



UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Digitally signed by
Technical Scientific
Library, TUM
Reason: I attest to the
accuracy and integrity
of this document

**FACULTATEA CALCULATOARE, INFORMATICĂ
ȘI MICROELECTRONICĂ
DEPARTAMENTUL INFORMATICĂ
ȘI INGINERIA SISTEMELOR**

**ANALIZA PERFORMABILITĂȚII SISTEMELOR
DE CALCUL PRIN REȚELE PETRI STOCASTICE
RECONFIGURABILE CU PARAMETRI FUZZY**

**Chișinău
Editura „Tehnica-UTM”
2021**

CZU 004.7
G 98

Lucrarea tratează problematica verificării și analizei performabilității sistemelor de calcul prin modele de rețele Petri stocastice reconfigurabile cu parametri fuzzy. Lucrarea este destinată studenților programului de studii la masterat *Calculatoare și rețele informaționale*, Universitatea Tehnică a Moldovei, inginerilor și doctoranzilor preocupați de domeniul ingineriei calculatoarelor și tehnologiei informației.

Manualul este recomandat pentru editare de Senatul Universității Tehnice a Moldovei.

Autor: prof. univ., dr. hab. Emilian GUȚULEAC

Recenzenți: conf. univ., dr. Victor ABABII
conf. univ., dr. Victor MORARU

Redactor responsabil: conf. univ., dr. Sergiu ZAPOROJAN

DESCRIEREA CIP A CAMEREI NAȚIONALE A CĂRȚII DIN RM

Guțuleac, Emilian.

Analiza performabilității sistemelor de calcul prin rețele petri stocastice reconfigurabile cu parametri fuzzy / Emilian Guțuleac; redactor responsabil: Sergiu Zaporojan; Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Calculatoare, Informatică și Microelectronică, Departamentul Informatică și Ingineria Sistemelor.

– Chișinău: Tehnica-UTM, 2021. – 304 p.: fig.

Aut. indicat pe vs. f. de tit.

– Referințe bibliogr.: p. 270-278 (94 tit.). – 100 ex.

ISBN 978-9975-45-742-2.

004.7

G 98

PREFATĂ

Sistemele de calcul (SC) și rețelele de calculatoare (RC) cu aplicații orientate obiect și servicii sunt sisteme complexe formate dintr-o multitudine de componente elementare de tipuri diferite, interconectate după o structură convenabilă, având caracteristici proprii ce decurg atât din constituția lor fizică, precum și din natura proceselor de calcul la care sunt supuse.

Proiectarea SC și a RC are ca obiective principale stabilirea configurației, fixarea capacității legăturilor de comunicație, elaborarea protocoalelor și identificarea unui mod performant prin care acestea sunt partajate între fluxurile informaționale active la momentul dat. Toate aceste sarcini trebuie raportate, deopotrivă, la administratorii, operatorii de rețea și la utilizatorii de servicii. Punctul de vedere al operatorilor se referă, cu precădere, la asigurarea unei utilizări cât mai eficiente de transferuri informaționale, scopul final fiind obținerea unor câștiguri maxime cu cheltuieli minime. În schimb, cerințele utilizatorilor vizează, în principal, modul în care serviciile sunt satisfăcute, situații precum așteptarea unei căi libere până la destinație, pierderea sau alterarea informației și întârzierea transferurilor de pachete fiind de dorit a fi cât mai rare, securitatea informațională etc. Pentru aceste aspecte sunt definite două categorii de indicatori cantitativi de performabilitate [7, 9, 35, 49, 61, 84]:

- **gradul de servire, GoS (*Grade of Service*)**, care se referă la posibilitățile de a beneficia de un anumit serviciu;

- **calitatea servirii, QoS (*Quality of Service*)**, care precizează posibilitățile anumitor servicii pe care le oferă un SC sau o RC pe durata utilizării lor.

QoS este un termen general care descrie măsurarea performabilității în baza unor indicatori cantitativi utilizați pentru exprimarea calității servirii în SC sau RC care se împart în două categorii: *categoria indicatorilor asociați serviciilor cu sau fără conexiune* și *categoria indicatorilor proprii serviciilor cu conexiune*. În prima categorie se includ indicatorii QoS legați, de exemplu, de transmiterea unei singure unități informaționale

(pachet, cadru), precum: întârzierea măsurată prin medie, deviație standard, probabilitatea coruperii, pierderii, duplicării și/sau livrării greșite a datelor; protecția față de accesul neautorizat; prioritatea în livrare, dar și parametrii care iau în considerare organizarea fluxurilor informaționale în ansamblu, ca de exemplu: eficiența transferului de date; măsurată prin durata medie și deviație standard etc.; probabilitatea livrării în dezordine. Din a doua categorie fac parte astfel de indicatori precum: fiabilitatea conexiunilor; întârzierea stabilirii (eliberării) unei conexiuni; probabilitatea eșecului în stabilirea unei conexiuni; elasticitatea conexiunii etc.

