



VILNIAUS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR INFORMATIKOS FAKULTETAS
PROGRAMŲ SISTEMŲ STUDIJŲ PROGRAMA

Bakalauro baigiamasis darbas

**Likvidavimo algoritmo tobulinimas perviršinio užstato
skolinimo protokoluose**

**Improving liquidation algorithms in over-collateralized lending
protocols**

Atliko : Vismantas Stonkus

Darbo vadovas : prof. dr. Remigijus Paulavičius

Darbo recenzentas : lekt. Karolis Uosis

Vilnius
2025

Turinys

Santrauka	3
Summary	4
Santrumpos	5
Ivadas	6
0.1. Tyrimo objektas ir aktualumas	6
0.2. Darbo tikslas	6
0.3. Uždaviniai	6
0.4. Metodai (ir prielaidos ir instrumentai)	8
1. Kas yra arbitražas	9
2. Likvidacijos	11
2.1. Tradicinės paskolų platformos	11
2.1.1. Veiklos principas	11
2.1.2. Likvidacijos tradicinėse sistemose	11
2.2. Kripto valiutų paskolų platformos	11
2.2.1. Kodėl žmonės skolinasi per kripto valiutų paskolų platformas?	12
2.2.2. DeFi likvidacijų palyginimas su tradicine finansų sistema	12
2.2.3. Protokoliai	13
2.2.4. Venus platforma	14
2.2.5. Arbitražo potencialas	14
3. Venus protokolo likvidavimo mechanizmas	16
3.1. Sąvokos	16
3.2. Likvidacijos ypatumai	16
3.3. Panašumai su kitais protokolais	17
4. Skirtingos likvidacijų strategijos	18
4.1. Naivus algoritmas	18
4.2. Esami tyrimai	18
4.3. Pasiūlyta <i>Optimal Fixed Spread Liquidation Strategy</i> modifikacija	19
5. Formatavimas	20
5.1. Matematinis tekstas	20
5.2. Matematinų rezultatų formulavimas	21
5.3. Lentelės	23
5.4. Paveikslėliai, grafikai, diagramos, nuotraukos	23
5.5. Sąrašai	23
6. Programinio kodo pateikimas	25
6.1. Algoritmai	25
6.1.1. Skyrelio pavyzdys	25
Rezultatai	26
Išvados	27

Santrauka

PERRASYTI

Darbe nagrinėjamos likvidacijos procesų optimizavimo galimybės perviršinio užstato skolinimo protokoluose. Tyrimo tikslas analizuoti likvidavimo strategijas, siūlomos algoritminės modifikacijos, siekiant maksimaliai padidinti likvidatoriaus pelną. Pateikiama egzistuojančių metodų apžvalga ir išsamiai analizuojamas "Optimal Fixed Spread Liquidation Strategy" algoritmas. Siūloma jo modifikacija – "pilno išėikvojimo" strategija, kuri efektyviau optimizuoja procesą, leidžiantį pilnai išnaudoti likvidacijos galimybę, neprarandant potencialaus pelno. Empiriniai duomenys iš Venus protokolo rodo, kad dauguma likvidacijų nepasiekia maksimaliai galimo pelno. Palyginus tris strategijas ("atkartoti", "iki uždarymo ribos", "pilnas išėikvojimas"), nustatyta, kad "pilno išėikvojimo" strategija generuoja iki 72% daugiau pelno nei istorinės likvidacijos. Tai rodo, kad optimizuotos strategijos galėtų reikšmingai padidinti likvidatorių pelningumą. Šio darbo rezultatai prisideda prie skolinimo protokolų optimizavimo ekosistemos ir atveria kelią tolimesnėms analizėms, susijusioms su valiutų porų ir užstato valdymo strategijomis. Darbo tęstinumas - gilintis į tarpvalutinius keitimus ir kitas likvidacijų galimybes, didinant arbitražo algoritmų efektyvumą.

Raktiniai žodžiai: blokų graindinės, likvidacijos, arbitražas, maksimali išgaunama vertė.

Summary

PERRASYTI

The study examines ways to optimize liquidation processes in over-collateralized lending protocols. The research focuses on analyzing liquidation strategies and propose algorithmic modifications to maximize the liquidator's profit. A review of the existing methods includes a detailed analysis of the "Optimal Fixed Spread Liquidation Strategy" algorithm. A proposed modification, called "the drain" strategy, optimizes the process, enabling full utilization of the liquidation opportunity without losing its potential profit. Empirical evidence from the Venus protocol shows that most liquidations do not achieve the maximum possible profit. A comparison of three strategies ("repeat," "up to close factor," and "drain") shows that "the drain" strategy generate up to 72% more profit than historical liquidations. This demonstrates that when optimized strategies can significantly increase liquidators' profitability. The findings of this study contribute to the ecosystem of lending protocol optimization and pave the way for further analyses related to currency pair and collateral management strategies. Future research could explore using different currencies and other liquidation opportunities to enhance the efficiency of arbitrage algorithms.

Keywords: blockchain, liquidation, arbitrage, maximal extractable value (mev).

Santrumpos

DeFi decentralizuotų finansų sistema, kurioje tradicinės finansinės paslaugos (paskolos, skolinimas, keitimas, draudimas ir kt.) teikiamos naudojant išmaniuosius kontraktus blokų grandinėse

Įvadas

1. apibrėžiamas tiriamasis objektas akcentuojant neapibrėžtumą, kuris bus išspręstas darbe,
2. aprašomas temos aktualumas,
3. nurodomas darbo tikslas ir uždaviniai, kuriais bus įgyvendinamas tikslas.
4. aptariamos teorinės darbo prielaidos bei kokios metodikos ir kuriam tikslui naudojamos,
5. apibūdinami su tema susiję literatūros ar kitokie šaltiniai,
6. temos analizės tvarka, darbo atlikimo aplinkybės,
7. pateikiama žinių apie naudojamus instrumentus (programas ir kt., jei darbe yra eksperimentinė dalis). Darbo įvadas neturi būti dėstymo santrauka.

Darbo uždavinyje

apibrėžiamas siekiamas rezultatas, kad būtų galimybė išmatuoti, ar tikslai ir uždaviniai yra išspręsti, bei kokių lygiu (vertinant kiekybę bei kokybę). Pavyzdžiui, „Atlikti literatūros analizę“ nėra tinkamas uždavinys, nes nusako procesą, tačiau neapibrėžia jo rezultato. Tinkamos uždavinio formuluotės šablonai: „Išanalizuoti literatūrą ... siekiant apžvelgti ir įvertinti /... metodų tinkamumą sprendžiamam uždaviniui/privalumus ir trūkumus sprendžiant ... uždavinį/rekomenduojamas ... projektavimo gaires, šablonus ir pan.“

0.1. Tyrimo objektas ir aktualumas

Šiame darbe bus tiriami kriptovaliutų paskolų platformų likvidavimo mechanizmai, ypatingą dėmesį skiriant *Venus* protokolui, veikiančiam *Binance Smart Chain* (BSC) blokų grandinėje. Bus analizuojamos likvidavimo proceso ypatybės ir ieškoma būdų jį optimizuoti. Šio protokolo veikimo principai būdingi daugeliui kitų perviršinio užstato skolinimo sistemų. Efektyvesnis likvidavimo algoritmas, padidinantis likvidatoriaus pelną, galėtų būti pritaikytas ir kitose decentralizuotose skolinimo platformose, siekiant optimizuoti likvidacijos procesą.

0.2. Darbo tikslas

Darbo tikslas – sukurti ir optimizuoti likvidavimo algoritmą, kuris maksimaliai padidintų likvidatoriaus pelną.

