

Poglavje 1

Uvod v modeliranje računalniških omrežij

Računalniška omrežja so v zadnjih štirih desetletjih izrazito napredovala tako z vidika izboljšanja *zmogljivosti*¹ (angl. *performance*), kot tudi z vidika izboljšanja *zanesljivosti*² (angl. *reliability*) njihovega delovanja. Pod napredkom na področju zmogljivosti imamo v mislih predvsem stalno povečevanje hitrosti prenosa podatkov in zagotavljanje pravočasnega prihajanja podatkov na ponorne točke omrežja v željenem vrstnem redu, pod napredkom na področju zanesljivosti pa vse večjo *robustnost* in posledično *dosegljivost*³ (angl. *availability*) računalniških omrežij. Slednjo merimo z deležem časa nahajanja omrežja v delujočem stanju gledano preko daljšega časovnega obdobja, matematično pa jo ponazorimo z izrazoma

$$T_{total} = T_u + T_d, \quad (1.1)$$

$$A_{network} = \frac{T_u}{T_{total}} = \frac{T_u}{T_u + T_d}, \quad (1.2)$$

kjer $A_{network}$ predstavlja metriko ali mero za oceno dosegljivosti, T_u količino časa v katerem se računalniško omrežje nahaja v delujočem stanju (angl. *uptime*), T_d količino časa v katerem se računalniško omrežje nahaja v nedelujočem stanju (angl. *downtime*), T_{total} pa časovni interval opazovanja računalniškega omrežja. Večina ponudnikov spletnih storitev (angl. *internet service provider* - ISP) si za cilj postavlja 99,999% dosegljivost svojega omrežja ali tako imenovano dosegljivost „petih devetic“. V primeru enoletnega opazovanja računalniškega omrežja bi to pomenilo nekaj več kot 5 minut dopustnega nedelujočega stanja omrežja. Glede na to, da na odpovedi računalniških omrežij vplivajo poleg notranjih faktorjev (npr. odpovedi naprav in prenosnih medijev ter nadgradenj v

¹Zmogljivost (SSKJ) - sposobnost česa, določena z največjo količino izdelkov, največjim številom dejanj, ki jih zmore v določenem času.

²Zanesljiv (SSKJ) - na katerega se da zanesti.

³V Računalniškem slovarčku (<https://dis-slovarcek.ijs.si/>) je angleški pojem *network availability* preveden kot *razpoložljivost omrežja*.

2 POGLAVJE 1. UVOD V MODELIRANJE RAČUNALNIŠKIH OMREŽIJ

omrežju) tudi zunanji faktorji (npr. požari, nevihte, izpadi električne energije, naravne nesreče, vdori v omrežja itd.), večina ISP in MSP (angl. *mobile service provider*, *mobile network operator*) ponudnikov omenjenega cilja v praksi ne dosega.

Računalniška omrežja postajajo za uporabnike vse bolj „nevidna“, saj uporabnikovo delo temelji na *storitvah*, ki mu jih računalniška omrežja s svojim delovanjem zgolj omogočajo. V kontekstu povedanega je uporabnik običajno pozoren le na *dosegljivost storitve* ($A_{service}$). Slednje ne smemo enačiti z *dosegljivostjo omrežja* ($A_{network}$), ki je načeloma vsaj tako velika kot dosegljivost storitve, praviloma pa večja, saj kljub normalnemu delovanju omrežja posamezna storitev ni nujno venomer dosegljiva (npr. nedelovanje strežnika elektronske pošte, bančnega avtomata, spletnega strežnika itd.). Omenjeno relacijo lahko zapišemo z izrazom

$$A_{service} \leq A_{network}. \quad (1.3)$$

Uporabnika tehnične značilnosti same izvedbe priklopa v omrežje vse manj zanimajo, je pa pozoren na predhodno omenjena faktorja zmogljivosti in zanesljivosti delovanja. Prvega uporabnik največkrat ocenjuje na deklarirani hitrosti pretoka podatkov do njega (angl. *download speed*⁴) in od njega (angl. *upload speed*⁵). Obe hitrosti merimo v bps (angl. *bits per second*⁶), ali še pogostejše v Mbps (angl. *megabits per second*⁷) in v Gbps (angl. *gigabits per second*⁸). Obe metriki v resnici ne definirata hitrosti prenosa podatkov⁹, temveč zgolj serializacijske zmožnosti uporabniške priključne točke, predstavljata pa nam zadovoljivo oceno za hitrost prenosa podatkov od uporabnika v zunanje omrežje in iz zunanjega omrežja k uporabniku. Natančneje bomo hitrost prenosa podatkov definirali v enem od naslednjih poglavij. Zanesljivost delovanja omrežja uporabnik največkrat ocenjuje s predhodno že opisano dosegljivostjo omrežja ($A_{network}$) in s številom napak, do katerih prihaja pri prenosu podatkov.