Obiectele modelării în știința și ingineria tehnică sunt *sistemele și procesele* de funcționare ale acestora. În special, în domeniul ingineriei și științei calculatoarelor obiectele modelării sunt procesele de calcul în SC și RC.

Evaluarea indicatorilor cantitativi QoS, ce caracterizează un anumit SC sau RC, se poate efectua prin **modelarea matematică** sau **analiza statistică** a rezultatelor experimentale. În primul caz beneficiem de formule de calcul, valabile în anumite ipoteze, ca de exemplu, considerarea procesului de sosire a pachetelor într-o interfață a unui anumit ruter RC ca fiind de tip Poisson [44]. În al doilea caz, uzăm de un *aparat matematic apropiat*, care oferă o serie de **statistici** (medie, deviație standard, autocovarianță, interval de încredere etc.) corespunzătoare eșantionului de rezultate obținut prin măsurători.

Măsurătorile se pot desfășura într-un cadru real de funcționare a sistemului sau prototipului supus analizei, ori într-un context virtual, folosind modele matematice și/sau simularea. Principial, **simularea** constă în imitarea, prin intermediul, de exemplu, a unui program specific pe calculator, a realității atât în privința modului de funcționare a sistemului, cât și a sarcinii la care este expus.

Modelarea matematică este un instrument puternic și eficient de cercetare a diferitelor obiecte, sisteme și procese în diverse domenii ale activității umane. Diversitatea proceselor, care apar în

sistemele investigate, determină varietatea metodelor și mijloacelor matematice utilizate în *teoria modelării*.

Pentru abordarea problematicii specifice elaborării SC sau RC s-a făcut apel la diverse procedee de formalizare, exploatându-se o arie vastă a matematicilor moderne [1, 2, 3, 26, 44, 59, 71, 74]. În acest context, un loc aparte în spațiul relativ neomogen al tratării matematice a proceselor de calcul și descrierii funcționării SC sau RC îl ocupă *formalismul rețelelor Petri (RP) de diferite extensii* [1, 2, 31, 36, 57, 63, 67]. Stadiul actual de dezvoltare al acestui formalism permite investigații atât calitative, axate pe aspecte logice, cât și cantitative, axate pe *aspecte temporale stocastice* și de *incertitudini epistemice* ale dinamicii funcționării SC sau RC. Actualmente, extensiile de RP ocupă o arie atât de vastă, încât este puțin probabil de a o percepe integral, ținând cont de faptul că teoria RP este în continuă dezvoltare.

Instruirea specialiștilor din ingineria SC, RC și din domenii conexe (informatică, telecomunicații, rețele informaționale, inginerie industrială, bioinginerie, economică etc.) s-a caracterizat printr-o accentuare a interesului către noi tipuri de dinamică, necesitând o extindere adecvată a fundamentelor teoretice și practice care să permită desfășurarea activităților de modelare, analiză și sinteză a sistemelor cu evenimente discrete (SED) sau SED dinamice (SEDD) [3, 14, 25, 39, 44, 50, 53] cum ar fi, de exemplu, SC și RC în care apar *fenomene de așteptare, concurență, sincronizări, conflicte, blocaje* etc., luând în considerare și *aspectele de incertitudine* a funcționării acestora.

RP stocastice (RPS) de diferite extensii sunt formalisme care reprezintă un domeniu relevant în ansamblul matematicilor aplicate destinate rezolvării problemelor practice de modelare, verificare, validare, evaluare a performanțelor, siguranței în funcționare și performabilității SEDD [1, 2, 17, 33, 53, 55].

Existența în literatura tehnico-inginerească din Republica Moldova a foarte puține materiale vizând aspectele teoretice și aplicative ale formalismului RPS, a motivat autorul acestor rânduri să elaboreze o lucrare concentrată asupra elementelor de bază ale

modelării, verificării și analizei performabilității SC și RC prin prin unele extensii de RPS descriptiv-reconfigurabile. Această lucrare este în primul rând rezultatul experienței didactice a autorului, care a permis simplificarea prezentării aspectelor teoretice și experiența de cercetare științifică, autorul publicând pe parcursul anilor un număr însemnat de lucrări de specialitate în această arie tematică. Lucrarea a fost scrisă în ideea de a fi cât mai accesibilă, fără a face rabat de la rigoarea științifică.

Spiritul acestei lucrări este specific antrenării studenților pe principii didactice moderne, restrângând latura pur matematică la strictul necesar și complementându-l prin exemple și studii demonstrative care ilustrează modul de aplicare a rezultatelor teoretice. Maniera de dozare și structurare a informațiilor prezentate facilitează parcurgerea și studierea textului, creând o relativă independență de consultare a altor resurse bibliografice.

