

## MODELAREA ȘI EVALUAREA DISPONIBILITĂȚII NODURILOR REȚELOR DE SENZORI PRIN GSPN CU PARAMETRI FUZZY

Andrei FURTUNA<sup>1\*</sup>,  
Alexei SCLIFOS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Calculatoare, Informatică și Microelectronică,  
Departamentul Informatică și Ingineria Sistemelor, Chișinău, Republica Moldova

\*Autorul corespondent: Andrei Furtuna, [furtuna\\_andrei@outlook.com](mailto:furtuna_andrei@outlook.com)

**Rezumat.** În lucrare este prezentat un model integrator de rețea Petri stocastică generalizată (GSPN) cu parametri fuzzy, care permite de a efectua mai nuanțat modelarea și evaluarea disponibilității nodurilor unei rețele senzoriale wireless (WSN), luând în considerare defecțiunile componentelor, mecanismele consumului de energie, interacțiunea intrușilor și a apărării sistemului de securitate WSN.

**Cuvinte cheie:** rețele Petri stocastice, senzori wireless, siguranța în funcționare

### Introducere

Rețelele de senzori wireless (WSN) sunt unele dintre cele mai rapid dezvoltate tehnologii informaționale cu aplicații relevante pentru misiuni critice și de siguranță, fiind utilizate cu succes în diferite domenii, cum ar fi transportul inteligent și logistica, monitorizarea mediului, supravegherea și securitatea instituțiilor, monitorizarea sănătății pacienților, controlul inteligent al rețelelor energetice, al proceselor cu aplicații industriale și militare etc. [1]. WSNs cuprinde, de obicei, noduri senzoriale (NS) individuale care funcționează cu anumite capacități de calcul și comunicare wireless limitate. NS sunt capabile să simtă mediul fizic - de exemplu, câmpul magnetic, undele acustice, temperatura, umiditatea, lumina, mișcarea etc - și partajează datele detectate prin comunicarea wireless între ele. În mod obișnuit, un NS cuprinde: un modul de detectare - acest modul obține date; un modul de procesare și stocare a datelor locale; un modul radio, destinat comunicațiilor fără fir; o sursă de alimentare limitată cu energie [2].

Deoarece NS sunt predispuse la defecțiuni și atacuri malițioase din cauza mediului de desfășurare necontrolat, limitarea resurselor de energie disponibile și a naturii mediului de radiodifuzare a transmisiei datelor, performanțele fiecărui tip de NS afectează și performanța totală a unei WSN. Astfel, *siguranța în funcționare* (eng. *dependability*) (SF) și performanțele NS [1-3] sunt principalii indicatori cantitativi ce trebuie evaluați pentru a asigura calitatea specificată a serviciilor (QoS, Quality of Service) [1-2] furnizate de către o WSN, în special atunci când ea este utilizată pentru o aplicație critică.

În literatura de specialitate sunt cunoscute doar câteva abordări de evaluare a fiabilității și disponibilității NS luând în considerare aparte diferite aspecte de modelare bazate pe lanțuri Markov, rețele Petri stocastice generalizate (GSPN) [4-6] și a jocurilor matematice [3, 4] în care parametrii cantitativi sunt mărimi certe. Însă, în SWN cunoștințele despre valorile parametrilor de defecțiune ale componentelor, ratelor de atac și ale celor de apărare [5] sunt, în general, imperfecte [7].

Astfel, pentru a descrie în mod mai realist funcționarea NS, luând în considerație aspectele de incertitudine menționate, în această lucrare este prezentată o abordare de modelare și evaluare a disponibilității NS care imbină utilizarea metodelor logicii și numerelor fuzzy și a GSPN. În baza îmbinării acestor paradigme este definită o extensie a GSPN cu parametri fuzzy, numită FGSPN. Ea se bazează pe fuzzificarea ratelor de declanșare ale tranzițiilor, în baza cărora sunt determinate probabilitățile fuzzy de stare [7-9] și a indicatorilor QoS.

În continuare, din cauza restricției de volum, pentru a facilita citirea acestei lucrări, vom prezenta doar unele elemente de bază ale teoriei logicii fuzzy, ale formalismul GSPN, FGSPN și aplicarea acestora la modelarea și evaluarea disponibilității NS, indicator QoS. Mai detaliat, cititorul poate consulta lucrarea [6] pentru a face cunoștință cu formalismul GSPN.

### Elemente ale teoriei logicii fuzzy

Teoria mulțimilor fuzzy și conceptele cu numere fuzzy [8] au apărut din necesitatea de a exprima cantitativ mărimi imprecise, în care domeniul de valori pe care îl ia funcția de apartenență nu mai este limitată la două valori, ci se extinde la întreg intervalul  $[0, 1]$ .

