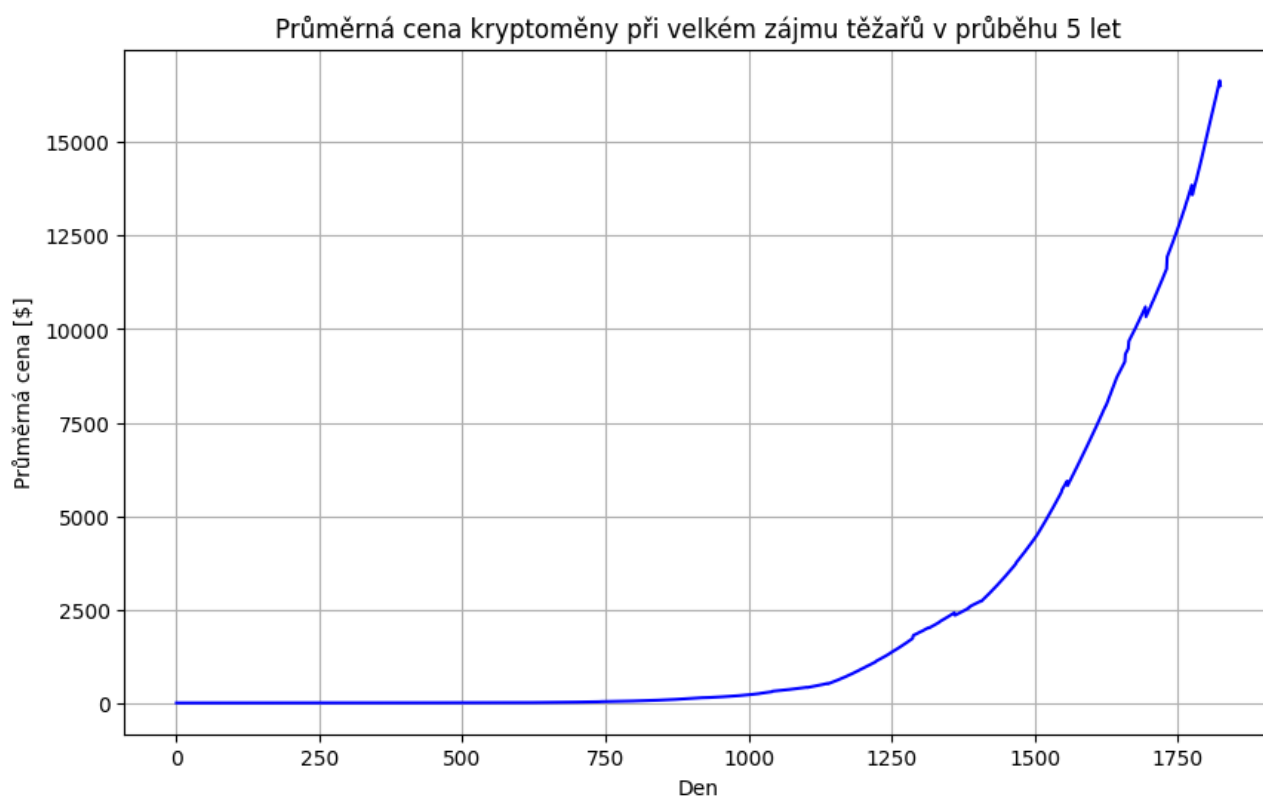
Atribut	Průměrná hodnota
Počáteční cena mince	20.000 \$
Finální cena mince	43.523 \$
Počet vytěžených mincí jedním těžařem	81.495.6
Zisky těžařů	1 422 242.1572 \$
Vládní zdanění na kryptoměny	10.754 %
Souhrnná výše všech pozitivních skokových změn ceny	563.873 %
Výše jedné pozitivní skokové změny ceny	7.943 %
Souhrnná výše všech negativních skokových změn ceny	244.276 %
Výše jedné negativní skokové změny ceny	5.552 %

Tabulka 3: Výčet zajímavých hodnot shromážděných od účastníků simulace

Na výsledném grafu můžeme vidět očekávanou cenovou volatilitu, která je způsobena spekulativními událostmi, v realitě se může jednat například právě o vyjádření vlivných osobností směrem k dané kryptoměně či jiné sociální události. Výkyvy cen by byly pravděpodobně markantnější, ovšem vlivem zprůměrování výsledných hodnot došlo k určitému zahlazení. Z přiložené tabulky je možno vidět, že převažovaly skokové změny, které cenu zvedaly, což odpovídá i většímu počtu "pozitivních výkyvů" v grafu.

