PODPORA ODLOČANJA S SIMULACIJAMI

BOJAN RUPNIK
Univerza v Mariboru, Fakulteta za logistiko, Celje, Slovenija
bojan.rupnik@um.si

Logistični, proizvodni, transportni in vsi sorodni problemi v osnovi potekajo po sorodnih procesih, pri katerih je ključni dejavnik čas. Glede na kompleksnost procesov je nekatere mogoče dokaj enostavno analizirati, bolj pa kot so procesi prepleteni, težje jih je dobro povzeti s klasičnimi analitičnimi pristopi. Pri tem so simulacije tiste, ki omogočajo globlji vpogled v potek tovrstnih procesov, omogočajo analizo učinkovitosti, pomanjkljivosti, predvsem pa preverjanje in analizo obstoječih sistemov ob različnih pogojih brez poseganja v njihovo delovanje. Poleg dobrega poznavanja procesov je za simulacije ključnega pomena podatkovna podpora, ki lahko vključuje od beleženja zgodovinskih podatkov pa do napovedovanja prihodnjega dogajanja z možnimi alternativnimi scenariji. Z možnostjo sprotnega beleženja podatkov med izvajanjem procesa in posredovanja aktivni simulaciji, ki podatke sproti obdeluje, lahko zgradimo digitalni dvojček. V sklopu tega poglavja udeleženci spoznajo strežne sisteme in čakalne vrste, simulacije diskretnih dogodkov in orodja, ki jih podpirajo ter primere uporabe v proizvodnih, logističnih in transportnih primerih.

DOI
https://doi.org/
10.18690/um.fl.2.2025.5

ISBN
978-961-286-971-7

Ključne besede:
poslovno odločanje,
podatki,
obdelava podatkov,
prikazovanje podatkov,
statistične analize

Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

DOI
https://doi.org/
10.18690/um.fl.2.2025.5

ISBN
978-961-286-971-7

SIMULATIONS IN DECISION MAKING

BOJAN RUPNIK
University of Maribor, Faculty of Logistics, Celje, Slovenia
bojan.rupnik@um.si

Keywords:
simulations,
discrete event simulation,
digital twin,
material flow,
queuing systems

Logistical, production, transportation, and all related issues in the industry follow similar processes, with time being the crucial factor. While some processes can be relatively easily analysed due to their simplicity, the more interconnected the processes are, the more challenging it becomes to describe them accurately using traditional analytical approaches. Simulations, in this regard, provide a deeper insight into the flow of such processes. They enable the analysis of efficiency, shortcomings, and, most importantly, allow for the examination of existing systems under different conditions without interfering with their operation. Besides having a good understanding of the processes, data support is crucial for simulation. This support can involve the recording of historical data and predicting future events with possible alternative scenarios. By enabling real-time data logging during process execution and providing the data to an active simulation that processes it in real-time, a digital twin can be created. Within the scope of this subject, participants familiarize themselves with server systems, queuing systems, discrete event simulations, and the tools that support them, along with examples of their application in manufacturing, logistics, and transportation scenarios.

University of Maribor Press

1 Uvod

S simulacijami poskušamo preslikati dogajanje iz resničnega sveta v matematični oz. računalniški model, s katerim lahko to dogajanje ponavljamo, ga spreminjamo ter opazujemo, kako se to dogajanje obnaša ob različnih pogojih. Večino področij iz poslovnega sveta je mogoče analizirati s simulacijami, kot so na primer materialni tokovi v proizvodnih obratih ali skladiščih, simulacije transportnih tokov, informacijskih ali finančnih tokov. Simulacije nam tako služijo ne le za analizo tovrstnih sistemov, ampak tudi za optimizacijo – sploh, kadar so sistemi preveč računsko kompleksni, da bi jih bilo mogoče v ustreznem času optimizirati s klasičnimi optimizacijskimi metodami.

Glede na vrsto problemov, ki jih rešujemo in namen optimizacije, obstaja več različnih simulacijskih pristopov:

- 3D/realno-časovne simulacije (npr. simulacije za učenje pilotov),
- sistemska dinamika (simulacije kompleksnih, celovitih sistemov),
- simulacija agentov (opazovanje ljudi, entitet ob interakcijah v prostoru in času),
- simulacija diskretnih dogodkov.