0.3. Uždaviniai

Užsibrėžtam tikslui pasiekti keliama šie uždaviniai:

1. Apžvelgti esamus paviršinio užstato skolinimo protokolus, išanalizuoti jų veikimo principus ir palyginti juos su *Venus* protokolu. Kadangi daugelis skolinimo protokolų kriptovaliutų ekosistemoje veikia panašiai, jei ši prielaida pasitvirtins, gauti rezultatai galės būti pritaikyti ir kituose protokoluose.
2. Išsamiai išnagrinėti *Venus* protokolo likvidavimo mechanizmą.
3. Sukurti ir/arba modifikuoti efektyvesnį likvidavimo algoritmą. Šiuo uždaviniu siekiame praplėsti kursiniame darbe pristatytas likvidavimo strategijas („atkartoti“, „iki uždarymo ribos“, „pilnas išieikvojimas“) papildant jas keturiomis naujomis strategijomis, kurios atsisako fiksuotų skolos ir užstato valiutų porų:
 - **Didžiausia skola** (single largest borrow) – grąžinama ta skolos valiuta, kurios suma yra didžiausia. Užstatas pasirenkamas iš tos pačios valiutos, jei užstato kiekis yra pakankamas, kitu atveju – valiuta, kurios vertė skolininko portfelyje didžiausia.
 - **Nuo mažiausio likvidavimo slenksčio** (from smallest collateral factor) – pirmiausia pasirenkamos užstato valiutos su mažiausiu likvidavimo slenksčiu, o paskutinė likvidacija vykdoma pagal „Didžiausios skolos“ strategiją.
 - **Nuo didžiausio likvidavimo slenksčio** (from largest collateral factor) – analogiška ankstesnei strategijai, tačiau prioritetas teikiamas užstato valiutoms su didžiausiu likvidavimo slenksčiu.
 - **Vienodos valiutos** (same tokens) – atliekamos „Pilno išieikvojimo“ strategijos likvidacijos tik toms valiutoms, kurios yra tiek užstatytos, tiek pasiskolintos. Ši strategija leidžia sumažinti valiutų keitimo riziką ir likvidumo problemas.
4. Palyginti sukurtas strategijas tarpusavyje bei su istorinėmis likvidacijomis.
5. Apibendrinti rezultatus ir pateikti išvadas bei rekomendacijas. Bus bandoma atsakyti į šiuos klausimus:
 - Ar „Nuo mažiausio likvidavimo slenksčio“ strategija yra pelningiausia likvidatoriui? Ši hipotezė grindžiama skolinimosi pajėgumo formule: jis priklauso nuo užstato valiutų verčių ir jų likvidavimo slenksčių sandaugų sumos. Tarkime, kad skolininkas yra užstatęs dvi vienodos vertės valiutas, tačiau vienos valiutos likvidavimo slenkstis yra 50%, o kitos – 90%. Užstatas su mažesniu likvidavimo slenksčiu mažiau prisideda prie skolinimosi pajėgumo nei užstatas su didesniu slenksčiu. Todėl likviduojant pirmiausia mažesnio slenksčio užstatą, mažiau paveikiamas bendras skolinimosi pajėgumas, o tai gali lemti didesnę likvidatoriaus pelną.
 - Ar „Nuo didžiausio likvidavimo slenksčio“ strategija, kuri veikia priešingai nei optimalios strategijos, rodyt mažesnę pelną likvidatoriui?
 - Ar „Vienodos valiutos“ strategija sustiprina „Pilno išieikvojimo“ strategijos pagrįstumą, nes eliminuoja valiutų konvertavimo riziką ir likvidumo trūkumą vykdant arbitražą didelėmis sumomis?

0.4. Metodai (ir prielaidos ir instrumentai)

{Cia papasakoti, kad likvidacijos pelningumas yra vertinimas pasinaudojant tuometinėmis valiutu vertėmis is tam tikro} Pirmiems dviem užduotims bus nagrinėjimas pavišintas protokolų kodas. Kaip trecia kaip ketvirta

PERRASYTI Kripto valiutos, kaip sparčiai auganti finansinė sritis, yra populiarus objektas spekuliantams, kurie siekia pasipelninti iš šių valiutų vertės svyravimų. Nepaisant didelių pelningumo galimybių, investavimas į kriptovaliutas neatsiejamas nuo rizikos, kad valiutos vertė gali smarkiai nukristi, dėl ko investuotojas gali prarasti dalį ar net visą pradinę investiciją. Siekiant maksimalaus pelno ir minimalios rizikos yra taikomi automatiniai arbitražo algoritmai. Šie algoritmai analizuoja kriptovaliutų rinkos svyravimus ir automatiškai vykdo sandorius, leidžiančius pasipelninti iš mažiausių kainų skirtumų tarp skirtingų biržų.

Šiame darbe dėmesys yra sutelktas į likvidacijos procesą ir jo integravimą į esamus automatinio arbitražo algoritmus. Darbo tikslas – analizuoti ir palyginti skirtingas likvidavimo strategijas perviršinio užstato skolinimo protokoluose, siekiant sukurti ir optimizuoti algoritmą, kuris maksimaliai padidintų likvidatoriaus pelną, efektyviai išnaudojant rinkos svyravimus ir automatizuoto arbitražo galimybes.

Tam, kad darbo tikslas būtų įgyvendintas buvo išsikelti uždaviniai:

1. Apžvelgti esamus perviršinio užstato skolinimo protokolus bei jų veikimo principus.
2. Išnagrinėti likvidavimo proceso mechanizmą.
3. Sukurti ar pamodifikuoti algoritmą, skirtą efektyviam likvidavimo strategijų vykdymui automatizuoto arbitražo sąlygomis.
4. Palyginti sukurtą algoritmą su egzistuojančiais sprendimais, įvertinant pelningumą.

Darbo struktūra yra sudaryta iš kelių pagrindinių skyrių. Pirmajame skyriuje pristatoma, kas yra arbitražas, siekiant suteikti teorinį pagrindą. Antrajame skyriuje aptariamos likvidacijos, jų svarba ir galimybės kriptovaliutų pasaulyje. Trečiajame skyriuje analizuojamos skirtingos likvidacijų strategijos, o ketvirtajame skyriuje pateikiami tyrimo rezultatai, įskaitant pelningumo skaičiavimus, strategijų realizacijos pavyzdžius ir duomenų analizę. Darbas užbaigiamas rezultatais ir išvadomis, kurios apibendrina pagrindines darbo įžvalgas.

