

## MODELAREA CONTROLULUI SIGUR AL MOBILITĂȚII NODURILOR SENZORIALE PRIN REȚELE PETRI HIBRIDE STOCASTICE

*E. Guțuleac, dr. hab., I. Gîrleanu, drd.*

*Universitatea Tehnică a Moldovei*

### INTRODUCERE

Progresele recente în domeniul sistemelor cu microprocesoare, roboților mobili și a comunicațiilor fără fir (wireless) au permis dezvoltarea rețelelor cu noduri mobile de senzori (ReSM) ce au mici costuri [1, 5, 11]. În prezent, există mai multe aplicații ale ReSM, mai ales, în situații emergente [2, 11]. Cu toate acestea, din cauza mediilor potențial dure, nesigure și dinamice, împreună cu o sursă de energie electrică și lățime de bandă limitată, proiectarea și realizarea ReSM se confruntă cu încă o mulțime de provocări tehnice de poziționare, durată de viață, rutare a pachetelor de date, securitate, precum și cu probleme de control sigur al mobilității nodurilor senzoriale [7, 10, 12].

Modelarea formală și tehnicile de verificare sunt utilizate pe scară largă la proiectarea și analiza mai multor tipuri de sisteme cu procese discret-continue, în baza verificării cărora se pot identifica lacunele de proiectare la stadiul incipient al ciclului lor de viață. Ca rezultat, aceste probleme pot fi eliminate mai devreme, iar costurile de depanare, întreținere și mentenanță pot fi reduse semnificativ.

Unul dintre cele mai răspândite formalisme moderne, folosite pentru modelarea și analiza sistemelor paralele/distribuite cu procese discret-continue, sunt rețelele Petri (RP) și rețelele Petri hibride stocastice (RPHS) de diferite extensii [3, 4].

Actualmente, în literatura de specialitate există doar câteva modele formale de verificare și analiză a rețelelor de senzori imobile [6, 8].

În lucrarea de față este propus un cadru unificator util pentru modelarea și analiza controlului sigur al mobilității nodurilor senzoriale ale ReSM complexe, orientate pe o descriere adecvată a stărilor discret-continue ale acestora și a regulilor de evoluție pentru actualizarea stării curente stabilite prin modele de RPHS. Reprezentarea grafică a acestor tip de modele, precum și fundamentarea lor matematică sunt bine potrivite pentru a reprezenta evoluția stărilor fiecărui nod senzorial mobil ( $NSM_i$ ,  $i = 1, \dots, n_s$ ) și interacțiunea dintre acestea. De asemenea, un avantaj important al demersului propus constă în faptul că modelul RPHS este foarte concis și

flexibil, deoarece mai multe dintre variabilele sale sunt parametrizate ce pot lua valori alternative dependente de marcajul curent.

### 1. REȚELE PETRI HIBRIDE STOCASTICE

Rețelele Petri hibride stocastice (RPHS) introduse în [3] permit modelarea, verificarea și evaluarea performanțelor proceselor de calcul cu evenimente discret-continue.

Particularitățile RPHS constau în faptul că atât mulțimea locațiilor  $P$  constituie o partiție  $P = P_d \cup P_c$ ,  $P_d \cap P_c = \emptyset$ , unde  $P_d$  este mulțimea locațiilor discrete și  $P_c$  este mulțimea locațiilor continue (buffere), cât și mulțimea tranzițiilor temporizate  $T$  constituie o partiție  $T = T_d \cup T_c$ ,  $T_d \cap T_c = \emptyset$ , unde  $T_d$  este mulțimea tranzițiilor discrete și  $T_c$  este mulțimea tranzițiilor continue, care fiind validate ele își schimbă în mod continuu cu viteza  $V_k(M, \vec{x})$  nivelul de fluid al bufferelor incidente cu tranziția continuă  $u_k \in T_c$  respectivă. Locațiile discrete pot conține un număr întreg de jetoane, iar locațiile continue pot conține o cantitate (mărime reală) de fluid. Locațiile discrete sunt reprezentate grafic prin cercurile simple, iar cele continue prin două cercurile concentrice. Tranzițiile discrete temporizate  $T_r$  (*immediate*  $T_0$ ) sunt reprezentate prin bare negre groase (*subțiri*),  $T_d = T_r \cup T_0$ ,  $T_r \cap T_0 = \emptyset$  iar cele continue prin dreptunghiuri mici. Marcajul curent  $(M, \vec{x})$  al RPHS este vectorul coloană ce redă distribuția comună a jetoanelor în locațiile discrete și a nivelurilor de fluide în buffere. Partea discretă a acestui marcaj este reprezentată de vectorul  $M = (m_i, \forall p_i \in P_d)$  ce conține un număr întreg pozitiv de jetoane  $m_i = M(p_i) \in \mathbb{N}_+$  în locațiile discrete  $p_i$ , iar  $\vec{x} = (x_k, \forall b_k \in P_c)$  este vectorul de marcare continuă a bufferelor în care  $x_k \in \mathbb{R}_+$  reprezintă nivelul de fluid în buferul  $b_k \in P_c$ , care este o mărime reală pozitivă sau

negativă. Jetoanele discrete sunt deplasate în conformitate cu regulile de declanșare ale tranzițiilor imediate  $t_j \in T_0$  și a celor temporizate  $q_k \in T_r$ , prin arce discrete.

Reprezentarea grafică a tuturor primitivelor RPHS este dată în figura 1.








Primitive discrete		
 Locatie	 Tranzitie temporizata	Arc normal $\rightarrow$
 Jetoane	 Tranzitie imediata	Arc test $\dashrightarrow$
		Arc inhibitor $\dashrightarrow \circ$
Primitive continue		
 Locatie	 Tranzitie temporizata	Arc fluid $\Rightarrow$
 Fluid		Arc inhibitor $\dashrightarrow \circ$
		Arc test $\dashrightarrow$
		Arc setare $\Rightarrow$

Figura 1. Primitivele unei rețele RPHS.

Duratele de declanșare ale tranzițiilor temporizate sunt definite de ratele instantanee de declanșare  $\lambda(q, M, \bar{x})$ , care pot depinde de marcajul curent al rețelei. Niveluri de fluid în buffere sunt schimbate fie prin tranziții continue  $u_j$  în funcție de viteza lor de declanșare  $v(u, M, \bar{x})$ , care poate depinde de marcajul curent al rețelei, sau pot fi stabilite direct de un arc de setare la o anumită valoare, atunci când o tranziție se va declanșa. Arcele inhibitoare (arcele test) dezactivează (validează) o tranziție atunci când un anumit număr de jetoane sau o anumită cantitate de fluid este prezentă într-o locație discretă sau continuă[3].