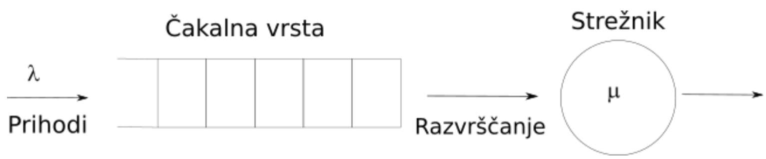
Prav slednji pristop je v ospredju tega dela. Simulacije diskretnih dogodkov omogočajo opisovanje kakršnihkoli sistemov, kjer posamezni dogodki vplivajo na nadaljnje obnašanje dogajanja. Sama metoda je v osnovi preprosta. Celoten sistem je zasnovan s stanji, ki jih spremenijo le dogodki ob vnaprej določenih časih. Za razliko od zveznih simulacij je med posameznimi dogodki, ne glede na pretečen čas, stanje vedno nespremenjeno. Dogodki so lahko definirani vnaprej (npr. predvideni prihodi strank), lahko pa tudi sami generirajo nove dogodke.

2 Modeliranje in simulacija procesov

Ne glede na področje vsi procesi vključujejo časovno komponento. Tako glede na obnašanje opazujemo, kaj se v določenem sistemu dogaja in kako dolgo kaj traja. Tu lahko upoštevamo vhodne tokove, kot so npr. prihodi strank v trgovino, trajanje nakupa, čakanje pred blagajno. Ta primer lahko preslikamo na številne druge, pri katerih govorimo o vhodih, obdelavi in na koncu izhodu iz sistema.

2.1 Strežni sistemi in čakalne vrste

Osnovni primer (Slika 5.1) strežnega sistema (Thomopoulos, 2012) vključuje čakalno vrsto, v kateri entitete čakajo na obdelavo in strežnik, ki te naloge obdeluje, delovanje sistema pa je odvisno od strežne zmogljivosti strežnika, intenzitete prihodov nalog in kapacitete čakalne vrste. Entitete lahko glede na naravo simulacije predstavljajo naloge, pakete, stranke, informacije, obdelovance oz. praktično vsak element, ki v sklopu simulacije vpliva na dogajanje.



Slika 5.1: Osnovni strežni sistem s čakalno vrsto
Vir: lasten

Intenziteta prihodov določa, s kakšno frekvenco prihajajo entitete v čakalno vrsto. V glavnem lahko intenziteto prihodov podamo kot:

$$\lambda = \frac{N}{T} \tag{1}$$

kjer je λ intenziteta, N število prihodov in T časovni interval prihodov.

Po postopku se vsaka entiteta postavi v čakalno vrsto, iz katere se posreduje strežniku, v kolikor je ta razpoložljiv. V primeru več čakajočih entitet je izbira naslednje, ki se posreduje, lahko izvedena po različnih pristopih:

- FIFO (First-in, First-out) pristop, kjer se vsaka naloga posreduje strežniku po vrstnem redu v katerem pride.
- LIFO (Last-in, Fast-out) pristop, kjer se zadnja naloga, ki vstopi v vrsto, prva posreduje na strežnik.
- Prioritetne vrste omogočajo postavitev prioritetne obravnave za določene naloge oz. skupine nalog. Tako se entitete z višjimi prioritetami posredujejo na strežnik pred tistimi z nižjimi.
- Naključni pristop določi naključno entiteto v čakalni vrsti.

Glede na intenziteto prihodov in razpoložljivost strežnika se lahko entitete v čakalni vrsti kopičijo, zmanjšujejo ali pa povprečno enakomerno dolgo čakajo v čakalni vrsti. Pri modeliranju sistemov je navadno iskana prav slednja varianta, saj omogoča stabilne sisteme.

