

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Primož Hrovat

Mikrostoritve v decentraliziranem okolju

DIPLOMSKO DELO

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM
PRVE STOPNJE
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: prof. dr. Matjaž Branko Jurič

Ljubljana, 2018

COPYRIGHT. Rezultati diplomske naloge so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavo in koriščenje rezultatov diplomske naloge je potrebno pisno privoljenje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

Besedilo je oblikovano z urejevalnikom besedil \LaTeX .

Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Tematika naloge:

Besedilo teme diplomskega dela študent prepíše iz študijskega informacijskega sistema, kamor ga je vnesel mentor. V nekaj stavkih bo opisal, kaj pričakuje od kandidatovega diplomskega dela. Kaj so cilji, kakšne metode uporabiti, morda bo zapisal tudi ključno literaturo.

TODO: dopolni z opisom, ko bo na voljo

Zahvaljujem se prof. Matjažu B. Juriču za podporo in usmeritve pri pripravi diplomskega dela. Posebna zahvala gre mojim staršem, bratom, sestrám, starim staršem in prijateljem, ki mi vedno stojijo ob strani in me pri mojem delu podpirajo.

Kazalo

Povzetek

Abstract

1	Uvod	1
2	Arhitekturni koncepti mikrostoritev	3
2.1	Arhitektura mikrostoritev	3
2.2	Vzorci	5
2.3	Vsebniki in orkestracija	8
3	Tehnologija veriženja podatkovnih blokov	13
3.1	Razlaga osnovnih konceptov	14
3.2	Ethereum	18
3.3	Hyperledger	21
3.4	Tehnologija veriženja podatkovnih blokov v kontekstu decentraliziranega izvajanja	23
4	Decentralizirano izvajanje	25
4.1	Odkrivanje storitev v decentraliziranem okolju	26
5	Implementacija predlagane rešitve	31
5.1	Nadzorni proces	32
5.2	Decentralizirana shramba	33
5.3	Odjemalec za Ethereum omrežje	34

5.4	Implementacija pametne pogodbe	34
5.5	Razširitev KumuluzEE platforme za podporo decentraliziranim aplikacijam	37
6	Delovanje in evalvacija	41
6.1	Testna aplikacija	41
6.2	Testiranje	41
6.3	Pomankljivosti trenutnega sistema in izboljšave v prihodnosti	43
7	Zaključek	47
	Literatura	50

Seznam uporabljenih kratic

kratica	angleško	slovensko
API	application programming interface	aplikacijski programski vmesnik
PoW	Proof-of-Work	Dokaz o opravljenem delu
DBMS	Database Management System	Sistem za upravljanje podatkovne baze
IPFS	Interplanetary File System	Medplanetarni datotečni sistem
REST	Representational state transfer	-
GKE	Google Kontainer Engine	-
AWS	Amazon Web Services	-
DOS	Denial of Service	Zavrnitev storitve
CNCF	Cloud Native Computing Foundation	-

Povzetek

Naslov: Mikrostoritve v decentraliziranem okolju

Avtor: Primož Hrovat

Mikrostoritve danes počasi a vztrajno prevzemajo primat v svetu razvoja programske opreme. Nadomeščajo tradicionalne aplikacije, za čim učinkovitejše izvajanje pa obstaja vrsto orodij in tehnik, ki procese skaliranja, distribuiranja in odkrivanja rešujejo na učinkovite načine. Aplikacije, grajene v arhitekturi mikrostoritev se večinoma izvajajo v velikih računskih centrih - računalniških oblakih. Vsi ti mehanizmi omogočajo, da smo zmožni odgovoriti na tisoče hkratnih zahtevkov, pri tem pa ohranjamo dobre performančne lastnosti. Problemi nastopijo ob izpadu enega ali več računskih centrov, oziroma pri prenosu aplikacije iz enega v drug oblačni sistem. V diplomski nalogi sem raziskal tehnologijo veriženja podatkovnih blokov, ki predstavlja korak v smeri decentralizirane shrambe podatkov. Podobno stopnjo decentralizacije želimo doseči na ravni aplikacijske logike in sicer na način, kjer bi poljubno storitev lahko izvajal poljuben član omrežja, za uspešno izvajanje pa bil tudi primerno finančno nagrajen. Zamišljamo si sistem, v katerem ne poznamo izpadov storitev ter dolgih odzivnih časov. Sistem decentraliziranega izvajanja bi nam hkrati olajšal finančno evaluirati posamezen klic, ter omogočil učinkovito izmenjavo vrednosti. V nalogi sem se predvsem na decentralizirano odkrivanje storitev, ter razvil prvi prototip aplikacije ter razširitve za ogrodje KumuluzEE, ki demonstrirata decentraliziran način izvajanja. Gre za pomembno svetovno novost, ki ima potencial začrtati nove

smernice v računalniški panogi. Stojimo na robu znanih mej, ki jih želimo potisniti dalje.

Ključne besede: decentralizacija, distribuirane storitve, tehnologija veriženja podatkovnih blokov.

Abstract

Title: Microservices in decentralized environment

Author: Primož Hrovat

Microservices today are one of the leading design principles, when it comes to building modern applications. Monoliths are being replaced with this modern architectural style and multiple tools and techniques are being developed to support it. Applications are deployed to a remote computing center, often called simply as cloud. These principles allow us to effectively respond to thousands of requests per second. The problems arise when those cloud providers experience massive breakdowns or we wish to commute to a different cloud provider. My thesis discusses blockchain technology that is currently one of the hot research topics. Blockchain provides decentralized and immutable data storage. Our vision is to enable that kind of decentralization to business logic (API) in a way that everyone can participate, either by executing any of the available services or consuming it. Executors are rewarded financially and the system enables us to efficiently transfer value. To achieve that goal, we must solve multiple problems, one of which is decentralized service discovery. I have proposed a conceptual solution to service discovery in a decentralized environment and implemented the first prototype, that enables decentralized execution of applications. We are standing on the edge of what we know is currently possible and are ready to push the boundaries even further. This can be the next big step in computer science.

Keywords: decentralization, distributed services, blockchain.

Poglavje 1

Uvod

Poslovne storitve se danes selijo v oblak. S pojavom arhitekture mikrostoritev in tehnologije vsebnikov ter orodij za njihovo orkestracijo, so, nekdanji ogromni kosi programske opreme pričeli razpadati na manjše, logično ločene sestavne dele. Razmeroma majhne in neodvisne aplikacije, specializirane za opravljanje točno določenih nalog, omogočajo hiter vzpostavitevni čas in puščajo majhen odtis na porabi strojne opreme. Neodvisnost teh aplikacij nam omogoča tudi skaliranje posameznih delov celotne storitve, ko je to potrebno.

Vsebniki so razmeroma stara tehnologija, ki je s pojavom okolja Docker doživela pravi razcvet. Gre za „lahko“ obliko virtualizacije, virtualizacija tu poteka na nivoju procesov in ne na nivoju operacijskega sistema. Pravi potencial vsebnikov izkoristimo z uporabo orkestratorjev kot so Kubernetes, Amazon ECS, Google Container Engine (GKE), Docker Swarm, Azure Container Service in podobni. Ta orodja omogočajo spremljanje, zaganjanje, zaustavljanje in preverjanje storitev, skladno z uporabniško podanimi zahtevami. Storitve se izvajajo distribuirano (porazdeljeno) in replicirano, pogosto na fizično ločenih sistemih, kar zagotavlja visoko stopnjo odzivnosti in dosegljivosti. Razpoložljivost in dosegljivost storitev se danes meri predvsem na peti ali šesti decimali, t.i. „število devetk“ (number of nines).

Pred desetimi leti se je s pojavom digitalne valute Bitcoin pričel hiter ra-

zvoj tehnologije, ki omogoča nespremenljivo in preverljivo hrambo podatkov na pojlubnih napravah v omrežju [27]. Tehnologija, poznana pod imenom veriženje podatkovnih blokov (blockchain), je hitro povezala računalniške zanesenjake ter ustanovitev različnih fundacij, ki se ukvarjajo z njenim razvojem. Med njimi najbolj prepoznani sta organizaciji Hyperledger in Ethereum.

Današnji sistemi so replicirani, distribuirani, vendar ne decentralizirani. Za arhitekturo, ki podpira izvajanje naših storitev skrbi ena, centralna identiteta, najsi bo to Google, Amazon ali Microsoft. Koncepte decentralizirane shrambe podatkov želimo aplicirati nivo višje, na nivo poslovne logike. Povezati tehnologijo podatkovnih blokov in arhitekturo mikrostoritev na način, da zagotovimo večjo robustnost in odpornost celotnega sistema in obenem dosežemo 100% razpoložljivost. Sistem, ki bi omogočal decentralizirano izvajanje, bi sestavljalo poljubno mnogo, med seboj neodvisnih, entitet. Te so pripravljene proti plačilu izvesti storitve na željo naročnika. Sodelovanje v omrežju je brezplačno in dostopno vsakomur, za opravljeno delo pa izvajalec prejme vnaprej predpisano nagrado. Celoten sistem sestoji iz množice različnih komponent, ki skupaj zagotavljajo preverljivost pravilnosti izvedenih operacij ter učinkovito porazdeljevanje ter prerazporejanje dela med entitetami. Naloga ene izmed osrednjih komponent je zagotoviti učinkovito odkrivanje preostalih, trenutno aktivnih storitev. Zasnova in razvoj te komponente je osrednji del te diplomske naloge, pred tem pa so na kratko predstavljene uporabljene tehnologije in tehnike.

Poglavje 2

Arhitekturni koncepti mikrostoritev

Razvoj monolitov je enostaven in danes dobro podprt v vseh danes prisotnih razvojnih okoljih. Prenos in namestitvev teh storitev na strežniške sisteme je enostaven postopek, rešitev v obliki izvršljivih datotek ali s kopiranjem direktorijske strukture prenesemo v produkcijsko izvajalno okolje. Če želimo tako storitev skalirati, kot vstopno točko v naše zaledne sisteme nastavimo izenačevalnika obremenitev (ang. load balancer), ki poskrbi za enakomerno porazdeljevanje dela med posameznimi instancami storitve.

Slabosti te arhitekture se pojavijo, ko storitev postane kompleksnejša. Podaljša se zagonski čas (start up time), ob preobremenitvi le enega dela storitve je potrebno vzpostaviti celotno aplikacijo. Otežen je proces sprotne dostave (Continouos Delivery) in sprotne integracije (Continouos Integration), za posodobitev enega dela sistema je namreč potrebno celotno storitev zaustaviti, posodobiti in ponovno zagnati [14].

2.1 Arhitektura mikrostoritev

Gradnja aplikacij je do nedavnega potekala na način, da so razvijalci vse odvisnosti in programsko logiko, potrebno za delovanje, zložili skupaj v ve-

liko tvorbo - monolit. Tak način gradnje ima svoje prednosti in slabosti. Prednosti na eni strani predstavljajo enostavna zgradba aplikacije, ker je vsa izvorna koda zbrana na enem mestu. Orodja za razvoj so prilagojena takšnemu načinu dela in razvijalcu ponujajo širok nabor funkcij, ki podpirajo celotno življenjko pot aplikacije, od razvoja, testiranja, namestitve v testna in produkcijska okolja ter vzdrževanja. Velikost projekta je na drugi strani ena od slabosti monolitov, majhne spremembe enega sestavnega dela potrebujejo ponovno namestitev celotne aplikacije. Skaliranje poteka vertikalno, preko ustvarjanja novih instanc celotne aplikacije. Monolitna zasnova aplikacije razvijalce in vzdrževalce zaveže k dolgoročni uporabi tehnologij, ki so bile uporabljene na začetku. Kasnejše uveljavljanje novih tehnologij oziroma nadomeščanje obstoječih je časovno in finančno potratno, celotno logiko aplikacije je potrebno prepisovati [14].

