

Poglavje 5

Metrike in orodja za ocenjevanje zmogljivosti računalniških omrežij

V pričujočem poglavju si bomo ogledali nekaj ključnih metrik za ocenjevanje zmogljivosti računalniških omrežij, na katere moramo biti pozorni tako pri snovanju omrežij, kot tudi pri samem spremljanju omrežnega prometa v že obstoječih omrežjih. Ogledali si bomo pojme *latence*, *števila skokov paketa*, *zgostitve prometa* in *strukturne neuravnoteženosti resursov*, obenem pa tudi navedli vrste programskih in strojnih orodij, ki nam olajšajo delo pri ocenjevanju zmogljivosti delovanja omrežij.

5.1 Latenca v računalniških omrežjih

Za začetek si oglejmo splošno definicijo pojma *latence*, povzeto po Wikipediji.

Definicija 17 *Latenca je čas, ki preteče od izdaje uporabniške zahteve do prejema kakršnegakoli odziva sistema, od katerega odziv pričakujemo.*

Z vidika uporabnika računalniškega sistema so tipični primeri latence čas nalaganja spletne strani, čas zagona programa, čas nalaganja operacijskega sistema, čas potovanja elektronske pošte od pošiljatelja do naslovnika itd. V splošnem velja, da je celotni čas latence zahteve sestavljen iz časa njenega prenosa do ponora, časa njenega čakanja v ponoru na obdelavo, časa njene obdelave - priprave odgovora na zahtevo in časa prenosa odgovora od ponora do prvotnega izvora zahteve. *Omrežno latenco* lahko definiramo na sledeče različne načine:

- z vidika *posameznega paketa* je latenca čas, ki ga potrebuje paket za pot od izvora (pošiljatelja) do ponora (naslovnika);
- z vidika *posamezne zahteve* je latenca čas, ki ga potrebuje zahteva za pot od izvora do ponora; zahteva je običajno sestavljena iz večjega števila paketov;
- z vidika *posamezne zahteve in odgovora nanjo*, je latenca sestavljena iz časa, ki ga potrebuje zahteva za pot od izvora do ponora, časa njenega čakanja na obdelavo na ponorni točki, časa za pripravo odgovora na strani ponora in časa, ki ga odgovor potrebuje za pot od ponora nazaj do izvora (angl. *round trip delay time* - RTD ali *round trip time* - RTT);

V pričujočem delu se bomo naslonili na prvo od treh definicij, kar pomeni, da omrežna latenca definira čas, ki mine med oddajo paketa s strani izvora v omrežje in prejemom tega paketa s strani ponora. Merimo jo v mili sekundah (*ms*), pogojena pa je s sledečimi *vplivnimi faktorji*:

- *z dolžino poti med oddajnikom in sprejemnikom*: daljša kot je pot, ki jo mora paket prepotovati, daljša bo latenca;
- *z vrsto prenosnih medijev na poti*: večje hitrosti prenosa omogočajo prenosni mediji glede na svojo naravo, krajša je latenca;
- *s pasovnimi širinami na prenosnih medijih*: večja kot je pasovna širina prenosnega medija, krajša je latenca;
- *z zanesljivostjo prenosnega medija*: manjše kot je število napak v omrežju (npr. izgub paketov), krajša je latenca;
- *z hitrostjo delovanja aktivnih naprav v omrežju*: hitrejše deluje posamezna aktivna naprava na komunikacijski poti, krajša je latenca;
- *s količino prometa*: več je prometa v omrežju, dlje bodo paketi čakali v čakalnih vrstah in posledično je daljša tudi latenca;
- *s porajanjem občasnih motenj*: tipičen primer občasnih motenj, ki podaljšajo latenco, so npr. vremenske motnje, ki lahko znižajo zmogljivostne karakteristike prenosnih medijev;