Mulțimea fuzzy  $\lambda$  este definită astfel:  $\lambda = \{(x, \mu_\lambda(x)) / x \in Z, \mu_\lambda(x) \in [0, 1]\}$ , unde funcția de apartenență  $\mu_\lambda(x)$ , asociată mulțimii fuzzy, arată gradul în care fiecare element din mulțimea  $Z$  aparține mulțimii fuzzy  $\lambda$ . Cu cât valoarea  $\mu_\lambda(x)$  este mai apropiată de 1, cu atât este mai puternică apartenența la mulțimea dată.

Două tipuri de numere fuzzy sunt cel mai des întâlnite în aplicații: numerele triunghiulare și numerele trapezoidale. Utilizarea numerelor fuzzy triunghiularizate este mai indicată, un motiv fiind și acela al complexității de calcul.

De asemenea, în literatura de domeniu numerele fuzzy  $\tilde{\lambda}$  sunt reprezentate și prin așa numite  $\alpha$ -tăieturi (eng.  $\alpha$ -cut):  $\tilde{\lambda}_i^\alpha = \{x : \mu_{\lambda_i}(x) \geq \alpha \in [0, 1]\}$  cu următoarele *intervale posibile de încredere* la nivel  $\alpha$ :  $\tilde{\lambda}_i^\alpha = [\tilde{\lambda}_i^{\alpha-}, \tilde{\lambda}_i^{\alpha+}] = [a + \alpha(b - a), c - \alpha(c - b)]$ .

### Elemente de bază ale FGSPN

Un model FGSPN, bazat pe GSPN cu parametri fuzzy, notat  $\tilde{\Gamma}$ , este o structură de obiecte, redată de 4-tuplul:  $\tilde{\Gamma} = \langle \Gamma, \tilde{w}, \tilde{\Lambda}, \mu_\lambda \rangle$ , unde:  $\Gamma$  este un model GSPN în care mulțimea finită de tranziții este partiționată astfel încât:  $T = T^0 \cup T^r$ ,  $T^0 \cap T^r = \emptyset$ , iar  $\text{Pri}(T^0) > \text{Pri}(T^r)$  este prioritatea de declanșare a tranzițiilor validate. Aici  $T^0$  este mulțimea tranzițiilor imediate (grafic reprezentate prin bare subțiri) cu o durată de declanșare nulă, iar  $T^r$  este mulțimea tranzițiilor temporizate (grafic reprezentate prin dreptunghiuri negre) cu o durată aleatorie de declanșare ce are o distribuție exponențial-negativă;  $\tilde{w}: T_0 \times IN_+^{|P|} \rightarrow IR^+$  este funcția de pondere fuzzy  $w(t, M)$  ce determină probabilitatea fuzzy  $\tilde{q}(t, M)$  de declanșare a tranziției imediate, validate de către marcajul curent  $M$ , care descrie un selector probabilistic;  $IR^+$  este mulțimea mărimilor reale nenegative;  $\tilde{\Lambda}: T^r \times IN_+^{|P|} \rightarrow IR^+$  este funcția ce determină  $0 < \tilde{\lambda}(t, M) < +\infty$  rata fuzzy de declanșare a tranziției temporizate validate în marcajul curent  $M$ , adică parametrul fuzzy al legii exponențial-negative;  $\mu_\lambda: \tilde{\Lambda} \rightarrow [0, 1]$  funcția gradului de apartenență al lui  $\tilde{\lambda}(t, M)$  la mulțimea fuzzy  $\tilde{\Lambda}$  ale valorilor ratelor fuzzy de declanșare ale tranzițiilor temporizate.

### Modelarea și evaluarea disponibilității unui NS prin FGSPN

În Figura 1 este prezentat modelul GSPN1 subiacentă FGSPN1 care descrie funcționarea unui NS, luând în considerare interacțiunea intrus – IDS, defectarea și repararea părții hardware și, de asemenea, aspectele de consum a energiei.

Semnificația locațiilor și cea a tranzițiilor GSPN1 din Figura 1 este următoarea:

- *Semnificația locațiilor*:  $p_1$  - inițiere recepție a unui pachet de date de către NS;  $p_2$  - procesorul NS este în stare *pasivă* („stand by”) pentru a economisi consumul de energie;  $p_3$  - memorie tampon;  $p_4$  - inițiere a trecerii NS este în stare activă de procesare a datelor recepționate;  $p_5$  - procesorul NS este *activat* și procesează date;  $p_6$  - procesorul NS este liber;  $p_7$  - intrusul atacă NS și IDS declanșează verificarea intrusului;  $p_8$  - atacul este detectat de către IDS;  $p_9$  - atacul nu este detectat de către IDS;  $p_{10}$  - IDS declanșează procesul de contracarare a atacului;  $p_{11}$  - IDS declanșează procesul de eliminare a consecințelor atacului;  $p_{12}$  - IDS nu a reușit să împiedice atacul;  $p_{13}$  - NS nu este disponibil din cauza unui *atac malițios reușit* sau a unei *defecțiuni hardware*;  $p_{14}$  - intrusul este gata să inițieze un atac al NS;  $p_{15}$  - intrusul a inițiat un atac al NS.