În figura 2 sunt reprezentate opțiunile posibile de conectare a locațiilor discrete și continue prin arce admisibile ale rețelei RPHS cu tranzițiile discrete și continue respective.

Principalele atribute cantitative ale RPHS, funcție de marcajul curent, sunt :

- ponderile arcelor directe, inhibitoare și test respectiv discrete și continue  $W(M, \bar{x})$ ;
- capacitatea locațiilor discrete astfel, încât  $\forall p_i \in P_d$  aceasta este redată de două mărimi: capacitatea minimă  $K_{p_i}^{\min}$  și cea maximă  $K_{p_i}^{\max}$ ,  $0 < K_{p_i}^{\min} < K_{p_i}^{\max} < +\infty$  de jetoane care poate să se afle în locația discretă  $p_i$ . Implicit,  $K_{p_i}^{\min} = 0$ , iar  $K_{p_i}^{\max}$  este nelimitată;

- capacitatea locațiilor continue, astfel încât pentru orice  $b_i$  aceasta este redată de două mărimi: capacitatea minimă  $x_i^{\min}$  (poate fi o mărime negativă) și cea maximă  $x_i^{\max}$ ,  $-\infty < x_i^{\min} < x_i^{\max} < +\infty$ , de fluid care poate să se afle în bufferul  $b_i$ . Implicit,  $x_i^{\min} = 0$ , iar  $x_i^{\max}$  este nelimitată;

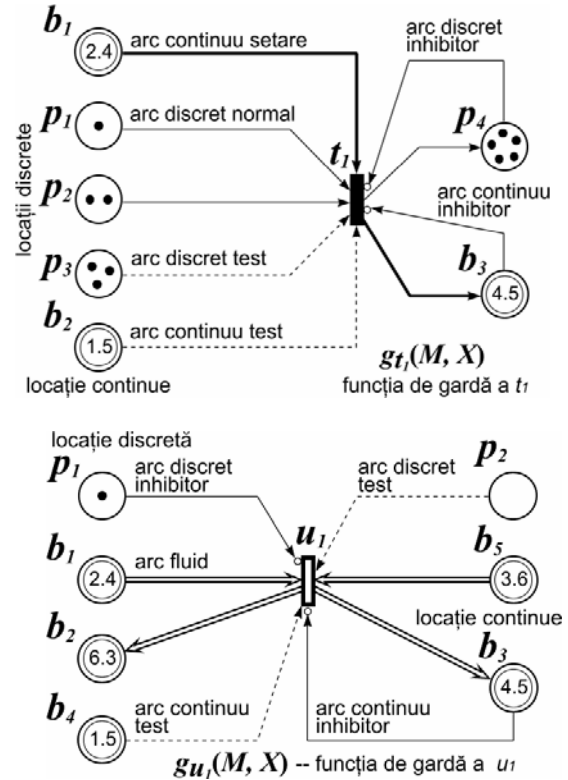


Figura 2. Conectările posibile ale arcelor RPHS cu tranzițiile discrete și continue.

- funcția de gardă, care pentru orice tranziție  $\mathcal{G}$  discretă sau continuă  $\mathcal{G} \in \{t, q, u\}$  determină o funcție Booleană  $g(\mathcal{G}, M, \bar{x})$  în marcajul curent. Dacă tranziția  $\mathcal{G}$  este validată de marcajul curent relativ la arce și  $g(\mathcal{G}, M, \bar{x})$  are valoarea 'true', atunci tranziția  $\mathcal{G}$  rămâne validată și, eventual, ea poate fi declanșată, iar dacă ea are valoarea 'false' - această tranziție nu mai este validată. Implicit,  $g(\mathcal{G}, M, \bar{x}) = 'true'$ ;
- prioritățile dinamice  $Pri(T_0) > Pri(T_r)$  de declanșare ale tranzițiilor validate de marcajul curent. Implicit, prioritățile nemenționate ale unor tranziții sunt considerate nule;
- ratele de declanșare  $\lambda(q, M, \bar{x})$  ale tranzițiilor discrete temporizate, validate de marcajul curent, adică rata de declanșare este parametrul legii exponențial-negative;
- viteza ponderată de declanșare  $\omega(t, M, \bar{x})$  a tranziției discrete imediate, după care este

determinată probabilitatea de declanșare a acestei tranziții validate de marcajul curent;

- viteza  $v(u, M, \bar{x})$  de declanșare a tranzițiilor continue. Această funcție determină rata fluidului transmis prin arcele ce leagă tranzițiile continue cu locațiile continue respective ale rețelei;

Definirea detaliată a *RPHS*, regulile de validare și declanșare ale tranzițiilor discrete și continue de către marcajul curent sunt prezentate în [3].

## 2. EXPRESII DESCRIPTIVE RPHS

Pentru a reda proprietăți compoziționale modelelor de rețele *RPHS*, în mod similar cu noțiunea de *pixel*, în [3] este introdusă noțiunea de *dexel (descriptive expression element)* și un set de operații compoziționale cu atribute respective care permit de a construi expresii descriptive, care sunt mapate direct în modelul specificat de utilizator.

În scopul de a facilita expunerea lucrării date, prezentăm succint doar unele operații compoziționale. Mai detaliat cititorul poate consulta lucrările [3, 4].