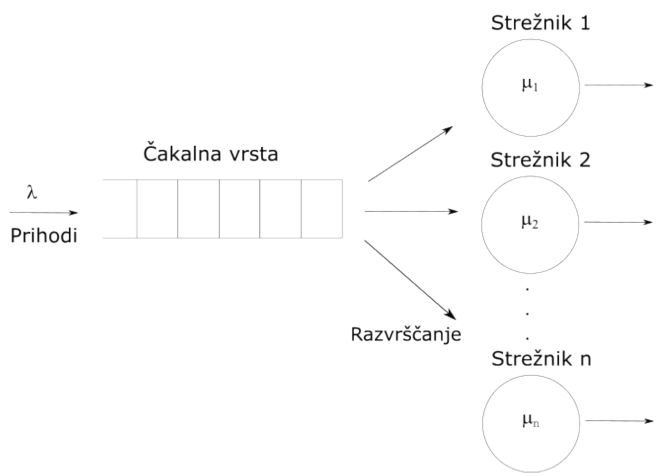
Poleg intenzitete prihodov je ključni dejavnik tudi hitrost strežbe μ, ki je podana s številom entitet, ki jih je strežnik zmožen obdelati na časovno enoto. Strežna hitrost je tako podana kot obratna vrednost strežnega časa.

$$\mu = \frac{1}{S} \tag{2}$$

S predstavlja strežni čas. Podobno kot pri prihodih je tudi strežni čas lahko podvržen naključnosti. Tako ločimo hitrosti strežbe na:

- deterministične in
- stohastične.

V nekaterih primerih je strežni čas konstanten in znan vnaprej, pri drugih pa odvisen od dejavnikov in naključen. Modeliranju strežnih časov navadno ustrezata eksponentna ali normalna porazdelitev glede na vrsto procesa.



Slika 5.2: Strežni sistem z več strežniki

Vir: lasten

Predstavljeni model omogoča simulacijo čisto osnovnega procesa z eno čakalno vrsto in enim strežnikom. Posnemanje primerov iz realnega sveta pa zahteva gradnjo kompleksnejših mrež, kjer lahko ima vsak gradnik več vhodov in izhodov. Glede na zahtevnost primera, ki ga želimo modelirati, lahko tako nastanejo kompleksni modeli, kjer na potek vplivajo, ne le povezanost med gradniki, temveč tudi pravila razvrščanja po posameznih, pogojno določenih prihodih in strežna pravila. Modeliranje in simulacijo tovrstnih primerov je zato smiselno izvesti v ustreznih namenskih orodjih.

Za opis glavnih karakteristik strežnih sistemov s čakalnimi vrstami je v uporabi Kendallova označba (Bolch et al., 2006). Osnovna označba je v naslednji obliki:

$$A/B/c/K/m/\mathrm{Q},$$

kjer predstavlja:

A – porazdelitev časov prihodov,
B – porazdelitev časov strežbe,
c – število strežnikov,
K – kapaciteto čakalnih vrst,
m – velikost populacije,
Q – strežno strategijo.

Vrednosti, ki jih tako zavzemata komponenti A in B, so:

- M – eksponentna porazdelitev,
- D – deterministična porazdelitev,
- E – Erlangova porazdelitev,
- G – splošna porazdelitev.

Število strežnikov c podaja podatek, na koliko strežnikih se lahko paralelno izvajajo strežbe.

Kapaciteta K določa maksimalno število strank v sistemu tako v čakalnih vrstah kot tudi na strežbi, medtem ko m predstavlja pričakovano število strank. Že prej omenjene strežne strategije (FIFO, LIFO) pa določajo, na kakšen način se entitete posredujejo iz čakalnih vrst.

2.2 Simulacija diskretnih dogodkov

Medtem ko strežni sistemi s čakalnimi vrstami predstavljajo predvsem abstraktno predstavitev, je za modeliranje kompleksnejših sistemov potreben naprednejši pristop. Simulacije diskretnih dogodkov (Fishman, 2001) poleg npr. sistemske dinamike ali agentske simulacije predstavljajo enega izmed najbolj uporabljenih pristopov. Med drugim je pogosta uporaba pri simuliranju problemov iz proizvodnje, zdravstva, transporta in logistike, energijskih sistemov, oskrbovalnih verig in sorodnih.

