Modellezés és szimuláció Petri hálókkal

dr. Bartha Tamás

Dr. Pataricza András

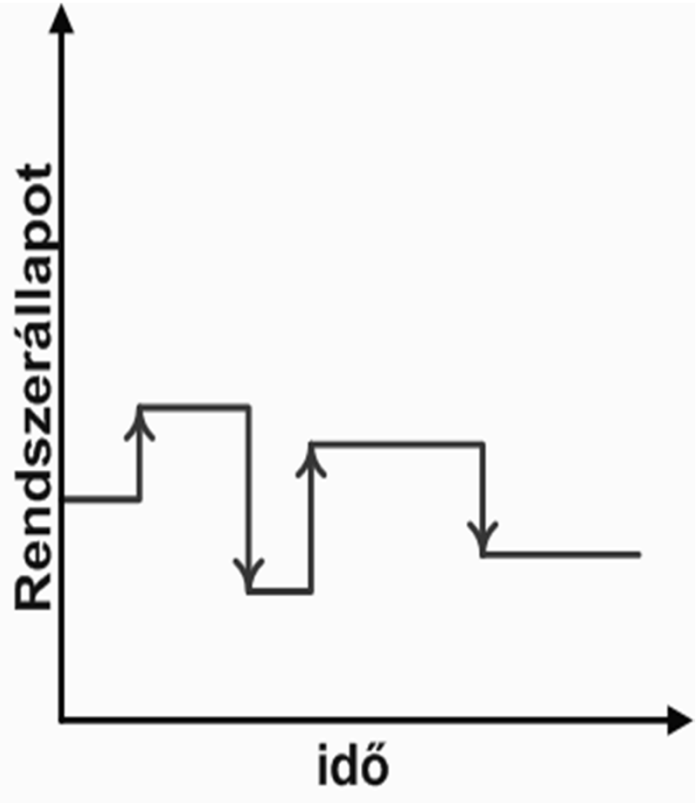
BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Diszkrét rendszermodellezés célja

- Informatikai rendszerek: jól tagoltak
  - rendszerépítés a komponensek integrációjával
  - elemi komponensek kapcsolata
    - explicit logikai kapcsolat: sorrendiség, ok-okozati függőség
    - implicit függőség: pl. osztott erőforrás használata
- Célkitűzés: minőségi vagy/és mennyiségi analízis
  - kvalitatív: logikai helyességbizonyítás
  - kvantitatív: teljesítményelemzés, megbízhatóság és rendelkezésre állás, biztonságosság

Rendszermodellek felbontása

- Modellezés célja
  - Korreláció: modell ↔ „valóság”
  - Érthetőség, áttekinthetőség
    - Nem cél a minimális modell
  - A teljes rendszer dinamikája
    - Komponensek modellje egyszerű
    - Bonyolult kölcsönhatások
- Csoportosítás
  - Folytonos } • értékben
  - Diszkrét } • időben



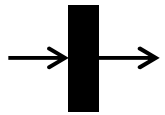
Tevékenységek

- Modellezés hierarchikus és funkcionális
  - (rész)folyamatok
  - tovább nem bontott, elemi lépések $\rightarrow$ tevékenységek
- Tevékenység
  - elemi lépés
  - felhasznált erőforrások
  - végrehajtási idő
    - determinisztikus
    - sztochasztikus

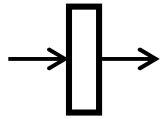
Tevékenységek modellezése Petri hálókban

Petri háló alapú modellek esetén a tevékenység:

- elemi lépés $\rightarrow$ tranzíció tüzelése
- felhasznált erőforrások $\rightarrow$ bemeneti / kimeneti helyek
- végrehajtási idő
  - determinisztikus
  - sztochasztikus



determinisztikus időzítésű tranzíció



exponenciális időzítésű tranzíció

Az engedélyezettséggel kapcsolatban felmerülő kérdések:

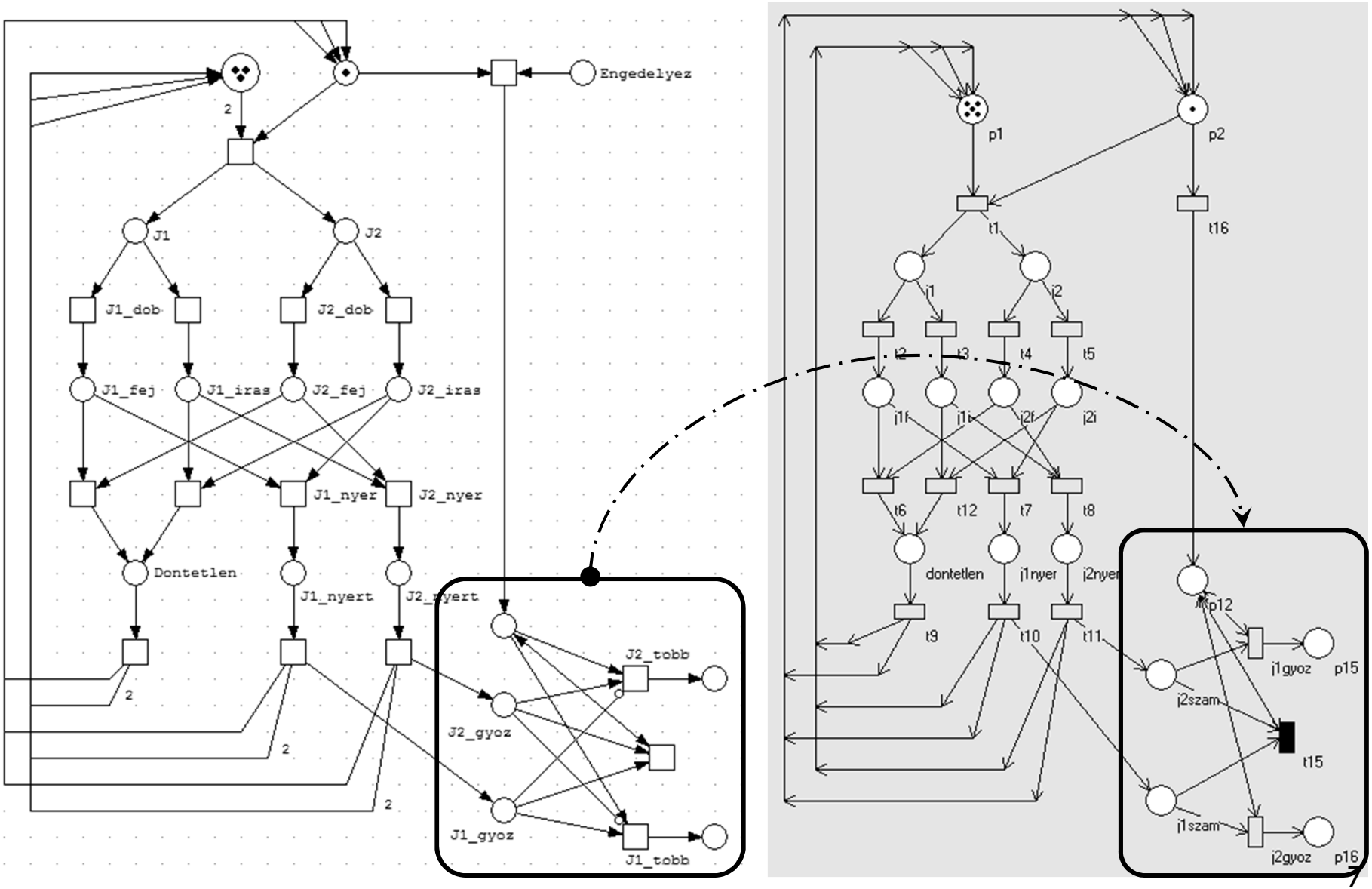
- Időzítetlen tranzíciók „prioritása” nagyobb: előbb tüzelnek
- Engedélyezettség megszűnése: mi lesz a gyújtási idővel?
  - újrainduló (újra sorsol)
  - megőrződő (korábban sorsoltból fennmaradó idő folytatódik)