Un *dexel* hibrid *bHDE* al rețelei subiacente *RPHS* este redat de expresia:

$$bHDE = \langle \Pi_j | \alpha_j m_{0i}^{h k_i} \tilde{y}_i^{\beta_i} [W_i^+, W_i^-] \Pi_k | \alpha_k \rangle,$$

unde  $\tilde{y} \in \{p, \bar{p}, \tilde{p}, b, \bar{b}, \tilde{b}\}$  este simbolul-locație care reprezintă locația discretă  $p$  sau continuă  $b$  incidentă la tranziția  $\tilde{z} \in \{t, q, u\}$ , care este simbolul-tranziție discretă imediată  $t$ , temporizată  $q$  sau continuă  $u$ , ce determină respectiv tipul de arc ( $\{p, b - \text{arc normal}, \bar{p}, \bar{b} - \text{arc inhibitor}, \tilde{p}, \tilde{b} - \text{arc test}\}$ ) cu ponderea respectivă  $W_i^-$  incident înainte la tranziția  $|_{\tilde{z}_k}$ :

$$W_i^- \in \{\text{Pr } e(\tilde{z}_k, \tilde{y}_i), \text{Inh}(\tilde{z}_k, \tilde{y}_i), \text{Test}(\tilde{z}_k, \tilde{y}_i)\},$$

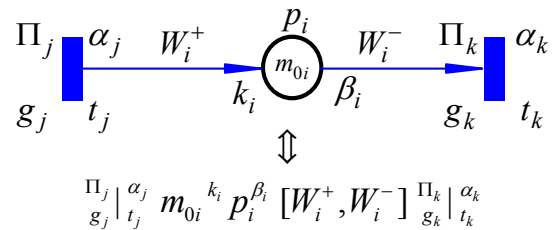
iar  $W_i^+ \in \{\text{Post}(\tilde{z}_j, \tilde{y}_i)\}$  este ponderea arcului normal ce iese din tranziția  $|_{\tilde{z}_j}$  și intră în locația  $\tilde{y}_i$ .

Atributele locației  $\tilde{y}_i$  sunt, respectiv:  $m_{0i}$  - marcajul inițial;  $k_i$  - capacitățile locației;  $\beta_i$  - eticheta locației ce redă tipul de condiții. Atributele tranzițiilor  $\tilde{z}_j$  și  $\tilde{z}_k$  sunt, respectiv:  $g_j$  și  $g_k$  - funcția de gardă;  $\Pi_j$  și  $\Pi_k$  - funcția de prioritate;  $\alpha_j$  și  $\alpha_k$  - eticheta ce redă tipul de acțiune sau activitate. Unele atribute pot fi omise, fiind considerate ca implicit date, de exemplu:  $m_{0i} = 0$ ;

$K_{p_i}^{\min} = 0$ , iar  $K_{p_i}^{\max}$  este considerată ca fiind nelimitată. În cazul în care  $W_i^- = W_i^+ = 1$  paranteza pătrată se va omite.

Maparea unor derivate ale *bHDE* pentru partea discretă a *RPHS* este prezentată în figura 3.

Cu ajutorul diferitor derivate ale *bHDE* și operații compoziționale unare și/sau binare, folosind un raționament adecvat ce redă interacțiunea condițiilor și evenimentelor sistemului specificat, putem compune expresii descriptive ale modelelor *RPHS* (sub)sistemelor considerate.



**Figura 3.** Maparea unor derivate ale *bHDE* pentru partea discretă a *RPHS*.

O expresie descriptivă (*DE*) a unei rețele  $\Sigma \zeta$  tip *RPHS* este:

$$DE ::= bDE | DE_i * DE_j | \circ DE,$$

unde  $*$  reprezintă operatorul unei operații binare, iar  $\circ$  reprezintă operatorul unei operații unare.

Implicit, la aplicarea acestor operații, locațiile și tranzițiile ce au același nume se vor contopi în mod respectiv. Într-o *DE*, orice simbol-locație sau simbol-tranziție poate fi folosit în orice ordine de mai multe ori. Astfel, se va subînțelege că în rețele *RPHS* respective, redate de expresia *DE*, aceleași locații (tranziții), cu același simbol vor fi contopite într-un singur simbol-locație (simbol-tranziție). Ca rezultat al aplicării acestor operații compoziționale, obținem o nouă clasă de subrețele  $N_i$ , interconectarea cărora, conform *DE*, va determina rețeaua  $\Sigma \zeta$  rezultantă, redată de această expresie.

Redăm în continuare unele operații compoziționale ce vor fi aplicate în această lucrare:

• *Operația Inhibiție*, redată de operatorul " $\bar{p}_i$ ", este o operație unară. Ea descrie faptul că la ocurența pre-condiției  $p_i$ , nu mai poate avea loc ocurența evenimentului specificat. Acestei operații îi corespunde dexel-ul  $DE1 = m_{0i}^{k_i} \bar{p}_i^{\beta_i} [W_i^-] \Pi_k | \alpha_k$  ce redă o rețea primitivă, constituită din locația  $p_i$  și arcul inhibitor ce duce din această locație în tranziția  $t_k$ , cu atributele respective, legată de declanșarea evenimentului specificat.

- *Operația Test* unară cu operatorul “ $\tilde{p}_i$ ”, descrie o buclă a rețelei impure, redată de  $DE2 = m_{0i} \tilde{p}_i [W_i] |_{t_j}^{\alpha_j}$ , care reprezintă arcul *test*.

- *Operația Sincronizare*, redată de operatorul “ $\bullet$ ” sau “ $\wedge$ ”, este o operație binară *comutativă*, *asociativă* și *reflexivă* ce descrie *sincronizarea* pre-condițiilor legate cu  $p_i \in \bullet t_j$ , ale unui eveniment  $t_j$ , apariția căruia va avea loc numai atunci, când concomitent aceste pre-condiții sunt verificate, fiind descrise de  $DE3$ :

$$DE3 = (m_{01}^{K_{p_1}} y_1 [W_1] \bullet \dots \bullet m_{0n}^{K_{p_n}} y_n [W_n]) |_{t_j}^{\alpha_j}$$

$$= \left( \bigwedge_{i=1}^n m_{0i}^{K_{p_i}} y_i [W_i] \right) |_{t_j}^{\alpha_j}.$$

- *Operația Secvențialitate*, redată de operatorul “ $|$ ”, este o operație binară ce determină logica “cauză-consecință” a relației dintre două stări locale  $p_i$  (pre-condiție) și  $p_k$  (post-condiție), determinată de acțiunea  $t_j$ . Această operație, exprimată de expresia  $DE4$ , este *asociativă*, *reflexivă* și *transitivă*, însă *necomutativă*:

$$DE4 = m_{0i} p_i [W_i] |_{t_j}^{\alpha_j} m_{0k} p_k [W_k]$$

$$\neq m_{0k} p_k [W_k] |_{t_j}^{\alpha_j} m_{0i} p_i [W_i].$$

Modelarea operației “*iterație*” poate fi redată prin contopirea locațiilor de la începutul expresiei cu cea de la sfârșitul ei care au același nume (operația “*închidere*”).