Strežni sistemi s čakalnimi vrstami predvidevajo dokaj neposreden tok med prihodi in obdelavo. Pri modeliranju diskretnih dogodkov pa se poleg samih entitet, vrst in strežnikov upoštevajo tudi karakteristike, pravila, viri in dogodki. V sklopu simulacije se na podlagi modela zgradi seznam vseh dogodkov in njihov predvideni čas. Dogodek predstavlja kakršnokoli spremembo sistema, kot npr. vstop stranke v čakalno vrsto, začetek oz. konec obdelave izdelka na stroju ali sprememba lastnosti entitete. Vsak dogodek spremeni stanje simuliranega sistema.

Izvajanje simulacije poteka po simulacijskem času, ki ne teče po realnem času, ampak diskretno preskakuje čase med posameznimi dogodki. Posamezni dogodki lahko tvorijo tudi nove dogodke, ki se prav tako umestijo v seznam bodočih dogodkov, zaradi česar se lahko nekateri, že načrtovani dogodki, tudi prestavijo.

Med samim izvajanjem simulacije se beležijo statistike čakalnih vrst, izkoriščenosti strežnikov, pretočnost in drugi parametri, s katerimi je mogoče podati ustrezno analizo simuliranih sistemov.

Še dva ključna elementa pri izvajanju simulacij sta verifikacija in validacija. Z verifikacijo preverimo pravilnost posameznih implementiranih funkcionalnosti, formul za izračune, logike. Z validacijo preverjamo, kako dobro model posnema realni sistem. Rezultate simulacije v ta namen primerjamo s pričakovanim obnašanjem realnega sistema, ki je pridobljeno iz meritev ali ekspertne ocene. Verifikacija in validacija sta ponavljajoča se procesa, ki vodita k večji natančnosti in zanesljivosti izdelanega modela. Z analizo senzitivnosti lahko ocenimo tudi območja negotovosti.

2.3 Modeliranje simulacijskih parametrov

Načini modeliranja vhodnih parametrov simulacije so odvisni od vrste simuliranega sistema in od razpoložljivih podatkov. Pri tem je v prvi fazi potrebno dobro razumevanje procesov, na podlagi katerih je možno modelirati materialni tok. Tako je potrebno identificirati vse dejavnike (procese ali parametre), ki lahko vplivajo na obnašanje sistema, kot so:

- entitete in njihove lastnosti – kateri so ključni elementi simulacije, kako lahko njihove lastnosti vplivajo na materialni tok (entitete z različnimi lastnostmi imajo npr. različne tokove skozi omrežje).
- Simulacijski objekti – kakršnikoli gradniki simulacijskega orodja, ki vplivajo na stanje sistema – izvori, ponori, strežniki oz. procesorji, čakalne vrste, objekti za združevanje oz. razdruževanje entitet, objekti za spreminjanje lastnosti entitet, generatorji dogodkov-
- Materialni tok – povezave med vsemi objekti iz oz. do katerih se entitete lahko premikajo. Ob tem je potrebno skrbno določiti pogoje preusmeritev iz posameznih objektov na naslednike.
- Vhodne intenzitete – primer, podan na začetku poglavja, je le ena izmed možnosti za modeliranje vhodov. Ob modeliranju vhodov iz realnih sistemov lahko uporabimo:
  - deterministične vrednosti – pri sistemih, kjer so dobro določene količine in časi (npr. vozni redi vlakov, urniki sestankov itd.).
  - Dinamične prihode – vhodne obremenitve so lahko odvisne od raznih dejavnikov kot npr. količina vozil ob prometnih špicah.
  - Prileganje statističnim porazdelitvam – kadar imamo na razpolago ustrezne podatke, lahko vhodne obremenitve modeliramo s prileganjem statističnim porazdelitvam.