Sztochasztikus Petri hálók

SPN = (P, T, E, W, M_0, Λ)

- tüzelési intenzitás $\Lambda : T \rightarrow R$
- időzítés: τ valószínűségi változó
  - eloszlásfüggvény: $P\{\tau < t\} = F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
  - sűrűségfüggvény: $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
- tüzelési szabály változik: intenzitás ~ prioritás
- két exponenciális eloszlás minimuma is az: $\lambda_1 + \lambda_2$
- PT és SPN elérhetőségi gráfja azonos
- időzített elérhetőségi gráf: folytonos Markov lánc

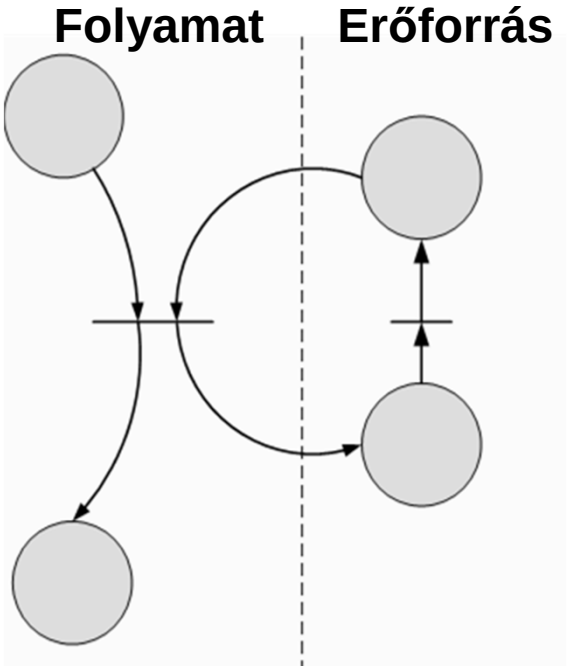
Időzítetlen tranzíciók prioritásának felhasználása

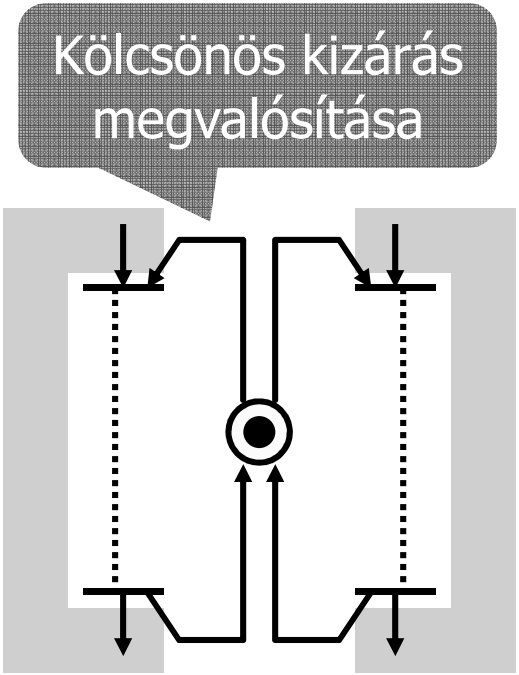


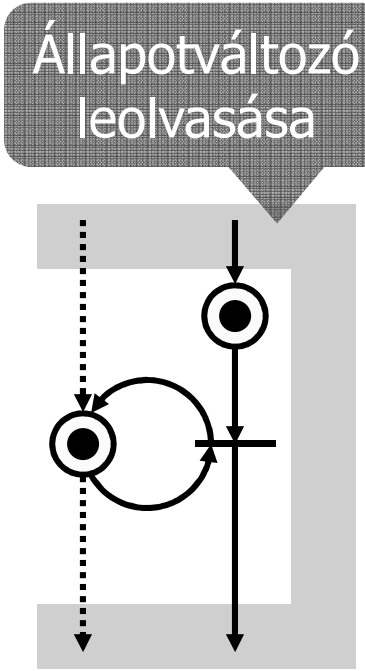
Erőforrás allokáció Petri hálókban

- Kölcsönös kizárás
- Több darab lefoglalása

Cél: nem a minimális,
hanem az érthető Petri háló!

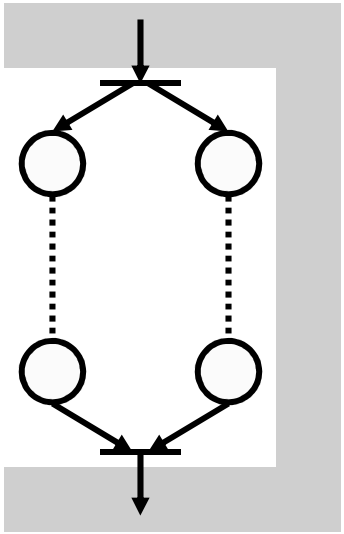


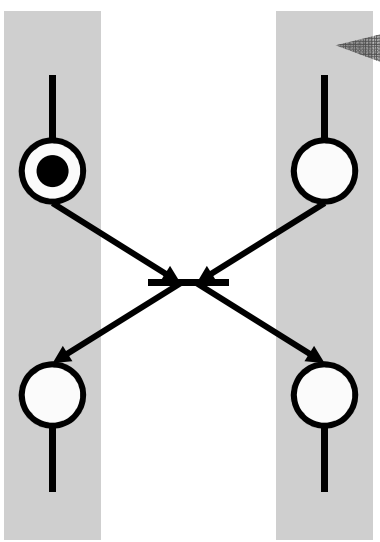




Üzenetek

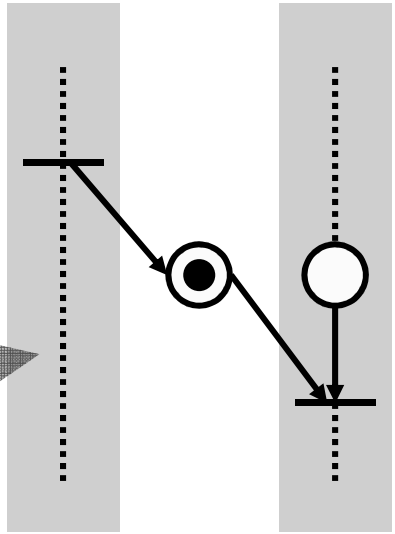
- Szoftverben párhuzamosság
  - FORK - elágazás
  - JOIN - visszatérés
- Kommunikáció biztosítása
  - üzenetekkel
- Wait – egymásra várás