- *Operația AND-Split sau Fork*, redată de operatorul “ $\diamond$ ” sau “ $;$ ”, descrie faptul că la apariția unui eveniment specificat  $t_j$  se vor produce concomitent două sau mai multe post-condiții. Aceasta operație binară, fiind *comutativă*, *asociativă* și *reflexivă*, este redată de următoarea expresia  $DE5$ :

$$DE5 = |_{t_j}^{\alpha_j} (m_{01} p_1 [W_1] \diamond \dots \diamond m_{0n} p_n [W_n])$$

$$= |_{t_j}^{\alpha_j} ( (\diamond)_{k=1}^n m_{0k} p_k [W_k] ).$$

- *Operația Paralelism competitiv*, redată de operatorul “ $\vee$ ” sau “ $\mp$ ”, descrie *relațiile logice de paralelism competitiv* ale condițiilor și evenimentelor între două sau mai multe procese concurente. Ea este aplicată pentru a efectua compunerea unor submodele de subrețele  $RPHS$ , ce descriu funcționarea subsistemelor respective, într-un model rezultat al sistemului considerat.

Fie două subrețele  $N_A$  și  $N_B$  sunt redade de expresiile respective  $DE_A = A$  și  $DE_B = B$ , atunci la compunerea lor prin aplicarea operatorului “ $\vee$ ”, relativ la aceste două expresii descriptive, obținem o rețea rezultantă  $N_R$  redată de  $DE_R = C = A \vee B$  în care locațiile și tranzițiile ce au același nume,

respectiv, vor fi contopite. Nodurile contopite vor păstra atributele și incidența arcelor din fiecare subrețea. Această operație este *comutativă*, *asociativă* și *reflexivă*.

- *Operația redenumire funcțională*, redată de operatorul “ $(Rename(DE_k \setminus \Psi))$ ”, permite de a *redenumi* unele locații, tranziții și/sau atribute ale acestora din  $DE_k$  ce aparțin submulțimii de noduri, arce sau marcate:

$$\Psi = \{t_l \mapsto t_j, p_n \mapsto p_i, x_v \mapsto y_m\},$$

astfel încât acestea pot fi modificate și folosite la descrierea proceselor ce cooperează prin  $\Psi$ .

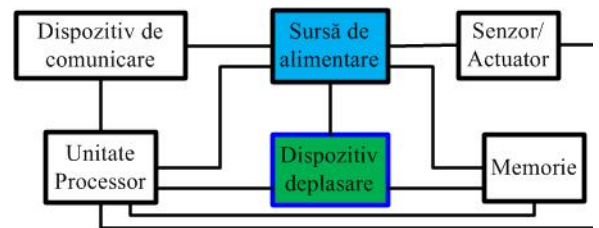
În [3] este arătat cum se poate efectua maparea  $DE$  a unei  $RPHS$  în reprezentare grafică a acestui tip de rețele și invers.

### 3. MODELAREA CONTROLULUI SIGUR AL MOBILITĂȚII NSM

O rețea generică de senzori constă dintr-un număr mare de noduri senzoriale ( $NSM_i$ ,  $i = 1, \dots, n_s$ ) mobile distribuite într-o zonă largă, care coordonează împreună pentru a recepționa și transmite datele de la senzori către un nod receptor principal (sau stație de bază) ce va produce informații semnificative [10]. De obicei,  $NSM_i$  sunt identice cu comunicații fără fir (wireless) între ele; această caracteristică facilitează proiectarea, analiza și funcționarea lor.

De obicei, un  $NSM_i$  este compus din șase componente principale (Fig 4.):

- o *unitate de procesare* a datelor relevante și de control al mobilității;



**Figura 4.** Structura unui nod senzorial mobil.

- câteva *memorii* pentru a stoca programele și datele intermediare;
- *senzori și actuatori*, care sunt o interfață reală a mediului fizic: dispozitive care pot observa sau controla parametrii fizici ai mediului;

- un *dispozitiv de comunicare* pentru trimiterea și recepția informației printr-un canal wireless, care funcționează într-un mod de excludere reciprocă;

- o *sursă de alimentare* disponibilă, adică o anumită formă de baterie electrică, este necesară pentru a furniza energie. Uneori, capacitățile de reîncărcare ale bateriei permit de a obține energie din mediul înconjurător (de exemplu, celule solare);

- un *dispozitiv de deplasare* ce asigură mobilitatea nodului senzorial.

Fiecare dintre aceste componente trebuie să funcționeze în mod echilibrat printr-un compromis dintre reducerea consumului de energie electrică cât este posibil și de necesitatea de a realiza sarcinile lor. Consumul de energie electrică al  $NSM_i$  trebuie să fie bine controlat. De obicei, bateria de energie electrică are o capacitate mică și încărcare cu energie prin îndepărtarea ei forțată este complicată și volatilă.

În continuare, pentru a construi modelul  $ST\zeta_i$ , subiacente  $RPHS_i$ , ce descrie controlul sigur al mobilității  $NSM_i$ , efectuat prin monitorizarea coordonatelor  $(x_i, y_i)$  și a reglării vitezelor  $(v_i^x, v_i^y)$  respective de deplasare în spațiul 2D pe aceste coordonate, vom adopta următoarele supoziții :

1.  $x_i^{\min} < x_i < x_i^{\max}$ ,  $y_i^{\min} < y_i < y_i^{\max}$ ,  
 $-\infty < -v_i^{x\min} < v_i^x < v_i^{x\max} < +\infty$ ,  
 $-\infty < -v_i^{y\min} < v_i^y < v_i^{y\max} < +\infty$ ;

2. Dacă  $v_i^x > 0$  (respectiv  $v_i^x < 0$ ), atunci  $NSM_i$  se deplasează *înainte* (respectiv *înapoi*) spre  $v_i^{x\max}$  (respectiv  $v_i^{x\min}$ ). În același mod se va efectua deplasarea pe coordonata Y cu vitezele și restricțiile respective;

3. *Accelerarea și frânarea* sunt funcții ce depind de vitezele și coordonatele curente de deplasare respective.