  - Zgodovinske podatke – kjer imamo na voljo beleženje dogajanja v sistemih (npr. sistemi MES), lahko opravimo analizo s prileganjem statističnim porazdelitvam.
  - Ekspertne ocene – ob pomanjkanju zapisov lahko oceno obnašanja posameznih gradnikov ocenimo na podlagi izkustvenih ocen ekspertov.
  - Naključne vrednosti – naključnost predstavlja ključni element simulacij. Pri modeliranju prihodov se sicer naključne vrednosti uporabljajo znotraj ustreznih razponov oz. se naključne vrednosti tvorijo po ustreznih porazdelitvah.
  - Analizo občutljivosti - vhodne parametre lahko spreminjamo, da ocenimo, kakšno je obnašanje sistema ob različnih začetnih nastavitvah ob predpostavki.
- Strežne hitrosti – pridobitev strežnih hitrosti je podobna kot pri vhodnih intenzitetah. Pogosto je možno strežne hitrosti pridobiti iz poznavanja trajanja procesov kot npr. specifikacije proizvodnih strojev, hitrosti transporta itd.

Ne glede na to, kateri pristop je uporabljen, je glede na modeliran sistem, potrebno skrbno preučiti vse izbrane parametre (validacija modela).

2.4 Naključne vrednosti

Tvorba naključnih vrednosti predstavlja enega izmed temeljnih konceptov pri simulacijah, zato ji tudi namenjamo lastno poglavje. Ustvarjanje naključnega števila (L'Ecuyer, 2012) je sicer matematično preprosta operacija, vendar lahko ob nerodnem pristopu pripelje do pojava vzorcev. Pojav vzorcev pri tvorbi naključnih števil lahko privede do neustreznega obnašanja simulacije, saj se lahko pojavijo nezaželene odvisnosti v simulacijskem toku, ki ga sicer v realnem sistemu ne bi bilo pričakovati.

Računalniški sistemi za tvorjenje naključnih vrednosti uporabljajo generatorje psevdo-naključnih števil, kjer se izračun naključne vrednosti izvede s funkcijo z vhodno spremenljivko. Primer enostavnega linearnega kongruenčnega generatorja podamo s formulo:

$$X_{n+1} = (aX_n + c)\%m \tag{3}$$

Tu predstavljajo:

X_n- seme generatorja,
a – množitelj – določa periodo in kakovost naključnosti,
c – inkrement – premik sekvence za večjo raznolikost ustvarjenih števil,
m – delitelj – določa obseg ustvarjenih števil.

Lastnosti zaporedja naključnih števil, ustvarjenega s takšnim generatorjem, so odvisne od izbire danih parametrov. Namen generatorjev je ustvariti čim večjo entropijo oz. nepredvidljivost stanj, zato je tudi izbira semena pomembna. Ob uporabi enakega semena bo funkcija vedno ustvarila enako zaporedje psevdo-naključnih vrednosti. Glede na potrebe je to lahko zaželeno, kot na primer pri izvedbi različnih konfiguracij ob enakih inicialnih vhodih ali pri verifikaciji. V večini primerov pa je zaželeno naključne vrednosti čim bolj razpršiti. V takih primerih je smiselno tudi seme generatorja izbrati čim bolj naključno, na primer iz trenutnega procesorskega časa ob izvršitvi generiranja naključne vrednosti. Linearni kongruenčni generator tvori cela števila na intervalu $[0, m-1]$, pogosto pa je želena tvorba realnih števil na intervalu $[0,1]$, predvsem v namene normalizacije vrednosti. V ta namen novo število delimo z m.

Pri modeliranju večine problemov iz realnega sveta intenziteta prihodov poteka naključno, kljub temu pa lahko to naključnost navadno postavimo v meje. Intenziteto prihodov tako pogosto modeliramo s porazdelitvami, kjer so prihodi neodvisni in povprečno sledijo v enakih razmikih. Modeliranje naključnih procesov iz realnega sveta pogosto izvajamo po Poissonovi porazdelitvi:

$$P(X = k) = \frac{(\lambda^k e^{-\lambda})}{k!}, \tag{4}$$

kjer je ($P(X = k)$ verjetnost pojavitve k dogodkov, λ povprečna intenziteta prihodov v časovnem intervalu in k število dogodkov za kolikor želimo poiskati verjetnost. Poissonova porazdelitev je uporabna pri opisu dogodkov, kot so:

- modeliranje prihodov strank v trgovino v določenem časovnem obdobju,
- analiza števila okvar pri proizvodnji,
- napovedovanje števila nesreč na odseku znotraj časovnega obdobja,
- prihodi sporočil pri e-pošti.