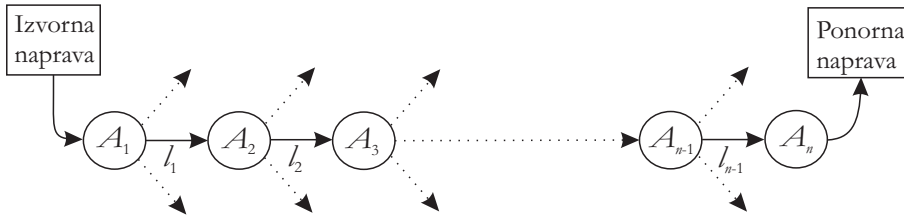
Glede na opazovani izvor in ponor se latenca običajno skozi čas spreminja zaradi časovne spremenljivosti vplivnih faktorjev ali eventuelne spremembe komunikacijske poti paketa od izvora do ponora, ki jo definirajo postopki usmerjanja. Za določanje latence in njena merjenja obstajajo javno dostopni standardi (npr. RFC1242, RFC2544, itd.).

5.1.1 Primer definicije omrežne latence

Kanadski proizvajalec omrežnih produktov RuggedCom Inc., ki ga je kasneje kupilo nemško podjetje Siemens, kot eden prvih proizvajalcev vpelje matematično notacijo izračuna ocene omrežne latence posameznega paketa [21] po izrazu

$$L_{Total} = \sum_{i=1}^n (L_{SF_i} + L_{SW_i} + L_{Q_i}) + \sum_{i=1}^{n-1} L_{WL_i}, \quad (5.1)$$

pri čemer n predstavlja število aktivnih naprav na komunikacijski poti, $n - 1$ pa število prenosnih medijev, kot je to predstavljeno na sliki 5.1. Pomeni preo-



Slika 5.1: Grafični prikaz komunikacijske poti med izvorom in ponorom.

stalih spremenljivk iz izraza (5.1) so upoštevajoč proizvajalčevo dokumentacijo povzeto po viru [21] sledeči:

- L_{SF} - *shranjevalna in posredovalna latenca* (angl. *store and forward latency*) izvira iz priprave paketa na obdelavo na aktivni napravi in na njegovo odpravo; naprava del latence doprinese s časom potrebnim za prenos prejetega paketa v pomnilnik, del latence pa s prenosom paketa na ustrezno izhodno vodilo naprave; oba časovna doprinosa k končni latenci zapišemo s spremenljivko L_{SF} , ki je definirana po izrazu

$$L_{SF} = \frac{FS}{BR}, \quad (5.2)$$

pri čemer je FS velikost obravnavanega paketa v bitih in BR bitna hitrost odhodnega prenosnega medija v bitih na sekundo¹; pri paketu velikosti 1500 byte-ov (največja efektivna velikost Ethernet paketa) in prenosnem mediju 100 Mbps je tako L_{SF} 120 μs , pri paketu velikosti 64 byte-ov (najmanjša efektivna velikost Ethernet paketa) in prenosnem mediju 1 Gbps pa je L_{SF} 0.5 μs ;

- L_{SW} - *tovarniška latenca aktivne naprave* (angl. *switch fabric latency*) je čas, ki ga k skupni latenci doprinese programska ali strojna realizacija

¹Izraz (5.2) povzet neposredno po viru [21] v resnici predstavlja zgolj čas oddaje paketa na odhodno vodilo.

usmerjevalne logike, ki jo opravlja aktivna naprava; omenjeni proizvajalec svojim napravam s strojno realizacijo usmerjanja spremenljivki L_{SW} pripiše vrednost $5.2 \mu s$;

- L_{WL} - *latenca ožičenja* (angl. *wireline latency*) je čas, ki ga doprinese k skupni latenci prenos po posameznem fizičnem prenosnem mediju, ki povezuje dve aktivni napravi; če je prenosni medij npr. optično vlakno, lahko posamezni biti po njem potujejo z efektivno hitrostjo dveh tretjin hitrosti svetlobe ($\frac{2}{3} * 3 * 10^8 m/s$); predvsem pri daljših povezavah ne smemo zanemariti vpliva dolžine prenosnega medija; pri razdalji prenosa 1000 km in uporabi fizičnega optičnega prenosnega medija, bi tako latenco ožičenja izračunali po izrazu

$$L_{WL} = \frac{s}{v} = \frac{1 * 10^6 m}{\frac{2}{3} * 3 * 10^8 m/s} \approx 5ms, \quad (5.3)$$

pri čemer s predstavlja dolžino poti, v pa potovalno hitrost;