Szinkron kommunikáció

Aszinkron (levelesláda) kommunikáció



Rendszermodellezés

Modellépítés folyamata:

- a három fő modellelem-fajta:
  - folyamatok, illetve tevékenységek
  - erőforrások
  - a logikailag csatolt folyamatok közti esetleges üzenetek
- felépítése először egyedileg
- majd ezekből a modell összeintegrálása

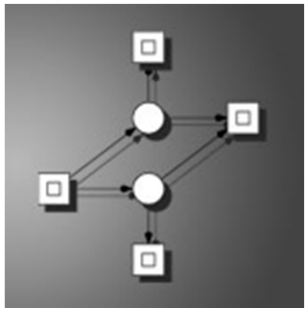
Rendszermodellezés

Modellépítés elemei:

1. a folyamat modellje (az erőforrás használat, illetve üzenetváltás részletes feltüntetése nélkül)
2. minden egyes erőforráshoz fel építeni
   - a foglalt/szabad állapotot jellemző kétállapotú véges automata modellrészt,
   - valamint az üzenetek pufferjének modelljét
3. a folyamat és erőforrás (illetve az üzenetek pufferje) modelljében a megfelelő állapotátmenetek összevonása

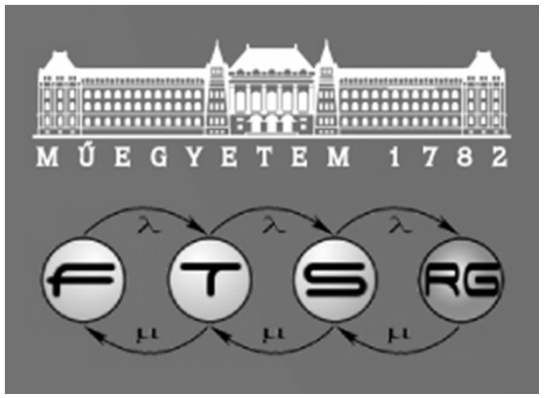
Modellező eszközök:
DNAnet, Snoopy, PetriDotNet

UNIVERSITY OF CAPE TOWN
Department of Computer Science



b-tu
Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus

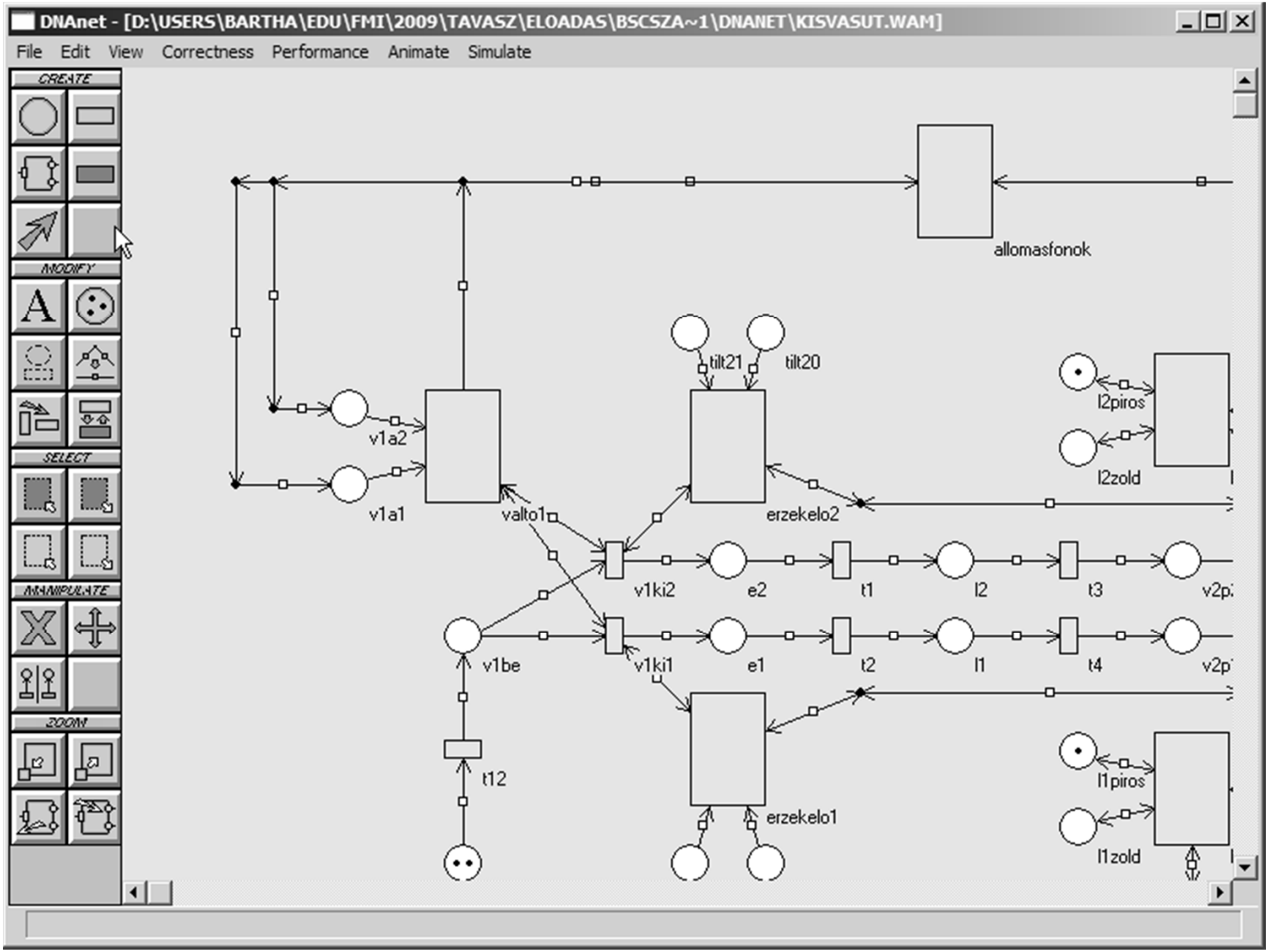
petridotnet
from BME-MIT



A DNAnet modellező program

- Képességei
  - grafikus szerkesztő
  - interaktív animáció (token game)
  - egyszerű analízis: dinamikus tulajdonságok ellenőrzése
  - nem interaktív szimuláció (teljesítmény analízishez)
- Előnyei
  - kicsi, kompakt, gyors, egyszerűen kezelhető
  - méretéhez képest sokat tud
  - ingyenes, szabad felhasználású
- Hátránya
  - nem minden környezetben futtatható
  - nem túl stabil ☹