Modeliranje vhodnih tokov ali strežnih hitrosti izvajamo s prileganjem statističnim porazdelitvam (Johnson, 1987), kot sta Poissonova ali normalna. Te lahko določimo s statističnimi testi, oceno oblike histogramov, metodo minimalnih kvadratov in drugimi pristopi. Ko imamo porazdelitve procesov znane, lahko na njihovi podlagi ustvarimo naključne dogodke, ki se odvijajo po enakih statističnih karakteristikah kot preučeni sistemi.

Primer izračuna naključno generiranih vrednosti po Poissonovi porazdelitvi s povprečno vrednostjo λ prikazuje naslednji postopek:

$$\boldsymbol{function}\ Poisson(\lambda)$$
$$L = e^{-\lambda}$$
$$k \leftarrow 0$$
$$p \leftarrow 1$$
$$\boldsymbol{while}\ (p > L)\ \mathbf{do}$$
$$k \leftarrow k + 1$$
$$p = p * rand()$$
$$\mathbf{end}$$
$$Poisson = k$$

Psevdokoda 1: generator naključnih vrednosti po Poissonovi porazdelitvi

3 Simulacijski primer

Za simulacijski primer vzemimo trgovino, v katero stopajo stranke, ki različno dolgo iščejo izdelke in jih na koncu kupijo na blagajni. Definirajmo lastnosti sistema:

- povprečno vstopi 5 strank na minuto,
- št. Blagajn: 5,
- povprečno trajanje nakupa: 15 min,

– transakcija na blagajni traja povprečno 5 minut.

Po Kendallovi notaciji bi lahko osnovni strežni sistem opisali z:

$M/M/5/30/3000/FIFO$,

pri čemer predpostavimo prihode strank in strežbo po eksponentni porazdelitvi, upoštevamo 5 blagajn, ocenjeno kapaciteto trgovine za 30 strank, skupno število strank pa zaokrožimo na 3000 (ocena za en delovni dan). Za strežno strategijo izberemo FIFO, se pravi, da se stranke strežejo glede na njihov čas prihoda (in nakupa).

Vhodni parameter tu predstavlja povprečni čas prihoda med dvema zaporednima strankama. Če privzamemo, da so prihodi strank Poissonov proces, lahko naključne čase prihodov modeliramo na naslednji način:

$$t_i = \frac{-\ln rnd()}{\lambda} \tag{5}$$

Tabela 5.1: Primer naključno določenih prihodov po eksponentni porazdelitvi

	Naključni čas [s]	Naslednji prihod [s]
1	0,010422473	0,625348364
2	0,44356782	27,23941755
3	0,047033142	30,06140609
4	0,561568412	63,7555108
5	0,416494108	88,74515728
6	0,083158277	93,73465391
7	0,023527478	95,14630261
8	0,052567808	98,30037111
9	0,130142537	106,1089233
10	0,055501926	109,4390389
11	0,010422473	144,9275279
12	0,44356782	152,8945772
	…	…

Vir: lasten

Podan simulacijski primer lahko analiziramo s strežnimi sistemi s čakalnimi vrstami, vendar se z vsakim dodanim elementom kompleksnost poveča. Zato je smotrno za tovrstne probleme uporabiti ustrezna simulacijska orodja. Pri simulacijskih orodjih ni pričakovati, da bodo rezultati simulacije popolnoma skladni s teoretičnimi izračuni zaradi zaokrožitvenih napak in naključnosti, vendar bi se morali pri dobro načrtovanem simulacijskem modelu rezultati dobro približati teoretičnim izračunom.