Fiind, în general, subordonate unor anumite curricule de curs, noțiunile și conceptele expuse în această lucrare apar, în mod firesc, într-o succesiune logică și sunt supuse unor restricții temporale și de spațiu inevitabile care conduc adeseori la dezvoltări teoretice și aplicative limitate.

La prezentarea metodelor analitice de modelare, calcul numeric și analiză a modelelor RPS specifice, în această lucrare sunt folosite relații matematice relativ simple, care permit a calcula, în primul rând, principalii indicatori cantitativi QoS ai SC sau RC. Din același motiv, lucrarea nu conține raționamente și demonstrații complexe ale dependențelor matematice prezentate, care permit, pe de o parte, destul de ușor a efectua estimări, fără a recurge la calcule complexe, pe de altă parte, pentru a obține o idee complet adecvată despre proprietățile comportamentale corespunzătoare ale sistemelor reale datorită analizei lor detaliate.

Materialul teoretic este însoțit de exemple analizate care vizează dezvoltarea abilităților și competențelor de a aplica cele mai utilizate extensii de RPS, metode și tehnici de calcul ale unor indicatori cantitativi QoS ai unor elemente individuale sau ai întregului SEDD prin modele RPS descriptiv-reconfigurabile cu

parametri cerți sau fuzzy.

La rezolvarea problemelor de modelare, verificare și analiiză a performabilității SEDD trebuie luat în vedere că, în lipsa oricăror date inițiale, este necesar a introduce supoziții și ipoteze care permit a rezolva și analiza problema studiată.

Pentru asimilarea mai eficientă a materialului teoretic, unele fragmente, care reprezintă cel mai mare interes, se disting prin diferite fonturi. Aceasta permite a concentra atenția cititorului asupra unor sau altor aspecte, care sunt importante pentru înțelegerea modelelor și a metodelor de analiză descrise.

Cu caractere aldine sunt evidențiate alte noțiuni și termeni, general acceptate, adesea găsite în literatură și care nu au definiții clare, precum și titluri auxiliare, denumiri etc.

În text, cu caracter italic sunt evidențiate cuvinte și expresii-cheie cărora trebuie acordată atenție și care dezvăluie sensul materialului, de asemenea, identifică termenii și noțiunile definite în alte secțiuni.

Obiectivele principale ale acestei lucrări sunt:

1. A oferi cititorului o idee inițială despre principiile de modelare și evaluare a performabilității SEDD complexe prin RPS de diferite extensii, a metodelor lor de calcul, folosind trei abordări principale: analiza analitică, numerică și de simulare. Cu toate acestea, materialul expus nu ar trebui să conțină calcule și demonstrații matematice împovărătoare. Expresiile, formulele matematice și modelele utilizate trebuie să fie ușor înțelese de orice specialist în domeniul ingineriei calculatoarelor, care are o pregătire matematică de bază în învățământul superior și cele mai generale idei despre RP, RPS, procesele stocastice, logicii fuzzy și a jocurilor matematice care servesc ca bază teoretică a materialului expus.

2. A furniza cititorului un set minim de modele, metode, tehnici și instrumente pentru studiul SEDD simple, aplicate în diferite domenii reale. Pentru realizarea acestui deziderat, în lucrare este considerat un număr necesar de modele RPS, care descriu diferite fenomene ale proceselor de calcul și permit analiza

indicatorilor de performabilitate ai unor SC sau RC.

Pentru a atinge aceste obiective, în lucrare este introdusă o terminologie clară și univocă în care:

- sunt descrise diverse modele RPS ale SC sau RC, specificați și analizați unii indicatori QoS ai acestor modele;
- sunt formulate probleme de modelare, ca fiind un instrument universal pentru studierea SEDD complexe, inclusiv sisteme tehnice cum ar fi calculatoarele, SC și RC;
- sunt considerate unele metode de calcul al indicatorilor QoS evaluați în baza unor extensii de RPS;
- sunt efectuate analize ale proprietăților comportamentale inerente proceselor de calcul, precum și influența parametrilor modelului asupra indicatorilor QoS.

În dimensionarea lucrării și expunerea principalelor repere de conținut s-a ținut cont de corelarea cu programul de învățământ la masterat *Calculatoare și rețele informaționale*, Facultatea Calculatoare, Informatică și Microelectronică, Universitatea Tehnică a Moldovei. Prin acest demers lucrarea dată își definește potențiali cititori din rândul studenților, inginerilor și doctoranzilor cu specializări înrudite, care o pot utiliza drept material pentru studiul individual.

Sunt așteptate cu interes eventualele observații privind conținutul lucrării sau propuneri de îmbunătățire a cărții.