1. Kas yra arbitražas

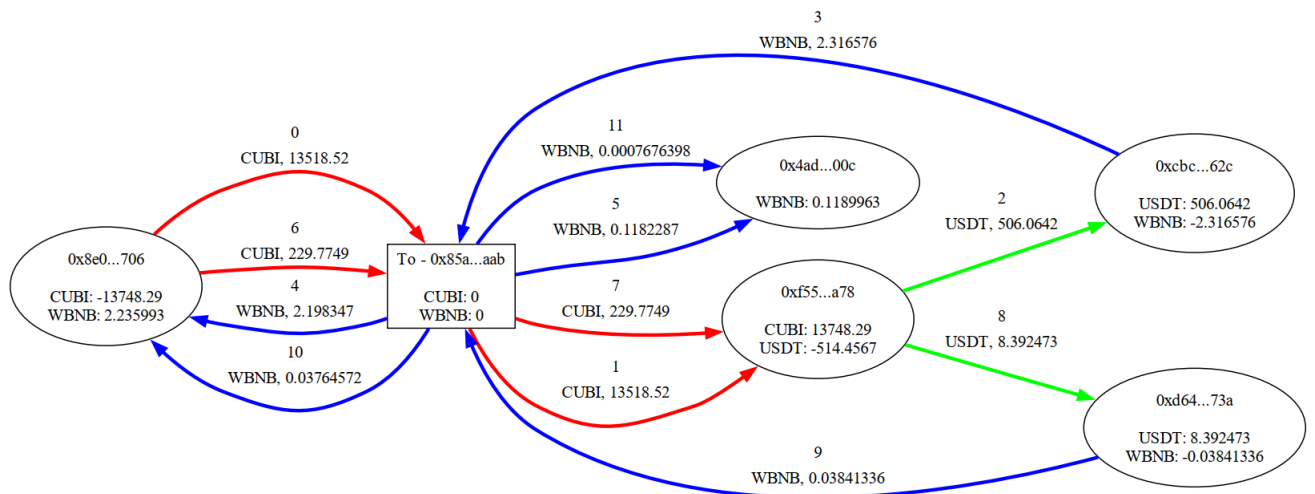
Arbitražas yra finansinė strategija, grindžiama ekonominių skirtumų išnaudojimu tarp dviejų ar daugiau rinkų, siekiant gauti pelną be jokios rizikos ar su minimalia rizika. Paprastai tariant, tai yra praktika, kai investuotojai perka tam tikrus finansinius instrumentus, tokius kaip prekės ar valiutos pigesnėje rinkoje, ir tuoj pat pardavinėja juos brangesnėje rinkoje, gaudami pelną iš šio kainų skirtumo.

Vienas esminių arbitražo principų yra reliatyvumas – investuotojai renkasi referencinę valiutą, kurios vertę jie laiko stabilia ir dirba siekdami padidinti šios valiutos kiekį. Pavyzdžiui, jei arbitražininkas laiko eurą stabilia valiuta, jis perka ir parduoda kitas valiutas arba kitokį turtą, tikėdamasis gauti kuo didesnį pelną eurai.

Paprasčiausias arbitražas susideda iš kainų skirtumų tarp dviejų rinkų. Tai pasiekama konvertuojant stabilų turto vienetą į kitą valiutą pagal kursą P_1 ir vėliau konvertuojant šią valiutą atgal į pradinį stabilų turto vienetą kursu P_2 , kur $P_1 \cdot P_2 > 1$. Šią pagrindinę idėją galima plėtoti ir modifikuoti įvairiais būdais:

- įtraukti tarpinius konvertavimo žingsnius, sudarant ilgesnę operacijų grandinę, siekiant išnaudoti kainų skirtumus biržose, kuriose nėra tiesioginio konvertavimo kelio iš ar į stabiliąją valiutą;
- pradėti arbitražą ne vien tik su viena stabiliąja valiuta, bet su keliomis. Taip galima efektyviau išnaudoti turimą kapitalą, nes skirtingos stabilų valiutų pozicijos gali suteikti daugiau lankstumo ir galimybių reaguoti į kainų skirtumus įvairiose biržose;
- išskaidyti valiutos konvertavimą į kitą per kelias biržas, siekiant išvengti didelio kainų svyravimo vienoje biržoje;
- konvertuoti vieną turto vienetą į kelias skirtingas valiutas vienoje tranzakcijoje dėl tam tikrų platformų galimybių;
- pasiskolinti kapitalą iš biržos su sąlyga, kad skola bus grąžinta per arbitražo procesą, taip panaikinant reikalavimą turėti pradinį kapitalą.

Efektyviausia arbitražo ypatumus pateikti pasinaudojant grafais. Pavyzdžiui, grafe, kur mazgai reprezentuoja savininkų sąskaitas (tradicinių valiutų atveju) arba piniginių adresus (kripto valiutų atveju), o kryptinės briaunos – valiutų ar kripto valiutų persiuntimus tarp jų, aiškiai matoma turtų judėjimo dinamika ir galimos arbitražo pelno galimybės.



1 pav. Arbitražo vizualizacija: lėšų pervedimai ir galutinis pelnas – 0,11899 WBNB

1 pav. pateikta arbitražo vizualizacija kriptovaliutų atveju. Matome 12 pavedimų tarp skirtingų piniginių adresų (numeracija prasideda nuo 0). Šiuo atveju adresas 0x85a...aab yra pradinis kontrakto adresas, kuris buvo iškviestas tranzakcijoje. Iš viso tranzakcijoje dalyvauja 4 rinkos, kuriose galima konvertuoti valiutų poras:

- 0x8e0...706 – CUBI - WBNB
- 0xf55...a78 – CUBI - USDT
- 0xcbe...62c – USDT - WBNB
- 0xd64...73a – USDT - WBNB

Adresas 0x4ad...00c šiuo atveju yra tik pelno piniginė, kurioje tranzakcijos pabaigoje atsiranda papildomi 0,11899 WBNB valiutos.

Kiekviename mazge taip pat pažymėtos valiutos ir jų kiekiai, nurodantys galutinį valiutos skirtumą po tranzakcijos. Pavyzdžiui, rinkoje 0x8e0...706 valiuta WBNB -> CUBI buvo konvertuota du kartus, kur iš viso į rinką įdėta 2,235993 WBNB, o išimta 13748,29 CUBI.

Tranzakciją galima suskirstyti į dvi dalis su pavedimais 0-5 ir 6-11. Pirmuosiuose penkiuose pavedimuose (0-4) atliekamas ratas: pradžioje trumpam pasiskolinama CUBI, tada ji iškeičiama į USDT, o po to – į WBNB. Trečiuoju pavedimu gaunama daugiau valiutos, nei reikia skolai grąžinti ketvirtuoju pavedimu. Todėl perviršis lieka kaip pelnas, kuris penktuoju pavedimu persiunčiamas į pelno piniginę. Panašiai vyksta ir su pavedimais 6-11, tačiau antrojoje dalyje naudojama kita USDT-WBNB rinka, o apskritai keičiamų valiutos kiekių dydžiai yra mažesni.

2. Likvidacijos

{Reiktu pasakyti kodėl čia rasom tekstą ir kodėl dedikuojam tiek daug puslapių šitai minčiai}

Koks yra šios analizės tikslas? Suprasti apie de fi paskolų platformas ir kuo jų likvidavimo procesas išsiskiria nuo tradicinių finansų sistemų.

2.1. Tradicinės paskolų platformos

Paskolų platformos – tai sistemos, kuriose vartotojai gali skolintis ar skolinti pinigus kitiems vartotojams. Tradicinėse bankinėse sistemose bankas veikia kaip tarpininkas tarp skolinčiojo ir skolininko. Panašiai veikia ir kredito unijos, kuriose nariai vieni kitiems suteikia paskolas per bendrą fondą.

2.1.1. Veiklos principas

- **Skolintojai:** asmenys ar įmonės, turintys perteklinių lėšų, kurias jie norėtų investuoti, kad gautų grąžą kaip palūkanas.
- **Skolininkai:** asmenys ar įmonės, kuriems reikia lėšų įvairiems tikslams – pradėti verslą, finansuoti projektą, pirkti prekę ir pan.

Skolintojai įneša savo lėšas į platformą, o skolininkai pateikia prašymus dėl paskolų. Platforma tada suderina šiuos du suinteresuotus šalių poreikius. Priklausomai nuo platformos ir paskolos tipo, gali būti reikalaujama, kad skolininkai užstatytų tam tikrą turto dalį kaip garantiją.

2.1.2. Likvidacijos tradicinėse sistemose

Tradicinėse finansų sistemose likvidacija vyksta tuomet, kai skolininkas nesugeba įvykdyti savo įsipareigojimų grąžinti paskolą. Tokiu atveju kredito įstaiga (bankas ar kredito unija) gali pradėti priverstinį skolų išieškojimo procesą, kuris dažnai apima užstato realizavimą.