De asemenea, pentru a determina expresiile descriptive respective ale  $ST\zeta_i$  vom codifica simbolurile-locăție și cele ale tranzițiilor respective, folosind două *indexuri*, unde primul index  $i$  arată numărul de ordine al  $NSM_i$ , iar al doilea index arată numărul de ordine al simbolului în  $ST\zeta_i$  :

$$p_{i,n}, b_{i,j}, q_{i,l}, t_{i,k} \text{ și } u_{i,m}.$$

În acest context, *specificațiile* locațiilor discrete și celor continue, care reprezintă stările

locale ale  $ST\zeta_i$ , ce descrie controlul de deplasare pe axele X și Y respective, sunt:

- $p_{i,1}$  și  $p_{i,7}$  - accelerarea (frânarea) vitezei în sens direct (invers);  $p_{i,2}$  și  $p_{i,8}$  - viteză constantă;  $p_{i,3}$  și  $p_{i,9}$  - accelerarea (frânarea) vitezei în sens invers (direct);  $p_{i,4}$  și  $p_{i,10}$  - stare activă a deplasării;  $p_{i,5}$  și  $p_{i,11}$  - frânare;  $p_{i,6}$  și  $p_{i,12}$  - oprit;  $p_{i,13}$  - bateria electrică este descărcată la minimum permis;
- $b_{i,1}$  și  $b_{i,3}$  - mărimea vitezei curente;  $b_{i,2}$  și  $b_{i,4}$  - distanța parcursă;  $b_{i,5}$  - nivelul curent de energie electrică a bateriei;

Specificațiile tranzițiilor discrete și ale celor continue, care reprezintă evenimente, acțiuni sau activități locale respective ale  $ST\zeta_i$ , sunt:

- *tranzițiile discrete temporizate:*  
 $q_{i,1}$  și  $q_{i,8}$  - durata de aflare din starea cu viteză constantă și trecerea la accelerarea ei în sens direct;  $q_{i,2}$  și  $q_{i,9}$  - durata de aflare în stare de accelerare în sens direct;  $q_{i,3}$  și  $q_{i,10}$  - durata de aflare în stare de accelerare în sens invers;  $q_{i,4}$  și  $q_{i,11}$  - durata de aflare din starea cu viteză constantă și trecerea la accelerarea ei în sens invers;  $q_{i,5}$  și  $q_{i,12}$  - durata de aflare în starea activă de deplasare;  $q_{i,6}$  și  $q_{i,13}$  - frânare și oprire;  $q_{i,7}$  și  $q_{i,14}$  - durata de aflare în stare oprit și trecerea în stare activă de deplasare.

- *tranzițiile discrete imediate:*  
 $t_{i,1}$ ,  $(t_{i,2})$  și  $t_{i,6}$ ,  $(t_{i,7})$  - trecerea din starea de accelerare în starea de frânare în cazul în care distanța autorizată în sens direct (invers) devine maximală (minimală);  $t_{i,3}$  și  $t_{i,8}$  - trecerea din starea activă în starea de frânare în cazul în care distanța autorizată în sens direct devine maximală sau în sens invers devine minimală;  $t_{i,4}$ ,  $(t_{i,5})$  și  $t_{i,9}$ ,  $(t_{i,10})$  - trecerea din starea de accelerare în sens direct (invers) în cea cu viteză constantă în cazul în care bateria electrică este descărcată până la un nivel minim autorizat;  $t_{i,11}$  și  $t_{i,12}$  - declanșarea încărcării bateriei electrice din starea  $NSM_i$  este oprit;  $t_{i,13}$  și  $t_{i,14}$  - declanșarea încărcării bateriei electrice din starea activă a  $NSM_i$  și oprirea lui.

- *tranzițiile continue:*  
 $u_{i,1}$  și  $u_{i,7}$  - accelerarea vitezei în sens direct;  $u_{i,2}$  și  $u_{i,8}$  - accelerarea vitezei în sens invers;  $u_{i,3}$  și  $u_{i,9}$  - deplasare în sens direct;  $u_{i,4}$  și  $u_{i,10}$  - deplasare în sens invers;  $u_{i,5}$  și  $u_{i,11}$  - frânare în sens

invers;  $u_{i,6}$  și  $u_{i,12}$  - frânare în sens direct;  $u_{i,3}$  și  $u_{i,14}$  - consum energie electrică;  $u_{i,15}$  - încărcarea bateriei.

Cantitatea curentă de energie electrică  $x_{i,5}$  este redată de bufferul  $b_{i,5}$ ,  $x_{i,5}^{\min} \leq x_{i,5} \leq x_{i,5}^{\max}$ .

Tranzițiile continue  $u_{i,13}$  și  $u_{i,14}$  redau consumul de energie al bateriei electrice la deplasarea lui  $NSM_i$  pe axa X și Y respectiv, iar  $u_{i,15}$  - încărcării bateriei electrice  $b_{i,5}$ .

Subrețeaua  $ST\zeta_i^x$  ce descrie controlul schimbării vitezei și al distanței de deplasare pe coordonata X este redată de următoarea expresie descriptivă  $Z_i^x = \bigvee_{j=1}^{10} Z_{i,j}^x$ , unde:

$Z_{i,1}^x = (\tilde{p}_{i,1} \cdot \bar{p}_{i,6}) |_{u_{i,1}} b_{i,1}$ ,  $Z_{i,2}^x = (b_{i,1} \cdot \tilde{p}_{i,3} \cdot \bar{p}_{i,6}) |_{u_{i,2}}$ ,  
 $Z_{i,3}^x = \tilde{p}_{i,5} |_{u_{i,5}} b_{i,1} \tilde{v}(b_{i,1} \cdot \tilde{p}_{i,5}) |_{u_{i,6}}$ ,  $Z_{i,4}^x = |_{u_{i,3}} b_{i,2} |_{u_{i,4}}$   
 descriu partea continuă, iar partea discretă a modelului ce controlează partea continuă este:

$$Z_{i,5}^x = (p_{i,1} \cdot \tilde{b}_{i,2} [x_{i,2}^{\max} - \gamma_1]) |_{t_{i,1}} p_{i,3} (|_{t_{i,5}} \tilde{v} |_{q_{i,3}}) p_{i,2},$$

$$Z_{i,6}^x = (p_{i,3} \cdot \bar{b}_{i,2} [x_{i,2}^{\min} + \gamma_1]) |_{t_{i,2}} p_{i,1} (|_{t_{i,4}} \tilde{v} |_{q_{i,2}}) p_{i,2},$$

$$Z_{i,7}^x = (p_{i,2} \cdot \bar{p}_{i,6} \cdot \bar{b}_{i,2} [x_{i,2}^{\max} - \gamma_1]) |_{q_{i,1}} p_{i,1},$$

$$Z_{i,8}^x = (p_{i,2} \cdot \bar{p}_{i,6} \cdot \tilde{b}_{i,2} [x_{i,2}^{\min} + \gamma_1]) |_{q_{i,4}} p_{i,3},$$

$$Z_{i,9}^x = p_{i,4} (|_{t_{i,3}} \tilde{v} |_{q_{i,5}}) p_{i,5},$$

$$Z_{i,10}^x = (p_{i,5} \cdot b_{i,1} [x_{i,1}]) |_{q_{i,6}} p_{i,6} |_{q_{i,7}} p_{i,4}.$$