Autorul

CUPRINS

PREFAȚĂ.....	3
1. ASPECTE DE ANALIZĂ A PERFORMABILITĂȚII SISTEMELOR CU EVENIMENTE DISCRETE.....	9
1.1. Caracteristici generale ale unui sistem.....	9
1.1.1. <i>Considerații generale.....</i>	<i>9</i>
1.1.2. <i>Clasificarea sistemelor și a proceselor.....</i>	<i>18</i>
1.2. Sarcinile modelării SC și RC.....	19
1.2.1. <i>Caracteristicile unui model.....</i>	<i>19</i>
1.2.2. <i>Cerințele de bază față de un model.....</i>	<i>22</i>
1.2.3. <i>Metode de modelare a SC și RC.....</i>	<i>26</i>
1.2.4. <i>Verificarea și validarea modelelor.....</i>	<i>28</i>
1.3. Indicatori QoS de performabilitate.....	32
2. REȚELE PETRI GENERALIZATE DESCRIPTIV – COMPOZIȚIONALE.....	51
2.1. Noțiuni introductive și definiții de bază.....	51
2.2. Expresii descriptive ale RP generalizate.....	64
3. ANALIZA PERFORMABILITĂȚII PROCESELOR DE CALCUL PRIN REȚELE PETRI MARKOVIENE.....	82
3.1. Temporizarea stocastică a rețelelor Petri.....	82
3.2. Rețele Petri generalizate markoviene.....	85
3.2.1. <i>Noțiuni introductive și definiții.....</i>	<i>85</i>
3.2.2. <i>Indicatori numerici de performabilitate.....</i>	<i>86</i>
3.3. Rețele Petri generalizate markoviene extinse.....	94
3.3.1. <i>Noțiuni introductive și definiții.....</i>	<i>94</i>
3.3.2. <i>Calculul probabilităților staționare de stare.....</i>	<i>98</i>

3.4. Aplicații de RMG cu automodificare.....	101
4. MODELAREA ȘI EVALUAREA PERFORMANȚELOR SISTEMELOR MULTIPROCESOR.....	109
4.1. Aspecte arhitecturale de modelare.....	109
4.2. SMP cu o magistrală și memorie comună.....	111
4.3. SMP cu magistrale și memorii comune multiple.....	127
4.4. Modelarea unui sistem cu masive de procesoare.....	137
4.4.1. <i>Structura sistemului cu masive de procesoare.....</i>	<i>137</i>
4.4.2. <i>Modelarea sistemului vectorial.....</i>	<i>139</i>
4.4.3. <i>Modelarea sistemului bidimensional.....</i>	<i>143</i>
5. ANALIZA PERFORMABILITĂȚII SC ȘI RC PRIN RMG FUZZY CU JOCURI STOCASTICE.....	148
5.1. Elemente ale teoriei logicii fuzzy și a jocurilor stocastice.....	148
5.1.1. <i>Aspecte de analiză a SC și RC orientate pe servicii</i>	<i>148</i>
5.1.2. <i>Elemente de numere fuzzy și fuzzy intuiționiste.....</i>	<i>151</i>
5.1.3. <i>Elemente de teoria jocurilor matematice stocastice.....</i>	<i>155</i>
5.2. Analiza performabilității dispozitivelor de calcul MANET prin RMG cu parametri fuzzy.....	157
5.2.1. <i>Aspecte de analiză a performabilității RC Ad-hoc.....</i>	<i>157</i>
5.2.2. <i>Modelul RMGF al apărării sistemului MPO atacat.....</i>	<i>161</i>
5.2.3. <i>Analiza numerică a indicatorilor QoS ai RMGF... ..</i>	<i>167</i>
5.3. Analiza securității RC prin RMG fuzzy intuiționiste cu jocuri stocastice.....	180
5.3.1. <i>Definirea și regulile funcționării RMGFJ.....</i>	<i>180</i>

5.3.2. Modelarea prin RMGFJ a unei RC particulare.....	182
5.3.3. Analiza numerică a RC particulare.....	188
6. ANALIZA PERFORMABILITĂȚII SC ȘI RC PRIN RMG DESCRIPTIV-RECONFIGURABILE.....	195
6.1. Aspecte de modelare a SC și RC reconfigurabile.....	195
6.2. RMG dinamic descriptiv-reconfigurabile.....	198
6.3. Evaluarea indicatorilor QoS ai SC în baza RMGR cu parametri Z-fuzzy.....	212
6.3.1. Elemente Z-fuzzy și ale teoriei credibilității.....	212
6.3.2. Modelul RMGRF al unui SC particular.....	217
6.4. Modelarea și analiza QoS a apărării RC prin tehnici MTD în baza RMGRF cu attribute matriceale.....	230
6.4.1. Aspecte ale apărării RC prin tehnici MTD.....	230
6.4.2. RMGRF cu attribute matriceale.....	235
6.4.3. Analiza gradului de securitate al unui nod RC.....	240
6.5. Evaluarea prin RMGMF a duratei de finalizare a procesării unei lucrări în mediul cloud MTD.....	251
6.5.1. Descrierea informală a sistemului atacat.....	251
6.5.2. Modelul RMGMF procesării unui task.....	253
CONCLUZII.....	262
BIBLIOGRAFIE.....	270
LISTA DE ACRONIME.....	279
ANEXA 1.....	282
A.1. Metoda tensorială de compunere a modelelor.....	282