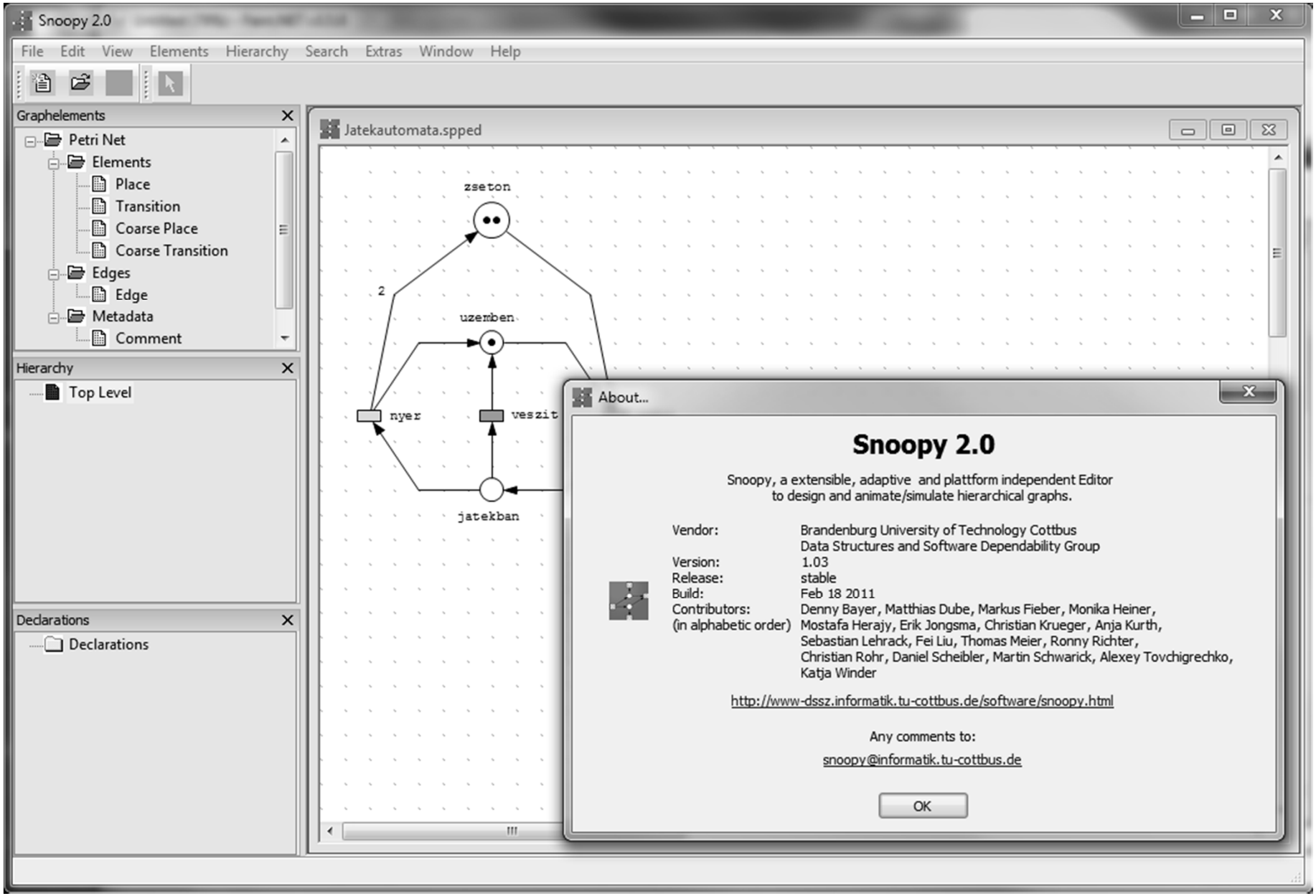
A DNAnet modellező program képe



A Snoopy modellező program

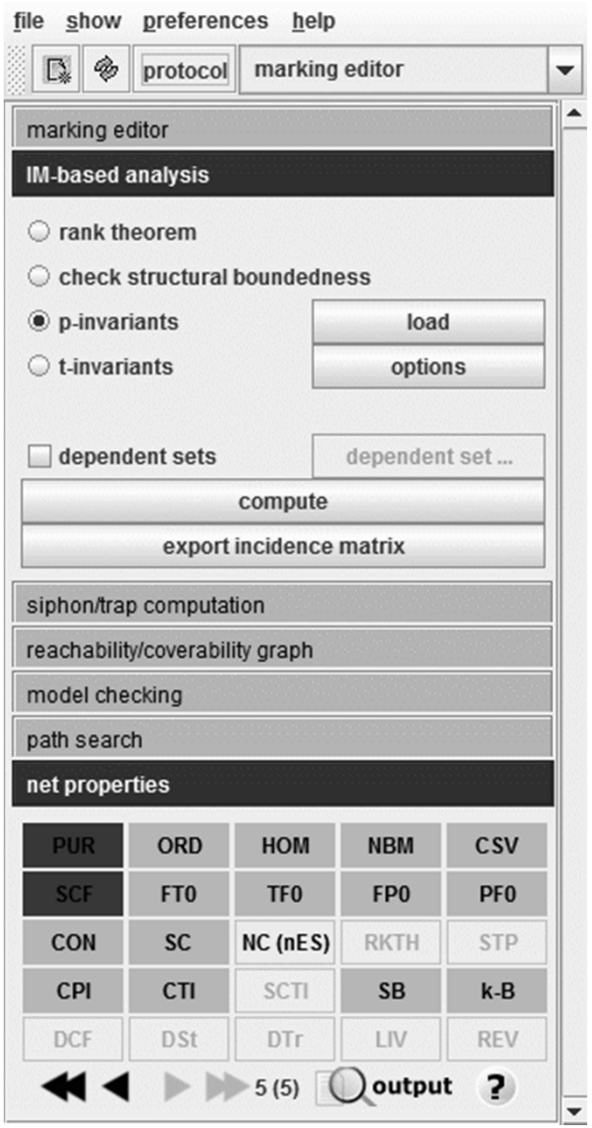
- Snoopy (Windows, Linux)
  - grafikus szerkesztő + Token Game (animált)
  - külső analízis eszköz: Charlie (Java)
  - egyszerűen kezelhető
  - kényelmi funkciók: copy / paste, undo / redo
  - kiterjesztések: tiltó él, olvasó él, reset él, egyenlőség él
  - számos háló típus, többek között színezett háló is
  - támogatja hierarchikus Petri hálók készítését
  - elemek színezése, méretezése, élsúlyok kijelzése
  - on-line help