K hitremu napredku zanesljivosti in zmogljivosti delovanja računalniških omrežij v zadnjih desetletjih so doprinesle tako izboljšane tehnologije prenosa podatkov po prenosnih medijih (npr. optične in brezžične mobilne tehnologije), kot tudi vsebinske izboljšave protokolov in postopkov usmerjanja ter njihove vse hitrejše strojne izvedbe. Ključni doprinosi k razvoju smo prispevali tudi uporabniki, ki smo ponujene storitve sprejeli in s tem razvoj preko cene naročnine komunikacijskih storitev tudi posredno financirali.

⁴Prihodna hitrost prenosa podatkov oziroma hitrost prenosa podatkov proti uporabniku.

⁵Odhodna hitrost prenosa podatkov oziroma hitrost prenosa podatkov od uporabnika.

⁶Število prenešenih bitov na sekundo.

⁷Število prenešenih milijonov bitov na sekundo.

⁸Število prenešenih milijard bitov na sekundo.

⁹Hitrost se izraža v razdalji, ki jo prepotuje nek objekt v opazovanem časovnem intervalu (npr. v km/h).

1.1 Osnovni model komunikacijske poti

V pričujočem delu bomo obravnavali *metode modeliranja*¹⁰ pretoka podatkov po računalniških omrežjih. Pretok podatkov v omrežju je lahko z vidika uporabnika *običajen* (hitrost prenosa podatkov je približno enaka deklarirani hitrosti, ki jo uporabnik pričakuje), ali pa *degradiran* (upočasnjen), ker je v omrežju preveč podatkov in posledično na posameznih točkah na poti prihaja do zastojev zaradi preobremenjenosti ali zasičenosti posameznih sestavnih delov omrežja. S samimi odpovedmi omrežja in s tem posledično ničelnim pretokom podatkov se v pričujočem delu ne bomo ukvarjali.

Za potrebe modeliranja ter same realizacije omrežij na tem mestu uvedemo pojem *komunikacijske poti*. Posamezno komunikacijsko pot sestavljajo naslednje vrste gradnikov:

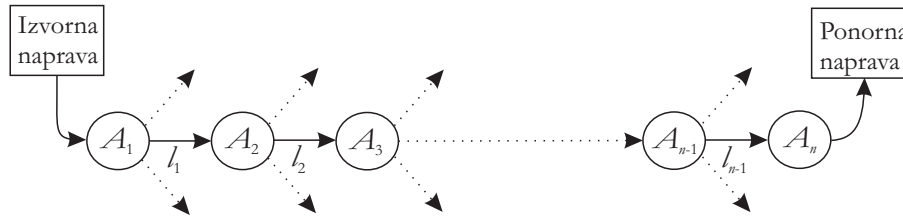
- *izvor podatkov*: pod tem pojmom smatramo napravo, ki je podatke z znanim naslovnikom (ponorom) poslala v omrežje;
- *pot po omrežju*: pod tem pojmom smatramo zaporedje *fizičnih prenosnih medijev*¹¹ in *omrežnih naprav* (npr. usmerjevalnikov), preko katerih potujejo podatki od izvora do ponora;
- *ponor podatkov*: pod tem pojmom smatramo napravo, ki naj bi jo podatki dosegli;

Na sliki 1.1 je predstavljena tipična komunikacijska pot, ki je sestavljena iz izvirne ter ponorne naprave, fizičnih prenosnih medijev (l_1 do l_{n-1}) in omrežnih naprav (A_1 do A_n). Na nekaterih omrežnih napravah v omrežju je potrebno podatke usmeriti na ustrezno destinacijo (preko izbranega fizičnega prenosnega medija proti izbrani omrežni napravi), kar naj bi zahtevo v časovnem smislu poteka poti približalo ponorni napravi (naslovniku). Za slednje je zadolžena „inteligenca“ usmerjanja, ki je vgrajena v večino omrežnih naprav. Poudariti je potrebno, da se pot po omrežju med izvorom in ponorom lahko glede na obremenitve posameznih fizičnih prenosnih medijev in omrežnih naprav skozi čas spreminja. Tudi za slednje poskrbi vgrajena „inteligenca“ usmerjanja v posameznih omrežnih napravah.