BIBLIOGRAFIE

1. Ajmone-Marsan M., Balbo G., and Conte G. A Class of Generalized Stochastic Petri Nets for the Performance Evaluation of Multiprocessor Systems. In: ACM Trans. Computer Systems, vol. 2, no.2, may 1984, p. 93-122.
2. Alla H., David R. *De Grafset aux reseaux de Petri*. Paris: Ed. Hermes, 1992. - 490 p.
3. Alfa S. A. *Queueing Theory for Telecommunications*. London: Springer, 2010. - 238 p.
4. Antokhina Yu. A. et al. Computer simulation of processes in technical systems. In: J. Phys., Conf. Ser. 1691, 2020, pp.1-6. Doi:10.1088/1742-6596/1691/1/012069.
5. Atanassov, K. T. Intuitionistic fuzzy sets. In: Fuzzy Sets and Systems, vol. 20, 1986, pp. 87-96.
6. Augustin, T., Miranda, E., Vejnarova, J. Imprecise probability models and their applications. In: International Journal of Approximate Reasoning, 50(4), 2009, pp. 581-582.
7. Avizienis A., Laprie J. C., Randell B., Landwehr C. Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing. In: IEEE Trans. on Dependable and Secure Computing, vol. 1, no. 1, Jan-March 2004, pp. 11-33.
8. Baskett F., Chandy K. M., Muntz R. R., Palacios F. G. Open, closed, and mixed networks of queues with different classes of customers. In: Journal of the Assoc. Comput. Mach., 22, 1975, pp. 248-260. Doi:10.1145/321879.321887.
9. Bosse S., Muller H., Turowski, K. Integrated Optimization of IT Service Performance and Availability Using Performability Prediction Models. In: Leimeister, J.M.; Brenner, W. (Hrsg.): Proc. der 13. Internationalen Tagung Wirtschaftsinformatik (WI 2017), St. Gallen, S., 2017, pp. 76-90.
10. Bucholz P., Ciardo G., Donatelli S., Kemper P. Complexity of memory-efficient Kronecker operations with applications to the solutions of the Markov models. In: Informs J. Comp., no. 12(3), Summer 2000, pp. 203-222.

11. Cai G., Wang B., Hu W., Wang T. Moving target defense: state of the art and characteristics. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, November 2016, 17(11), 2016, pp.1122-1153.

12. Cai G., Wang B., Luo Y., Hu W. A Model for Evaluating and Comparing Moving Target Defense Techniques Based on Generalized Stochastic Petri Net. In: Wu J., Li L. (eds) *Advanced Computer Architecture. ACA 2016*, vol 626. Springer, Singapore, 2016, pp. 184-197.

13. Carvalho M., Ford R. Moving-target defenses for computer networks. In: *IEEE Security & Privacy*, 12(2), Mar.-Apr. 2014, pp. 73-76.

14. Cassandras C. G., Lafortune S. *Introduction to Discrete Event Systems*. Second Edition. Ed.: Springer Science+Business Media, LLC, 2008. - 781 p.

<http://cs6.yolasite.com/resources/book.pdf>

15. Cașcaval P. *Sisteme de timp real. Fiabilitatea și siguranța în funcționare*. Iași: Ed. Performantica, 2007. - 215 p.

16. Chen Z. et al. Numerical Evaluation of Job Finish Time Under MTD Environment. In: *IEEEAccess*, vol. 8, 2020, pp. 11437-11446. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965090.

17. Ciardo G., Blakemore A., Chimento P. F., Muppala J.K., and K.S. Trivedi. Automated generation and analysis of Markov reward models using stochastic reward nets. In: *Linear Algebra, Markov Chains, and Queueing Models*, Springer, New York, 1993, pp. 145-191.

18. Cinlar E. *Introduction to stochastic processes*. Prentice Hall, 1975. - 416 p.

19. Cherdantseva, Y. A review of cyber security risk assessment methods for SCADA systems. In: *Computers & Security*, 56, 2016, pp.1-27.

20. Chiola, G. Ajmone-Marsan M., Balbo G., Conte G. Generalized stochastic Petri nets: A definition at the net level and its implications. In: *IEEE Transactions on Software Engineering*, 19 (2), 1993, pp. 89-107.

21. Cho J.H., Ben-Asher N. Cyber defense in breadth: Modeling and analysis of integrated defense systems. In: Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, vol. 15(2), 2018, pp. 147-160.

22. Connell W., Menasce D. A., Albanese M. *Performance Modeling of Moving Target Defenses*. In: MTD Models and Evaluation, MTD'17, October 30, Dallas, TX, USA, 2017, pp.53-63.