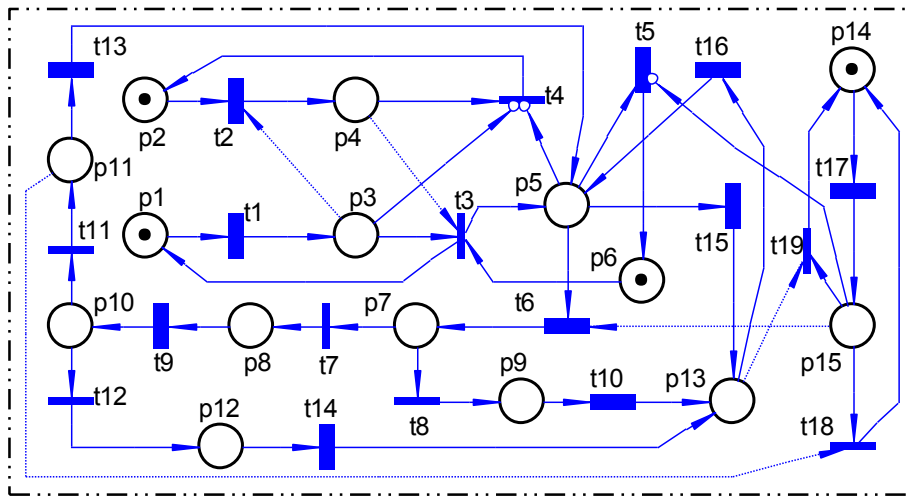


Figura 1. Modelul GSPN1 al FGSPN1 ce descrie funcționarea unui nod WSN

- *Semnificația tranzițiilor temporizate:*  $t_1$  - sosirea unui pachet de date în NS;  $t_2$  - schimbarea stării *stand by* a NS în cea activă;  $t_3$  - procesarea datelor recepționate de către NS;  $t_4$  - declanșarea atacului NS de către intrus;  $t_5$  - activitatea IDS de contracarare a atacului detectat;  $t_6$  - activitatea malițioasă a intrusului ce nu a fost detectată de IDS;  $t_7$  - IDS recuperează cu succes funcționarea corectă a NS atacat;  $t_8$  - activitatea malițioasă a intrusului ce a fost detectat de IDS, însă IDS nu poate recupera funcționarea corectă a NS;  $t_9$  - apariția unei defecțiuni hardware;  $t_{10}$  - NS este reparat;  $t_{11}$  - apariția unui intrus în NS.

- *Semnificația tranzițiilor imediate:*  $t_{12}$  - alocarea microprocesorului pentru prelucrarea unui pachet;  $t_{13}$  - trecerea NS din *starea activă* în cea de *stand by*;  $t_{14}$  - probabilitatea că IDS a detectat atacul;  $t_{15}$  - probabilitatea că IDS nu a detectat atacul;  $t_{16}$  - probabilitatea că acțiunile de recuperare ale IDS sunt reușite;  $t_{17}$  - probabilitatea că acțiunile de recuperare ale IDS nu sunt reușite;  $t_{18}$  - eliminarea cu succes a activităților intrusului;  $t_{19}$  - intrusul părăsește NS după un atac reușit.

### Analiza numerică a QoS în baza modelului FGSPN1

Evaluarea unor indicatori QoS ai NS atacat este efectuată în baza analizei modelului FGSPN1 în două etape. Prima etapă este aceeași ca și cea convențională de modelare prin GSPN1, subiacentă FGSPN1 [7-9]. Unica diferență este aceea că distribuția probabilităților staționare de stare ale GSPN1 este obținută parametric utilizând lanțul Markov timp continuu (LMTCC) generat de modelul GSPN1 analizat. Cu alte cuvinte, fiecare probabilitate staționară de stare,  $\pi_i$ , este descrisă în termenii ratelor obișnuite de declanșare ale tranzițiilor, adică în funcție de  $\lambda_i$  care reflectă numai natura stocastică a NS modelat. În a doua etapă ratele de declanșare ale tranzițiilor sunt reprezentate ca numere fuzzy trapezoidale sau triunghiulare,  $\tilde{\lambda}_i^\alpha = [\tilde{\lambda}_i^{\alpha-}, \tilde{\lambda}_i^{\alpha+}]$ . După înlocuirea mărimilor numerice fuzzy ale  $\tilde{\lambda}_i$ , folosind teoria de calcul a numerelor fuzzy, obținem  $\alpha$ -tăieturi ale probabilităților staționare fuzzy  $\tilde{\pi}_i$  de stare ale LMTCC subiacent GSPN1 [9]. În conformitate cu [8, 9] este folosită aritmetica intervalelor cu  $\alpha$ -tăieturi pentru a calcula funcțiile variabilelor fuzzy. Pentru a putea găsi  $\alpha$ -tăieturile ale  $\tilde{\pi}_i(\alpha)$  este necesar de a rezolva și o problemă de optimizare [9] care face ca soluția să fie fezabilă.