Arhitektura mikrorazdelitve se problema gradnje aplikacij loti drugače. Aplikacija se logično razbije na posamezne sestavne dele, ki se izvajajo samostojno in se med seboj povezujejo preko lahkih komunikacijskih protokolov. Vsak sestavni del aplikacije je samostojen v smislu skaliranja, življenjske dobe posamezne instance, razvoja in podpornih tehnologij. Tak način gradnje sledi vzoru, ki ga v fizičnem svetu poznamo že stoletja, to je sestavljanje vnaprej pripravljenih delov v celoto. Lep primer tega je avtomobilska industrija. Na tekočem traku se na tisoče sestavnih delov različnih proizvajalcev zloži v polno funkcionalno enoto - avtomobil. Podobno želimo doseči pri razvoju programske opreme, kar bi pohitrilo in pocenilo razvoj novih aplikacij, krepko pa bi omejili tudi nepotrebno podvajanje izvorne kode [13, 10].

V povezavi z mikrorazdelitvami je tesno povezana tudi arhitektura „cloud-native“. Gre za novo paradigmo razvoja programske opreme, ki sledi načinom izdelave stvari v fizičnem svetu. Z namenom uveljavljanja in razvoja paradigme je bila ustanovljena „Cloud Native Computing Foundation“, ki bdi nad razvojem standardov in novih smernic. Oblačne sisteme sestavljajo [19]:

- Aplikacije in procesi, ki se izvajajo znotraj vsebnikov. Vsebniki so neodvisne in izolirane izvajalne enote.

- Storitve, ki se dinamično upravljajo in nadzorujejo preko centralnega orkestracijskega procesa.
- Mikrostoritve, ki so sestavni deli sistema in so med seboj šibko sklopljene.

Računalništvo v oblaku je uporaba in dostop do računskih virov (aplikacije, podatkovna skladišča, procesorski čas...) na zahtevo preko interneta. Plačilo se izvede skladno s količino porabljenih virov. Viri so elastični in zmožni hitrega in učinkovitega skaliranja ter prilagajanja trenutnim zahtevam. V grobem med seboj ločimo tri glavne komponente oblačnih sistemov: SaaS, PaaS in IaaS. SaaS (Software as a Service) - programska oprema kot storitev, je oblačna aplikacija, ki se izvaja na oddaljenih računalnikih, do katerih uporabnik storitve dostopa preko interneta. Prednosti teh aplikacij so dostopnost od koderkoli, za nemoteno delovanje aplikacije je odgovoren ponudnik. Storitev je zmožna dinamičnega skaliranja, da zadovolji trenutnim potrebam. PaaS (Platform as a Service) - platforma kot storitev, uporabnikom ponuja programsko platformo, brez stroškov nakupa in kompleksnosti upravljanja podporne strojne in programske opreme. IaaS (Infrastructure as a Service) - infrastruktura kot storitev, ponuja dostop do računskih virov (strežniki, omrežna oprema, shramba...). Uporabnikom ni potrebno investirati v lastno strojno opremo, podobno kot obe sestrski storitvi (SaaS in PaaS), je tudi ta zmožna samodejnega skaliranja [7].

2.2 Vzorci

Ključne lastnosti mikrostoritev so predvsem ozka usmerjenost v reševanje specifičnih težav. Storitve so med seboj šibko sklopljene, kar predstavlja prednost pri nadgradnjah in menjavi implementacije, za delovanje sistema, vsaj v teoriji, potrebujemo le jasno določene vmesnike. Upravljanje in usklajevanje storitev prevzema centralna avtoriteta, vsaka storitev je sama odgovorna za svoje podatke. Napake so v dinamičnem sistemu pogoste, njihovo učinkovito zaznavanje in upravljanje je v domeni tako nadzornika, kot

storitve same. Celoten sistem lahko primerjamo z operacijskim sistemom Unix, ki ga sestavlja vrsta med seboj neodvisnih procesov, ki opravljajo ozko usmerjeno nalogo, med seboj pa jih povezujemo preko cevovodov. Pri mikrororitvah cevovode nadomestimo z omrežnimi protokoli (HTTP, gRPC) [10].

V tem podpoglavju predstavljam še tri vzorce, značilne za arhitekturo mikrororitev: metrike, preverjanje odzivnosti ter odkrivanje storitev. Ustrezno povezane v celoto predstavljajo skoraj vse elementarne dele sistema, sposobnega decentraliziranega izvajanja. Za učinkovit sistem potrebujemo načine, kako ugotoviti, katere storitve delujejo po pričakovanjih in katere ne, ter katera izmed sodelujočih entitet v omrežju nam lahko najhitreje ponudi odgovor na zahtevo – izvede storitev.

2.2.1 Metrike

Posamezna storitev se lahko izvaja na različnih (fizičnih) lokacijah, na različni strojni opremi in v več instancah. Pojavi se potreba po spremljanju storitve in njenega obnašanja, kje in zakaj prihaja do izpadov oziroma morebitnih dolgih odzivnih časov. Vse želene metrike želimo shraniti na enem centralnem mestu, jih po možnosti agregirati, in tako omogočiti enostavno odkrivanje napak in njihovo reševanje. V osnovi poznamo dva modela zbiranja metrik:

- mikrororitev sama pošilja metrike centralni zbirki (push)
- centralna zbirka zahteva metrike od storitve (pull)

Zbiranje metrik ponuja dober vpogled v obnašanje posameznih storitev, s sabo pa prinese dodatno potrebno infrastrukturo in dodatne težave pri implementaciji [11].

Ena izmed bolj znanih storitev za zbiranje aplikacijskih metrik je Prometheus, odprtokodna zbirka orodij za zbiranje in agregiranje metrik ter obveščanje. Projekt je bil kmalu za orkestracijskim okoljem Kubernetes pridružen fundaciji CNCF. Prometheus metrike zahteva od storitve (način

pull), jih agregira in ob tem proži morebitna opozorila. Skupaj z ogrođjem Grafana omogoča celovit, tudi vizualni, vpogled v zbrane metrike [16].

2.2.2 Preverjanje odzivnosti (Health Check)

Pogosto se zgodi, da se storitev še vedno odziva na posamezne zahteve, vendar so te neuspešne. V takšnih primerih je pričakovano obnašanje sistema, da nedelujočo storitev iz omrežja označi kot nedosegljivo in jo nadomesti z novo. Tu v igro vstopi koncept preverjanja odzivnosti storitev (ang. Health check), ki za vsako storitev pričakuje izpostavljeno dostopno točko, preko katere lahko sistem pridobi informacije o sposobnosti storitve, da odgovori na zahteve. Vsaka storitev je odgovorna za preverjanje svojih zunanjih in notranjih virov in generiranja poročila o trenutnem statusu posamezne komponente. Tipični testi so preverjanje zmožnosti povezave na podatkovno bazo, dosegljivost ostalih odvisnih storitev, povezljivost z vrstami... Poleg zunanjih odvisnosti se preveri tudi stanje gostitelja: razpoložljiv prostor na disku, zasedenost CPE ipd. Nadzorna storitev periodično proži zahteve na vse registrirane storitve in preverja njihove odzive. Tipičen ukrep ob negativnem odzivu je zaustavitev in ponovni zagon nedelujoče storitve [12].

2.2.3 Odkrivanje storitev (Service discovery)

Ko želimo od zunanje entitete pridobiti podatke oziroma prožiti določeno akcijo, potrebujemo njen omrežni naslov (kombinacija naslova IP in številke vrat). Pri klasičnih aplikacijah, ki se izvajajo na fizični napravi, so naslovi relativno statični. Zelo malo je tudi klicev med posameznimi aplikacijami, saj se storitve med seboj kličejo preko programskih klicev. V arhitekturi mikrostoritev je omrežnih klicev bistveno več, ker je celotna programska logika aplikacije sestavljena iz več samostojnih storitev. Njihovo število se dinamično spreminja, skladno s tem tudi omrežni naslovi posameznih instanc. Posledično je potrebno za odjemalca vpeljati nov mehanizem, ki je zmožen dinamično odkriti naslove, na katerih se želena storitev nahaja.

Tipično za oblačne arhitekture je, da se odkrivanje storitev realizira s pomočjo centralnega registra. Storitve se ob pričetku izvajanja registrirajo. Odjemalska aplikacija ob potrebi po dostopu do zunanje storitve na register naslovi poizvedbo za lokacijo trenutno aktivnih instanc želene storitve. Zaka-snitev pri omrežnih klicih je bistveno večja kot pri programskih klicih znotraj aplikacije, zato želimo visoko učinkovitost poizvedb [15, 26].

2.3 Vsebniki in orkestracija

Vsebniki danes nadomeščajo virtualne naprave, predvsem na račun bolj učinkovite uporabe sistemskih virov in odpravljanjem nepotrebnih podvajanj program-ske opreme.

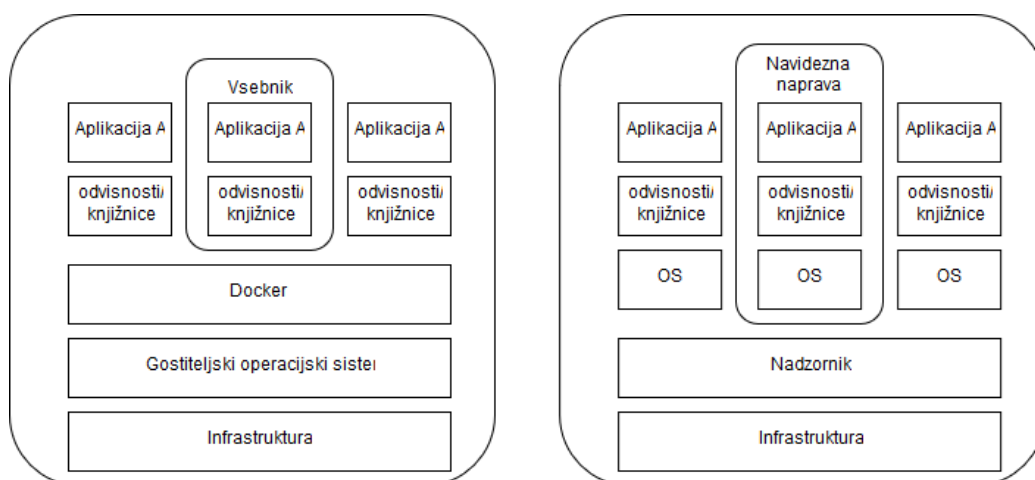
2.3.1 Tehnologija vsebnikov

Vsebnik je samostojen, izvršljiv skupek programske opreme, ki vsebuje vse potrebne odvisnosti, orodja, knjižnice in nastavitve, potrebne za izvajanje. Izvajanje kode znotraj vsebnika bo v vsakem gostiteljskem ogrodju (Win-dows, Linux, MacOS) enako. Notranji deli vsebnika so izolirani od okolice, kar odpravlja morebitne konflikte zaradi različnih verzij potrebnih odvisno-sti. V primerjavi z navideznimi napravami, vsebniki virtualizirajo operacijski sistem in ne podporne strojne opreme. Z gostiteljskim sistemom in ostalimi vsebniki delijo jedro operacijskega sistema, vsak izmed njih v svojem naslov-nem prostoru.