V tekstu smo do sedaj kot osnovni predmet prenosa omenjali *podatke*. Na tem mestu iz širokega in ohlapnega pojma prenosa podatkov preidimo na dejstvo, da se po omrežju prenašajo *paketi*, sestavljeni iz podatkovnih in kontrolnih bitov. Posamezni paket nam bo v nadaljevanju pričujočega dela z vidika modeliranja predstavljal *osnovno nedeljivo entiteto*, ki ji moramo zagotoviti nemoten in čimhitrejši prenos po omrežju od izvirne do ponorne naprave.

¹⁰Modeliranje (SSKJ) – prenos lastnosti, značilnosti raziskovanega predmeta na podoben predmet, narejen po določenih pravilih.

¹¹Fizični prenosni medij – žična ali brezžična povezava, po kateri lahko prenašamo podatke.



Slika 1.1: Splošni model komunikacijske poti med izvorom in ponorom.

1.2 Zahteve, strežniki, čakalne vrste

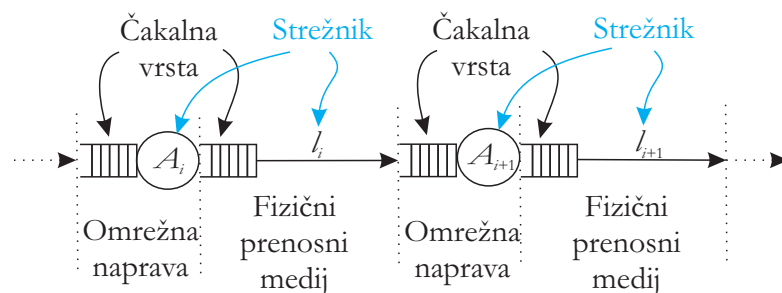
Osnovni gradniki modeliranja računalniških omrežij v domeni pričujočega dela so *zahteve*, *strežniki* in *čakalne vrste*. Našteti pojmi izhajajo iz področja *teorije strežbe* oziroma *teorije čakalnih vrst* (angl. *queuing theory*) [1], njihovi pomeni pa so sledeči:

- pod pojmom *zahteve* si predstavljamo osnovno nerazčlenljivo entiteto, ki potuje od neke izvorne do neke ponorne točke; z vidika računalniških omrežij bodo te zahteve *paketi*, v katere so vpeti podatkovni in kontrolni biti; v splošno namenskih modelirno - simulacijskih programskih orodjih je zahteva poimenovana tudi z izrazoma *transakcija* ali *entiteta*;
- pod pojmom *strežnika* si predstavljamo posamezen segment omrežja, ki ga zahteva (paket) za določen čas zasede; v tem času strežnik *postreže* oziroma *servisira* zahtevo; strežniki so lahko tako fizični prenosni mediji (zahteve zavzamejo določene razpoložljive časovne rezine prenosnega medija v odvisnosti od njegove propustnosti¹² (angl. *throughput*)), kot tudi omrežne naprave; na mnogih od njih poteka procesiranje - preusmerjanje zahtev v ciljne segmente omrežja; v splošno namenskih modelirno - simulacijskih programskih orodjih je strežnik pogosto poimenovan z izrazom *resurs*;
- pod pojmom *čakalne vrste* si predstavljamo pomnilniški vmesnik (angl. *buffer*), v katerem zahteva *čaka*, da bo postrežena (obdelana, servisirana ali sprocesirana) na strežniku; v računalniških omrežjih do porajanja čakalne vrste lahko pride tako pred vsako omrežno napravo (npr. čakanje na izvedbo usmerjanja paketa pred usmerjevalnikom), kot tudi ob izstopu iz omrežne naprave pred vstopom na fizični prenosni medij (čakanje na proste časovne rezine za odpošiljanje paketa po fizičnem prenosnem mediju); zgodovinsko gledano smo bili v preteklosti priče omembe vrednega polnjenja čakalnih vrst s paketi predvsem na vhodni strani omrežnih naprav (angl. *input queue*, *ingress queue*, *ingoing interface*), dandanes pa se