Procesas dažnai prasideda nuo skolininko įspėjimo apie neįvykdytą mokėjimą. Jeigu situacija nesikeičia, kreditorius gali inicijuoti teisinį procesą: kreiptis į antstolius arba teismą dėl turto arešto ir pardavimo. Užstatas, pavyzdžiui, nekilnojamasis turtas ar transporto priemonė, įvertinamas ir parduodamas aukcione arba per kitus kanalus.

Gautos lėšos naudojamos skolos padengimui. Jeigu užstato realizavimo suma viršija skolos vertę, likutis grąžinamas skolininkui. Priešingu atveju, jei skolos likutis išlieka, skolininkas lieka skolingas likusią sumą. Procesas yra ilgesnis nei automatizuotose sistemose, tačiau suteikia galimybę ginčams spręsti ir apsaugoti abi puses teisinėmis priemonėmis.

2.2. Kripto valiutų paskolų platformos

Šiuolaikinėse paskolų platformose populiarėja kripto valiutų paskolų modelis, kuriame operacijos atliekamos naudojant kripto valiutą arba kitą kriptoturtą kaip užstatą. Skolinimo ir grąžinimo

procesai šiose platformose vykdomi naudojant išmaniuosius kontraktus (angl. *smart contracts*). Tokios platformos priklauso decentralizuotų finansų (angl. *Decentralized Finance, DeFi*) sistemai – tai finansinių paslaugų ekosistema, veikianti be tarpininkų, pagrįsta blokų grandinės technologija ir automatizuota išmaniųjų kontraktų pagalba.

Viena iš svarbiausių šių platformų savybių yra tai, kad skolininkai privalo pateikti užstatą, kuris viršija paimtos paskolos vertę. Kriptovaliutų pasaulyje tokia perviršinio užstato sistema yra būtina, nes leidimas skolintis daugiau nei pateikto užstato vertė atvertų kelią reikšmingam išnaudojimui. Jei būtų galima pateikti mažai užstato ir gauti didelę paskolą, tai sukeltų didelę riziką platformai, nes skolininkai galėtų nesąžiningai išnaudoti šią galimybę, o skolintojai patirtų didžiulius nuostolius. Todėl perviršinio užstato reikalavimas yra esminis saugumo mechanizmas, užtikrinantis stabilumą ir patikimumą šiose finansinėse sistemose.[Nes24]

Dar viena kriptovaliutų paskolų platformų ypatybė – tai valiutų vertės nustatymo procesas, kuris yra atliekamas naudojant orakulus. Orakulai yra išoriniai informacijos tiekėjai, kurie pateikia duomenų srautą naudojantis išmaniaisiais kontraktais. Šie kontraktai yra periodiškai atnaujinami per privilegijuotas *blockchain* tranzakcijas. Šios tranzakcijos nustato tam tikros valiutos vertę, užtikrindamos sklandų ir patikimą platformos veikimą.

2.2.1. Kodėl žmonės skolinasi per kriptovaliutų paskolų platformas?

1. **Kapitalo prieinamumas neparduodant turto:** skolinantis per kriptovaliutų platformas, galima gauti lėšų neparduodant turimų kriptovaliutų, taip išvengiant galimų mokesčių ir toliau dalyvaujant rinkos augime [Pil24].
2. **Greitas ir paprastas procesas:** kriptovaliutų paskolos dažnai suteikiamos greičiau ir su mažiau biurokratijos nei tradicinės bankų paskolos, nes nereikalaujama kredito istorijos patikrinimo [Oke24].
3. **Trumpasis pardavimas:** dar angliškai vadinamas *shorting*. Kriptovaliutų skolinimo platformos leidžia naudotojams skolintis kriptovaliutas, kurias jie vėliau parduoda dabartine rinkos kaina tikėdamiesi kainų kritimo ateityje. Kainai nukritus yra nuperkamas tas pats kiekis valiutos, kiek buvo pasiskolinta, ir iš karto gražinama skola. Šis metodas leidžia investuotojams uždirbti iš rinkos kainų svyravimų net ir krintant kainoms. Pavyzdžiui, investuotojas gali užstatyti savo ETH, pasiskolinti BTC, parduoti BTC už \$30000, tariant, kad einamuoju metu yra tokia kaina, ir vėliau nusipirkti už \$25000, tariant, kad po kažkiek laiko kaina nukrito, grąžindamas skolą ir pasilikdamas \$5000 pelno. [Aca20].

2.2.2. DeFi likvidacijų palyginimas su tradicinę finansų sistema

DeFi likvidacijos procesas skiriasi nuo tradicinio likvidavimo keliais esminiais aspektais, kurie yra svarbūs norint suprasti, kodėl šiose sistemose leidžiama įtraukti daugiau dalyvių – trečiąsias šalis, atliekančias likvidaciją[Nes24]:

- **Automatizavimas:** DeFi likvidacijos paprastai yra automatizuotos naudojant išmaniuosius kontraktus, todėl nereikia žmogaus įsikišimo. Tradicinėse finansų sistemose maržos reikalavimas (angl. *margin call*) dažnai reikalauja skolininko ar tarpininko rankinio veiksmo.
- **Skaidrumas:** DeFi likvidacija yra visiškai skaidri – visos tranzakcijos vyksta viešoje blokų grandinėje. Tradicinėse finansų sistemose likvidacijos detalės gali būti sunkiau prieinamos ar nematomos plačiajai visuomenei.
- **Decentralizacija:** DeFi veikia be tarpininkų – kriptovaliutų likvidacijos vykdomos tiesiogiai per kodo logiką. Tradicinėse finansų sistemose likvidacijas valdo brokeriai arba finansinės institucijos.

Kai skolininko užstato vertė krinta žemiau likvidavimo ribos (angl. *liquidation threshold*), pagal protokolą bet kam leidžiama atlikti likvidaciją. Per likvidacijos procesą užstatas (angl. *collateral*) yra parduodamas, dažnai su tam tikra nuolaida, mainais į valiutą, kurią skolininkas pasiskolino. [Ven24]

2.2.3. Protokolai

Yra daugybė paskolų protokolų, veikiančių įvairiuose *blockchain* tinkluose, kurie suteikia vartotojams galimybę skolintis ir skolinti decentralizuotai. 1 lentelėje pateikiami keli populiariausi šių protokolų pavyzdžiai.

- **Blokų grandinės** – išvardijami *blockchain* tinklai, kuriuose veikia atitinkamas protokolas. Paskolų mechanizmas tarp tinklų gali skirtis dėl tinklo subtilybių, tačiau pagrindiniai procesai išlieka tokie pat tam pačiam protokolui.
- **Bendra užrakinta vertė (Total Value Locked)** – atspindi platformos bendrą turto vertę įdėtą naudotojų. Tai svarbus rodiklis, leidžiantis įvertinti protokolo populiarumą ir pasitikėjimą. Paskolų platformų kontekste, ši vertė nurodo bendrą užstato sumą, iš kurios kaupiamos palūkanos už paskolintą turtą.

Iš lentelės matome, kad Aave yra vienas iš populiariausių ir labiausiai paplitusių paskolų protokolų, veikiantis daugybėje *blockchain* tinklų ir turintis didžiausią bendrą užrakintą vertę – \$22,112 milijardų. Šis protokolas išsiskiria savo plačia integracija ir stipriu vartotojų pasitikėjimu.