Shema 2.1 prikazuje bistveno razliko med vsebniško tehnologijo in tehno-logijo virtualizacije [23].

2.3.2 Orkestracijska orodja

Proces prenosa in namestitve vsebnikov v izvajalno okolje je moč avtomati-zirati. Proces postaja pomembnejši z rastjo števila vsebnikov in gostiteljskih



Slika 2.1: Primerjava vsebnikov in navideznih naprav

sistemov. Ta tip avtomatizacije imenujemo orkestracija, ponuja pa nam vrsto funkcionalnosti [1]:

- upravljanje z gostiteljskim sistemom
- instanciranje vsebnikov
- upravljanje z vsebniki
- povezovanje vsebnikov preko vmesnikov
- izpostavljanje storitev zunanjim napravam
- skaliranje gruč vsebnikov

S pojavom in razširitvijo vsebniške tehnologije so se pojavila tudi številna orodja za orkestracijo. Med njimi najbolj poznana sta Docker Swarm in Kubernetes. Vsako izmed teh orodij orkestracijo rešuje na svoj način, Kubernetes pa je trenutno eno izmed najbolj razširjenih orodij. Njegove glavne funkcionalnosti so:

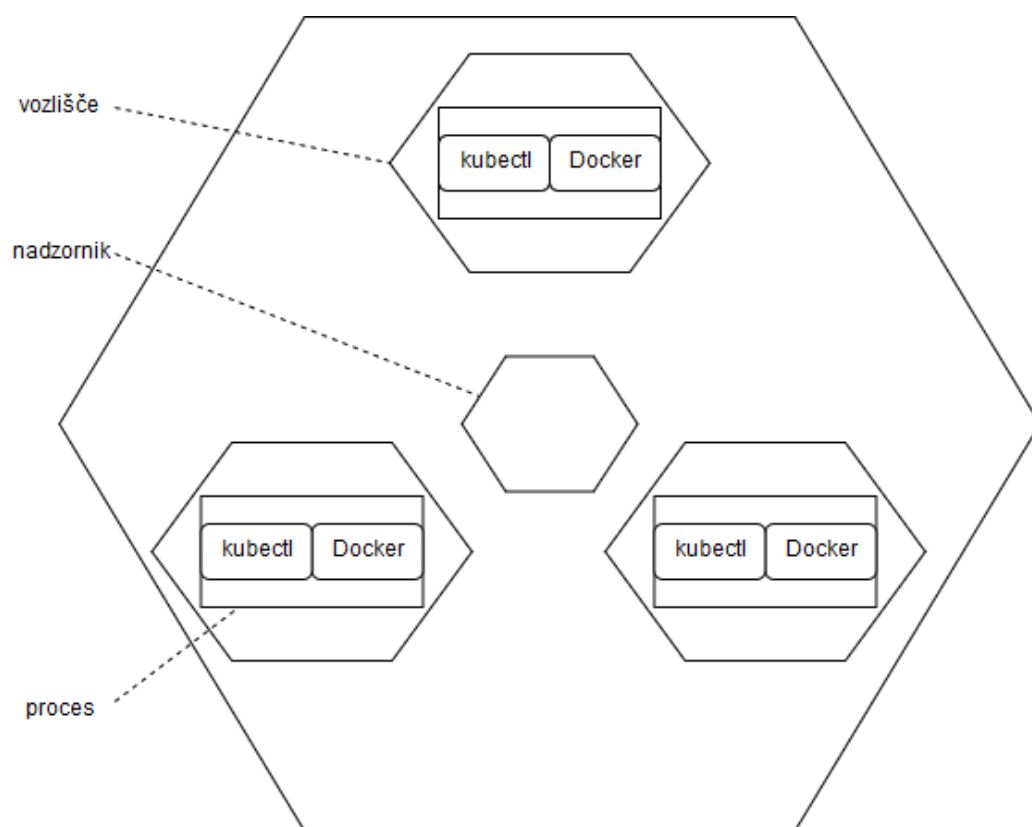
- avtomatizirano nameščanje in repliciranje vsebnikov

- skaliranje
- porazdeljevanje dela (load balancing)
- nameščanje posodobitev
- odpornost na napake in odpovedi vsebnikov z avtomatskimi ponovnimi zagoni
- kontrolirano izpostavljanje notranjega omrežja zunanjim storitvam

Glavni sestavni deli Kubernetesa [1]:

- gruča: zbirka enega ali več strežnikov (ang. Node), ki svoje vire ponujajo nadzornemu procesu
- strok (pod): skupina vsebnikov in pripadajočih shramb, ki so dodeljene enemu gostitelju. Predstavljajo osnovno celico Kubernetesa, znotraj stroka si procesi delijo lokalni omrežni naslovni prostor.
- labele: dodeljene oznake posameznim entitetam (vsebnikom), ki omogočajo upravljanje z njimi v skupini
- storitve: skrbijo za osnovno dodeljevanje dela in izpostavljajo stroke zunanjemu svetu.

Slika 2.2 prikazuje osnovno shemo Kubernetes gruč.



Slika 2.2: Kubernetes gruča [21]

Poglavje 3

Tehnologija veriženja podatkovnih blokov

Izvajanje poslovne logike aplikacije uvrščamo med nivo hrambe podatkov in nivo uporabniškega vmesnika. Decentralizirano hrambo podatkov danes že poznamo, od tu pa gradimo in razmišljamo naprej, v smeri decentralizacije poslovne logike. V tem poglavju bom predstavil tehnologijo in osnovne ideje, ki omogočajo porazdeljeno hrambo podatkov. Koncepti pri decentralizirani hrambi podatkov predstavljajo osnovo in odskočno desko za decentralizacijo izvajanja poslovne logike. Podatkovni bloki nam omogočajo trajno in nespremenljivo sklepanje ter zapis dogovorov o podrobnostih izvajanja, kar je nujno za zanesljiv sistem takšnih storitev.

Veriženje podatkovnih blokov je peer-to-peer porazdeljena podatkovna shramba, dosežena s soglasjem, sistemom „pametnih“ pogodb ter drugih pomožnih tehnologij [4]. Osrednja komponenta sistema je glavna knjiga (ang. ledger), ki beleži vse akcije (transakcije), izvedene na omrežju [6]. Entiteta, ki transakcijo izvede, jo podpiše s svojim privatnim ključem. Skupek transakcij tvori podatkovni blok, bloki se med seboj povezujejo v podatkovno verigo. Posamezne člene verige med seboj povezuje zgoščevalna funkcija, na vhod katere postavimo zgoščeno vrednost trenutnega in prejšnjega bloka. Podatkovno verigo je moč vedno le podaljševati, trenutno veljavno in resnično

stanje omrežja je trenutno najdaljša serija blokov. Celotna veriga blokov je replicirana na vsaki izmed sodelujočih entiteti.

Kombinacija teh pristopov omogoča, da nobena izmed sodelujočih entitet ne more spreminjati že zapisanih blokov. Napad na omrežje je možen le s pridobitvijo več kot polovice vseh sodelujočih entitet v omrežju, ki bi potrjevale resničnost ponarejenih transakcij in sčasoma sestavile daljšo podatkovno verigo, ki bi obveljala kot trenutna resnica. S temi mehanizmi se zagotovi veljavnost in nespremenljivost podatkov v okolju, ki mu apriori ni potrebno zaupati. Ni več potrebe po zunanji, zaupanja vredni, entiteti.

Za interakcijo z glavno knjigo in zapisovanje novih informacij, omrežje uporablja t.i. „pametne pogodbe“. To je del programske kode, ki se lahko odziva na dogodke v omrežju, izvede zapisano poslovno logiko ter ustvarja nove transakcije [6].

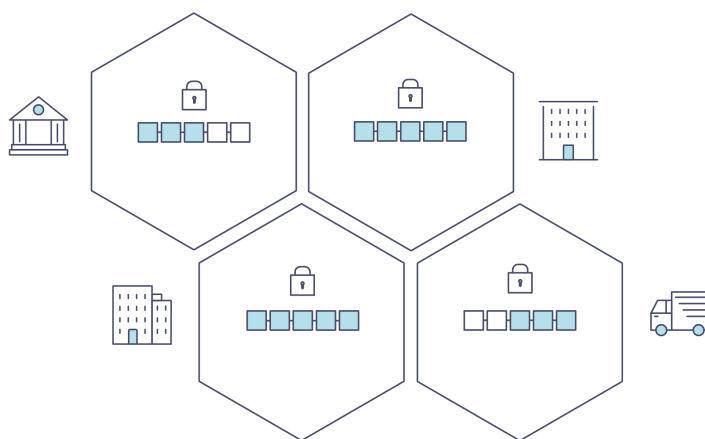
V nadaljevanju tega poglavja se bomo posvetili osnovnim konceptom ter predstavili posebnosti dveh implementacij te tehnologije - omrežji Ethereum in Hyperledger Fabric. Osredotočili smo se predvsem na ti dve, ker do rešitve problema pristopata z nasprotnih bregov. Prva rešitev predpostavlja popolnoma javno omrežje, kjer so identitete uporabnikov neznane, druga svoje prednosti gradi na predpostavki popolnega zaupanja med sodelujočimi identitetami. V želji zgraditi sistem, ki bo omogočal decentralizirano izvajanje storitev in preprečeval morebitne poneverbe izvedbe posameznih operacij, hkrati pa zagotavljal popolnoma anonimnost udeležencev, je verjetno smiselno uporabiti nekakšno fuzijo obeh pristopov.

3.1 Razlaga osnovnih konceptov

3.1.1 Porazdeljena glavna knjiga

V osrčju tehnologije podatkovnih blokov je porazdeljena glavna knjiga, ki vsebuje zapise o vseh transakcijah, izvedenih na omrežju. Glavna knjiga je replicirana na vseh entitetah v omrežju, ki med sabo sodelujejo in skrbijo za vzdrževanje. Informacije so v glavno knjigo le dodajajo z uporabo krip-

tografskih tehnik, ki zagotavljajo, da je vsaka zapisana transakcija trajna in nespremenljiva. To omogoča enostavno preverjanje izvora informacije, od tu tudi drugo poimenovanje za tehnologijo podatkovnih blokov kot sistem dokazovanja [6]. Na sliki 3.1 je prikazana osnovna shema omrežja.



Slika 3.1: Porazdeljeno omrežje. Vsak uporabnik hrani kopijo glavne knjige [6]

.