¹²Propustnost naprave – število nerazčlenljivih entitet, ki jih je naprava zmožna obdelati (npr. prenesti) v opazovanem časovnem intervalu.

omembe vredno polnjenje vrst odvija predvsem na izhodni strani omrežnih naprav (angl. *output queue*, *egress queue*, *outgoing interface*); do omenjene spremembe je privedlo povečanje hitrosti delovanja omrežnih naprav s prenosom logike iz programske v strojno izvedbo;

Glede na povedano bi tako lahko vsako posamezno omrežno napravo in vsak posamezni fizični prenosni medij na komunikacijski poti iz slike 1.1 opcijsko dopolnili s čakalno vrsto, kot je to predstavljeno na sliki 1.2.



Slika 1.2: Razvrstitev čakalnih vrst pred omrežnimi napravami in pred fizičnimi prenosnimi mediji.

1.3 Modeliranje in simulacije toka paketov v računalniških omrežjih

Primarni namen pričujočega dela je pregled metod za postavljanje *modelov računalniških omrežij* z namenom izvajanja *simulacij dinamike toka paketov* v omrežjih. Glede na simulacijske rezultate modelu po potrebi zvečujemo zmogljivosti posameznih strežnikov (fizičnih prenosnih medijev in omrežnih naprav), s čimer praviloma povečujemo hitrost delovanja omrežja, lahko pa strežnikom zmogljivosti tudi zmanjšujemo, s čimer dinamiko v omrežju praviloma upočasnjujemo. Prva aktivnost omrežju finančno ceno zvišuje, druga pa mu jo znižuje. Pod spreminjanjem zmogljivosti sestavnih delov omrežja - strežnikov imamo v mislih spreminjanje procesnih zmognosti omrežnih naprav, spreminjanje tipov fizičnih prenosnih medijev, spreminjanje velikosti pomnilniških vmesnikov (čakalnih vrst), razširjanje omrežnih naprav, če so le te *skalabilne*¹³, itd.

Glavni cilji modeliranja računalniških omrežij so sledeči:

- določanje odzivanja modela omrežja v normalnih in nenormalnih pogojih delovanja (npr. ob nepredvidenih dogodkih);
- izvajanje natančnega uglaševanja modela omrežja (angl. *fine tuning*);

¹³Skalabilen sistem – sistem, ki ga je z vidika njegovih sestavnih delov - resursov možno razširiti tako, da je zmožen opravljanja večje količine dela.

- izvajanje IF-THEN analiz v modelu omrežja;
- iskanje kompromisa med ceno in zmogljivostjo realnega omrežja, ki sta sprejemljivi tako za končnega uporabnika, kot tudi za lastnika omrežja (upravljalca ter ponudnika storitev);

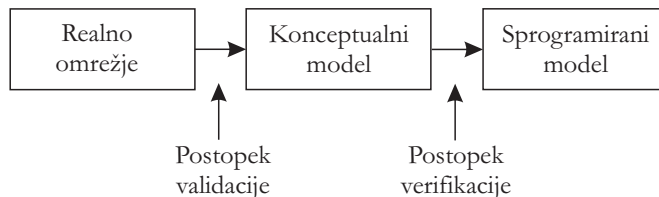
Vse ugotovitve, ki jih pridobimo na osnovi modela omrežja in simulacij nad njim, lahko na naslednjem koraku uporabimo pri gradnji novega omrežja ali pri spremembah v že obstoječem omrežju. Modeliranje je nepogrešljivo pri snovanju novih omrežij, manj pa je vidna njegova vloga pri spremembah v že obstoječih omrežjih. Ker smo v slednjih soočeni z realnim uporabniškim prometom, običajno sprememb v omrežju zaradi možnega nezadovoljstva uporabnikov ne realiziramo vse dotlej, dokler svojih hipotez v zvezi s posledicami sprememb nismo potrdili na osnovi modelov in simulacij.