- L_Q - *latenca čakanja* (angl. *queuing latency*) je čas, ki ga v današnjem času paket porabi za čakanje v čakalni vrsti pred njegovim odlaganjem na izhodni prenosni medij; kot smo omenili že v uvodnem poglavju, se je zaradi rasti hitrosti delovanja aktivnih naprav v zadnjih dvajsetih letih glavnina čakalnega časa prenesla iz čakalne vrste iz vhodnega dela aktivne naprave na čakalno vrsto na izhodu aktivne naprave; ob tem ne gre zanemariti vpliva prioritete strežbe paketov, ki lahko omenjeno posplošitev drastično zakomplicira; L_Q zapišemo z izrazom

$$L_Q = NetworkLoad * L_{SF(max)}, \quad (5.4)$$

pri čemer je L_Q povprečna latenca iz naslova čakanja, $NetworkLoad$ procentualni delež maksimalnega možnega bremena prometa, $L_{SF(max)}$ pa L_{SF} največjega možnega paketa (1500 byte-ov), kar pomeni, da je L_Q ocenjena pesimistično;

Zaradi lažje interpretacije pomena izraza (5.1) na tem mestu naredimo enostaven računski zgled izračuna latence za posamezen paket.

Zgled 15 Predpostavimo, da imamo opravka s paketom dolžine 1500 byte-ov, ki potuje do 7.000 km oddaljene lokacije v ZDA pri 50% obremenjenosti omrežja na celotni komunikacijski poti. Na svoji poti obišče 10 aktivnih naprav, vsi prenosni mediji pa so optične narave. Kakšen bo čas potovanja paketa od izvora do ponora?

Rešitev: Na osnovi izraza (5.1) izračunamo vrednost

$$L_{Total}(paket) = \sum_{i=1}^{10} (120\mu s + 5,2\mu s + 60\mu s) + 35ms \approx 35,8ms. \quad (5.5)$$

Iz zgleda je razvidno, da glavnina latence (približno 35 ms) izhaja iz časa, v katerem paket potuje po prenosnih medijih, le manjši del (približno 1 ms) pa iz časa zadrževanja paketa v aktivnih napravah. Seveda pa temu ob zgostitvah prometa ni tako, saj se v tem primeru lahko drastično poveča vpliv posameznega faktorja L_{Q_i} . Do podobnega rezultata, kot smo ga izračunali v pričujočem zgledu, bi prišli, če bi latenco izmerili s kombinacijami ukazov `ping` ter `tracert` (v Linux sistemih `traceroute`), ki ju pozna večina operacijskih sistemov in omogočata opis prepotovane poti z ustreznimi latencami.

5.1.2 Posplošitev definicije latence

Definicijo latence iz predhodnega razdelka lahko posplošimo na tak način, da latenco izenačimo z vsoto časov, ki izhajajo iz sledečih procesov na vsaki aktivni napravi ali omrežni povezavi [22], [23]:

- *procesov propagacije* (angl. *propagation delay*): pod propagacijskim časom smatramo čas potreben za potovanje posameznega bita od ene aktivne naprave do druge; ta čas je odvisen od hitrosti prenosa bita in razdalje med aktivnima napravama; hitrost prenosa merimo v $\frac{m}{s}$ (metrih na sekundo), razdaljo pa v m (metrih); v definiciji prejšnjega razdelka smo se na propagacijski čas sklicevali s spremenljivko L_{WL_i} ;
- *procesov transmisije* ali *serializacije* (angl. *transmission delay*): pod transmijskim časom smatramo čas potreben za odpošiljanje zaporedja bitov, ki jih enega za drugim v ustreznih časovnih rezinah pogojenih s prepustnostjo vodila odlagamo na vodilo; ta čas je odvisen od velikosti paketa v številu bitov in od prepustnosti vodila, ki je podana z enoto *bps* (bitih na sekundo) ali pogostejše v *Mbps* (milijonih bitov na sekundo); transmijski čas bi lahko imenovali tudi za *čas oddaje paketa*; v definiciji prejšnjega razdelka smo se nanj sklicevali s spremenljivko L_{SF_i} ;
- *procesov usmerjanja* (angl. *routing&switching* ali *processing delay*): pod časom usmerjanja smatramo čas potreben za obdelavo paketa na aktivni napravi; v definiciji prejšnjega razdelka smo se nanj sklicevali s spremenljivko L_{SW_i} ;
- *procesov čakanja* (angl. *queuing delay*): pod časom čakanja smatramo čas, ki ga posamezni paket preživi v čakalni vrsti; v definiciji prejšnjega razdelka smo se nanj sklicevali s spremenljivko L_{Q_i} ;