3.1.2 Pametne pogodbe

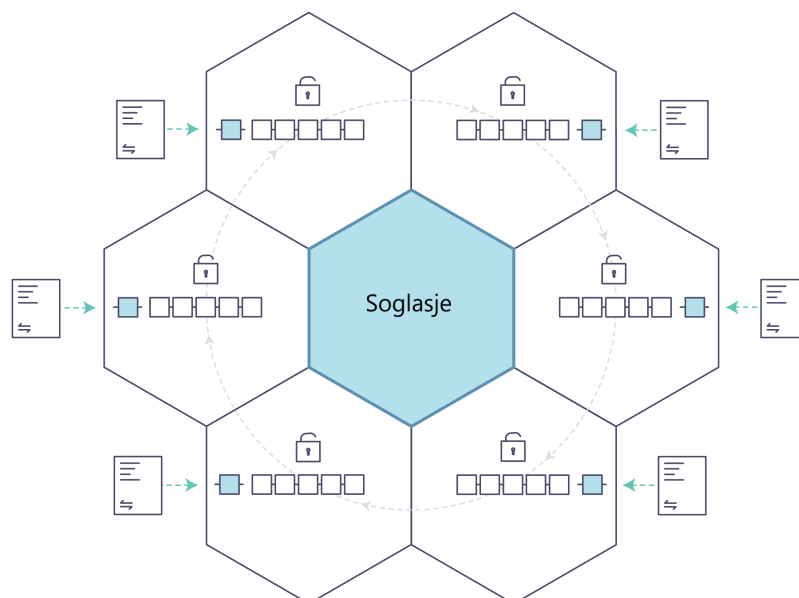
Pametne pogodbe omogočajo kontroliran dostop in interakcijo z glavno knjigo. So osnovni mehanizem za enkapsulacijo informacij in njihovo preprosto vzdrževanje preko omrežja. Poleg tega omogočajo tudi določeno stopnjo avtomatizacije, kot izvrševanje transakcij brez človeškega posredovanja. V primerjavi s tradicionalnimi pogodbami nam pametne pogodbe zagotavljajo višjo stopnjo varnosti in zmanjšujejo dodatne stroške, ki so povezani z njihovim izvajanjem [24]. Na sliki 3.2 je prikazan osnovni potek interakcije pametne pogodbe z glavno knjigo.



Slika 3.2: Interakcija pametne pogodbe z glavno knjigo [6].

3.1.3 Soglasje

Proces sinhronizacije glavne knjige v omrežju je imenovan soglasje. Zagotavlja, da se glavna knjiga posodobi le takrat, ko so transakcije in podatkovni bloki potrjeni s strani zaupanja vrednih udeležencev omrežja. Glavna knjiga se posodobi tako, da vsi udeleženci omrežja, izvedejo enake (zapisane) transakcije v istem vrstnem redu. Slika 3.3 prikazuje primer doseženega soglasja.



Slika 3.3: Doseženo soglasje v omrežju [6].

3.1.4 Izvajalna okolja glede na zaupanje med udeleženci

V grobem lahko, glede na stopnjo zaupanja, ločimo dva tipa izvajalnih okolij, ki ga udeleženci delijo med seboj. Imamo omrežje, kjer so udeleženci vnaprej znani, identificirani s strani tretje osebe, ki ji zaupajo vsi sodelujoči. Interakcije med njimi so varne v smislu prevzemanja odgovornosti. Morebitna škodoželjnost udeleženca je enostavno kaznovana zaradi fizično overjenih oseb (pravnih ali fizičnih).

V javnih okoljih teh ugodnosti ne uživamo. V omrežju lahko sodeluje kdorkoli in to povsem anonimno, med udeleženci tako privzeto velja načelo nezaupanja. Zaupa se le stanju celotne najdaljše podatkovne verige. Tipično so za potrjevanje blokov in novih transakcij uporabljene „kripto valute“, pridobljene s ti. postopkom rudarjenja. Ta omrežja večinoma temeljijo na

Byzantine Fault-Tolerance (BFT) [6, 25].

3.1.5 Zasebnost in zaupnost

Javne podatkovne verige so replicirane na vseh sodelujočih entitetah, kar prinaša transparentnost, obenem pa poslovnim subjektom onemogoča učinkovito sklepanje dodatnih ugodnosti, aneksov ipd. s poslovnimi partnerji. Ena od možnih rešitev problema je enkripcija podatkov, ki pa v tem primeru odpove. Vsak izmed sodelujočih ima dostop do celotne glavne knjige, kar omogoča enostavne napade s silo. V nadaljanju predstavljeno omrežje Fabric tu vpečuje koncept kanalov. Ti predstavljajo logično grupiranje posameznih entitet in omejujejo dostop do pametnih pogodb in glavne knjige na posameznem kanalu [6].

3.2 Ethereum

Ethereum je decentralizirana platforma, ki izvaja pametne pogodbe (smart contracts) - aplikacije, ki se izvajajo natanko tako, kot so bile zapisane. Platforma je osnovana na verigi podatkovnih blokov, ki omogoča reprezentacijo in prenos vrednosti. Lahko si ga predstavljamo kot svetovni računalnik, izvajanje programske kode pa poteka na vseh sodelujočih računalnikih. Pametne pogodbe ponujajo možnost interakcije s podatkovno verigo, določeni deli kode pa se izvajajo le pod točno določenimi pogoji [2].

Stanje v Ethereum omrežju določajo objekti, znani kot uporabniški računi (accounts). Vsak račun sestavlja 20 bajtov dolg naslov, prenos sredstev in informacij med računi pa predstavlja spremembo trenutnega stanja. Uporabniške račune sestavljajo štiri polja [2]:

- **števec (nonce)**, ki preprečuje podvajanje transakcij
- **trenutno stanje Ethra (ether balance)** trenutna količina ethra v lasti računa

- **pogodbena koda (contract code)** opcijsko polje
- **shramba (storage)** privzeto prazno

Ether je interno plačilno sredstvo v omrežju. Uporablja se kot nadomestilo za izvrševanje transakcij. Ethereum pozna dva tipa uporabniških entitet: zunanje (externally owned), določenih s privatnimi ključi in pogodbene (contract accounts), določenih s kodo. Zunanji računi ne obvladujejo kode, z ostalimi entitetami v omrežju pa lahko komunicirajo preko digitalno podpisanih transakcij. Pametne pogodbe so entitete, ki se v omrežju odzivajo na vnaprej določena sporočila: izvedejo del logike, berejo in pišejo v glavno knjigo oziroma pošljejo novo sporočilo v omrežje [2].

3.2.1 Komunikacija med entitetami

V omrežju obstajata dva načina komunikacije: sporočila (messages) in transakcije (transactions). Transakcije so podpisani podatkovni bloki, ki jih ustvarijo zunanji uporabniški računi. Sestavni deli transakcije so:

- prejemnik
- podpis pošiljatelja
- količina prenesenega ethra
- podatki (opcijsko)
- STARTGAS, največje dovoljeno število izvedenih računskih operacij
- GASPRICE, cena posamezne računske operacije

Sporočila so namenjena interni komunikaciji med pametnimi pogodbami. So le navidezni objekti, obstajajo izključno v izvajalnem okolju. Sestavlja jih [2]:

- pošiljatelj
- prejemnik

- količina prenesenega ethra
- STARTGAS

3.2.2 Navidezni stroj Ethereum

Navidezni stroj je glavna abstrakcija celotnega omrežja. Je izvajalno okolje za pametne pogodbe v Ethereum omrežju in služi kot „peskovnik“ za izvajanje kode. Celotni navidezni stroj lahko predstavimo s terko (**stanje blokov, transakcija, sporočilo, koda, spomin, sklad, programski števec, plin**). *Stanje blokov* je predstavitev vseh računov s trenutnim stanjem ethra in shrambe. Vsaka izvedena operacija zmanjša vrednost preostale količine plina, glede na uteženost posamezne operacije. Transakcija se zaključi ob izvedbi zadnje operacije v programu oziroma s prekinitvijo, ko porabljena količina plina preseže največjo dovoljeno [2].

Potrjevanje in ustvarjanje blokov

Vsak blok v Ethereum verigi vsebuje kopijo vseh transakcij in zadnjega stanja omrežja. Poleg tega sta v bloku zapisani tudi zaporedna številka bloka in zahtevnost. Postopek validacije bloka poteka sledeče:

1. Preveri, če predhodni blok obstaja in je veljaven
2. Preveri časovni žig bloka - večji od prejšnjega bloka, vendar ne več kot 15 minut v prihodnosti
3. Preveri številko bloka, zahtevnost, izvor transakcije, izvor „strica“ in omejitev količine plina
4. Preveri veljavnost „Proof of Work“
5. Naj bo $S[0]$ stanje na koncu predhodnega bloka
6. Naj bo TX seznam transakcij v bloku. Za vsak $\{i \mid 0, 1, \dots, n-1\}$ je naslednje stanje $S[i+1] = APPLY(S[i], TX[i])$. V primeru napake ali presežene omejitve količine plina na blok (GASLIMIT), vrni napako.

7. Naj $S_{FINAL} = S[n]$. Nagrada za najden blok se izplača samo najditelju.
8. Preveri, da je vrhnje vozlišče Merklovega drevesa stanja S_{FINAL} enaka končnemu stanju v bloku. V tem primeru je blok veljaven.

Koda je izvedena s strani vseh sodelujočih entitet v omrežju [2].

3.3 Hyperledger

Hyperledger je družina odprtokodnih projektov, namenjenih razvoju tehnologije veriženja podatkovnih blokov. Projekt deluje pod okriljem organizacije The Linux Foundation, v sodelovanju s skupnostjo. Med prvimi in najbolj znanimi izmed Hyperledger projektov je Hyperledger Fabric, prvotno razvit v podjetju IBM in Digital Asset. Pod okrilje projekta Hyperledger spadajo še Sawtooth, Iroha, Burrow ter Indy. Vsak izmed projektov na svoj način rešuje izzive s področja podatkovnih verig oziroma naslavlja ozko problem-sko domeno. Kot primer: projekt Indy se ukvarja s problematiko spletne identitete uporabnika [4]. Trenutno najbolj znana in razširjena platforma je Fabric, v času pisanja dostopna v različici 1.1. Od ostalih podobnih projektov se loči predvsem s konceptom privatnih omrežjih, pri katerih je sodelovanje omejeno s sistemom dovoljenj. Omogoča modularno izbiro načina soglasja in ga je moč prilagajati zahtevam poslovnih uporabnikov [5].

3.3.1 Fabric

Hyperledger Fabric je v sami zasnovi namenjen poslovni uporabi. Omogoča modularno in prilagodljivo arhitekturo, podobno kot ostale implementacije tehnologije veriženja blokov pozna tudi pametne pogodbe, tu imenovane „chain code“. Pametne pogodbe se izvajajo znotraj vsebnikov Docker in omogočajo implementacijo v poljubnem splošnonamenskem programskem jeziku. Drugačen je tudi postopek izvedbe transakcije.

Celotno omrežje je zasnovano na predpostavki (delnega) zaupanja med sodelujočimi entitetami, kar ga razlikuje od javnih omrežij. Enostavna je menjava implementacije protokola za doseganje soglasja, implementiranih bodisi na osnovi reševanja napak ob odpovedi (Crash Fault Tolerant – CFT) ali bizantinske odpornosti na napake (Byzantine Fault Tolerance – BFT). Za samo delovanje ne potrebuje kriptovalute, potrjevanje transakcij in blokov pa ni nujno izvedeno s strani vseh sodelujočih, ampak le določene podmnožice. V teoriji nam omogoča paralelizacijo in posledično višjo zmogljivost celotnega omrežja [6].