1 lentelė. Paskolų protokolų palyginimas [Def]

Pavadinimas	Blokų grandinės	Bendra užrakinta vertė (Total Value Locked)
Aave	Ethereum, Arbitrum, Avalanche, Polygon, Base, Optimism, Scroll, BSC, Gnosis, Metis, ZKsync Era, Fantom, Harmony	\$22,112B
JustLend	Tron	\$7,282B
Spark	Ethereum, Gnosis	\$5,391B
Compound Finance	Ethereum, Arbitrum, Base, Optimism, Polygon, Scroll	\$3,051B
Morpho	Ethereum, Base	\$2,930B
Kamino Lend	Solana	\$2,126B
Venus	BSC, ZKsync Era, Arbitrum, opBNB, Ethereum	\$1,938B
Avalon Labs	CORE, Bitlayer, Taiko, BSC, Merlin, BOB, Mode, BSquared, ZetaChain, Kaia, Arbitrum, Ethereum, Base, IoTeX, Scroll, Mantle, Zircuity	\$1,134B
Fluid Lending	Ethereum, Arbitrum, Base	\$622,38M
Benqi Lending	Avalanche	\$511,67M
NAVI Lending	Sui	\$476,31M
Suilend	Sui	\$468,55M
Marginfi Lending	Solana	\$453,06M

2.2.4. Venus platforma

Šiame darbe toliau yra analizuojamas *Venus* protokolas ir jo istorinės likvidacijos. Nors ši platforma nėra didžiausia, jos likvidavimo mechanizmai yra panašūs į daugelio kitų kriptovaliutų paskolų platformų. Tai bus detaliau parodyta skyriuje 3.

Venus protokolas pasirinktas dėl autoriaus asmeninio susipažinimo su jo veikimu ir ilgametės patirties pagrindiniame jo *blockchain* tinkle – *Binance Smart Chain (BSC)*.

2.2.5. Arbitražo potencialas

Iš esmės, likvidaciją galima laikyti tam tikra rinka, suteikiančia galimybę konvertuoti vieną valiutą į kitą. Likvidacija paprastai yra pelninga likviduotojams, nes pasiskolinta valiuta yra iškeičiama į užstatą, kurio vertė dažnai viršija grąžintos paskolos sumą – taip likvidatoriams sukuriama finansinė paskata veikti. Ši procedūra yra nepalanki skolininkui, nes jis priverstinai praranda dalį arba visą savo užstatą. Skolintojams likvidacija naudinga tuo, kad užtikrina paskolos grąžinimą net ir tuomet, kai skolininkas pats to padaryti nesugeba. Todėl likvidacijos procesas yra naudingas likviduotojams ir skolintojams, tačiau nuostolinga skolininkui.

Jeigu valiuta, kuria reikia grąžinti skolą, yra nestabili iš likvidatoriaus perspektyvos, galima konvertuoti turimą kapitalą iš stabilios valiutos į skolinamąją valiutą. Panašiai, užstato valiutą galima konvertuoti į stabilų piniginių vienetą per tam tikras valiutų keitimo operacijas kitose rinkose. Tokiu atveju, arbitražo sistema tampa itin vertinga, nes ji gali automatizuoti valiutos konversijos procesą ir rasti efektyviausią būdą konvertuoti iš valiutos A į valiutą B, tuo pačiu užtikrinant, kad likvidatorius gaus maksimalų pelną.

Taigi, jeigu turime algoritmą, kuris sugeba aptikti arbitražo galimybes iš tam tikros rinkų aibės, šią aibę galima papildyti likvidacijos rinkomis, leidžiant likvidatoriams bandyti pasipelnyti iš likvidacijų su minimalia ar net be rizikos. Tačiau likvidatoriai gali susidurti su rizikomis – pavyzdžiui, būti aplenkiami kitų likvidatorių arba mokėti mokesčius už bandymus atlikti likvidaciją be sėkmingo likvidavimo dėl klaidos ar būsenos pasikeitimo, kuri nebeleistų atlikti valiutų konvertavimo. Šios rizikos yra aktualios ir paprastesniems arbitražo scenarijams tarp rinkų.

3. Venus protokolo likvidavimo mechanizmas

{Koks tikslas šio skyriaus? Kokius klausimus norim atsakyti?} Norim išsamiai išnagrinėti Venus protokolo likvidavimo mechanizmą. Palyginti kitus paskolų platformų mechanizmus su Venus ir parodyti, kad tolimesni algoritmai gali būti pritaikyti kitose platformose.

Šiame skyriuje siekiama išsamiai išanalizuoti Venus protokolo likvidavimo mechanizmą, suprasti jo veikimo principus bei išskirti pagrindinius parametrus, lemiančius likvidacijos eigą. Nors pasirinktas konkretus protokolas, analizė nėra skirta tik jam – šiuo tyrimu taip pat siekiama įvertinti, kiek Venus modelis yra atstovaujantis platesnei kriptovaliutų paskolų platformų ekosistemai. Lyginant su kitais protokolais, bus siekiama pagrįsti, kad tolimesni šiame darbe siūlomi algoritmai gali būti taikomi ir kitose panašaus tipo decentralizuotose skolinimo sistemose.

3.1. Sąvokos

- **Pozicija (angl. *position*):** rinkinys kelių užstatų ir paskolų, suskirstytų pagal valiutą, kuriuos valdo vienas naudotojas.
- **Likvidacijos paskata:** priedas arba nuolaida, kurią likvidatorius gali gauti, likviduodamas užstatą. Šis skirtumas skatina likvidatorius veikti nedelsiant, kai paskola peržengia likvidavimo slenkstį. Venus atveju tai yra 10% gražinamos valiutos vertės.
- **Paskolos ir užstato santykis (angl. *loan to value, LTV*):** procentinė dalis, kuria užstato vertė įtraukiama į skolinimosi pajėgumą. Kiekviena valiuta turi atskirą vertę (paprastai nuo 60% iki 90%).
- **Uždarymo riba (angl. *close factor, CF*):** maksimali skolos dalis, kuri leidžiama būti grąžinta vienos likvidacijos metu. Vertė yra bendra visam protokolui, mūsų atveju 50%.
- **Skolinimosi pajėgumas (angl. *borrowing capacity, BC*):** apibrėžia bendrą vertę, kurią skolininkas gali pasiskolinti, atsižvelgiant į jo užstato sumą.

$$BC = \sum_i (\text{Užstato vertė}_i \times LT_i), \quad \text{kur } i \text{ žymi } i\text{-ąją valiutą pozicijoje}$$

- **Sveikumo koeficientas (angl. *health factor, HF*):** matuoja pozicijos būklę, apibrėžiamą kaip skolinimosi pajėgumo ir esamų skolų santykį. Jeigu sveikumo koeficientas mažesnis negu 1, skolininkas tampa likviduojamas.

$$HF = \frac{BC}{\sum_i \text{Skolos vertė}_i}$$

3.2. Likvidacijos ypatumai

Skolininkui tapus likviduojamu, yra daugybė pasirinkimų, kaip vykdyti jo pozicijos likvidavimą. Likvidavimo proceso metu būtina pasirinkti konkrečią užstato ir paskolos valiutų porą, kurioje pasko-

los valiuta yra grąžinama, o užstato valiuta paimama iš skolininko. Taip pat, nustatomas grąžintinos sumos dydis. Svarbu pabrėžti, jog atlikus nedidelę likvidaciją, skolininkas gali išlikti likviduojamas, tai reiškia, kad likvidavimo procesas gali būti vykdomas kelis kartus.