Atributele cantitative explicite ale  $Z_i^x$  sunt:

- Funcțiile de gardă :

$$g(u_{i,1}) = (m_{i,5} = 0) \& (m_{i,13} = 0) \& (x_{i,2} < (x_{i,2}^{\max} - \gamma_{i,1})),$$

$$g(u_{i,2}) = (m_{i,5} = 0) \& (m_{i,13} = 0) \&$$

$$\& (x_{i,2} < (x_{i,2}^{\min} + \gamma_{i,1})), \quad g(q_{i,7}) = (m_{i,5} = 0),$$

$$g(u_{i,3}) = (x_{i,1} > 0) \& (m_{i,13} = 0),$$

$$g(u_{i,4}) = (x_{i,1} < 0) \& (m_{i,13} = 0),$$

$$g(t_{i,3}) = (x_{i,2} > (x_{i,2}^{\max} - \gamma_{i,1})) \vee (x_{i,2} < (x_{i,2}^{\min} + \gamma_{i,1})),$$

$$g(t_{i,4}) = g(t_{i,5}) = (m_{i,5} = 1) \vee (m_{i,6} = 1) \vee (m_{i,13} = 1),$$

$$g(q_{i,6}) = ((x_{i,1} < \gamma_{i,2}) \& (x_{i,1} > 0)) \vee \\ \vee ((x_{i,1} > -\gamma_{i,2}) \& (x_{i,1} < 0)),$$

- Ratele de declanșare ale tranzițiilor :

$$V(u_{i,1}) = V(u_{i,2}) = v_{i,1}, \quad V(u_{i,3}) = -V(u_{i,4}) = x_{i,1},$$

$$V(u_{i,5}) = -\gamma_{i,3} \cdot x_{i,1}, \quad V(u_{i,6}) = \gamma_{i,3} \cdot x_{i,1},$$

$$\lambda(q_{i,l}) = \lambda_l, \quad l = 1, \dots, 7.$$

Expresia descriptivă  $Z_i^y$  a subrețelei  $ST\zeta_i^y$  ce descrie controlul schimbării vitezei și distanței de

deplasare pe coordonata Y a  $NSM_i$  este obținută din  $Z_i^x$ , folosind operația de redenumire funcțională :

$$Z_i^y = \text{Re name}(Z_i^x \setminus \Psi_i^y), \text{ unde:}$$

$$\Psi_i^y = \{x \mapsto y, b_{i,j} \mapsto b_{i,2+j}, p_{i,n} \mapsto p_{i,6+n},$$

$$q_{i,l} \mapsto q_{i,7+l}, t_{i,e} \mapsto t_{i,5+e}, u_{i,n} \mapsto u_{i,6+n}\}.$$

Atributele cantitative explicite ale  $Z_i^y$  sunt egale respectiv cu cele ale lui  $Z_i^x$ .

Subrețeaua  $ST\zeta_i^B$  ce descrie încărcarea și descărcarea bateriei este redată de expresia descriptivă  $Z_i^B = \bigvee_{j=1}^5 Z_{i,j}^B$ , unde:

$$Z_{i,1}^B = \tilde{p}_{i,13} |_{u_{i,15}} b_{i,5} \tilde{v}(b_{i,5} \cdot \bar{p}_{i,6}) |_{u_{i,13}} \tilde{v}(b_{i,5} \cdot \bar{p}_{i,12}) |_{u_{i,14}}$$

$$Z_{i,2}^B = (\bar{b}_{i,5} \cdot \tilde{p}_{i,6} \cdot \bar{p}_{i,13}) |_{t_{i,11}} \tilde{v}(\bar{b}_{i,5} \cdot \tilde{p}_{i,12} \cdot \bar{p}_{i,13}) |_{t_{i,12}},$$

$$Z_{i,3}^B = (\bar{b}_{i,5} \cdot p_{i,4} \cdot \bar{p}_{i,13}) |_{t_{i,13}} p_{i,5},$$

$$Z_{i,4}^B = (\bar{b}_{i,5} \cdot \bar{p}_{i,10} \cdot \bar{p}_{i,13}) |_{t_{i,14}} p_{i,11},$$

$$Z_{i,5}^B = (p_{i,13} [2] \cdot \tilde{b}_{i,2} [x_{i,5}^{\max} - \gamma_{i,4}]) |_{t_{i,15}}.$$

Atributele cantitative explicite ale  $Z_i^B$  sunt:

$$V(u_{i,13}) = V(u_{i,14}) = v_{i,13}, \quad V(u_{i,15}) = v_{i,15}.$$

Expresia descriptivă  $Z_i$  a rețelei  $ST\zeta_i$ , subiacentă  $RPHS_i$ , ce descrie controlul sigur al mobilității nodului senzorial  $NSM_i$  este:

$$Z_i = Z_i^x \tilde{v} Z_i^y \tilde{v} Z_i^B.$$

Modelul de rețea  $ST\zeta_i = [{}_i Z_i]_i$  membranală [4], redat de expresia descriptivă  $Z_i$ , este reprezentat în figura 5. În acest model locațiile și tranzițiile respective sunt numerotate numai cu al doilea index, primul index  $i$  implicat coincide cu cel al  $NSM_i$  și el nu este menționat, deoarece acest fapt se subînțelege din context. În acest model sunt utilizate trei locații discrete pentru a distinge situațiile în care nodul  $NSM_i$  este în starea respectivă de frânare (locația  $p_3$ ), de a trece la o viteză constantă (locația  $p_2$ ) și accelerare (locația  $p_1$ ). Jetonul între aceste trei locații discrete sunt deplasate de tranzițiile discrete temporizate  $q_1, q_2, q_3$  și  $q_4$ . Diferite valori numerice pentru ratele de declanșare ale acestor patru tranziții sunt atribuite pentru a efectua diferite experimente. Viteza curentă a acestui nod pe coordonata X este redată de nivelul fluidului în locația continuă  $b_1$ . Această viteză crește (descrește), atunci când tranziția continuă  $u_1$  (respectiv  $u_2$ ) este validată când loca-