Modularnost

Omrežje sestoji iz šestih osnovnih komponent, ki jih je moč poljubno menjati [6]:

1. urejevalnik (ordering service)
2. upravitelj članstva (membership service) - povezuje zunanje entitete z njihovimi kriptografskimi predstavitevami
3. P2P gossip protocol - opsijski
4. Pametne pogodbe (chaincode) - procesno izolacijo zagotavlja izvajanje znotraj vsebnikov Docker. Onemogočen je neposreden dostop do glavne knjige
5. SUPB (DBMS)
6. zamenljiva politika potrjevanja in validiranja

Pametne pogodbe

Pametne pogodbe so delčki programske kode, ki se izvajajo kot distribuirane aplikacije. Tri glavne značilnosti teh aplikacij so: veliko število sočasno

izvajanih pametnih pogodb, dinamično dodajanje v omrežje in v osnovi ne-vredne zaupanja. Obstoječi načini izvajanja pogodb so umeščene v arhitekturo **uredi-izvedi**. Za njih je značilno, da transakcije validirajo in sekvečno uredijo, temu pa sledi propagacija potrjenih blokov po omrežju. Vsaka sodelujoča entitea nato transakcije izvede v tem vrstem redu. Za enoličen način sekvenčnega izvajanja tu nastane potreba po novem, determinističnem programskem jeziku. En izmed predstavnikov je programski jezik za programiranje pogodb v omrežju Ethereum, Solidity. Ker je vsaka izmed transakcij izvedena s strani vsake entitete, to predstavlja veliko porabo razpoložljivih virov ter omejuje skaliranje ter učinkovitost izvajanja [6].

Fabric pametne pogodbe izvaja po arhitekturi **izvedi-uredi-validiraj**. Vsaka transakcija je najprej izvedena s čimer se preveri njeno pravilnost. Nato je urejena glede na protokol za doseganje soglasja. Ob koncu je transakcija validirana s strani za to pooblaščenih zunanjih entitet. Tu v igro vstopi domensko specifična politika potrjevanja. Slednje prinaša potencialno velike performančne prihranke [6].

3.4 Tehnologija veriženja podatkovnih blokov v kontekstu decentraliziranega izvajanja

Decentralizirana hramba podatkov je osnova, na kateri je primerno graditi in osnovati sisteme, sposobne decentraliziranega izvajanja. Raziskave in tehnike uporabe kriptografskih in drugih protokolov, ki zagotavljajo nespremenljivost podatkov in v praksi preprečujejo njihovo ponarejanje, lahko apliciramo nivo višje, na nivo poslovne logike. Trenutno znamo varno hraniti podatke na tisoče napravah, ter hkrati zagotavljati njihovo pristnost. Zamisli o decentraliziranem registru smo osnovali prav na tej lastnosti, kar je podrobneje razloženo v poglavju 4.

Poglavje 4

Decentralizirano izvajanje

Izvajanje storitev v oblaku s sabo prinaša kar nekaj prednosti, kot so samodejno skaliranje in istanciranje posamezne storitve, glede na trenutne zahteve in potrebe. Računalniški oblak je abstrakcija, ki za seboj skriva ogromne podatkovne in računske centre. Ti so v večini v lasti velikih korporacij, prednjačijo Amazon, Google in Microsoft. Odvisnost od ponudnika računalniškega oblaka zna biti problematična, napaka v sistemu lahko povzroči večurno nedostopnost naših storitev. Navkljub skrbi, ki jo ponudniki posvečajo vzdrževanju 100% dosegljivosti, od zadnjega odmevnjega primera mineva le dobro leto in pol [20].

Izvajanje storitev želimo decentralizirati - vsaka sodelujoča entiteta v omrežju lahko, pod določenimi pogoji, izvaja katerokoli izmed nabora razpoložljivih storitev. Prednost, ki jo prinaša decentralizirano izvajanje poslovne logike je praktično nemogoč napad zavrnitev storitve (DOS) in porazdeljen napad zavrnitve storitve (DDOS). Napadalec je zmožen posamezno sodelujočo entiteto v omrežju obremeniti do te mere, da le ta preneha z izvajanjem določene storitve. Decentraliziran sistem bi v primeru prenehanja izvajanja storitve na eni entiteti izvajanje dodelil drugi. Postopek bi moral biti za končnega uporabnika storitve transparenten. S tehnologijo podatkovnih blokov bi bilo moč posamezne klice storitev tudi finančno ovrednotiti. Trenutno je potrebnih več klicev, ki najprej izvedejo samo poslovno logiko

aplikacije, temu pa sledi klic, ki izvede še finančno transakcijo. Podatkovna veriga nam omogoča, da klice storitev opremimo s finančnimi podatki in ob uspešni izvedbi izvajalca sistem samodejno nagradi.

V nadaljevanju diplomskega dela so predstavljeni osnovni koncepti rešitve registracije in odkrivanja storitev v decentraliziranem okolju. Odkrivanje storitev v decentraliziranem okolju igra pomembno vlogo, podobno kot pri storitvah, ki se izvajajo v oblračnih sistemih. Poleg te komponente, za polno delujoč sistem potrebujemo še dodatne mehanizme, ki bodo preverjali pravilnost izvajanja, zbirali metrike in porazdeljevali delo. Predstavljena rešitev tako prispeva le del funkcionalnosti končnega sistema, ki bo omogočal decentralizirano izvajanje.

4.1 Odkrivanje storitev v decentraliziranem okolju

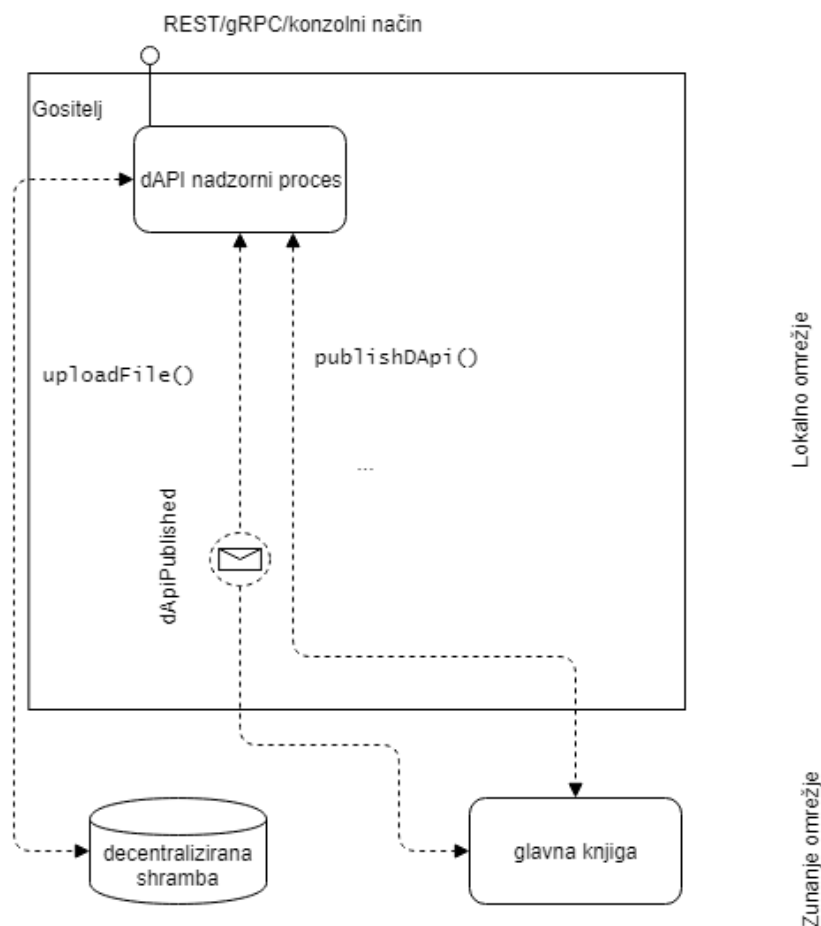
Predlagan sistem za odkrivanje storitev v decentraliziranem okolju sestavljajo naslednje komponente:

- Registracija nove aplikacije 4.1.1
- Registracija izvajalcev 4.1.2
- Registracija storitve 4.1.3
- Odkrivanje storitev 4.1.4

Registracija in odkrivanje storitve je uporaba že znanih konceptov, prenesenih v okolje, kjer vlogo registra storitev prevzema porazdeljena glavna knjiga. Dodatno smo uvedli še registracijo aplikacije, ki je pripravljena na izvajanje v decentraliziranem omrežju in registracijo izvajalcev. Slednja omogoča lastništvo več izvajalnih naprav eni posamezni identiteti.

4.1.1 Registracija nove aplikacije

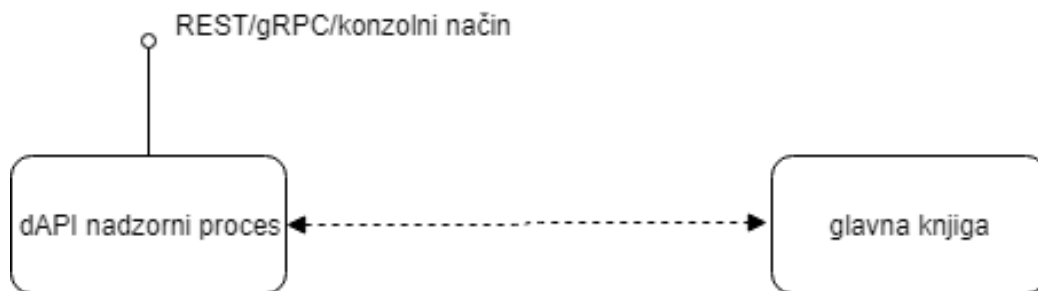
Omrežje je javno, kdorkoli lahko objavi in ponudi novo aplikacijo, primerno za izvrševanje. Izvorno kodo oziroma izvršljivo datoteko aplikacije shranimo v decentralizirano shrambo. Temu sledi zapis podatkov (ime, verzija, izvajalno okolje...) o aplikaciji v glavno knjigo. Ob uspešni registraciji omrežje proži dogodek s podatki o novi aplikaciji. Izvajalci, ki se registrirajo na te dogodke, lahko takoj pričnejo z izvajanjem aplikacije, če se za to odločijo, oziroma jim je izvajanje dodeljeno s strani omrežja. Razporejanje opravil in izvajanja po omrežju je stvar prihodnjih raziskav. Preprost diagram poteka je prikazan na sliki 4.1.



Slika 4.1: Registracija nove aplikacije

4.1.2 Registracija izvajalcev

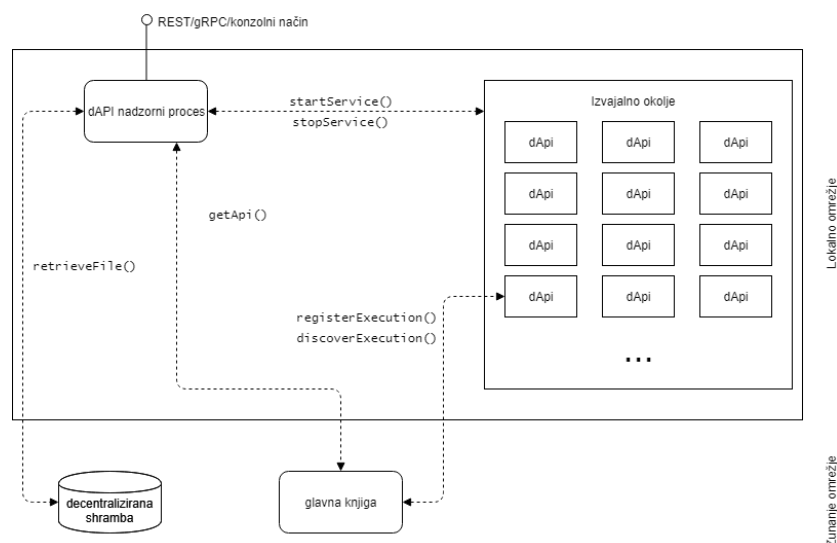
Vsaka identiteta lahko upravlja z več izvajalnimi enotami. Ta pristop omogoča enemu uporabniškemu računu pripis vseh nagrad, ki si jih prisluži množica izvajalcev. Podatki, ki se o posameznem izvajalcu zabeležijo so: lastnik (account), unikatna številka izvajalca (id) in naslov, preko katerega je izvajalec dosegljiv. Izvajalcu se lokalno nastavi omejitve glede porabe sistemskih virov, ki jih lastnik nameni decentraliziranemu izvajanju storitev. Postopek je shematsko prikazan na sliki 4.2.