23. Costa C., Benjamin G., Bedregal, C., Doria Neto A. D. Intuitionistic Fuzzy Probability. In: A.C. da Rocha Costa, R.M. Vicari, F. Tonidandel (Eds.): SBIA 2010, LNAI 6404, SpringerVerlag Heidelberg, 2010, pp. 273-282.

24. Ding Z., Shen H. Applying Fuzzy Differential Equations to the Performance Analysis of Service Composition. In: D.-S. Huang et al. (Eds.): ICIC 2010, LNCS 6215, Springer-Verlag, 2010, pp. 118-125.

25. Discrete event dynamic system.

https://en.wikipedia.org/wiki/Discrete_event_dynamic_system

26. Donatelli S., Hillston J., and Ribaldo M. A comparison of Performance Evaluation Process Algebra and Generalized Stochastic Petri Nets. In: Proceedings of the 6th Petri Nets and Performance Models Workshop, October 1995, p. 158-168.

27. Ehrig H., Padberg J. Graph grammars and Petri net transformations. In: Lectures on Concurrency and Petri Nets: Advances in Petri Nets, Springer Berlin Heidelberg, 2004, pp.496-536.

28. Gelenbe E. et al. Réseaux de files d'attente. Modélisation et traitement numérique. France, Edition Homes et Techniques, 1980. - 160 p.

29. Gelenbe E. Production-form queueing networks with negative and positive customers. In: Journal of Applied Probability, vol.28, 1991, pp. 656-663.

30. Guțuleac E., Zaporozjan S., Țurcanu Iu., Gîrleanu I. Analiza QoS a sistemelor Ad-hoc cu dispozitive de calcul orientate pe

servicii prin rețele Petri stocastice fuzzy. In: Meridian Ingineresc, 3, 2016, pp. 36-45.

31. Guțuleac, E. Descriptive compositional HSPN modeling of computer systems. In: Annals of the Craiova University, România, 2006, vol. 3 (30), no.2, pp.82-87.

32. Guțuleac E., Mocanu M. L. Descriptive Dynamic Rewriting GSPN-based Performance Modeling of Computer Systems. In: Proceedings of the 15th International Conference on Control Systems and Computer Science, 25-27 May 2005, București, România, 2005, pp. 62-66.

33. Guțuleac E. Evaluarea performanțelor sistemelor de calcul prin rețele Petri stocastice. Editura „Tehnica-Info”, Chișinău, 2004. - 276 p.

34. Guțuleac E., Boșneaga C., Reilean A. VPNP-Software tool for modeling and performance evaluation using generalized stochastic Petri nets. In: Proc. of the 6-th Intern. Conference on D&AS-2002, Suceava, România, 2002, pp. 243-248.

35. Guțuleac E. Sisteme și rețele de așteptare. Chișinău: Ed. Tehnica-UTM, 2019. - 284 p.

36. Guțuleac E., Zaporozjan S., Moraru V., Sclifos A. Performance modeling of network defense in breadth systems by matrix rewriting SRN with fuzzy parameters. In: Journal of Engineering Science, vol. XXVI, no. 3, 2019, pp. 38-53.

37. Harale N., Meshram B. B. Network Based Intrusion Detection and Prevention Systems: Attack Classification, Methodologies and Tools. In: International Journal of Engineering And Science, vol.6, Issue 5, 2016, pp. 1-12.

38. Ibidunmoye E. O., Alese B. K., Ogundele O.S. A Game-theoretic Scenario for Modeling the Attacker-Defender Interaction. In: Journal Comput. Eng. Inf. Technol., vol.2, No.1, 2013, pp.1-8.

39. Ioan L., Grazziela N. Modelare și evaluări de performanță în telecomunicații. București: Ed. Matrix Rom, 2008. - 228 p.

40. Kang B., Wei D., Li Y., Deng Y. A Method of Converting Z-number to Classical Fuzzy Number. In: Journal of Information & Computational Science, 9: 3, 2012, pp. 703-709.