A Snoopy modellező program képe



Analízis eszközök Snoopy-hoz

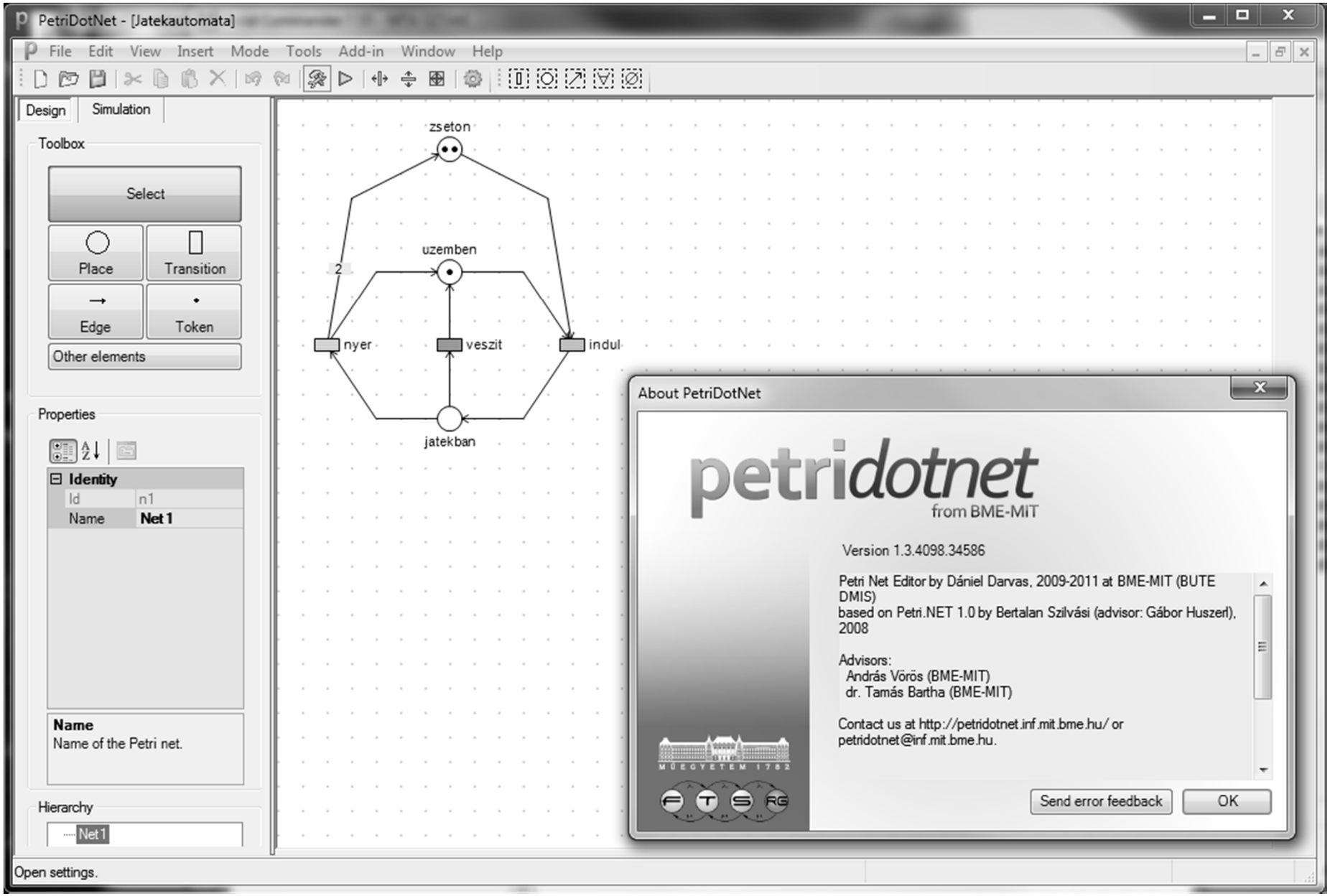
- Charlie (Java)
  - dinamikus tulajdonságok, elérhetőség
  - strukturális tulajdonságok, invariánsok
  - explicit CTL és LTL modellellenőrző
- INA (Windows, Linux)
  - szöveges felületű parancssori program
  - Token Game (szöveges)
  - invariáns analízis, elérhetőségi gráf generálás
  - strukturális tulajdonságok ellenőrzése
  - szimulációs képességei nincsenek



A PetriDotNet modellező program

- Képességei
  - grafikus szerkesztő + Token Game + szimuláció
  - egyszerűen kezelhető, sok kényelmi funkció
  - kiterjesztések: tiltó él, időzítés, színezett háló
  - támogatja hierarchikus Petri hálók készítését
  - kiegészítő modulokkal bővíthető, pl. analízis modulok
  - dinamikus tulajdonságok, CTL modellellenőrző
  - elemek színezése, elforgatása, élsúlyok kijelzése
  - szabványos PNML fájlformátum, van hozzá INA kimenet
- Hazai ☺ fejlesztés: petridotnet.inf.mit.bme.hu

A Petri.NET modellező program képe



Petri háló alapú modellek készítése
(Példa a modellezési folyamatra)

A modellezési feladat

Alternating Bit Protocol

- Átviteli protokoll veszteséges csatornához
  - üzenet elveszhet (véges számú alkalommal)
  - üzenet tartalma nem változhat
- Cél: a protokoll biztosítsa, hogy minden üzenet véges időn belül eljusson a vevőhöz

Küldő folyamat

- Üzenetekhez egy ellenőrző bitet kapcsol
- Az üzenetek megérkezését nyugta jelzi
- A nyugta tartalmazza az ellenőrző bitet
- Első üzenethez csatolt bit: $\mathbf{b^0}$
  - ha az üzenet elvész, a folyamat időtúllepéssel észleli a nyugta hiányát $\rightarrow$ újra küldi
  - ha a folyamat $\mathbf{b^0}$ bittel ellátott nyugtát kap (ilyet várt), akkor a következő üzenethez $\mathbf{b^1} = \neg\, \mathbf{b^0}$ bitet köt
  - ha a folyamat $\mathbf{b^X}$ bittel ellátott nyugtát vár és $\mathbf{b^Y}$ bittel ellátott nyugtát kap $\rightarrow$ egyszerűen eldobja