1.3.1 Terminologija modeliranja računalniških omrežij

Osnovni terminološki pojmi na področju modeliranja računalniških omrežij so sledeči [2]:

- *opazovano omrežje*: pod tem pojmom smatramo že obstoječe realno omrežje, ali omrežje, ki je šele v fazi načrtovanja (omrežje še ni realizirano);
- *komponente omrežja*: pod tem pojmom smatramo množico vseh sestavnih delov, ki sestavljajo komunikacijske poti v opazovanem omrežju; pod sestavnimi deli imamo v mislih fizične prenosne medije in omrežne naprave z vsemi njihovimi tehničnimi karakteristikami;
- *stanje omrežja*: pod tem pojmom smatramo množico vseh tipov zahtev (paketov), njihovo število in njihove pozicije v omrežju v neki opazovani časovni točki t ; stanje omrežja se v realnih omrežjih izredno hitro spreminja in njegov natančen posnetek je izredno težko narediti;
- *modeliranje omrežja*: pod tem pojmom smatramo delovni proces, ki nas pripelje do *modela* bodisi realnega oziroma že obstoječega omrežja, ali pa do modela omrežja, ki ga želimo z njegovo pomočjo načrtovati;
- *model omrežja*: pod tem pojmom smatramo opis komponent sistema in formalni opis njihove medsebojne povezanosti (opis relacij med omrežnimi napravami in fizičnimi prenosnimi mediji);
- *simulacija na modelu omrežja*: pod tem pojmom smatramo postopke navideznega izvajanja strežbe (izvajanje modela), ki nam dajo kvantitativne rezultate o dinamiki pretoka zahtev (paketov); model izvajamo avtomatizirano s pomočjo temu namenjenih računalniških programskih orodij, prožimo pa ga lahko z različnimi začetnimi pogoji (npr. z uporabo različno zmogljivih komponent omrežja, različnih topoloških konfiguracij komponent omrežja ter različnih vhodnih bremen - številom in porazdelitvami porajanja zahtev (paketov), ki vstopajo v model);

- *validacija in verifikacija modela omrežja*: na sliki 1.3 je predstavljen princip gradnje modela ob predpostavki, da opazovano realno omrežje že obstaja; na prvem koraku postavimo *konceptualni model omrežja* (v njem so definirane komponente omrežja in njihova povezanost), na drugem koraku pa konceptualni model prenesemo v programsko okolje (ga sprogramiramo, zgradimo v grafičnem programskem okolju itd.); pod pojmom *validacije*



Slika 1.3: Zaporedje gradnje modela s postopkoma validacije in verifikacije.

smatramo izvedbo postopkov preverjanja skladnosti konceptualnega modela z realnim omrežjem, pod pojmom *verifikacije* pa izvedbo postopkov preverjanja skladnosti sprogramiranega modela s konceptualnim modelom; ob predpostavki, da realno omrežje ni prekompleksno, je pomemben predvsem postopek validacije, saj izkušnje kažejo, da se večina napak v modele prikrade v fazi gradnje konceptualnega modela; s postopkoma validacije in verifikacije vzpostavimo zaupanje v konsistentnost modela in posledično tudi v njegove simulacijske rezultate;

- *simulacijska hipoteza*: pod tem pojmom smatramo *predpostavljene simulacijske rezultate*, do katerih naj nas bi pripeljala simulacija ob vnaprej določenih začetnih pogojih (npr. količini bremena v omrežju, zmogljivosti posameznih komponent omrežja itd.); izvedba simulacije na osnovi modela je brez simulacijske hipoteze v večini primerov nesmiselna; uporabna je le v primeru validacije in verifikacije modela; če bi v modelu npr. povečali zmogljivost posameznih omrežnih naprav, bi bila simulacijska hipoteza predpostavka, da se bo pretok zahtev (paketov) skozi omrežje posledično pohitril; v mislih imamo torej predpostavke, povezane s spremembami značilnosti ali parametrov posameznih komponent omrežja;

Vzpostavljeni konceptualni model je lahko popolnoma verna slika opazovanega omrežja ali pa pogostejše njegova posplošitev oziroma približek. Glavna prednost modela je, da nam omogoča hitre spremembe strukture (*arhitekture* in *parametrov komponent omrežja*) opazovanega omrežja in napove posledice, ki jih imajo te spremembe na pretok zahtev po omrežju.