Pomembno vlogo pri skupni latenci predstavlja moment *zadnje milje* (angl. *last-mile latency*, *last mile problem*). Pod njim smatramo tisti delež celotne latence paketa, ki izhaja iz časa porabljenega na komunikacijski poti od naše končne uporabniške točke do zmogljivejšega dela omrežja našega ponudnika internetnih storitev (hrbtenice ponudnika) in časa porabljenega na komunikacijski poti od hrbtenice ponudnika naslovnika do končne točke naslovnika. Običajno ne glede na krajšo fizično razdaljo ta časovni delež ni majhen glede na celotno latenco od izvora do ponora. Povedano drugače, čas (t_1), ki ga porabi paket

Relacija	Razdalja	Idealni čas	Realni čas	RTT
Ljubljana - London	1.228 km	4 ms	6 ms	12 ms
London - New York	5.585 km	19 ms	28 ms	56 ms
New York - San Francisco	4.148 km	14 ms	21 ms	42 ms
New York - Sydney	15.993 km	53 ms	80 ms	160 ms
Obseg ekvatorja	40.075 km	134 ms	200 ms	200 ms

Tabela 5.1: Primeri izračunanih latenc za vzorčne relacije. Razdalja predstavlja zračno razdaljo med lokacijama, idealni čas latence čas dosežen pri prenosu po fizičnem optičnem mediju v vakuumu, realni čas latence čas dosežen pri prenosu po optičnem mediju (vlaknu), RTT pa *round trip time* med lokacijama [23].

za svoje potovanje v začetnem ali končnem delu omrežja, v primerjavi s prepotovano razdaljo (d_1) ni prenosorazmeren celotni latenci (t) glede na celotno razdaljo (d) med izvorom in ponorom paketov. Slednje lahko zapišemo z izrazom

$$\frac{t_1}{d_1} \geq \frac{t}{d}, \quad (5.6)$$

ki z relacijo \geq ponazarja počasnejši prenos paketa na samem začetku ali koncu komunikacijske poti v primerjavi s celotno hitrostjo prenosa gledano preko celotne komunikacijske poti.

V tabeli 5.1 je predstavljenih nekaj konkretnih izračunanih časov latenc. Izračun temelji na dveh idealiziranih predpostavkah in sicer na predpostavki, da je razdalja prenosnega medija med izvorom in ponorom enaka zračni razdalji med lokacijama in na predpostavki, da so čakalni časi paketov ničelni. Vsi rezultati izračunov so zaokroženi na cele milisekunde in ob ničnem pribitku na čas čakanja v vrstah v praksi nedosegljivi. Pri tem „*Idealni čas*“ predstavlja velikost latence pri prenosu podatkov po hipotetičnem optičnem fizičnem mediju v vakuumu, „*Realni čas*“ pa velikost latence pri prenosu podatkov po optičnih vlaknih.

Tipične velikosti latenc od izvora do ponora paketa se v današnjih računalniških omrežjih gibljejo od nekaj *ms* do nekaj 100 *ms*, če se signal prenaša po prenosnih poteh z nosilnimi mediji kot sta bakrena parica ali optično vlakno. V primeru uporabe satelitskih ali brezžičnih povezav so te latence običajno višje. Z vidika uporabnikov so željene latence do 50 *ms*, saj slednje zadostujejo tudi nemotenemu prenosu multimedijskih pretočnih vsebin (angl. *multimedial streaming*).