Slika 4.2: Postopek registracije izvajalcev

4.1.3 Registracija izvajanja storitve

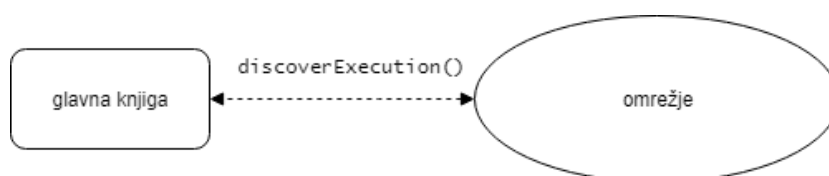
Ob zahtevi za pričetek izvajanja aplikacije, predhodno registrirane v omrežju, se prične postopek pridobivanja informacij o željeni storitvi. Iz registra se pridobi podatke o imenu, verziji, lastniku in lokaciji shrambe aplikacije. Izvorno kodo oz. izvršljivo datoteko storitve se pridobi iz omrežja, po potrebi jo nadzorni proces prevede in zažene. Storitve sama ob inicializaciji poskrbi za registracijo v registru (glavna knjiga). Zabeleži se podatke o izvajalcu in storitvi, ki je pričela z izvajanjem. Gre za najbolj kompleksen del registracije, shematsko je prikazan na sliki 4.3.



Slika 4.3: Postopek registracije izvajanja storitve

4.1.4 Odkrivanje storitve

Želimo storitev, pod pogojem da se v omrežju izvaja, pridobimo z enostavno poizvedbo v glavni knjigi. Med razpoložljivimi storitvami odjemalec izbere eno, pridobi podatke o lokaciji izvajanja in izvede klic 4.4. Od tu naprej komunikacija med storitvami poteka preko izbranega protokola (REST, gRPC, Event-driven).



Slika 4.4: Postopek odkrivanja

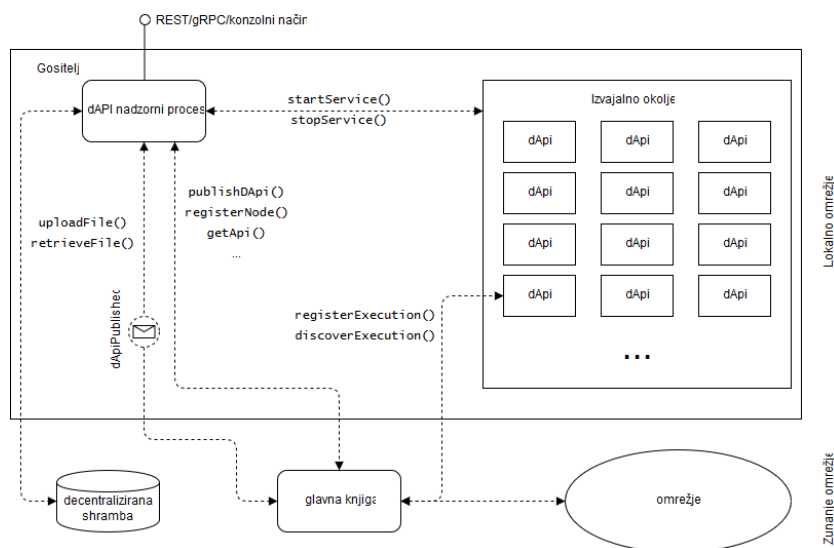
Deregistracija storitev predstavlja težji del naloge, ker ni centralnega procesa, ki bi bdal nad registriranimi storitvami in preverjal njihovo dosegljivost. Potrebna bo dodatno raziskovalno delo, kako učinkovito deregistrirati storitev, podobno kot je to rešeno pri trenutno uporabljenih registrih (etcd, Consul, ZooKeeper). Za deregistracijo posamezne storitve je tako zaenkrat

odgovoren nadzorni proces.

Poglavje 5

Implementacija predlagane rešitve

Pri implementaciji predstavljenih konceptov smo se osredotočili le na osnovne funkcionalnosti registra - registracijo aplikacije, registracijo izvajalcev in registracijo storitve.



Slika 5.1: Arhitekturna shema rešitve

Na sliki 5.1 je prikazana shema predlagane rešitve. Osrednji del omrežja je nadzorni proces - *dApi manager*, ki dostopa do glavne knjige, decentralizirane

shrambe in upravlja s storitvami, ki jih gostitelj izvaja. Gostiteljski sistem v trenutni različici podpira upravljanje z vsebniki Docker. Aplikacije, ki so na voljo za izvajanje so shranjene na datotečni shrambi IPFS, podporna podatkovna veriga je na omrežju Ethereum. Posamezne komponente sistema so podrobneje opisane v nadaljevanju.

5.1 Nadzorni proces

Nadzorni proces za izvajanje decentraliziranih storitev (dAPIjev) skrbi za:

- registracijo novih storitev v omrežje,
- prenos izvršljivih datotek v in iz omrežja,
- zagon, zaustavitev in upravljanje storitev

Komunikacija z nadzornim procesom trenutno poteka preko REST aplikacijskega vmesnika, v načrtu pa je implementacija vmesnikov za konzolni nadzor ter podpora novejšim komunikacijsim protokolom kot so gRPC, Apache Trift in podobni.

Za registracijo nove storitve nadzornemu procesu podamo pot do slike vsebnika Docker. Sistem poskrbi za distribucijo slike v omrežje IPFS in podatke o storitvi doda v shrambo pogodbe na Ethereum omrežju. Ob uspešni registraciji se proži dogodek, ki sodelujoče entitete obvesti o novi storitvi, pripravljeni za izvajanje. Te se lahko na dogodek lahko odzovejo z zahtevo za pričetek izvajanja storitve. Trenutno je izvajanje nove storitve potrebno prožiti ročno, ko bo pripravljen modul za razporejanje opravil, bo postopek v celoti avtomatiziran. Želene storitve se pridobi iz omrežja IPFS, sliko vsebnika se naloži v izvajalno okolje Docker in zažene. Storitve sama poskrbi za registracijo in odkrivanje ostalih storitev v omrežju.

Razširitev obstoječe KumuluzEE konfiguracijske datoteke:

dapi—manager :

storage :

```
remote:
  type: ipfs
  location: /ip4/127.0.0.1/tcp/5001
local:
  downloadFolder: download
  execution:
managers:
- type: docker
  connection: tcp://192.168.99.100:2376
  tls: true
  certificate-path: /path/to/certificate
  instance-limit: 10
blockchain:
  provider: ethereum
  host: http://127.0.0.1:8545
  account: /path/to/wallet
  password: password
```

5.2 Decentralizirana shramba

Izvršljive datoteke oziroma slike vsebnikov storitve je potrebno shraniti na način in lokacijo, kjer bodo dostopne vsem sodelujočim entitetam v omrežju. Podobno, kot želimo izvajanje storitev decentralizirati, želimo poskrbeti tudi za decentralizirano shrambo. V implementaciji smo uporabili decentralizirano shrambo IPFS. Gre za projekt, osnovan na omrežju Ethereum, glavni cilj pa je shranjevanje datotek v porazdeljeni shrambi. Dostop do datotek poteka prek omrežja P2P, protokol za izmenjavo datotek BitSwap je podoben protokolu BitTorrent. Vsako datoteko, ki jo želimo shraniti v omrežje, odjemalec razbije na podatkovne bloke, izračuna zgoščeno vrednost posameznega bloka, te vrednosti pa nato sestavi v strukturo imenovano Merkle Tree. Datoteko pridobimo enostavno preko zgoščene vrednosti v korenu drevesa.

Omrežje je sposobno poiskati posamezne koščke prvotne datoteke, vsebino posameznega pa hitro preveri z izračunom zgoščene vrednosti. V kolikor nam kdo želi podtakniti napačne bloke posamezne datoteke, sistem to prepozna in neveljavne bloke preprosto zavrže, ko od ostalih sodelujočih entitet prejme iste dele datoteke. Datoteka je veljavna, v kolikor sistem uspe sestaviti podatkovno strukturo Merkle Tree, katerega zgoščena vrednost v korenu drevesa je identična podani [9].

5.3 Odjemalec za Ethereum omrežje

Sistem za delovanje potrebuje odjemalca, ki se zna povezati v Ethereum omrežje. V naši testni postavitvi je mesto odjemalca prevzel program Geth, implementacija Ethereum protokola v programskem jeziku Go. [3] Nadzorni proces se preko JSON RPC povezuje na lokalno instanco odjemalca Geth, decentralizirane storitve v izvajalnem okolju Docker pa se povezujejo na proces, dostopen preko mreže Infura. Infura nam omogoča enostaven dostop do Ethereum omrežja, brez potrebe po lokalnem izvajanju Ethereum protokola. Za sodelovanje v omrežju nam tako lokalno ni potrebno namestiti ničesar, prav tako nam ni potrebno hraniti celotne zgodovine podatkovne verige. Na spletni strani se enostavno registriramo, s tem pridobimo unikatni ključ, ki nam omogoča dostop do oddaljenega izvajalca [8].

5.4 Implementacija pametne pogodbe

Pametna pogodba, ki predstavlja register storitev in osrednji del sistema, je napisana v programskem jeziku Solidity. Solidity je jezik, v katerem ustvarjalci Ethereum omrežja priporočajo implementacije pametnih pogodb. Je visoko nivojski jezik, precej podoben JavaScriptu in namenjen izvajanju na navideznem stroju Ethereum (EVM). Med konstrukti jezika najdemo dedovanje, knjižnice, uporabniško določene tipe in ostale visokonivojske konstrukte. Namensko orodje za razvoj pametnih pogodb je trenutno le eno, poznano

pod imenom Remix, dostopno pa je tudi v spletni različici [17].

Osnovni konstrukti zasnovane pogodbe so strukture User, dApi, Worker in Execution.

```
contract Registry {
    struct User {
        string friendlyName;
        mapping(bytes32 => Worker) workers;
        mapping(bytes32 => dApi) dApis;
    }

    struct dApi {
        string name;
        string version;
        string location;
        bool isValid;
    }

    struct Worker {
        string name;
        bytes32 workerId;
        bool isValid;
    }

    struct Execution {
        Worker worker;
        string location;
        bool active;
    }

    /// MAPPINGS
    mapping (address => User) users;
```

```
mapping (bytes32 => Execution[]) dAPIExecutors;
...
```

Struktura **User** predstavlja ponudnika decentraliziranih aplikacij. Vsakemu ponudniku pripada seznam izvajalcev (workers) in objavljenih API-jev (dApis). O posamezni storitvi hranimo ime, verzijo ter lokacijo, ki v našem primeru predstavlja zgoščeno vrednost korena slike Docker, shranjene na IPFS. Vsak izvajalec je samostojna enota, ki je zadolžena za izvajanje aplikacije, struktura Execution, v navezavi z mapiranjem *dAPIExecutors* pa povezuje aplikacijo z njenimi izvajalci in naslovu, preko katerega je dostopna.