ția  $p_1$  ( respectiv  $p_3$  ) este marcată și  $p_6$  nu este marcată. Locațiile  $p_5$  și  $p_6$ , cu tranziția  $q_6$ , sunt folosite în scopul de a modela o oprire urgentă a

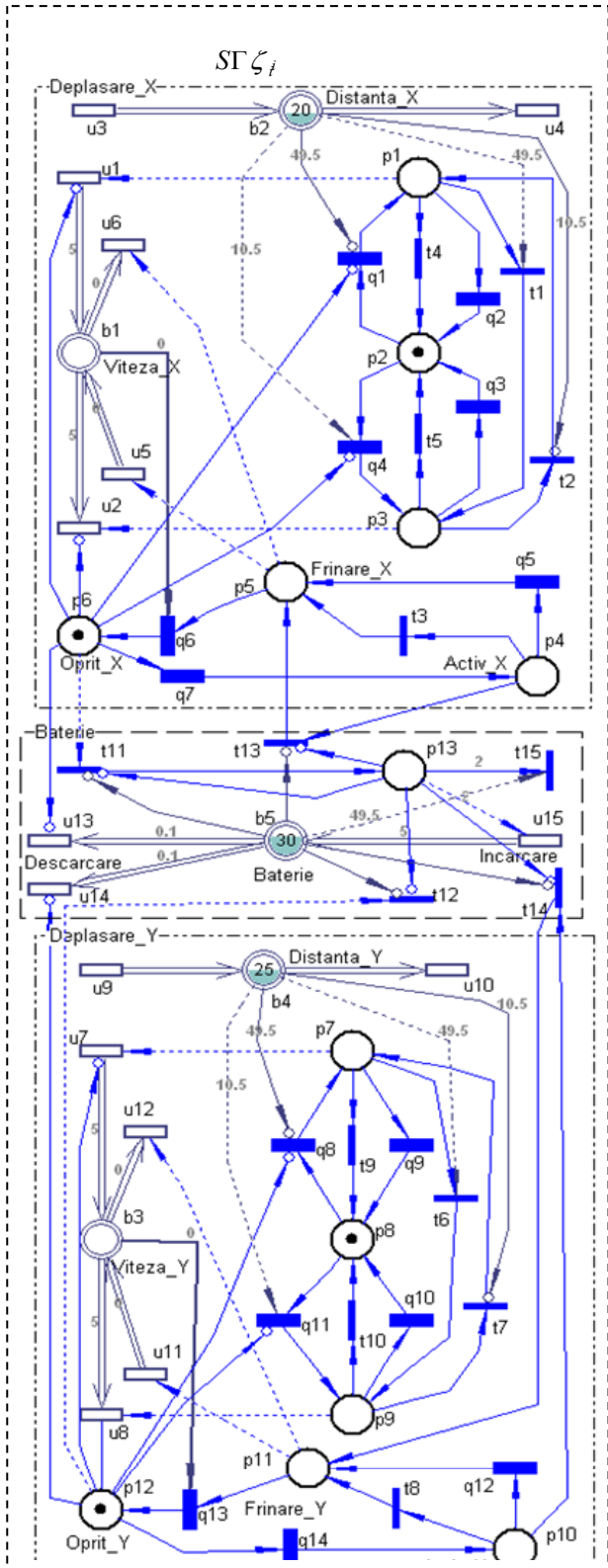


Figura 5. Modelul  $ST\zeta_i$  de rețea  $RPHS_i$  ce descrie controlul mobilității  $NSM_i$ .

nodului pentru a evita unele coliziuni frontale cu un nod care rulează în direcție opusă. Coordonata X (respectiv Y) curentă este reprezentată de nivelul locației fluide  $b_2$  (respectiv  $b_4$ ). Nivelul de fluid al acestei locații este crescut de către tranziția  $u_3$  (respectiv  $u_9$ ) și respectiv scăzut de către tranziția  $u_4$  (respectiv  $u_{10}$ ) funcție de nivelul de fluid al locației  $b_1$  (respectiv  $b_3$ ), adică în funcție de viteza pozitivă (negativă) curentă de deplasare a nodului  $NSM_i$  pe coordonata dată.

Modelul  $ST\zeta_i$  din figura 5 a fost validat și analizat folosind sistemul software instrumental VHPN de simulare vizuală a modelelor de tipul RPHS [9]. Această rețea  $ST\zeta_i$  este sigură, viabilă și reinițializabilă.

În figura 6 sunt prezentate unele realizări de simulare vizuală a funcționării  $ST\zeta_i$  cu următoarele atribute cantitative :

$$M_0^i = (p_{i,2}, p_{i,6}, p_{i,8}, p_{i,12}), \gamma_{i,3} = 1,30,$$

$$\bar{x}_0^i = (20x_{i,2}, 25x_{i,4}, 30x_{i,5}), \gamma_{i,1} = \gamma_{i,2} = \gamma_{i,4} = 0,50,$$

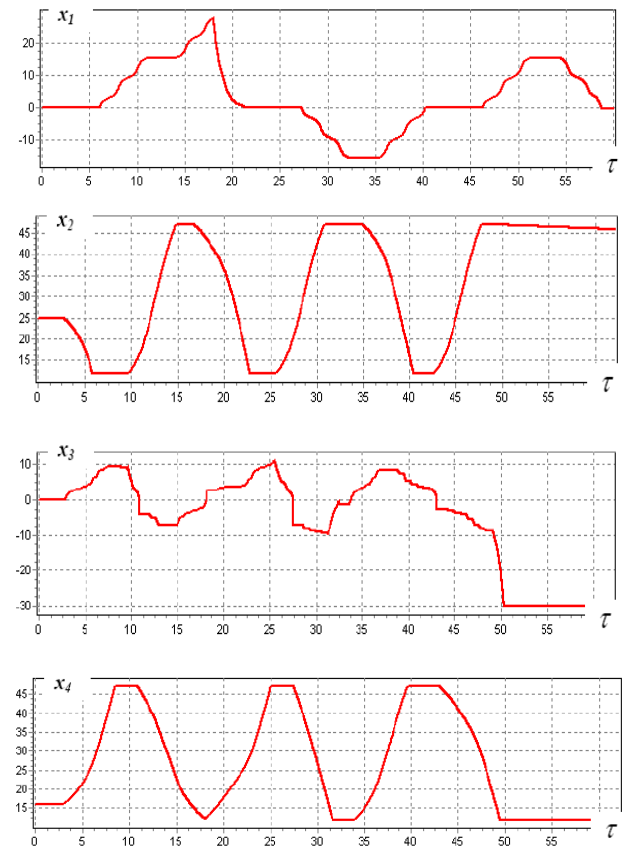


Figura 6. Graficul schimbării vitezei  $x_1$  (resp.  $x_3$ ) și a deplasării  $x_2$  (resp.  $x_4$ ) nodului  $NSM_i$  pe coordonata X (resp. Y).