5.4 Experiment 3

Třetí experiment se snaží ukázat zásadní vliv kryptoměnových těžařů na celkovou cenu těžené měny. Těžaři totiž tvoří poměrně pravidelné producenty nových mincí, které uvádějí do oběhu, čímž značně zvyšují nabídku a za předpokladu, že je i dostatečná poptávka ze strany ostatních aktérů, zejména pak investorů, má to za vliv zvyšování ceny. V simulaci bude opět vystupovat jedna kryptoměna *coin1* s počáteční cenou 20 \$, čtyři investoři (od každého typu po dvou), dvě směnárny, vládní aparát s počátečním zdaněním ve výši 1 %, jedna entita pro skokové změny cen, celkem tři entity reprezentující technologické inovace těžebního vybavení a dohromady 7 těžařů. Délka simulace je nastavena na 5 let. Kompletní konfigurace tohoto experimentu je uložena v souboru *mining_boom.json*.



Obrázek 3: Graf průměrné ceny sledované kryptoměny v rámci třetího experimentu při zvýšeném počtu těžby.

Atribut	Průměrná hodnota
Počáteční cena mince	20.000 \$
Finální cena mince	16 570.008 \$
Počet vytěžených mincí jedním těžařem	400 327.491
Vládní zdanění na kryptoměny	10.754 %

Tabulka 4: Výčet zajímavých hodnot shromážděných od účastníků simulace

Z výsledného grafu je zjevný trend téměř nepřetržitého růstu ceny sledované kryptoměny, vyjma několika propadů, které lze přičítat zejména skokovým změnám ceny. Z příložené tabulky je vidět značné množství, které jednotliví těžaři za dobu simulace. Tento faktor společně s přítomností investorů má za následek pozorovanou stoupající křivku ceny kryptoměny.

5.5 Závěry experimentů

Celkem byly provedeny 3 experimenty, každý z nich pětkrát a zjištěné hodnoty následně zprůměrovány a prezentovány. První experiment představoval situaci na trhu s nulovou poptávkou po kryptoměně, což vedlo k poklesu ceny až na nulovou úroveň. Druhý experiment prezentoval vliv, který mají externí vlivy, jako známé osobnosti a jejich akce a prohlášení a regulační úřady na cenu kryptoměny, jejichž cena se tímto vlivem rozkmitala. Závěrečný třetí experiment se soustředil na scénář, kdy je trh zásobován novými vytěženými mincemi, což má společně s dostatečnou poptávkou pozitivní vliv na cenu.

Výše uvedené scénáře lze v programu spustit prostřednictvím příkazu *make run*. Výstupy jednotlivých scénářů a entit jsou vypisovány na standardní výstup a vývoj ceny kryptoměn/y je zaznamenáván do souboru *[název scénáře].price_vals*. Program rovněž nabízí i další dodatečné scénáře, které lze spustit příkazem *./ims-sim [název scénáře].json*.

6 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

Provedené experimenty ukazují, že vliv jednotlivých aktérů na trhu má nezanedbatelný vliv na vývoj ceny kryptoměny na takovém trhu. A právě proto v rámci našeho projektu vznikl nástroj, který se snaží tyto vlivy a jejich význam představit.