Fogadó folyamat

- Első vétel: $\mathbf{b^0}$ ellenőrző bittel jelölt üzenetet kap
- Az üzenetet feldolgozza, a vételt a kapott bit visszaküldésével nyugtázza
  - ha a következő üzenetben az ellenőrző bit értéke $\mathbf{b^1}$ (helyesen), akkor az új üzenetet is feldolgozza és a $\mathbf{b^1}$ bit visszaküldésével nyugtázza
  - ha a következő üzenetben az ellenőrző bit értéke $\mathbf{b^0}$ (nem megfelelő), akkor az üzenetet eldobja (korábban már feldolgozta), de nyugtát küld

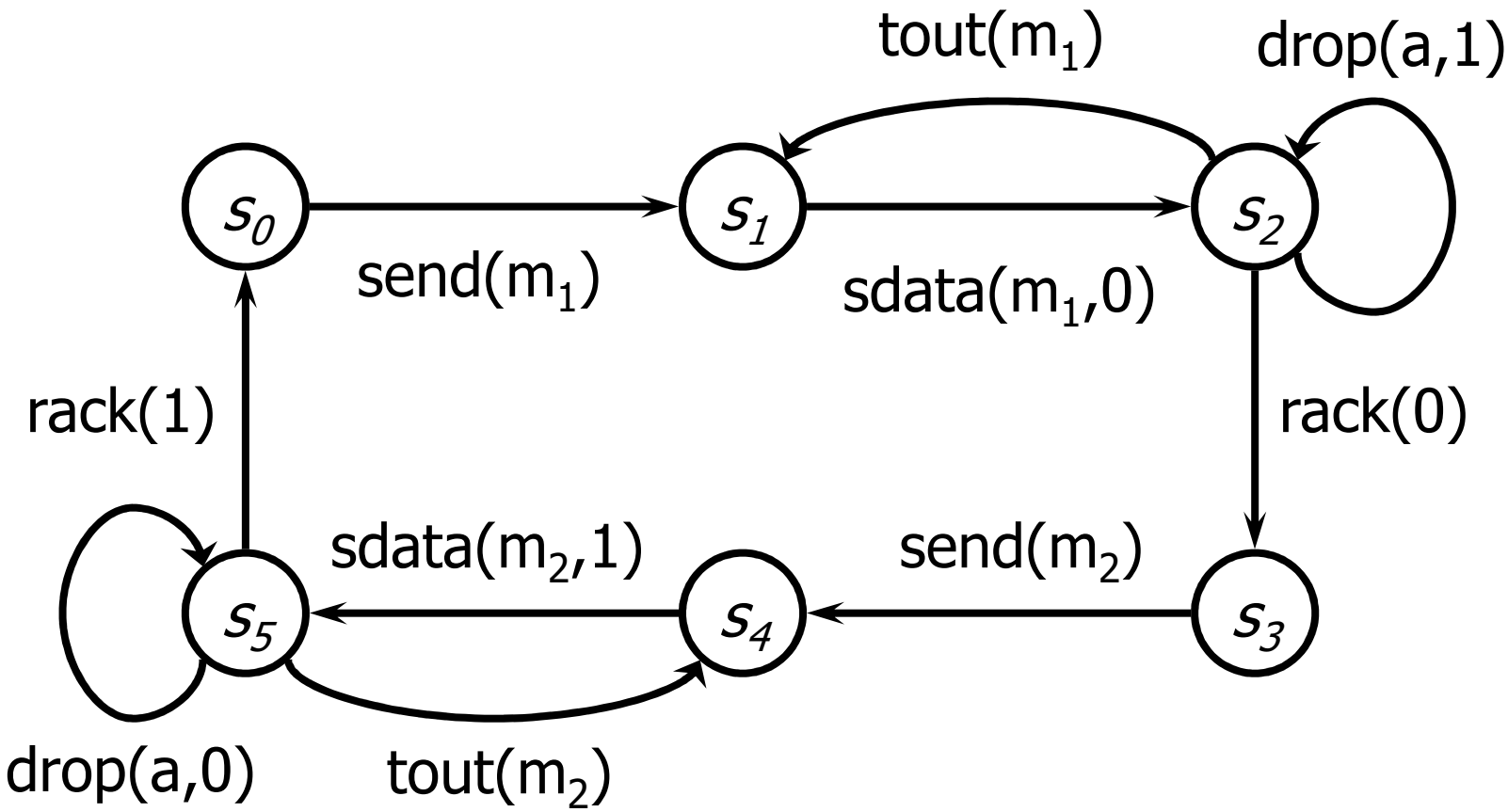
A modellalkotás lépései

1. A feladat felbontása tevékenységekre és erőforrásokra
2. Tevékenységek állapotgráfjának kidolgozása
3. Erőforrások modellje a pufferek modelljeivel
4. Állapotgráf modellekből Petri háló modell készítése
5. Tevékenységek és erőforrások kapcsolatának leírása
6. Tevékenység és erőforrás modellek integrálása
7. Integrált modell helyességének ellenőrzése
8. Modell felhasználása a (kvantitatív) feladat megoldására