Iz zastavljenega primera simulacije lahko hitro ugotovimo, da sistem ni vzdržen; ob povprečnem število 5 strank na minuto in 5 blagajnami s strežno hitrostjo 5 minut. Čas nakupovanja pri tem predstavlja primer, ki ga stranke opravljajo istočasno. Če bi s Kendallovo notacijo podali samo ta del, bi ga lahko opisali kot proces, ga lahko poenostavljeno podamo z:

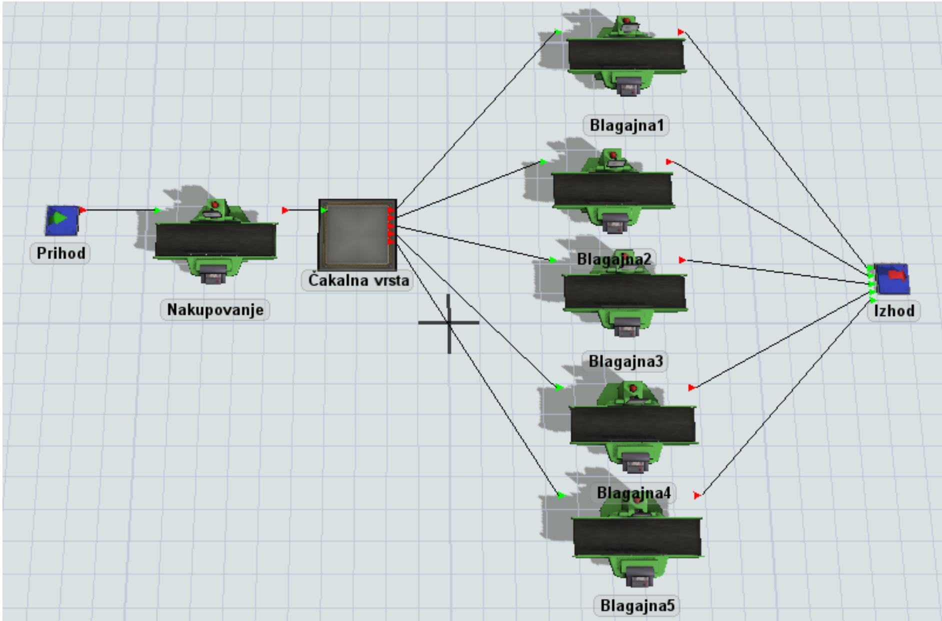
$$M/M/\infty,$$

saj pri nakupovanju vsaka stranka opravlja svoj nakup in pri tem niti ne rabi vstopati v čakalno vrsto. Zato lahko ta segment upoštevamo kot neomejen (vsaka stranka ima svoj takoj razpoložljiv strežnik). Prihodi strank predstavljajo prihode, kot so generirani, za strežno hitrost upoštevamo po zadanih parametrih povprečno 15 min na stranko. Stranke po opravljenem nakupu vstopijo v čakalno vrsto (oz. čakalne vrste pred posameznimi blagajnami). Pri konkretni simulaciji bi morali seveda upoštevati razne faktorje, kot so delovni čas, pavze in malice, obremenitve ob različnih časih tekom dneva itd.

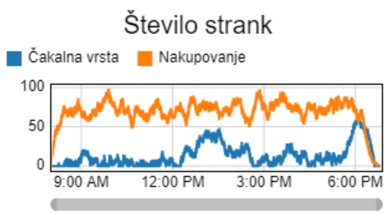
Predstavljeni primer lahko modeliramo v simulacijskih orodjih (Slika 5.3) ter se izogibamo množici izračunov pri večanju kompleksnosti strežnih sistemov s čakalnimi vrstami.

Ker je zastavljeni primer nestabilen (nenehno naraščanje čakalne vrste in nenehna zasedenost blagajn), preverimo, kako bi lahko spremenili sistem v vzdržnega. V glavnem lahko uporabimo dva pristopa. Lahko dodamo dodatne blagajne ali pa jih zamenjamo za hitrejše. Za ta scenarij pustimo vse nastavitve in karakteristike enake, le blagajne pohitrimo za faktor 5 (še vedno po eksponentni porazdelitvi).