41. Kashefi I., Kassiri M., Shahidinejad A. A Survey on Security Issues in Firewalls: A New Approach for Classifying Firewall Vulnerabilities. In: International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 3, Issue 2, March-April 2013, pp.585-591.
42. Kahraman C., Tüysüz F. Manufacturing System Modeling Using Petri Nets. In: C. Kahraman & M. Yavuz (Eds.): Prod. Engr. & Manage., STUD-FUZZ 252, Springer-Verlag, 2010, pp. 95-124.
43. Kang B., Wei D., Li Y., Deng Y. A Method of Converting Z-number to Classical Fuzzy Number. In: Journal of Information & Computational Science, 9: 3, 2012, pp. 703-709.
44. Kleinrock L. Queueing systems, vol. 1 “Theory”, vol. 2 “Computer applications”. Wiley&Sons, 1975. - 426 p.
45. Kotov V.E. Seti Petri. Moscova: Ed. Nauka, 1984. 160 p.
46. Krishna B. M. Performability Engineering: An Essential Concept in the 21st Century. In: Handbook of Performability Engineering, 2008, pp. 1-12.
<https://www.researchgate.net/publication/251120384>
47. Kure H. I, Islam S., Razzaque M. A. An Integrated Cyber Security Risk Management Approach for a CyberPhysical System. In: Applied Sciences. 8, 898, 2018, pp.1-29.
48. Kumar U. et al. Analysis of Network Security Issue and Its Attack and Defence. In: International Journal of Computer Science and Information Technologies, vol. 7 (3), 2016, pp.1029-1031.
49. Laprie J-C. Sûreté de fonctionnement des systèmes: concepts de base et terminologie. In: Revue de l'Électricité et de l'Électronique (REE), 11, 2004, pp.95-105.
50. Lata S., Kumar A. Mehar's method for analyzing the fuzzy reliability of piston manufacturing system. In: Eksploatacja Niezawodnosc – Maintenance and Reliability, 51, nr. 3, 2011, pp. 26-39.
51. Li Y., Sun J., Cao Q. Analysis for Ad Hoc Network Attack-Defense Based on Stochastic Game Model. In: Sensors & Transducers, Vol. 173, Issue 6, June 2014, pp. 256-262.

52. Li X., Liu B. Foundation of credibilistic logic. In: Fuzzy Optimization and Decision Making, v.8, no.1, 2009, pp. 91-102.

53. Liu F., Heiner M., Yang M. Fuzzy Stochastic Petri Nets for Modeling Biological Systems with Uncertain Kinetic Parameters. In: PLoS ONE 11(2): e0149674, 2016, pp. 1-19. DOI:10.1371/journal.pone.0149674.

54. Li J., Dai X., Meng Z., Dou, J. and Guan, X. Rapid design and reconfiguration of Petri net models for reconfigurable manufacturing cells with improved net rewriting systems and activity diagrams. In: Computers and Industrial Engineering, vol. 57, No. 4, 2009, pp.1431-1451.

55. Lin C., Wang Y Z., Wang Y. A Stochastic Game Nets Based Approach for Network Security Analysis. In: Proceedings of the 29th International Conference on Application and Theory of Petri Nets and other Models of Concurrency, 2008, pp.21-33.

56. Liu B., Liu Y. Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value model. In: IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 10, no. 4, 2002, pp.445-450

57. Llorens M., Oliver J. Structural and dynamic changes in concurrent systems: reconfigurable Petri nets. In: IEEE Transactions on Computers, vol.53, No. 9, 2004, pp.1147-1158.

58. Maleki H. et. al. Markov Modeling of Moving Target Defense Games. In: Proc. of the 3rd ACM Workshop on Moving Target Defense (MTD 2016). ACM, Vienna, 2016, pp.81-92.

59. Matcovschi M.H. Lanțuri și sisteme de așteptare markoviene. Iași: Editura Gh. Asachi, 2003. - 198 p.

60. Meng T., Wolter K., Wang Q. Security and Performance Tradeoff Analysis of Mobile Offloading Systems Under Timing Attacks. In: M. Beltran et al. (Eds.): Computer Performance Engineering 12th European Workshop, LNCS 9272, 2015, pp.32-46. DOI:10.1007/978-3-319-23267-6 3.

61. Meyer J.F. On evaluating the performability of degradable computing system. In: IEEE Trans. on Computer, vol. c-29, no. 8, 1980, pp. 720-731.

62. Muppala J., Ciardo G., Trivedi K. S. Stochastic reward nets for reliability prediction. *Commun. Reliab. Maintainab. Serv.*, vol. 1(2), 1994, pp. 9-20.

63. Murata T. Petri nets: properties, analysis and applications In: *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, No. 4, 1989, pp.541-580.

64. Nagoorgani A., Ponnalagu K. An approach to solve intuitionistic fuzzy linear programming problem using single step algorithm. In: *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, volume 86, No. 5, 2013, pp. 819-832.

65. Munteanu T., Gurguiatu G., Bălănuță C. Fiabilitate și calitate în ingineria electrică. Note de curs. Galați: University Press, România, 2009. - 122 p.

66. Network Simulator - ns-2. <https://www.isi.edu/nsnam/ns>

67. Padberg J., Kahloul L. Overview of Reconfigurable Petri Nets. In: *Graph Transformation, Specifications, and Nets*, Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 201-222.

68. Pastravanu O., Matcovschi M., Mahulea C. Aplicații ale rețelelor Petri în studiul sistemelor cu evenimente discrete. Iași: Ed. Gh. Asachi, 2002. - 238 p.

69. Pastravanu O. Sisteme cu evenimente discrete. Tehnici calitative bazate pe formalismul rețelelor Petri. București: Ed. Matrix Rom, 1997. - 225 p.