Modelele GSPN1 și FGSPN1 au fost validate, folosind produsul program VPNP [10]. Acest model are 27 stări stabile. GSPN1 este *mărginită*, *viabilă* și *reinițializabilă* [6], iar LMTCC, generat de modelul GSPN1, este ergodic [6, 7, 9] și astfel există un regim staționar de funcționare

al NS. Pentru un set de parametri fuzzy a fost efectuată analiza disponibilității NS ca fiind probabilitatea staționară fuzzy  $\tilde{\pi}_D(\alpha) = \text{Pr ob}(M(p_{13}) = 0)$ , adică pentru toate marcajele accesibile ale FGSPN1  $M(p_{13}) = 0$ .

În mod similar, pot fi evaluați și alți indicatori SF, de exemplu, *fiabilitatea*, *costurile aigurării securității și productivitatea* NS, care sunt funcții de probabilitățile fuzzy respective.

### Concluzii

În cadrul acestui studiu, este propusă o abordare unificatoare de modelare și evaluare a disponibilității unui NS al WSN, bazată pe GSPN cu parametri fuzzy, FGSPN, care permite de a descrie mai nuanțat ambele dimensiuni ale incertitudinii de funcționare, care sunt variabilitatea probabilistică și cea de imprecizie. Această abordare permite, de asemenea, de a modela și a analiza caracteristicile numerice de performanță și a siguranței de funcționare a NS și a oricăror sisteme critice, dinamice și complexe.

Pe viitor vom considera și modele GSPN cu parametri fuzzy intuiționiste și, de asemenea, aplicarea abordării propuse în alte domenii.

### Referințe

1. VENKATESAN, L.; SHANMUGAVEL, S.; SUBRAMANIAM, C. A. Survey on Modeling and Enhancing Reliability of Wireless Sensor Network. In: *Wirel. Sens. Netw.*, 2013, pp. 41–51.
2. DÂMASO, A.; FREITAS, D.; ROSA, N.; SILVA, B.; MACIEL, P. Evaluating the Power Consumption of Wireless Sensor Network Applications Using Models. In: *Sensors*, 2013, 13, pp. 3473–3500.
3. DÂMASO, A.; ROSA, N.; MACIEL, P. *Integrated Evaluation of Reliability and Power Consumption of Wireless Sensor Networks* [online]. 2017, 17, 2547, pp. 1-27. [accesat 10.02.2020]. Disponibil: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/11/2547>
4. LEE, J. S.; SUN, Y. H. Behavior Modeling of Networked Wireless Sensors for Energy Consumption Using Petri Nets. In: *The Thirteenth International Conference on Systems and Networks Communications, 2018*, Nice, France, October 14-18, 2018, pp. 64-68.
5. BUTUN, I.; MORGERA, S. D.; SANKAR, R. A survey of intrusion detection systems in wireless sensor networks. In: *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2014, 16, pp. 266–282.
6. AJMONE-MARSAN, M.; BALBO, G.; CONTE, G. A Class of Generalized Stochastic Petri Nets for the Performance Evaluation of Multiprocessor Systems. In: *ACM Trans. Computer Systems*, 1984, vol. 2, 2, pp. 93-122.
7. AUGUSTIN, T.; MIRANDA, E.; VEJNAROVA, J. Imprecise probability models and their applications. In: *Intern. Journal of Approx. Reasoning*, 50(4), 2009, p. 581 - 582.
8. PEDRYCZ, W.; SKOWRON, A.; KREINOVICH, V. *Fuzzy Numbers and Fuzzy Arithmetic* [online]. 2008, pp. 259-283. [accesat 03.02.2020]. Disponibil: <https://www.researchgate.net/publication/229708790>
9. TÜYSÜZ, F.; KAHRAMAN, C. *Modeling a flexible manufacturing cell using stochastic Petri nets with fuzzy parameters* [online]. 2010, 37, pp. 3910–3920. [accesat 11.01.2020]. Disponibil: <https://www.researchgate.net/publication/287993951>
10. GUȚULEAC, E.; BOȘNEAGA, C.; REILEAN, A. VNP-Software tool for modeling and performance evaluation using generalized stochastic Petri nets. In: *Proceedings of the 6-th International Conference on D&AS2002*, Suceava, România, 23-25 May 2002, pp. 243-248.