Svarbu pažymėti, kad likvidavimo metu protokolas leidžia likviduoti didesnį valiutos kiekį, nei būtina skolininko pozicijai subalansuoti. Tarkime:

- skolininkas yra pateikęs \$2000 vertės BTC (bitkoino) valiutą kaip užstatą;
- BTC valiutos paskolos ir užstato santykis (*LTV*) yra 80%;
- skolininkas yra pasiskolinęs 1650 USDT valiutos, kuri atitinka JAV dolerį.

Toliau 2 lentelėje matyti, kaip šios vertės kinta po skirtingo dydžio likvidacijų. Pirmuoju variantu grąžinama \$417, po kurios skolininko sveikumo koeficientas pakyla virš 1, todėl skolininko pozicija nuostoja būti likviduojama. Antruoju variantu grąžinama maksimali suma, kiek leidžiama, kai uždarymo riba lygi 50%. Šiuo atveju pozicija taip pat tampa „sveika“, tačiau skolininkas patiria didesnį nuostolį, o likvidatorius – didesnį pelną.

Būsena	Užstato vertė	Skolos vertė	BC	HF	Pelnas likvidatoriui / nuostolis skolininkui
Pradinė	2000	1650	1600	0,97	–
Po \$417 likvidacijos	1541,3	1233	1233,04	1,00003	41,7
Po \$825 likvidacijos	1092,5	825	874	1,06	82,5

2 lentelė. Pavyzdinė užstato, skolos ir sveikumo koeficiento kaita po likvidacijos

Likvidatoriams yra naudinga grąžinti kuo didesnę skolą už skolininką, nes už grąžintą paskolos valiutą atlyginama tokios pačios vertės užstatu, be to, papildomai suteikiama 10% užstato kaip paskaita. Likvidatorių procesą riboja du pagrindiniai dalykai: skolininko užstato dydis ir maksimali uždarymo riba.

Likvidavimo proceso kintamųjų įvairovė lemia sudėtingą optimizavimo problemą, kuri reikalauja ne tik išsamaus problemos modelio, bet ir kūrybingų algoritminių sprendimų.

{Parodome, kad galime likviduoti daugiau nei leidžiama vienu}

3.3. Panašumai su kitais protokolais

Parodome, kad panašūs dalykai yra ir aave'eje ir kituose dideliuose

4. Skirtingos likvidacijų strategijos

4.1. Naivus algoritmas

Paprasta likvidavimo algoritmo idėja gali būti tokia: pasirenkama paskolos valiuta, kuriai skolininkas turi didžiausią įsipareigojimą, ir užstato valiuta, kurios kiekis yra didžiausias. Tada stengiamasi grąžinti pusę paskolos arba tiek, kad būtų išnaudotas visas skolininko užstatas parinktai valiutai. Kadangi praktikoje dažniau pasiekama uždarymo riba, o ne skolininko užstato ribojimas, šiai strategijai suteikiame konkretesnį pavadinimą – **iki uždarymo ribos**.

Pavyzdžiui, 3 lentelėje pateikti trys scenarijai su skolininko pozicijomis, kuriose, tarkime, visi skolininkai yra likviduojami.

Pirmame scenarijuje renkamės ETH valiutą kaip grąžinamą, nes taip galima grąžinti didžiausią vertę (\$500). Grąžinant šią sumą iš skolininko užstato galima paimti \$550 vertės turto. Kadangi BNB yra tik \$500, to nepakanka, todėl renkamės valiutą su didžiausiu užstatu – BTC.

Antrame scenarijuje vėl renkamės USDT kaip grąžinamą valiutą, o ETH – kaip užstatą, nes jo vertė didžiausia. Tiesa, šiuo atveju pakaktų ir AVAX užstato, nes grąžindami didžiausią leistiną sumą (\$1000) galime paimti \$1100 vertės turto. Jei AVAX valiutą būtų lengviau parduoti rinkoje, likvidatorius galėtų rinktis ją.

Trečiame scenarijuje iš kelių užstato variantų renkamės ETH, nes jo vertė didžiausia, o grąžinama valiuta bus USDC (taip pat dėl didžiausios sumos). Iš tikrųjų bet kuri grąžinama valiuta leistų padengti tokią sumą, jog būtų galima paimti visą ETH užstatą, nes tereikia grąžinti $\frac{\$500}{1,1} \approx \$454,54$ skolos.

Scenarijus	Skolų pozicija	Užstatų pozicija
1	ETH: \$1000 DAI: \$500 USDC: \$300	BTC: \$2000 BNB: \$500
2	USDT: \$2000 DAI: \$400	ETH: \$3000 AVAX: \$1500
3	USDC: \$1500 WBTC: \$800	ETH: \$500 SOL: \$400 AVAX: \$400 BNB: \$400

3 lentelė. Pavyzdiniai skolininko pozicijų duomenys su įvairiomis skolomis ir užstatais

4.2. Esami tyrimai

Šioje srityje jau egzistuoja mokslinių darbų, siūlančių algoritmus likvidavimo problemoms spręsti. Pavyzdžiui, [Emp] pristato algoritmą *Optimal Fixed Spread Liquidation Strategy*, kuris padalina likvidavimo procesą į dvi mažesnes likvidacijas, kurias kartu sudėjus, leidžia likviduoti didesnę kiekį nei būtų galima padaryti tik su vienu dideliu likvidacijos iškvietimu. Pirmoji likvidacija yra maksimaliai didelė, taip, kad po jos skolininkas vis dar lieka likviduojamas, reikia, jog sveikumo koeficientas (*HF*)

yra kiek įmanoma mažesnis, bet nemažesnis nei 1. Antroji likvidacija užbaigia procesą, likviduojant maksimalų kiekį, kurį leidžia protokolo taisyklės, vienu likvidacijos iškvietaimu, kas paprastai reiškia 50% likusios paskolos dydžio.

Venus protokolui *Optimal Fixed Spread Liquidation Strategy* algoritmas nėra tinkamas, nes grąžinant pagrindinio tinklo valiutą (šiuo atveju BNB) pasikeičia kursas, pagal kurį apgaubtas užstatas (angl. *wrapped*) konvertuojamas į pagrindinę valiutą. Kurso perskaičiavimas įvyksta prieš pat nustatant skolininko poziciją. Dėl to didelės grąžinamos sumos gali reikšmingai paveikti skolininko likvidumo būklę, sumažindamos likvidacijos ribą arba netgi visiškai sustabdydamos likvidavimo procesą. Pagrindinė problema su algoritmu yra ta, kad pirmoji likvidacija, nors formaliai palieka skolininką likviduojamą, tam tikrais atvejais leidžia likviduoti tik labai mažas sumas antroje likvidacijoje.

Tam tikrais atvejais, kai skolininko įsiskolinimas yra itin didelis, gali būti vykdomos daugiau nei dvi likvidacijos, kiekvieną kartą likviduojant iki uždarymo ribos. Tačiau minėtas algoritmas apsiriboja tik dviem likvidacijų iškvietaimais.

4.3. Pasiūlyta *Optimal Fixed Spread Liquidation Strategy* modifikacija

Siūlome koreguoti *Optimal Fixed Spread Liquidation Strategy*. Visų pirma, neapsiribosime dviem likvidacijos iškvietaimais. Proceso pradžioje sukame ciklą, kurio metu kiekvieno iteracijos pradžioje apskaičiuojame $B_{uždarymo}$ ir $B_{užstato}$, kur:

- $B_{uždarymo}$ – maksimalus grąžinamos valiutos kiekis, leidžiamas likviduoti vienu kartu pagal uždarymo ribos taisyklę.
- $B_{užstato}$ – grąžinamos valiutos kiekis, reikalingas visiškai atsiimti skolininko užstatą pasirinkta valiuta.