70. Petri Nets Tools Database Quick Overview.

<https://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/>

[PetriNets/tools/quick.html](https://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/tools/quick.html)

71. Rista C., Teixeira M., Griebler D., Fernande L. G. Evaluating, Estimating, and Improving Network Performance in Container-based Clouds. In: *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2018, pp. 514-520.

72. Prange U., Ehrig H., Hoffmann K., Padberg, J. Transformations in Reconfigurable Place/Transition Systems. In: *Springer Berlin Heidelberg*, 2008, pp.96-113.

73. Sachdeva A., Kumar P., Kumar D. Behavioral and performance analysis of feeding system using stochastic reward

nets. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 45, Nos. 1-2, 2009, pp.156-169.

74. Sallhammar K., Helvik B. E., Knapskog S. J. On stochastic modelling for integrated security and dependability evaluation. In: The Journal of Networks, vol. 1, Issue 5, 2006, pp. 31-42.

75. Schacke K. On the Kronecker Product. 2013. pp. 1-35. https://www.math.uwaterloo.ca/~hwoikowi/henry/reports/kronthes_isschaecke04.pdf. Accesat: mai 2021.

76. Shi L., Li Y., Feng H. Performance Analysis of HoneyPot with Petri Nets. In.: Information, 9, 245, 2018, pp.2-19.

77. Sanders W.H. Meyer J.F. A Unified Approach for Specifying Measures of Performance, Dependability, and Performability. In: Dependable Computing for Critical Applications, vol 4: of Dependable Computing and Fault-Tolerant Systems (ed., A. Avizienis and J. Laprie), Springer-Verlag, 1991, pp. 215-237.

78. Sengupta S. et al. A Survey of Moving Target Defenses for Network Security. In: Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, 2020, pp.1988-1995.

79. Stewart W. J. Introduction to the numerical solution of Markov chains. Princeton University Press, USA, 1994. - 568 p.

80. Tigane S., Kahloul L., Bouekkache S. Generalized stochastic Petri nets with rewritable topology. In: Proceedings of International Conf. on EDiS, 2017, pp. 1-6.

81. Tüysüz F., C. Kahraman. Modeling a flexible manufacturing cell using stochastic Petri nets with fuzzy parameters. Expert Systems with Applications, vol. 37, 2010, pp.3910-3920.

82. Tigane S., Kahloul L., Bouekkache S. Net rewriting system for GSPN a RMS case study. In: Proc. International Conference on Advanced Aspects of Software Engineering (ICAASE), IEEE, October, 2016, pp.38-45.

83. Thamotharan S. A Study on Multi Server Fuzzy Queuing Model in Triangular and Trapezoidal Fuzzy Numbers Using $\alpha -$

Cuts. In: International Journal of Science and Research (IJSR), volume 5 Issue 1, 2016, pp. 226-230.

84. Trivedi K. S., Kim D.S., Roy A., Medhi D. Dependability and security models. In: Proc. Of 7th International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks, Oct. 2009. pp. 11-20.

85. Villemeur A. Sûreté de fonctionnement des système industriels, vol. 67, Eyrolles, 1988. - 822 p.

86. Wang J. Petri Nets for Dynamic Event-Driven System Modeling. In: Handbook of Dynamic System Modeling, chapter 24, 2007, pp. 1-17.

87. Wolfram Mathematica: Modern Technical Computing.
<https://www.wolfram.com/mathematica/>

88. Wu N., Zhou, M. Intelligent token Petri nets for modelling and control of reconfigurable automated manufacturing systems with dynamical changes. In: Transactions of the Institute of Measurement and Control, vol. 33, No. 1, 2011, pp.9-29.

89. Zadeh L.A. A note on Z-numbers. In: Information Science, no. 181, 2011, pp. 2923-2932.

90. Zhang G. et. al. Attack Simulation based Software Protection Assessment Method with Petri Net. In: Intl. Journal on Cyber Situational Awareness, vol. 1, No. 1, 2016, pp. 152-181.

91. Zhang J., Khalgui M., Li Z., Mosbahi O., Al-Ahmari A.M. R-TNCES: a novel formalism for reconfigurable discrete event control systems. In: IEEE Transactions on Systems, Man., and Cybernetics: Systems, vol. 43, No. 4, 2013, pp.757-772.

92. Zheng J., Namin A. S. A survey on the moving target defense strategies: An architectural perspective. In: Journal of Computer Science and Technology, 34(1), 2019, pp. 207-233.

93. Zhou K.Q., Zain A.M. Fuzzy Petri nets and industrial applications: a review. In: Artif. Intell. Rev. 45, 2016, pp. 405-446. DOI 10.1007/s10462-015-9451-9.

94. Zhuo W., Lin C., Chen X. Quantitative analysis method of network attack and defense based on stochastic game model. In: Journal of Computers, vol. 9, 2010, pp. 1748-1762.