Po postavitvi modela sledi njegova *validacija*. Izvedemo jo tako, da modelu na vходу dostavimo breme, za katerega vemo, kako se nanj odzove realni (že obstoječi) sistem, oziroma namesto slednjega uporabimo željene odzive še neobstoječega sistema. Če model izkazuje vnaprej določeno stopnjo ujemanja z

realnim oziroma željenim odzivom, je validacija uspešna, zato takšnemu modelu lahko (bolj ali manj) zaupamo.

Pod pojmom *simulacije* smatramo „izvajanje“ modela, ki nam ponazori dinamiko paketov v opazovanem modeliranem omrežju. Splošneje bi lahko zapisali, da je simulacija po eni plati orodje za evaluacijo zmogljivosti (angl. *performance*) opazovanega omrežja pri različnih konfiguracijah in različnih uporabljениh komponentah omrežja, po drugi plati pa simulacijo lahko smatramo kot orodje, ki nam omogoči analizo ustreznosti dinamike in pravilnosti odzivanja modela opazovanega omrežja. Simulacija namreč lahko pokaže, da dinamika v sistemu ni ustrezna in se izkaže kot nepravilna.

Na tem mestu lahko postavimo odgovor na vprašanje, čemu v splošnem uporabljati modeliranje in simulacije. Uporabljamo ju za *analizo pravilnosti delovanja* in *analizo zmogljivosti delovanja* opazovanega sistema. V kontekstu računalniških omrežij bi bil primer prve analize preverjanje *pravilnosti delovanja novo zasnovanih protokolov*, primer druge analize pa iskanje *ozkih grl* (angl. *bottleneck*) v omrežjih, ki so v večini primerov vzroki za upočasnjevanje toka paketov na posamezni komunikacijski poti. Pod pojmom ozkega grla smatramo komponento v omrežju (fizični prenosni medij ali omrežno napravo), pred katero prihaja zaradi njene premajhne strežne zmogljivosti do prekomernega polnjenja čakalnih vrst in s tem posredno do prekomernega čakanja ali celo izgubljanja zahtev (paketov).

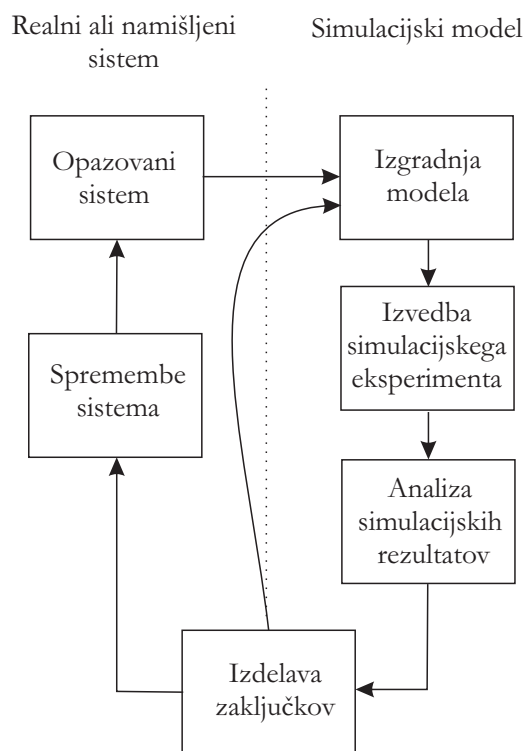
V pričujočem delu bomo obravnavali simulacije diskretnih dogodkov (angl. *discrete event simulation*), saj bodo osnovne entitete opazovanja zahteve (paketi), ki jih lahko glede na njihove čase porajanja in njihovo naravo (velikost in tip) obravnavamo kot diskretne entitete.

Na sliki 1.4 je predstavljen *ciklični proces simulacijske analize* [2]. Cikel se začne pri sistemu, ki ga opazujemo (blok „Opazovani sistem“ levo zgoraj), sledijo pa izgradnja modela, izvedba posameznega simulacijskega eksperimenta, analiza simulacijskih rezultatov, izdelava zaključkov o opazovanem sistemu, odtod pa z eventualnimi spremembami dopolnimo opazovani sistem in/ali njegov model. Za vse faze cikla razen izvedbe simulacijskega eksperimenta je zadolžen človek.