$$\begin{aligned}
v_{i,1} = v_{i,2} = v_{i,7} = v_{i,8} = 5, v_{i,13} = v_{i,14} = 0,1 \text{ și} \\
v_{i,15} = 5,0, \lambda_{i,j} = \lambda_{i,7+j} = 1, j = 1, \dots, 7. \\
x_{i,1}^{\max} = x_{i,3}^{\max} = -x_{i,1}^{\min} = -x_{i,3}^{\min} = 30, \\
x_{i,2}^{\min} = x_{i,4}^{\max} = 20, x_{i,5}^{\max} = 50, \\
x_{i,2}^{\max} = x_{i,4}^{\min} = 50.
\end{aligned}$$

Folosind acest model  $\Sigma\zeta_i$  la etapa de proiectare, se poate de determinat parametrii de control mobil ai  $NSM_i$  astfel încât să fie asigurată navigarea dorită în timp real în aria specificată de către utilizator.

#### 4. CONCLUZII

În lucrarea de față este propus un cadru unificator pentru descrierea controlului sigur al mobilității nodurilor senzoriale prin  $RPHS$ , orientate pe reprezentarea stărilor curente și a regulilor de evoluție ale procesului discret-continuu de navigare a acestor noduri. Reprezentarea grafică a modelelor de  $RPHS$  și fundamentarea lor matematică sunt bine potrivite pentru a reprezenta evoluția stărilor fiecărui nod sensorial și, de asemenea, interacțiunea dintre acestea. Această abordare poate fi aplicată și la descrierea funcționării diferitor tipuri de sisteme cu procese de natură discret-continue. În plus, cu destul de puține modificări și completări, utilizarea abordării descrise poate fi în continuare generalizată pentru a studia sisteme din domenii cu caracteristici de funcționare dinamic reconfigurabile, condiționate de evenimente specificate la etapa de proiectare.

În lucrările pe viitor, vom aborda problema modelării prin  $RPHS$  a proceselor interacțiunii nodurilor mobile  $NSM_i$ ,  $i = 1, \dots, n_s$  în regim multi salt (multihop) pentru obținerea și transmiterea informațiilor către nodul receptor central.

Lucrarea dată a fost efectuată în cadrul proiectului național de cercetări științifice aplicative 14.820.18.02.03/U.

#### Bibliografie

1. **Anastasi, G., Conti, M., Di Francesco, M.** *Reliable and energy-efficient data collection in sparse sensor networks with mobile elements.* *Perform. Eval.* 66(12), pp. 791–810, 2009.
2. **Felemban, E., Sheikh, A.** *A Review on Mobile and Sensor Networks Innovations in Intelligent Transportation Systems.* *Journal of Transportation Technologies*, 4, pp. 196-204, 2014. doi: [10.4236/jtts.2014.43020](https://doi.org/10.4236/jtts.2014.43020).
3. **Guțuleac, E.** *Descriptive compositional HSPN modeling of computer systems.* *Annals of the University of Craiova, România, Series: Automation, Computers, Electronics and Mechatronics*, Vol. 3(30), No.2, pp. 82-87, 2006.
4. **Guțuleac, E.** *Descriptive Timed Membrane Petri Nets for Modeling of Parallel Computing.* *International Journal of Computers, Communications & Control*, No. 3, Vol. 1, Agora University Editing House, Oradea, România, pp. 33-39, 2006.
5. **Kazi, R., Bohra, N., Shaikh, F. K.** *Assessing Data Reliability in Mobile Wireless Sensor Network.* In F.K. Shaikh et al. (Eds.): *WSN4DC 2013, CCIS 366, Springer-Verlag*, pp. 73–84, 2013.
6. **Martyna, J.** *Simulation Study of the Mobility Models for the Wireless Mobile Ad Hoc and Sensor Networks.* In A. Kwiecień, P. Gaj, and P. Stera (Eds.): *CN 2012, CCIS 291, Springer-Verlag*, pp. 324–333, 2012.
7. **Martyna J.** *Modeling of Energy Consumption for Mobile Wireless Ad Hoc and Sensor Networks.* In A. Kwiecień, P. Gaj, and P. Stera (Eds.): *CN 2012, CCIS 291, Springer-Verlag*, pp. 314–323, 2012.
8. **Sahoo, P. K., Sheu, J. P., Chang, Y. C.** *Performance evaluation of wireless sensor network with hybrid channel access mechanism.* *Journal of Network and Computer Applications*, 32(4), pp. 878–888, 2009.
9. **Țurcanu, Iu., Guțuleac, E., Cordonenu, A.** *Sistem Software de Simulare Animată a Rețelelor Petri Diferențiale Reconfigurabile.* In *Proceedings of the 6-th International Conference, ICMCS 2009, vol. 1, 1-3 October*, pp. 307-311, 2009.
10. **Xianren, W., Sadjadpour, H. R., Garcia-Luna-Aceves, J. J.** *Link Lifetime as a Function of Node Mobility in MANETs with Restricted Mobility: Modeling and Applications.* In *Proceedings of the International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile*, pp. 1-10, 2007.
11. **Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal, D.** *Wireless sensor network survey.* *Computer Networks*, 52(12), pp. 2292–2330, 2008.
12. **Zhou, H., Luo, D., Gao, Y. and Zuo, D.** *Modeling of Node Energy Consumption for Wireless Sensor Networks.* *Wireless Sensor Network*, Vol. 3, No. 1, pp. 18-23, 2011. doi: [10.4236/wsn.2011.31003](https://doi.org/10.4236/wsn.2011.31003).