Registracija poteka v več korakih, najprej je potrebno registrirati ponudnika storitve, nato se samodejno ob zagonu instance nadzorne storitve izvede registracija izvajalca. Za registracijo storitve poskrbi storitev sama, preko razširitve *Kumuluz-dapi*.

```
function registerApi(string _name,
    string _version,
    string _location,
    bytes32 _hash, bool _isValid) public {
    dApi memory dapi = dApi(
        _name,
        _version,
        _location,
        _isValid
    );

    users[msg.sender].dApis[_hash] = dapi;
    emit dAPIPublished(_name, _version, msg.sender,
        _hash);
}
...
```

Proces deregistracije izvajanja storitve je kompleksnejši postopek, ki zahteva kar nekaj računskega dela. Dokler je v sistemu malo registriranih izva-

jalnih enot je deregistracija hitra in za uporabnika neopazna, tako z vidika časa kot cene. Problem nastopi v primeru velikega števila izvajalnih enot. Na testnem omrežju *Rinkeby* smo ob testiranju večjega števila registrianih izvajalnih enot presegli omejitve računskih korakov na transakcijo (gas).

```
function deregisterExecution(bytes32 _apiHash ,
uint _wIndex) public {
    if (_wIndex >= dAPIExecutors[_apiHash].length)
        return;

    for (uint i = _wIndex;
i < dAPIExecutors[_apiHash].length - 1; i++){
        dAPIExecutors[_apiHash][i] =
            dAPIExecutors[_apiHash][i + 1];
    }
    dAPIExecutors[_apiHash].length--;
}
```

Računsko še zahtevnejši problem nastopi ob deregistraciji izvajalca, tu bi bilo potrebno iterirati preko vseh registriranih storitev in poiskati izvajalca za brisanje. Ta del registra še ni implementiran in potrebuje dodatno pozornost v prihodnje.

5.5 Razširitev KumuluzEE platforme za podporo decentraliziranim aplikacijam

5.5.1 Implementacija Kumuluz-dapi

Želja in cilj za učinkovit razvoj decentraliziranih aplikacij je priprava programskih vmesnikov, ki bodo razvijalcem omogočili enostavno nadgradnjo in predelavo obstoječih aplikacij v dApije. V razvojni fazi je razširitev za aplikacije, ki uporabljajo platformo KumuluzEE. Vmesnik mora biti intuitiven in enostaven za uporabo, zato smo za zgled vzeli podobno in že obstoječo

rešitev *KumuluzEE Service Discovery*, ki rešuje problem odkrivanja storitev v oblačnih arhitekturah [26].

Anotacije

Razširitev vsebuje dve anotaciji, s katerima opremimo obstoječo aplikacijo. Prva služi registraciji storitve, z njo pa se opremi glavni aplikacijski razred REST storitve, ki je trenutno edini podprt način komunikacije.

```
@Qualifier
@Retention(RetentionPolicy.RUNTIME)
@Target({ElementType.TYPE})
public @interface RegisterDApi {
    String name() default "";
    String environment() default "";
    String version() default "";
    ApiType apiType() default ApiType.REST;
}
```

Podatki, ki jih beležimo o posamezni storitvi so: *ime (name)*, *okolje (environment)*, *verzija (version)* in *tip aplikacijskega vmesnika (apiType)*.

Druga anotacija skrbi za označevanje parametrov, ki jih preko javanske tehnologije CDI, vrinemo v spremenljivke.

```
@Qualifier
@Target({ElementType.FIELD, ElementType.METHOD})
@Retention(RetentionPolicy.RUNTIME)
public @interface DiscoverDApi {
    @Nonbinding String name() default "";

    @Nonbinding String environment() default "";

    @Nonbinding String version() default "";
}
```

```
@Nonbinding ApiType apiType()  
    default ApiType.REST;  
}
```

Programska logika

Preko procesiranja anotacij pridobimo podatke o želeni storitvi, pri inicializaciji pa razširitev poskrbi za samodejno registracijo, oziroma odkrivanje storitve. Za delovanje razširitve potrebujemo omogočeno tehnologijo CDI. Metoda za registracijo storitve je povsem enostavna, uporabljamo pa knjižnico Web3j. Web3j je majhna knjižnica, namenjena aplikacijam Java in Android, ki se zna povezati na omrežje Ethereum. Klice na REST vmesnik odjemalca (geth, parity) ovije v razrede in metode, omogoča pa tudi pretvorbo pametnih pogodb, napisanih v jeziku Solidity, v javanske razrede [22].

```
private void registerService(  
    ServiceExecution apiExecutionDetails) {  
  
    logger.info(" Registering new service execution");  
    registry  
        .registerService(apiExecutionDetails.getApiHash(),  
            apiExecutionDetails.getWorker(),  
            apiExecutionDetails.getLocation()).observable()  
        .subscribe(tx -> {  
            BigInteger gasUsed = tx.getGasUsed();  
            logger.info("New dApi executor registered: "  
                + apiExecutionDetails.toString() +  
                ". Gas spent: " + gasUsed);  
            logger.info("Block number: "  
                + tx.getBlockNumber());  
        });  
}
```

5.5.2 Priprava aplikacije

V standardno KumuluzEE aplikacijo je potrebno vključiti razširitev *kumuluz-dapi*. Razširitev ponuja nabor anotacij, s katerimi storitev bodisi registriramo v omrežje, bodisi določeno storitev poiščemo. Potrebna je še dopolnitev konfiguracijske datoteke, v kateri podamo dodatne informacije o naši storitvi. Ob zagonu storitve se preko anotacij poišče in registrira v omrežje. V glavno knjigo se zapišejo podatki o izvajani storitvi, izvajalcu ter naslov, na katerem je storitev dostopna.

Za odkrivanje storitev poskrbi razširitev, ki v glavni knjigi poišče izvajalce storitve, med njimi pa na podlagi izbranega algoritma za razporejanje bremen, izbere enega izmed izvajalcev in pridobi naslov, na katerem se storitev trenutno izvaja.

Razširitev obstoječe KumuluzEE konfiguracijske datoteke:

```
dapi :  
  blockchain :  
    host : naslov izvajalca  
    account : /pot/do/datoteke  
    password : geslo  
  type : docker  
  storage : ipfs  
  api : rest
```

V konfiguraciji so predvidene tudi trenutno neuporabljene nastavitve za tip izvršljive datoteke, tip shrambe, na kateri se nahaja izvorna koda aplikacije, ter tip aplikacijskega vmesnika. Trenutno sistem podpira le vsebnike Docker, ki jih je moč pridobiti preko omrežja IPFS, aplikacijski vmesnik je REST.

Poglavje 6

Delovanje in evalvacija

6.1 Testna aplikacija

Za namene testiranja delovanja sistema smo implementirali dve preprosti REST storitvi - uporabniki (users) in kupci (customers). Storitev *uporabniki* hrani seznam vseh uporabnikov v sistemu. Storitev *kupci* od prve storitve pridobi seznam uporabnikov in ga le posreduje naprej. Prva storitev testira uspešnost registracije izvajanja, medtem ko druga služi kot test odkrivanja uspešno registrirane storitve.

Implementirani storitvi sta zelo enostavni, prva se odziva na klic *GET /users* in druga na klic *GET /customers*. Na tem mestu storitev ne bomo posebej predstavljali.

6.2 Testiranje

Pred zagonom sistema je potrebno ustvariti račun (account) na omrežju Ethereum in opraviti inicializacijo odjemalca IPFS. Identiteto na omrežju Ethereum pridobimo enostavno že z nekaj kliki, v kolikor se poslužimo grafičnega vmesnika Ethereum denarnice, oziroma preko ukazne vrstice z ukazom `geth account new`. Odjemalec nas nato vodi skozi celoten postopek ustvarjanja uporabniškega računa, ki ga zaščitimo z geslom. Podobno enostavna je ini-

cializacija odjemalca IPFS, s to razliko, da edini uporabniški vmesnik predstavlja ukazna vrstica. Z ukazom `ipfs init` sprožimo postopek ustvarjanja računa, s katerim se kasneje predstavljamo v omrežju.

Pred zagonom nadzornega procesa moramo poskrbeti za delujoč odjemalec na omrežju Ethereum, uporabili smo testno omrežje Rinkeby, delujoč odjemalec za omrežje IPFS in gostiteljsko napravo za vsebnike Docker, dosegljivo preko protokola HTTP. Potrebena je še ustrezna dopolnitev konfiguracyjske datoteke.

Ob zagonu nadzornega procesa se le-ta uspešno registrira kot izvajalec. Zatem s klicem POST na `/dapi/ethereum-račun/api` prenesemo sliko Docker na shrambo IPFS, proces pa poskrbi tudi za registracijo aplikacije v omrežju. Ob uspešno izvedeni akciji se proži dogodek, ki preostale sodelujoče obvesti o novo objavljeni storitvi. Klic GET na `/dapi/ethereum-račun/api`, s podanimi ustreznimi poizvedovalnimi parametri (ime in verzija storitve), nam vrne podatke o objavljeni aplikaciji.

```
{
  "name": "users-dapi",
  "version": "1.0.0",
  "issuer": "0x6587f642a96bf0628486cd9...",
  "location": "QmenABGsZcxdbQnhPJR93V...",
  "hash": "wzjhuCjpfKw6Rs5YStmly5Naq...",
  "valid": true
}
```

Dobimo podatke o imenu, verziji, izdajalcu storitve, zgoščeno vrednost, ki enolično predstavlja aplikacijo, ter zgoščeno vrednost naslova direktorija v sistemu IPFS (location).

Klic POST na `/dapi/ethereum-račun/startService` iz shrambe IPFS prenese sliko aplikacije, vendar je le ta poškodovana in je ni moč uvoziti v sistem Docker. Napake nismo uspeli odpraviti, v času izdelave je bilo na omrežju Github prav na to temo prijavljenih vrsto zahtevkov.

Za namene testiranja smo ročno vstavili sliko aplikacije v gostiteljsko

napravo Docker in preko nadzornega procesa ustvarili ter zagnali vsebnik. Vsebnik se uspešno zažene in registira v omrežju, tu pa nastopi naslednja težava. Storitev je moč odkriti, vendar ne takoj po registraciji. Vzroka za to nismo uspeli najti, ko pa je storitev moč odkriti, se testna aplikacija *kupci* uspešno poveže na storitev *uporabniki* in ob zahtevi pridobi celoten seznam uporabnikov, ki ga v tem primeru le posreduje naprej.

Kot predstavljeno, celotni sistem ni popolnoma funkcionalen, v nadaljevanju pa smo naleteli še na nekaj težav, ki trenutno onemogočajo učinkovito decentralizirano izvajanje. V podpoglavju 6.3 so težave podrobneje opisane.