Jei $B_{užstato} \leq B_{uždarymo}$, vadinasi, kita likvidacija bus paskutinė, ir grąžiname $B_{užstato}$ pasiskolintos valiutos kiekį. Šios logikos privalumas yra tas, kad jei pirmosios likvidacijos dydis yra ribojamas užstato trūkumo, procesas gali būti baigtas per vieną likvidaciją. Tai leidžia maksimaliai efektyviai išnaudoti galimybes, sumažinant nereikalingų skaičiavimų, už kuriuos reikia sumokėti pagrindinę valiutą, kiekį.

Kitu atveju ($B_{užstato} > B_{uždarymo}$), ieškome didžiausio B_i tokio, kad po likvidacijos vis dar būtų galima likviduoti bent $B_{užstato} - B_i$. Jei rastas $B_i > 0$, atlikus likvidaciją grįžtame į ciklo pradžią. Jei $B_i = 0$, reiškia, bet koks likvidacijos dydis pavers skolininką nelikviduojamu. Tokiu atveju likviduojama $B_{užstato}$ ir į ciklo pradžią nebegrįžtama.

Galima įsivaizduoti, kad 4.2. skyriuje aprašytas algoritmas taip pat ieško didžiausio B_i pirmajai likvidacijai, užtikrinančio, jog po jos skolininkas išliks likviduojamas. Tačiau mūsų algoritmas reikalauja ne tik, kad skolininkas išliktų likviduojamas, bet ir kad būtų galima likviduoti reikšmingą kiekį valiutos.

Tais atvejais, kai skolininkas yra stipriai įsiskolinęs, siūlomas algoritmas atliks seką likvidacijų, kurių kiekviena bus dvigubai mažesnė už ankstesnę. Tai tęsis tol, kol bus grąžinta visa skola arba išnaudotas visas užstatas. Dėl šios savybės šią modifikuotą strategiją vadiname **pilno išsekvojimo** strategija (angl. *drain strategy*).

5. Formatavimas

Šiame skyriuje bus pateikti pavyzdžiai matematinio teksto, lentelių ir paveikslėlių formatavimams bei aprašyta, kaip taisyklingai suformuluoti matematinius jūsų baigiamojo darbo rezultatus.

5.1. Matematinis tekstas

Matematinės formulės gali būti įterptos teksto pastraipose, formulės \LaTeX kodą atskiriant simboliais $\$. . \$$. Pavyzdys: trigonometrinė tapatybė $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$.

Tačiau formulės atrodys daug gražiau, jeigu jos bus išskirtos į atskiras lygtis, formulės kodą patalpinant į aplinką $\backslash[. . \backslash]$. Štai tokios lygties pavyzdys:

$$e^{i\alpha} = \cos \alpha + i \sin \alpha, \quad \alpha \in \mathbb{R}.$$

Šioje lygtyje buvo panaudoti matematiniai simboliai \mathbb{R} ir e , kurių komandos $\backslash\mathbb{R}$ ir $\backslash e$ apibrėžtos šablono pradžioje.

Kartais formulės užima kelias eilutes, pvz.:

$$\begin{aligned} 2 &= 1 + 1 + 0 = \left(\frac{\sqrt{16}}{\tan^2 \pi/3 + 1} \right) + \ln e + \sin \pi \\ &= (\sin^2 17 + \cos^2 17)^{\ln e} + \cos 0 + (x^{1/\ln x})'. \end{aligned} \tag{1}$$

Nepamirškite padėti taško (.) formulės pabaigoje, jeigu tai sakinio pabaiga. Taip pat akreipkite dėmesį į skliaustų, kurių viduje stovi didelė trupmena $\backslash\frac$, aukštį, kuris automatiškai reguliuojamas komandomis $\backslash\left(. . . \backslash\right)$ arba nurodomas komandomis $\backslash\big, \backslash\Big, \backslash\bigg$.

Jeigu formulės prisireiktų vėliau, jos nereikia kiekvieną kartą perrašinėti iš naujo. Reikiamą formulę visada galima pacituoti su komanda $\backslash\eqref$. Pavyzdžiui, aukščiau užrašyta formulė su numeriu cituojama taip: lygtis (1). Tam reikia komanda $\backslash\label$ formulei priskirti laikiną pavadinimą, kurį \LaTeX automatiškai pakeis į reikiamą numerį. Daugiau informacijos apie \LaTeX matematinius simbolius, lygtis, matematinės aplinkas ir komandas galima rasti šiame dokumente [**amsdoc**].

Pateiksime dar keletą formulių, kuriose naudojamos sudėtingesnės matematinės komandos. Matricos ir determinantai užrašomi naudojant \LaTeX aplinkas \pmatrix ir \vmatrix :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}, \quad \det A = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{vmatrix} = 0 \cdot 3 - 1 \cdot 2 = -2.$$

Sudėtingesnėms lygtims ir matricoms formatuoti labai praverčia paketo \mathtools [**mtoolsdoc**] komandomis. Paketas \mathtools įtrauktas į darbo šabloną, todėl jo komandomis galima naudotis tiesiogiai.

Išvestinė užrašoma naudojant apostrofo simbolį ('), pavyzdžiui,

$$(f(x)g(x))' = f'(x)g(x) + f(x)g'(x).$$

Teiloro polinomas:

$$p(x) = p(a) + p'(a)(x - a) + \frac{p''(a)}{2!}(x - a)^2 + \dots + \frac{p^{(n)}(a)}{n!}(x - a)^n.$$

Paprastoms ir dalinėms išvestinėms, diferencialams, gradientams ir pan. užrašyti į darbo šabloną įtrauktos labai patogios komandos `\dv` ir `\pdv`, `\dd`, `\grad` iš `physics` paketo [**physdoc**]:

$$\frac{df}{dx}, \quad \frac{d^2f}{dx^2}, \quad \frac{\partial f}{\partial x}, \quad \frac{\partial^5 f}{\partial x^5}, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}, \quad df, \quad \nabla f$$

Integralą su režiais užrašysime naudodami \LaTeX komandą `\int_{a}^b`:

$$\int_a^b f(x)dx = F(a) - F(b) = F(x) \Big|_a^b$$

Daugialypiams, paviršiniams, kreiviniams integralams užrašyti galima naudoti komandas `\iint`, `\iiint`, `\oint`, ir pan.

$$\iint_D f(x,y) dx dy, \quad \iint_D f(x,y) dS, \quad \int_{\gamma} f(x,y) dl, \quad \oint_{\gamma} P(x,y) dx + Q(x,y) dy.$$

5.2. Matematinų rezultatų formulavimas

Jūsų darbo matematiniams rezultatams suformuluoti reikėtų naudoti aplinkas

Apibrėžimas, Teiginys, Teorema, Lema,

Išvada, Pastaba, Pavyzdys, Įrodymas.

Šios aplinkos jau yra apibrėžtos jūsų baigiamojo darbo šablone `VUMIFTemplateClass.cls`, sulietuvinus standartines \LaTeX komandas

`definition, proposition, theorem, lemma,`

`corollary, remark, example, proof.`

Apibrėžimo pavyzdys:

5.2..1 Apibrėžimas. Skaičius $p \in \mathbb{N}$ yra vadinamas *pirminiu skaičiumi*, jeigu jisai dalijasi tik iš 1 ir savęs paties. Pirminių skaičių aibė yra žymima \mathbb{P} .

Teiginio pavyzdys:

5.2..2 Teiginys. Dviejų nepriklausomų atsitiktinių dydžių $X, Y : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ sandaugos XY vidurkis lygus tų pradinių dydžių vidurkių sandaugai:

$$\mathbb{E}(XY) = \int_{\Omega} X(\omega)Y(\omega)d\mu(\omega) = \mathbb{E} X \cdot \mathbb{E} Y,$$

su sąlyga, kad X, Y ir XY vidurkiai egzistuoja.