S porajanjem novih omrežnih storitev pomen omrežne latence narašča. Tipična področja, kjer večja latenca zmanjšuje konkurenčnost uporabnika, so npr. področja spletnih iger, spletnih športnih stav, spletnega borznega posredovanja in algoritmično podprtih trgovalnih orodij (angl. *e-trading*). Kako pereč je ta problem, ponazorimo z naslednjim primerom. Hibernia Networks je eden od večjih lastnikov in upravljalcev optičnih povezav pod Atlantikom, preko katerih poteka komunikacijski promet med Evropo in ZDA. V letu 2011 so navkljub že obstoječim povezavam vložili 400 milijonov USD v polaganje novih optičnih

povezav po optimalnejši poti, ki je skrajšala fizično dolžino že obstoječih optičnih vodil od Londona do New Yorka. Z vložkom so dosegli na račun skrajšanja fizične dolžine povezav v povprečju 5 ms prihranka na propagacijskem delu časa latence. Povedano drugače, je vsaka ms prihranka stala 80 milijonov USD [23].

Predhodno smo že ugotovili, da pri prenosu podatkov na daljše razdalje igra ključno vlogo proces propagacije, ki je omejen s hitrostjo prenosnega medija. Na tem mestu se moramo zavedati, da je hitrost potovanja svetlobe najvišja možna hitrost potovanja podatkov, ki jo poznamo danes, in da v tem trenutku poljubno povečevanje propagacijske hitrosti podatkov praktično ni mogoče.

5.2 Število skokov paketa

Druga od pomembnih metrik, ki jo uporabljamo za kvantitativno ocenjevanje komunikacijske poti in postopkov usmerjanja med izvorom in ponorom, je *število skokov* (angl. *hop*) paketa. Število skokov (angl. *hop count*) je definirano s številom aktivnih naprav (angl. *network devices*), ki jih paket obišče med izvorom in ponorom. Na sliki 5.1, kjer smo predstavili splošni model komunikacijske poti, bi bilo tako število skokov n . Večje kot je število skokov, slabša je karakteristika komunikacijske poti. Metriko števila skokov mnogokrat uporabimo za grobo oceno metrike *fizične razdalje* med izvorom in ponorom.

V predhodnem odstavku smo število skokov paketa izenačili s številom aktivnih naprav, ki jih na svoji komunikacijski poti obišče paket. Na tem mestu bi bilo smiselno doreči, kaj smatramo kot aktivne naprave omrežja. Mednje sodijo usmerjevalniki (angl. *routers*), stikala (angl. *switches*), ponavljalniki (angl. *repeaters*), prehodi (angl. *gateways*), požarni zidovi (angl. *firewalls*), zvezdišča (angl. *hubs*)² itd. V večini primerov velja, da za skoke smatramo samo obiske tistih naprav, ki vršijo usmerjanje (torej obiske usmerjevalnikov in v nekaterih primerih obiske požarnih zidov) [24].

Metriko števila skokov uporabljajo tudi komunikacijski protokoli. RIP protokol (angl. *routing information protocol*) tako npr. v paketih uporablja TTL značke (angl. *time to live* ali *hop limit*), pri čemer se TTL značka posameznega paketa ob obisku vsakega usmerjevalniku dekrementira. Ko nek usmerjevalnik prejme paket z vrednostjo TTL značke enako 0, se paket zavrže. S tem se onemogoči predolgo potovanje paketov v omrežju. TTL značke imajo običajno neke privzete začetne vrednosti (npr. 255 ali 64).

Za zaključek lahko rečemo, da je metrika kvantitativne narave, ter da manjše število skokov mnogokrat res odraža hitrejšo komunikacijsko pot paketov. Pri „a priori“ uporabi slednjega sklepa moramo biti previdni, saj obstaja možnost, da ima neka komunikacijska pot z manjšim številom skokov večjo latenco, kot tista z večjim številom skokov.

²Vsi prevodi angleških izrazov v slovenski jezik so povzeti po računalniškem slovarju, dosegljivem na spletnem naslovu <http://dis-slovarcek.ijs.si/>.