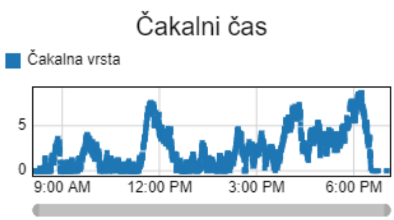
Cilj vsake simulacije je ugotoviti zmogljivosti modeliranega sistema, kamor spadajo razne karakteristike. V tem primeru se osredotočimo na velikost čakalne vrste (Slika 5.4) in čakalne čase v njej (Slika 5.5) ter izkoriščenost blagajn (Slika 5.6).



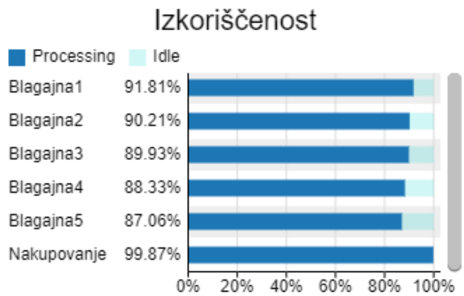
Slika 5.3: Simulacijski model trgovine v orodju FlexSim
Vir: lasten



Slika 5.4: Dolžina čakalne vrste
Vir: lasten



Slika 5.5: Čakalni časi v čakalni vrsti
Vir: lasten



Slika 5.6: Izkoriščenost blagajn
Vir: lasten

Rezultati simulacije ob spremenjenih karakteristikah pokažejo (relativno) stabilen sistem, saj nimamo nenehno naraščajočih čakalnih vrst in čakalnih časov. Pogosto je pri simulacijah kompleksnih sistemov potrebno poiskati rešitve, kjer se izognemo ozkim grlom in neizkoriščenim virom.

4 Zaključek

Predstavljeni primer kaže le delček zmožnosti, ki jih simulacije nudijo. Velika uporabnost simulacij pride do izraza predvsem pri preučevanju kompleksnih sistemov, kjer je govora o navidezno nepovezanih parametrih. Tako se simulacije uporabljajo na logističnem, finančnem, informacijskem, proizvodnem oz. pravzaprav kakršnemkoli sorodnem področju. Na področju logistike simulacije predstavljajo stroškovno ugoden pristop pri analizi proizvodnih procesov, transportnih poti in usmerjanja, prometnih vzorcev ipd. S spreminjanjem parametrov simulacije oz. simulacijskih scenarijev je možno kompleksne sisteme opazovati z različnih vidikov, kar omogoča učinkovito odločanje na podlagi smotrnih analiz.

Izvedba simulacij omogoča cenovno učinkovit pristop za analizo kompleksnih sistemov brez potrebe po prekinitvi procesov. V današnjih tehnoloških sistemih je opaziti vedno večjo integracijo raznovrstnih rešitev, od sistemov ERP, MES, PLC, SCADA in drugih. Medtem ko tovrstni sistemi v glavnem beležijo in tudi lahko v veliki meri vodijo procese, predstavlja simulacija alternativno možnost za optimizacijo s primerjavo alternativ in podporo odločanju. V zadnjem obdobju v ospredje prihajajo digitalni dvojčki, ki omogočajo celovit vpogled v razne procese podjetij. Digitalni dvojčki zajemajo dogajanje procesov podjetja v realnem času iz senzorjev, strojev, naprav in drugih virov (internet stvari) ter na podlagi teh zgradijo virtualno predstavo. Simulacije, izvedene nad virtualno podobo realnega sistema, omogočajo globlji vpogled v delovanje in poslovanje ter predstavljajo dodano vrednost pri poslovnem odločanju na vseh nivojih.

Literatura

Thomopoulos, N. T. (2012). Fundamentals of queuing systems: statistical methods for analyzing queuing models. Springer Science & Business Media.

Bolch, G., Greiner, S., De Meer, H., & Trivedi, K. S. (2006). Queueing networks and Markov chains: modeling and performance evaluation with computer science applications. John Wiley & Sons.

Fishman, G. S. (2001). Discrete-event simulation: modeling, programming, and analysis (Vol. 537). New York: Springer.

Johnson, M. E. (1987). Multivariate statistical simulation: A guide to selecting and generating continuous multivariate distributions (Vol. 192). John Wiley & Sons.

L'Ecuyer, P. (2012). Random number generation (pp. 35-71). Springer Berlin Heidelberg.