Svarbūs matematiniai teiginiai yra vadinami *teoremomis*:

5.2..3 Teorema (Pirmoji teorema apie izomorfizmą). Sakykime, kad $f : G \rightarrow H$ – grupių G ir H homomorfizmas. Tada grupės G vaizdas $f(G)$ izomorfiškas faktorgrupei $G / \ker(f)$, tai yra

$$f(G) \cong G / \ker(f).$$

Trumpesni pagalbiniai teiginiai vadinami *lemomis*. Tačiau ir lemų formuluotės gali būti pakankamai sudėtingos:

5.2..4 Lema (Lema apie vektorių pakeitimą). Tarkime, kad tiesinės erdvės V virš kūno k vektoriai

$$v_1, v_2, \dots, v_s \tag{2}$$

yra tiesiškai nepriklausomi, ir kad kiekvienas šios šeimos vektorius $v_i, 1 \leq i \leq s$ tiesiškai išreiškiamas vektoriais

$$w_1, w_2, \dots, w_t. \tag{3}$$

Tuomet $s \leq t$, ir egzistuoja toks vektorių šeimos (3) pošeimis $w_{j_1}, w_{j_2}, \dots, w_{j_s}$, kurį pakeitę vektoriais v_1, v_2, \dots, v_s , gausime vektorių šeimai (3) ekvivalenčių šeimą (3).

Aplinka *Pastaba* skirta smulkiems pastebėjimams:

5.2..5 Pastaba. Teoremos sąlyga, kad intervalas $[a, b]$ būtų kompaktiškas, o funkcija $f(x)$ tame intervale būtų tolydi, yra būtina.

Kita aplinka *Pavyzdys*, skirta trumpiems skaitiniams arba formulų pavyzdžiams:

5.2..6 Pavyzdys. Lygčių sistemos

$$\begin{cases} ax + by = e \\ cx + dy = f \end{cases}$$

sprendinių Kramerio formulė:

$$x = \frac{D_x}{D}, \quad y = \frac{D_y}{D},$$

čia

$$D = \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} = ad - bc, \quad D_x = \begin{vmatrix} e & b \\ f & d \end{vmatrix} = ed - bf, \quad D_y = \begin{vmatrix} a & e \\ c & f \end{vmatrix} = af - ec.$$

Atkreipsime dėmesį, kad matematinės aplinkos numeruojamos automatiškai. Kaip ir formules, matematinius apibrėžimus, teiginius, pavyzdžius galima cituoti kitur tekste pirma įvardijant su \label

o tada reikiamoje vietoje sukuriant citavimo nuorodą \ref. Pavyzdžiui, mes galime pacituoti Teoremą 5.2..3 arba Lemą 5.2..4 tose teksto vietose, kuriose mums reikia jomis pasiremti.

5.3. Lentelės

Jei yra pristatomos lentelės, tai lentelių nuorodos turėtų būti paminėti tekste, pavyzdžiui: 4 lentelėje matomi kažokie rezultatai.

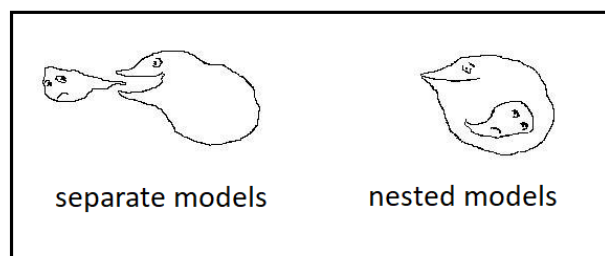
4 lentelė. *Lentelės numeruojamos viršuje, antraštės rašomos viršuje*

Stulpelis 1	Stulpelis 2	Stulpelis 3

Kiekviena lentelė būtinai turi turėti pavadinimą, kuris, kaip ir lentelės numeris, rašomas toje pačioje eilutėje virš lentelės. Visos lentelės numeruojamos paeiliui (nerekomenduojama numeruoti raidėmis, pvz., 7 a lentelė).

5.4. Paveikslėliai, grafikai, diagramos, nuotraukos

Jei darbe naudojami paveikslėliai, būtina juos paminėti tekste, pvz.: 2 paveikslėlyje matome paveikslėlio pateikimo pavyzdį.



2 pav. *Paveikslėlių numeriai rašomi apačioje, antraštė rašoma apačioje*

Toliau eina tekstas po paveikslėliu.

5.5. Sąrašai

Nenumeruojamo sąrašo pavyzdys:

- pirmasis elementas;
- antrasis elementas.

Numeruojamo sąrašo pavyzdys:

1. lorem ipsum dolor sit amet;

2. consectetur adipiscing elit;
3. vivamus a nisl gravida.

6. Programinio kodo pateikimas

Šiame skyriuje pateikiamas programinio kodo pateikimo būdas rašto darbe.

6.1. Algoritmai

Algoritmai, lygiai taip pat, kaip ir paveikslėliai ar lentelės, yra numeruojami. Juos būtina paminėti tekste, pvz.: 1 algoritmas naudojamas surasti minimalią funkcijos \mathcal{L} reikšmę.

1 algoritmas Gradientinio nusileidimo pseudokodas

```
1: # Darome prielaidą, kad  $\mathcal{L}$  apibrėžtas tekste
2: Įeitis:  $\mathcal{D}$  – duomenų rinkinys
3: Įeitis:  $\theta_0$  – parametrų atsitiktinių reikšmių inicializavimas
4: Įeitis:  $\gamma$  – žingsnio dydis, mokymosi greitis (angl. learning rate, step size)
5: Įeitis:  $m$  – epochų skaičius
6: for  $i = 1, 2, \dots, m$  do
7:    $\theta_i := \theta_{i-1} - \gamma \nabla_{\theta} \mathcal{L}(\mathcal{D}, \theta_{i-1})$ 
8:   # Funkcijos  $\mathcal{L}$  išvestinė suskaičiuojama automatiškai, autograd pagalba
9: end for
```

6.1.1. Skyrelio pavyzdys

Nebūtina naudoti daug skyrelių (*subsubsections*).

Rezultatai

Detaliau, kas turi būti parašyta šiame skyriuje, rasite atitinkamos programos metodiniuose reikalavimuose.

Išvados

Detaliau, kas turi būti parašyta šiame skyriuje, rasite atitinkamos programos metodiniuose reikalavimuose.

Šaltiniai

- [Aca20] B. Academy. *What is short selling in financial markets?* 2020. URL: <https://www.binance.com/en/square/post/511206>.
- [Def] DefiLlama. *Lending TVL Rankings*. Tikrinta 2024-12-08. URL: <https://defillama.com/protocols/Lending>.
- [Nes24] L. Nessi. *What Is DeFi Liquidation: Meaning, Incentives, Risks*. 2024. URL: https://www.ccn.com/education/crypto/what-is-defi-liquidation/?utm_source=chatgpt.com.
- [Oke24] N. Okeke. *Kaip gauti ir naudoti Binance kriptovaliutų paskolas*. 2024. URL: <https://targettrend.com/lt/binance-crypto-loans/>.
- [Pil24] A. Pileckis. *Kas yra kriptovaliutų skolinimas (Lending) ir kaip jis veikia?* 2024. URL: <https://kriptovaliutos.io/kas-yra-kriptovaliutu-skolinimas-lending-ir-kaip-jis-veikia/>.
- [Ven24] Venus. *Liquidations*. 2024. URL: <https://docs-v4.venus.io/guides/liquidation>.