1.3.2 Koraki za izgradnjo cikličnega procesa simulacijske analize

Simulacijski cikel temelji na *komponentah omrežja*, *vhodnih spremenljivkah modela omrežja*, *zmogljivostnih metrikah* in nenazadnje na *povezavah* med komponentami omrežja [2]. Pod komponentami omrežja smatramo strežnike in njihove čakalne vrste (fizične prenosne medije in omrežne naprave), pod vhodnimi spremenljivkami npr. intenzivnosti porajanja zahtev in intenzivnosti strežnih procesov posameznih strežnikov, pod zmogljivostnimi metrikami npr. povprečni čakalni čas v opazovani vrsti ali maksimalna dolžina vrste, pod povezavami pa način povezovanja komponent omrežja. Potrebni koraki za izgradnjo cikličnega procesa simulacijske analize so sledeči:

- identifikacija opazovanega omrežja in problemov, ki se v njem že porajajo,



Slika 1.4: Grafični prikaz cikličnega procesa simulacijske analize.

ali jih v njem pričakujemo v prihodnosti;

- formulacija opazovanega omrežja in problema: potrebno je postaviti meje opazovanega omrežja, definirati zmogljivostne metrike, ki bodo služile kvantitativnemu ocenjevanju različnih konfiguracij omrežja, zasnovati različne konfiguracije omrežja, ki se jih bo ocenjevalo in določiti ciljno publiko, ki ji bodo rezultati analize predstavljeni;
- zbiranje podatkov o opazovanem omrežju: na tem mestu imamo v mislih podatke željenih omrežnih parametrov, po drugi strani pa tudi podatke (vhodne spremenljivke) o vseh komponentah, ki tvorijo omrežje; potrebno je identificirati vse variabilne ali naključne faktorje v opazovanem sistemu; večina omrežij se sooča s stohastičnostjo¹⁴ vhodnih spremenljivk, kot je npr. intenzivnost porajanja prometa v omrežju;
- formulacija in razvoj modela: potrebno je zgraditi mrežni diagram omrežja, s čimer identificiramo tok zahtev po modelu;

¹⁴Stohastičnost - lastnost procesa, v katerem se dogodki porajajo naključno.

- validacija in verifikacija modela: potrebno je izvesti primerjavo dinamike simulacije ob vnaprej podanih vhodih z definiranim vplivom z realnimi ali željenimi karakteristikami opazovanega omrežja;
- dokumentiranje modela zaradi kasnejših nadgradenj: potrebno je natančno opisati vse predhodno našteje korake;
- izdelava simulacijskega načrta: potrebno je zasnovati serijo simulacijskih eksperimentov, ki naj bi vodili do izboljšanja zmogljivosti ali odprave ozkih grl in problemov v omrežju; pozorni moramo biti na število ponovitev simulacijskih eksperimentov v razmerah, ko imamo opravka z variabilnostjo in naključnostjo vhodnih spremenljivk; v tem primeru mora biti število eksperimentov večje (običajno od 3 do 5 ponovitev);
- določitev začetnih in robnih pogojev simulacij: s tem imamo v mislih npr. začetno število zahtev v omrežju, opsijsko variabilnost vhodnih spremenljivk (npr. intenzivnosti strežbe), časovno dolžino simulacijskega eksperimenta, čas „ogrevanja“ simuliranega omrežja, način izbire pseudo naključnih števil, ki nam pomagajo pri izbiri vrednosti variabilnih vhodnih spremenljivk itd.;
- izvajanje simulacijskih eksperimentov;
- interpretacija simulacijskih rezultatov: na tem koraku moramo numerične izsledke pridobljene s simulacijo pretvoriti v zaključke, ki bodo v pomoč pri izdelavi sklepa o morebitnih spremembah realnega omrežja in/ali njegovega modela;
- izdelava sklepa o morebitnih spremembah opazovanega realnega omrežja ali njegovega modela;

1.3.3 Prednosti in slabosti modeliranja in izvajanja simulacij

Prednosti, ki jih prinaša cikel modeliranja in simulacij, lahko strnemo v naslednje alineje:

- možnost boljšega razumevanja zakonitosti dinamike v opazovanemu omrežju;
- možnost testiranja hipotez o dinamiki v omrežju;
- možnost analize običajne dinamike v omrežju, dinamike v *stresnih razmerah* (ob zmanjšanju zmogljivosti komponent omrežja) in dinamike ob *prekomernemu zvečanju bremena* (zahtev v omrežju);
- identifikacija *vodilnih vhodnih spremenljivk*, glede na njihov vpliv na simulacijske rezultate;
- identifikacija ozkih grl v omrežju;

- možnost uporabe različnih ocenjevalnih metrik;

Slabosti omenjenih postopkov so predvsem v dodatnem potrebnem času in razpoložljivosti ustreznih resursov (npr. ljudi z znanjem, programskih orodij itd.), kar posledično lahko vodi v višje stroške povezane z nadgradnjo ali zasnovo opazovanega omrežja.

1.4 Razumevanje pojma računalniških omrežij

V predhodnih razdelkih smo se sklicevali na pojem *računalniškega omrežja*, pri čemer imamo pod slednjim pojmom v mislih izredno široko paletu omrežij. Mednje sodijo splošnejša kot so *fiksna omrežja* ISP ponudnikov (običajno so razvejana v nekem lokalnem okolju), *hrbtenična fiksna omrežja* (za primer lahko omenimo prekooceanske optične povezave), *mobilna omrežja* MSP ponudnikov (običajno so razvejana na nacionalnem nivoju), pa tudi specifičnejša kot so npr. deloma zaprta omrežja na potniških letalih, hibridna omrežja energetskih ponudnikov, hibridna omrežja centrov za izvajanje kontrole zračnega prometa in še bi lahko naštevali. Vsem naštetim omrežjem sta skupni problematiki zagotavljanja dovolj hitrega in zanesljivega prenosa podatkov in o njunem zagotavljanju govorimo v pričujočem delu.

1.5 Pregled dela

V drugem poglavju pričujočega dela predstavimo osnove teorije strežbe in pomen njene uporabe na področju *analize zmogljivosti delovanja* računalniških omrežij. V tretjem in četrtem poglavju se posvetimo običajnim in barvnim Petrijevim mrežam, s pomočjo katerih izvajamo *analizo pravilnosti delovanja* računalniških omrežij. V petem, šestem in sedmem poglavju predstavimo specifične kvantitativne in kvalitativne metrike za ocenjevanje zmogljivosti delovanja omrežij, v osmem poglavju pa predstavimo osnove programskega razvojnega okolja OMNeT++. Predstavljena snov ni ozko usmerjena samo na problematiko računalniških omrežij, temveč so predstavljene osnove uporabne tudi pri modeliranju in simulacijah preostalih neračunalniških strežnih sistemov¹⁵.

1.6 Zaključek uvodnega poglavja

Modeliranje različnih vrst sistemov in izvajanje simulacij nad modeli je prav gotovo eno od področij računalništva, ki je v današnjem času do neke mere zapostavljeno. Na mnogih področjih, kjer je eksperimentiranje v realnem okolju lahko nemogoče, prepovedano, prenevarno, cenovno predrago ali časovno potratno, je pogosto modeliranje in izvajanje simulacij predpogoj za doseganje optimalnega delovanja opazovanega sistema. Med takšna področja sodijo na primer modeli pretoka entitet v cestnem ali železniškem prometu, modeli

¹⁵Tekst je pordečen, ker se vsebina poglavij lahko še spremeni.

12 POGLAVJE 1. UVOD V MODELIRANJE RAČUNALNIŠKIH OMREŽIJ

delovanja strežno orientiranih sistemov v poslovnih sistemih (npr. v bankah, trgovinah, restavracijah, na smučiščih itd.), modeliranje strežbe, ki jo izvajajo računalniški sistemi (npr. spletne trgovine, poštni strežniki itd.), modeliranje izvajanja opravil v specifičnih poslovnih sistemih (npr. v zdravstvu in servisnih dejavnostih) itd.

Literatura

- [1] N. C. Hock, *Queuing Modelling Fundamentals*. John Wiley & Sons, Chichester, Anglija, 1996.
- [2] M. Anu, “Introduction to modeling and simulation,” in *Proceedings of the 29th conference on Winter simulation* (S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers, and B. L. Nelson, eds.), pp. 7–13, 1997.