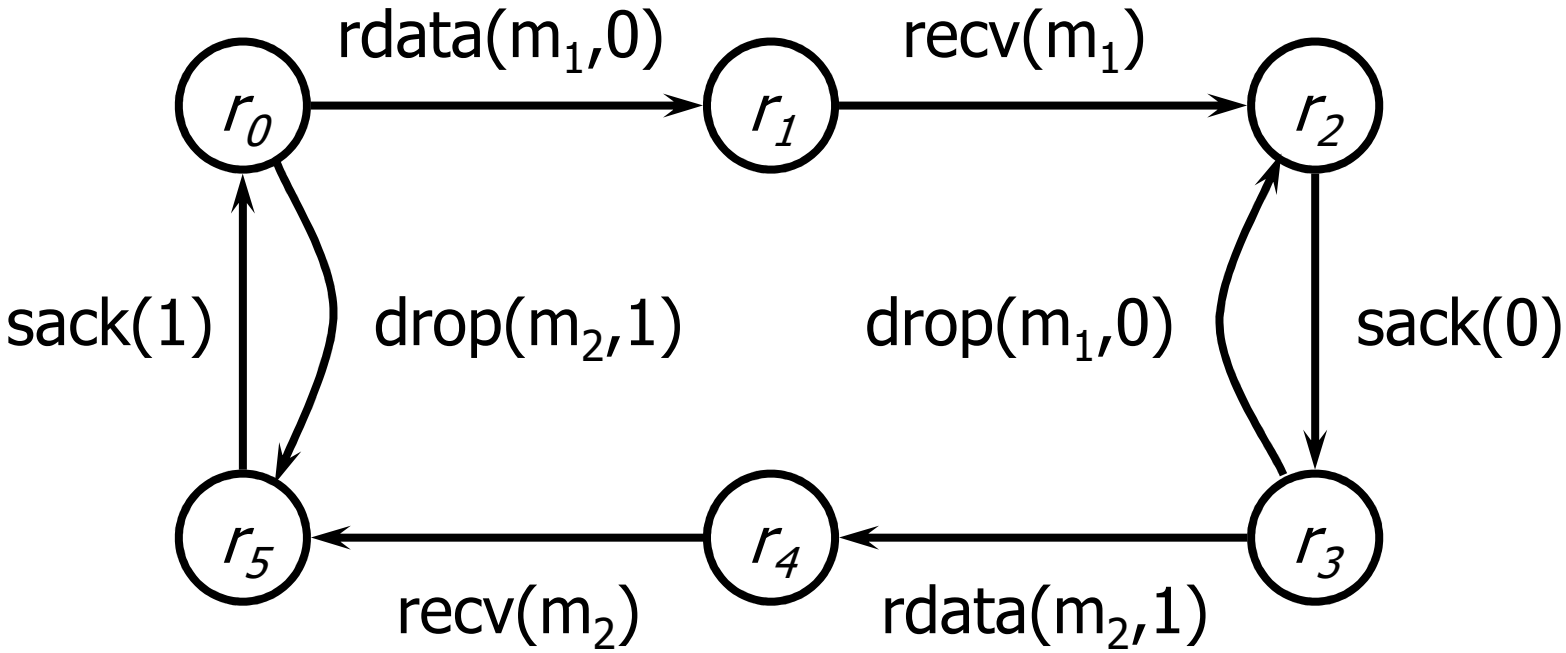
Komponensek és állapotgráfjaik

- Alrendszerek
  - Tevékenységek: küldő folyamat, fogadó folyamat
  - Erőforrások: adat csatorna, nyugtázó csatorna
- Minden alrendszer saját állapottal rendelkezik
  - körök: állapotok
  - nyilak: események
- Azonos események egy időben mennek végbe: szinkronizáció