5.3 Zgostitve prometa

Pri modeliranju prometa v navideznem še neobstoječem omrežju ali opazovanju prometa (angl. *monitoring*) v že obstoječem omrežju moramo biti posebno pazljivi na tiste točke v omrežju, v katerih prihaja pogosto ali občasno do zgostitev prometa (angl. *traffic congestion*). Za zgostitev smatramo situacijo, ko pride do čakanja zahtev v čakalnih vrstah pred posameznimi aktivnimi napravami ali prenosnimi mediji. Z vidika izvedbe nadgradnje - izboljšave modeliranega ali realnega omrežja moramo oceniti naslednje dejavnike:

- časovno pogostost ali frekvenco tovrstnih dogodkov (večja je frekvenca zgostitev, nujnejši je poseg v obliki zvečanja zmogljivosti resursov ali v primeru skalabilnosti povečanja njihovega števila);
- velikost ali kritičnost zgostitve prometa z definiranim vplivom na uporabnika (ali in v kolikšni meri uporabnik občuti zgostitev prometa);
- možnost, izvedljivost ter finančno in časovno zahtevnost nadgradnje, ki se realizira v obliki zvečanja zmogljivosti sistemskih resursov (strežnikov, aktivnih naprav, omrežnih povezav itd.) v omrežju;
- identifikacijo vzrokov za zgostitve (vzroki lahko izhajajo iz pričakovanega naraščanja prometa, ali zaradi izrednih dogodkov v omrežju, kot so napadi, nepravilnost pri delovanju protokolov itd.);
- možnost rekonfiguriranja aktivnih naprav itd.;

5.4 Strukturna neuravnoteženost omrežja

Pod pojmom strukturne neuravnoteženosti omrežja smatramo neustreznost omrežnih resursov, neustreznost njihovega števila in neustreznost njihove razporeditve. Pod pojmom resursov smatramo aktivne naprave s pripadajočimi licenčnimi zmogljivostnimi karakteristikami („*licencami*“) in omrežne povezave, ki sestavljajo naše omrežje. Strukturna neuravnoteženost se manifestira s porajanjem zgostitev prometa, ki jih povzročajo *ozka grla* sistema. Običajni ukrepi, ki nas rešijo iz neuravnoteženosti, so uvajanje novih resursov, prestavljanje in prerazporejanje obstoječih resursov, ter njihova nadgradnja. Glede na padajoče cene vpeljave aktivnih komponent je edina resna ovira za doseganje strukturne uravnovešenosti resursov v omrežju razpoložljivost z dovolj zmogljivimi fizičnimi omrežnimi povezavami.

V predhodnem odstavku smo omenili pojem *licenc*, ki se v zadnjem desetletju uveljavljajo kot nova prodajna strategija proizvajalcev komunikacijske opreme. Tako lastniki (ponudniki ISP in MSP storitev) omrežij od proizvajalcev kupujejo aktivno opremo (npr. usmerjevalnike ali bazne postaje za potrebe mobilne telefonije), katerih zmogljivost je nastavljiva programsko preko takojimenovanih licenc. Slednje pomeni, da vzdrževalec omrežja po sicer enotni opremi v omrežju

seli „plavajoče“ licence in s tem zvišuje zmogljivosti omrežja tam, kjer jih trenutno potrebuje in slednje znižuje tam, kjer jih trenutno ne potrebuje. Podobno elastičnost konfiguriranja resursov najdemo tudi v oblčnih storitvah.

5.5 Orodja za ocenjevanje zmogljivosti računalniških omrežij

Na koncu uvodnega poglavja smo navedli dva tipa modelirno - simulacijskih programskih okolij in sicer *univerzalne simulacijske jezike* in *aplikacijsko orientirane simulatorje*. Na področju analize delovanja računalniških omrežij poznamo še mnoga druga programska orodja, ki jih lahko razdelimo v naslednje skupine, glede na njihov namen:

- emulatorji omrežij z nastavljivimi parametri: pod parametri imamo v mislih pasovno širino, latenco, izgubo, zgostitve, itd. (angl. *bandwidth, latency, loss, congestion, jitter*); koristni so predvsem pri formiranju bremen in analizi odzivnosti sistema nanje;
- mrežni monitorji, generatorji in analizatorji za beleženje, generiranje in analizo prometa;
- generatorji dnevnih datotek (angl. *logging*);
- stresna orodja, s katerimi umetno znižujemo razpoložljivost omrežnih resursov in na ta način analiziramo delovanje omrežja ob nekaterih mejnih pogojih;
- bremenska orodja, s katerimi lahko umetno zvišujemo breme v omrežju in na ta način analiziramo delovanje omrežja ob takšnih pogojih;
- uravnoteževalna orodja (angl. *balancing tools*) za uravnoteženje sistemskih resursov (npr. razmerja upload/download, določanja prioritet posameznim protokolom na osnovi koncepta DPI (angl. *deep packet inspection*) 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.
- [3] L. Kleinrock and R. Gail, *Queuing systems, problems and solutions*. John Wiley & Sons, New York, ZDA, 1996.
- [4] N. Zimic and M. Mraz, *Temelji zmogljivosti računalniških sistemov*. Založba FE in FRI, Ljubljana, Slovenija, 2006.
- [5] R. Jamnik, *Verjetnostni račun in statistika*. Društvo matematikov, fizikov in astronomov socialistične republike Slovenije, Zveza organizacij za tehnično kulturo Slovenije, Ljubljana, Slovenija, 1986.
- [6] K. S. Trivedi, *Probability and Statistics with Reliability, Queueing and Computer Science Applications*. John Wiley & Sons Inc., New York, ZDA, 2002.
- [7] H. Stöcker, *Matematični priročnik z osnovami računalništva*. Tehnična založba Slovenije, Ljubljana, Slovenija, 2006.
- [8] J. Virant, *Modeliranje in simuliranje računalniških sistemov*. Didakta, Radovljica, Slovenija, 1991.
- [9] J. F. Shortle, J. M. Thompson, D. Gross, and C. M. Harris, *Fundamentals of queueing theory*. John Wiley & Sons, Hoboken, ZDA, 2018.
- [10] J. L. Peterson, *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, ZDA, 1981.
- [11] J. Bordon, M. Moškon, N. Zimic, and M. Mraz, "Semi-quantitative Modeling of Gene Regulatory Processes with Unknown Parameter Values Using Fuzzy Logic and Petri Nets," *Fundamenta Informaticae*, vol. 160, no. 1–2, pp. 81–100, 2018.

- [12] J. Virant, *Logične osnove odločanja in pomnjenja v računalniških sistemih*. Založba FE in FRI, Ljubljana, Slovenija, 1996.
- [13] T. Murata, "Petri Nets: Properties, Analysis and Applications," *Proceedings of The IEEE*, vol. 77, no. 4, pp. 541–580, 1989.
- [14] W. G. Schneeweiss, *Petri Nets for Reliability Modeling*. LiLoLe Verlag, 1999.
- [15] A. S. Tanenbaum and D. J. Wetherall, *Computer Networks*. Prentice Hall Inc., Boston, ZDA, 2011.
- [16] N. Jensen and L. Kristensen, *Coloured Petri Nets*. Springer, 1998.
- [17] K. Jensen, "A Brief Introduction to Coloured Petri Nets," in *Proceedings of the Third International Workshop on Tools and Algorithms for Construction and Analysis of Systems (TACAS '97)*, 1997.
- [18] K. Jensen, *Coloured Petri Nets Basic concepts*. Springer, 1997.
- [19] D. Božić, *Analiza in zgled uporabe programskega orodja CPNTools za postavljanje modelov dinamičnih sistemov*. Diplomsko delo FRI-UL, 2012.
- [20] M. Dolenc, *Verifikacija komunikacijskih protokolov na osnovi barvnih Petrijevih mrež*. Diplomsko delo FRI-UL, 2015.
- [21] "Matematična ocena latence proizvajalca Rugged." <https://w3.siemens.com/mcms/industrial-communication/en/rugged-communication/Documents/AN8.pdf/>, 2015.
- [22] "Matematična ocena latence proizvajalca O3b Networks." http://www.o3bnetworks.com/media/40980/white%20paper_latency%20matters.pdf/, 2015.
- [23] "Primer on Latency and Bandwidth." <https://www.oreilly.com/library/view/high-performance-browser/9781449344757/ch01.html>, 2018.
- [24] "Hop Count Definition." <https://www.techopedia.com/definition/26127/hop-count>, 2019.