6.3 Pomankljivosti trenutnega sistema in izboljšave v prihodnosti

Prva različica sistema ponuja kar nekaj možnosti za izboljšave. Prva izmed pomankljivosti je sama cena registracije in deregistracije storitev in njihovih izvajalcev. Vsaka registracija novega izvajalca pomeni nov zapis na podatkovno verigo, kar v dinamičnem sistemu in ob trenutnih cenah transakcije na Ethereum omrežju predstavlja potencialno veliko finančno breme za izvajalca. Zahtevnejša od prve je druga pomankljivost sistema in sicer deregistracija izvajalca. Brisanje podatkov iz podatkovne verige je nemogoče zaradi same zasnove tehnologije - nespremenljivost. S transakcijo je možno le navidezno brisati - razveljaviti preteklo transakcijo, zapis pa na podatkovni verigi ostane. Brisanje je prav tako razmeroma draga operacija, posebno velik problem predstavlja brisanje izvajalca in s tem posledično še deregistracijo vseh storitev, ki jih je izvajalec v trenutku prekinitve izvajanja izvajal.

Dodatni mehanizmi, ki jih poznajo obstoječi sistemi za odkrivanje storitev, so še samodejna deregistracija storitve ob vnaprej določenem pretečenem času neaktivnosti. Trenutna implementacija tega mehanizma še ne pozna, problem predstavlja predvsem decentralizacija. V tem sistemu ni centralne storitve, ki bi ob določenem času iz registra preprosto brisala vse neaktivne storitve. Sistem potrebuje nov mehanizem, ki bo znal med storitvami poi-

skati neaktivne in jih odstraniti iz registra. Kakšen bo mehanizem in princip delovanja sta v tem trenutku neznanka.

Sistem potrebuje način prerazporejanja zahtev po omrežju. Kdo izmed trenutno registriranih izvajalcev bo lahko najhitreje odgovoril? Hiter odgovor je pogojen s fizično oddaljenostjo gostitelja od izvajalca, omrežnimi zakasnitvami ter hitrostjo samega izvajalca. Reševanje teh izzivov je naslednje v vrsti za praktično uporaben sistem.

Vsakega izvajalca storitve želimo za uspešno izveden klic ustrezno finančno nagraditi. Tu se poraja več vrst odprtih vprašanj, izstopa predvsem vprašanje finančne vrednosti posameznega klica in način preverjanja pravilnosti izvedbe klica. Je izvajalec dejansko pravilno izvedel zahtevano dejanje, tako kot je predvidel razvijalec in naročnik? Potreben je mehanizem, ki ga zaenkrat imenujmo „Proof of Execution“. Podobno kot trenutni mehanizmi „Proof of Work“, „Proof of Stake“ ter sorodni, ki jih uporabljajo decentralizirane podatkovne verige, potrebujemo mehanizem, preko katerega se bodo sodelujoče entitete v omrežju sposobne odločiti, ali je določen izvajalec pravilno izvedel zahtevano dejanje. S tem področjem se trenutno aktivno ukvarjajo tudi pri startupu SONM, ki objublja računsko moč na zahtevo v decentraliziranem okolju. Iz oblachnega računalništva želijo preiti na t.i. „računalniške storitve v megli“ (fog computing) [18].

Za podporo načrtovanemu sistemu je v prihodnje potrebno razviti tudi lastno podatkovno verigo. Podatkovna veriga bi morala omogočati hitro potrjevanje transakcij, ki so podporna veja registra storitev. Optimizirati bi bilo potrebno računsko zahtevnost danih operacij, oziroma omejiti izvajanje pametnih pogodb le na podmnožico entitet v omrežju, funkcionalnost, podobna tisti v sistemu HyperLedger Fabric. Omrežje najverjetneje potrebuje tudi učinkovitejši algoritem za doseg konsenza. *Proof of Work* tu odpove, oziroma predstavlja preveliko časovno in finančno potratnost.

Sistem bi za praktično uporabo potreboval tudi učinkovit način za izvedbo finančnih transakcij ob uspešno izvedenem klicu. V arhitekturi mikrostoritev se klice storitev največkrat preusmerja preko aplikacijskih prehodov (API

gateway). Ti zbirajo določene statistične parametre o klicih in, na podlagi vnaprej definiranih finančnih politik, zaračunajo uporabo. Ideja pri decentraliziranem sistemu je ob uspešnem klicu samodejno izvesti finančno transakcijo, ter centraliziran prehod nadomestiti s popolnoma decentralizirano logiko. Način, kako to izvesti je zaenkrat še neznanka in bo stvar prihodnjih raziskav.

Poglavje 7

Zaključek

Mikrostoritve in oblačna arhitektura sta prinesli revolucijo v načinu razmišljanja in gradnje aplikacij. Približujemo se temu, kar v fizični proizvodnji poznamo že dolgo, in sicer hitre proizvodne linije za izdelke. Podobno lahko danes, tako kot kocke, sestavljamo tudi aplikacije. Ne zanima nas kako vsak posamezen košček celotnega sistema rešuje svoj del problema, ampak koristimo vnaprej definiran aplikacijski vmesnik, ki se načeloma ne spreminja. Aplikacije, končni produkt takšnega načina zlaganja, so odporne na hitre spremembe v okolju, sposobne samodejnega odpravljanja napak in skaliranja. Sestavni deli so med seboj šibko sklopljeni in odgovorni le za svoje ozko usmerjene naloge. Problem, ki ga naslavljamo, je morda enostavno spregledati. Trenutni sistem je odporen na vse vrste programskih napak, s pomočjo replikacij preko fizično ločenih računskih centrov deloma tudi strojnih okvar, še vedno pa lahko trpi dosegljivost in odzivnost [20]. V kolikor nam uspe te vire računske moči decentralizirati, sistemom dodamo še dodatno dimenzijo odpornosti in praktično onemogočimo napade zavrnitve odzivnosti (DOS).

Na poti k temu cilju je potrebno rešiti veliko odprtih vprašanj, ki so v trenutnih oblačnih sistemih že rešeni, ter probleme, ki se pojavijo pri decentralizaciji.

V diplomski nalogi smo se ukvarjali z registracijo in odkrivanjem storitev v decentraliziranem okolju. Namesto centralnega registra smo uporabili

tehnologijo podatkovnih blokov, ki s pomočjo kriptografskih prijemov zagotavlja nespremenljivost in enostavno preverljivost zapisanih in porazdeljenih podatkov. Registra nam ni uspelo razviti v meri, ki smo si jo zamislili. Pri implementaciji konceptov smo naleteli na kup nepredvidenih težav, povezanih predvsem z implemetacijo same tehnologije. Rezultat je delno delujoč sistem, ki je osnovan na omrežju Ethereum. Omrežje trenutno ni primerno za izvajanje predvidenih nalog. Za nadaljnje raziskovalno delo po vsej verjetnosti potrebujemo prilagojeno implementacijo celotne podatkovne verige.

Odkrivanje storitev je le ena v vrsti komponent, ki jih polno delujoč decentraliziran sistem potrebuje. Navkljub le delnemu uspehu bi, ob dodatnem raziskovalnem delu, lahko na področju decentraliziranega izvajanja dosegli nove mejnike in zakoličili pot naslednje generacije programske opreme.

Literatura

- [1] Containers and Orchestration Explained. Dosegljivo: <https://www.mongodb.com/containers-and-orchestration-explained>. Dostopano: 15. 07. 2018.
- [2] Ethereum whitepaper. Dosegljivo: <https://github.com/ethereum/wiki/wiki/White-Paper#ethereum>. Dostopano: 22. 05. 2018.
- [3] Go ethereum. Dosegljivo: <https://geth.ethereum.org/>. Dostopano: 28. 06. 2018.
- [4] Hyperledger. Dosegljivo: <https://www.hyperledger.org>. Dostopano: 22. 05. 2018.
- [5] Hyperledger - open source blockchain for business. Dosegljivo: <https://www.ibm.com/blockchain/hyperledger.html>. Dostopano: 22. 05. 2018.
- [6] Hyperledger Fabric documentation. Dosegljivo: <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io>. Dostopano: 22. 05. 2018.
- [7] IBM. What is cloud computing? Dosegljivo: <https://www.ibm.com/cloud/learn/what-is-cloud-computing>. Dostopano: 11. 07. 2018.
- [8] Infura. Dosegljivo: <https://infura.io/>. Dostopano: 28. 06. 2018.
- [9] Ipfs. Dosegljivo: <https://ipfs.io/>. Dostopano: 28. 06. 2018.

-
- [10] Microservices: a definition of this new architectural term. Dosegljivo: <https://martinfowler.com/articles/microservices.html>. Dostopano: 11. 07. 2018.
 - [11] Pattern: Application metrics. Dosegljivo: <http://microservices.io/patterns/observability/application-metrics.html>. Dostopano: 28. 06. 2018.
 - [12] Pattern: Health check. Dosegljivo: <http://microservices.io/patterns/observability/health-check-api.html>. Dostopano: 04. 07. 2018.
 - [13] Pattern: Microservice Architecture. Dosegljivo: <http://microservices.io/patterns/microservices.html>. Dostopano: 11. 07. 2018.
 - [14] Pattern: Monolithic Architecture. Dosegljivo: <http://microservices.io/patterns/monolithic.html>. Dostopano: 22. 05. 2018.
 - [15] Pattern: Service discovery. Dosegljivo: <https://www.nginx.com/blog/service-discovery-in-a-microservices-architecture/>. Dostopano: 04. 07. 2018.
 - [16] Prometheus overview. Dosegljivo: <https://prometheus.io/docs/introduction/overview/>. Dostopano: 28. 06. 2018.
 - [17] Solidity Documentation. Dosegljivo: <http://solidity.readthedocs.io/en/v0.4.24/>. Dostopano: 12. 07. 2018.
 - [18] Sonm. Dosegljivo: <https://sonm.com/>. Dostopano: 28. 06. 2018.
 - [19] The Linux Foundation. Cloud native computing foundation („cncf“) charter. Dosegljivo: <https://www.cncf.io/about/charter/>. Dostopano: 11. 07. 2018.

-
- [20] Update: 11-hour AWS failure hits websites and apps. Dosegljivo: <https://www.computerworld.com/article/3175643/cloud-computing/aws-failure-hits-web-sites-and-apps.html>. Dostopano: 16. 07. 2018.
- [21] Using Minikube to Create a Cluster. Dosegljivo: <https://kubernetes.io/docs/tutorials/kubernetes-basics/create-cluster/cluster-intro/>. Dostopano: 15. 07. 2018.
- [22] Web3J. Dosegljivo: <https://github.com/web3j/web3j>. Dostopano: 16. 07. 2018.
- [23] What is a container. Dosegljivo: <https://www.docker.com/what-container>. Dostopano: 11. 07. 2018.
- [24] Nicola Atzei, Massimo Bartoletti, and Tiziana Cimoli. A survey of attacks on ethereum smart contracts (sok). In *Principles of Security and Trust*, pages 164–186. Springer, 2017.
- [25] Miguel Castro, Barbara Liskov, et al. Practical byzantine fault tolerance. In *OSDI*, volume 99, pages 173–186, 1999.
- [26] Urban Malc. Zasnova in razvoj rešitve za dinamično odkrivanje mikrorstitev v oblčnih arhitekturah. Diplomaska naloga, Fakulteta za in računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani, 2017.
- [27] Satoshi Nakamoto. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system.