Reference

- [1] *Bitcoin Average Cost Per Transaction* [online]. ycharts, november 2024 [cit. 2024-11-30]. Dostupné z: https://ycharts.com/indicators/bitcoin_average_cost_per_transaction.
- [2] *Crypto Mining Difficulty Explained: An In-Depth Look* [online]. kucoin, jún 2024 [cit. 2024-11-27]. Dostupné z: <https://www.kucoin.com/learn/crypto/crypto-mining-difficulty-explained>.
- [3] *Intel Processor Generations* [online]. hyperpc, január 2024 [cit. 2024-11-26]. Dostupné z: <https://hyperpc.ae/company/blog/generations-of-intel-processors?srsltid=AfmB0oq2gZ0FC27YFqDZNQbQJ3wME5ueK51j0eFT65ggbkf0meQpTNy5>.
- [4] ANTE, L. How Elon Musk's Twitter activity moves cryptocurrency markets. *Technological Forecasting and Social Change*. 2023, [cit. 2024-11-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162522006333>.
- [5] HRUBÝ, M. *Diskrétní modelování – Petriho sítě a SIMLIB/C++*. Dostupné na adrese <http://perchta.fit.vutbr.cz:8000/vyuka-ims/uploads/1/ims-demo1.pdf>.
- [6] HRUBÝ, M. *Seminář o projektech IMS*. Dostupné na adrese <http://perchta.fit.vutbr.cz:8000/vyuka-ims/uploads/1/IMS-2023-seminar-o-projektech.pdf>.
- [7] HRUBÝ, M. *Simulační experimenty SIMLIB/C++*. Dostupné na adrese <http://perchta.fit.vutbr.cz:8000/vyuka-ims/uploads/1/diskr2-2011.pdf>.
- [8] LEGGE, M. *What Determines the Price of Crypto?* [online]. Koinly, november 2024 [cit. 2024-11-26]. Dostupné z: <https://koinly.io/blog/what-determines-the-price-of-crypto/>.
- [9] LOHMANN, N. *JSON for Modern C++*. Dostupné na adrese <https://github.com/nlohmann/json>.
- [10] MUNCASTER, P. *German Police Shutter 47 Criminal Crypto Exchanges* [online]. infosecurity-magazine, september 2024 [cit. 2024-11-28]. Dostupné z: <https://www.infosecurity-magazine.com/news/german-police-shut-47-criminal/>.
- [11] NAKAMOTO, S. *Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system* [online]. 2008 [cit. 2024-08-04]. Dostupné z: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [12] OOSTERBAAN, E. *The Elon Effect: How Musk's Tweets Move Crypto Markets* [online]. Coindesk, september 2023 [cit. 2024-11-26]. Dostupné z: <https://www.coindesk.com/layer2/2021/12/14/the-elon-effect-how-musks-tweets-move-crypto-markets>.
- [13] PERINGER, P. *SIMulation LIBrary for C++ programming language*. Dostupné na adrese <https://www.fit.vut.cz/person/peringer/public/SIMLIB/>.
- [14] PETR PERINGER, M. H. *Modelování a simulace*. Dostupné na adrese <http://perchta.fit.vutbr.cz:8000/vyuka-ims/uploads/1/IMS.pdf>.
- [15] SMITH, D. *The Role of Exchanges in Cryptocurrency Trading* [online]. cryptogeek, február 2023 [cit. 2024-11-27]. Dostupné z: <https://cryptogeek.info/en/blog/exchange-role>.
- [16] SORIANO, J. *7 Types of Cryptocurrency Investors: A Comprehensive Guide* [online]. helalabs, apríl 2024 [cit. 2024-11-27]. Dostupné z: <https://helalabs.com/blog/7-types-of-cryptocurrency-investors-a-comprehensive-guide/>.
- [17] TEAM, C. *[REPORT PREVIEW] The Chainalysis Guide to On-Chain User Segmentation for Crypto Exchanges* [online]. Chainalysis, jún 2024 [cit. 2024-11-26]. Dostupné z: <https://www.chainalysis.com/blog/crypto-exchanges-on-chain-user-segmentation-guide/>.

- [18] TOM WESTBROOK, S. M. *Bitcoin approaches \$100,000 on optimism over Trump crypto plans* [online]. Reuters, november 2024 [cit. 2024-11-26]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/technology/bitcoin-breaks-95000-first-time-optimism-over-trump-crypto-plans-2024-11-21/>.
- [19] TYSON, M. *Nvidia GeForce RTX 50-series launch pushed back to early 2025 according to prominent leaker* [online]. tomsHARDWARE, júl 2024 [cit. 2024-11-26]. Dostupné z: <https://www.tomshardware.com/pc-components/gpus/nvidia-geforce-rtx50-launch-pushed-back-to-early-2025-according-to-prominent-leaker>.
- [20] UMANOV, L. *Bitcoin price mathematical model (bitcoin formula)* [online]. medium, jún 2019 [cit. 2024-11-29]. Dostupné z: <https://medium.com/@levumanov/bitcoin-price-mathematical-model-bitcoin-formula-f1967cd34c6f>.