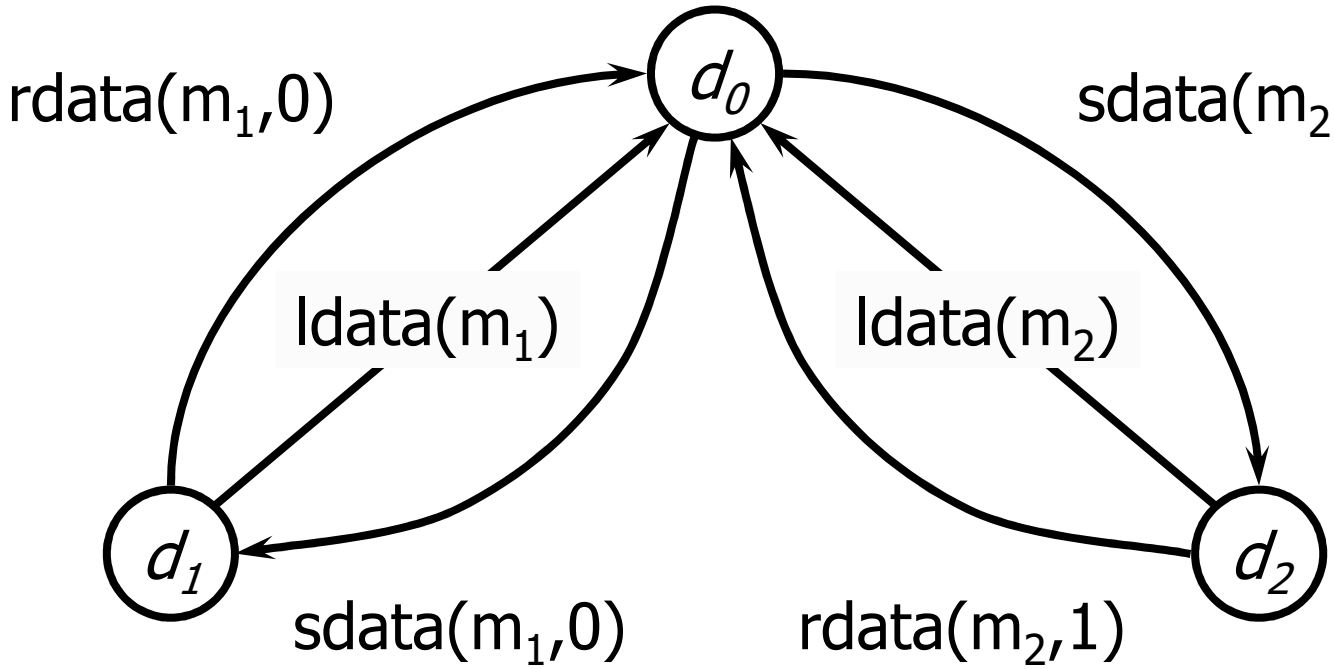
Küldő folyamat állapotgráfja



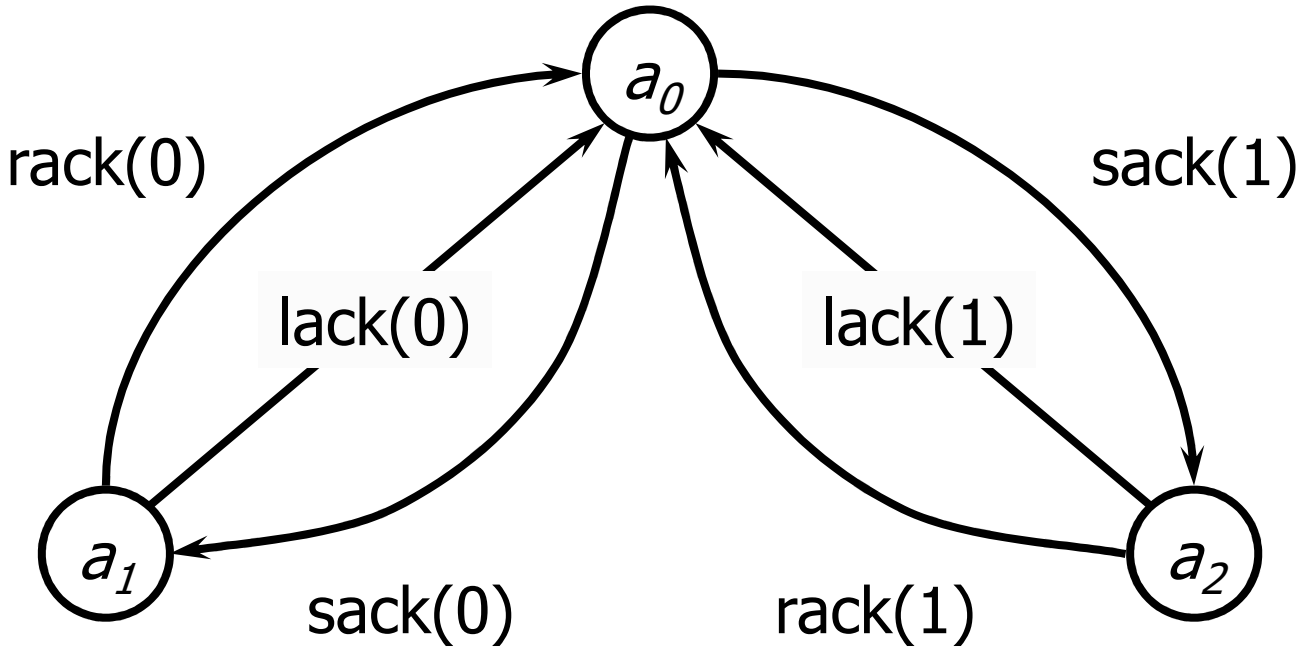
Fogadó folyamat állapotgráfja



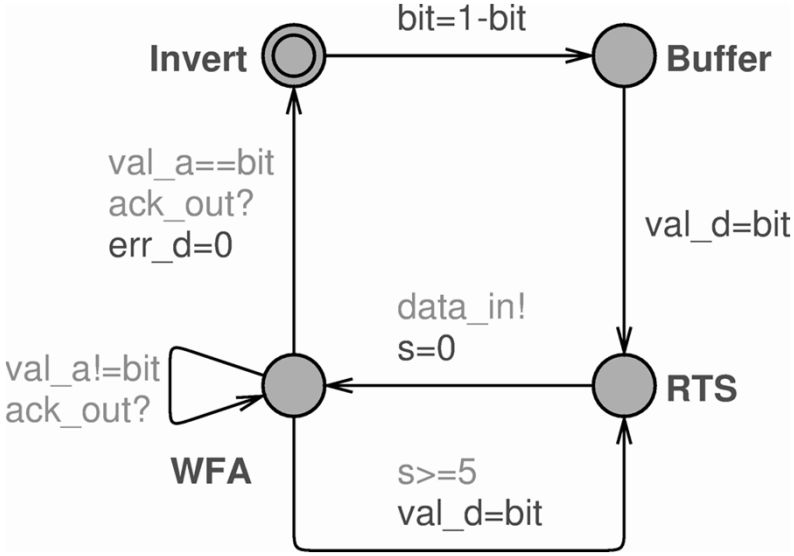
Adat csatorna állapotgráfja

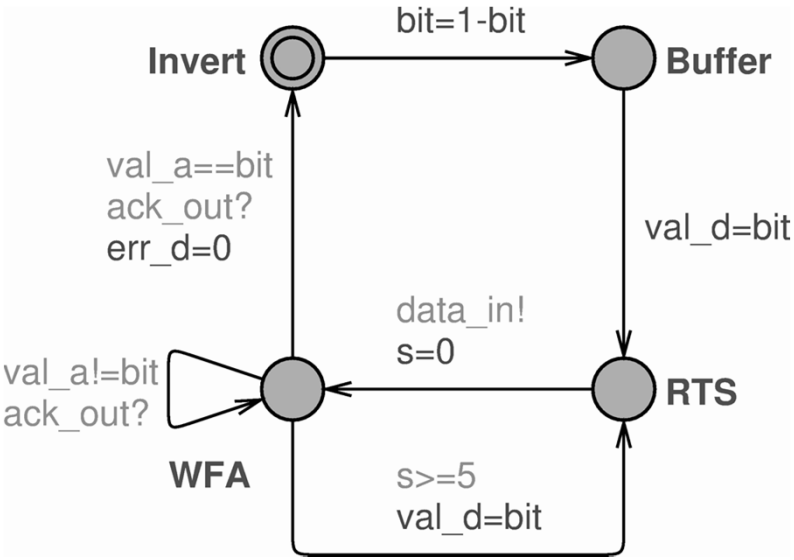


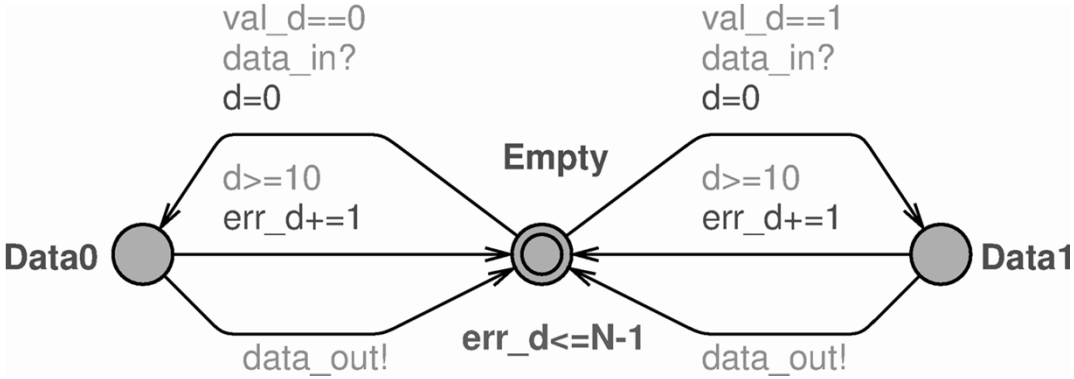
Nyugtázó csatorna állapotgráfja



UPPAAL modell

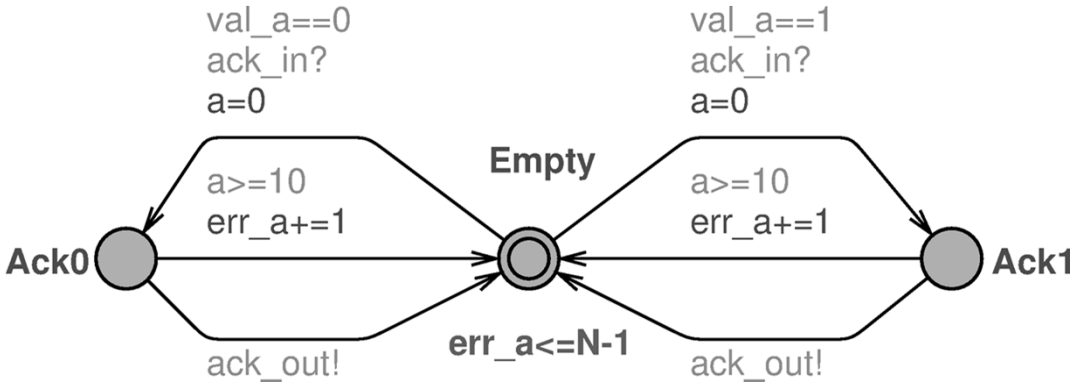




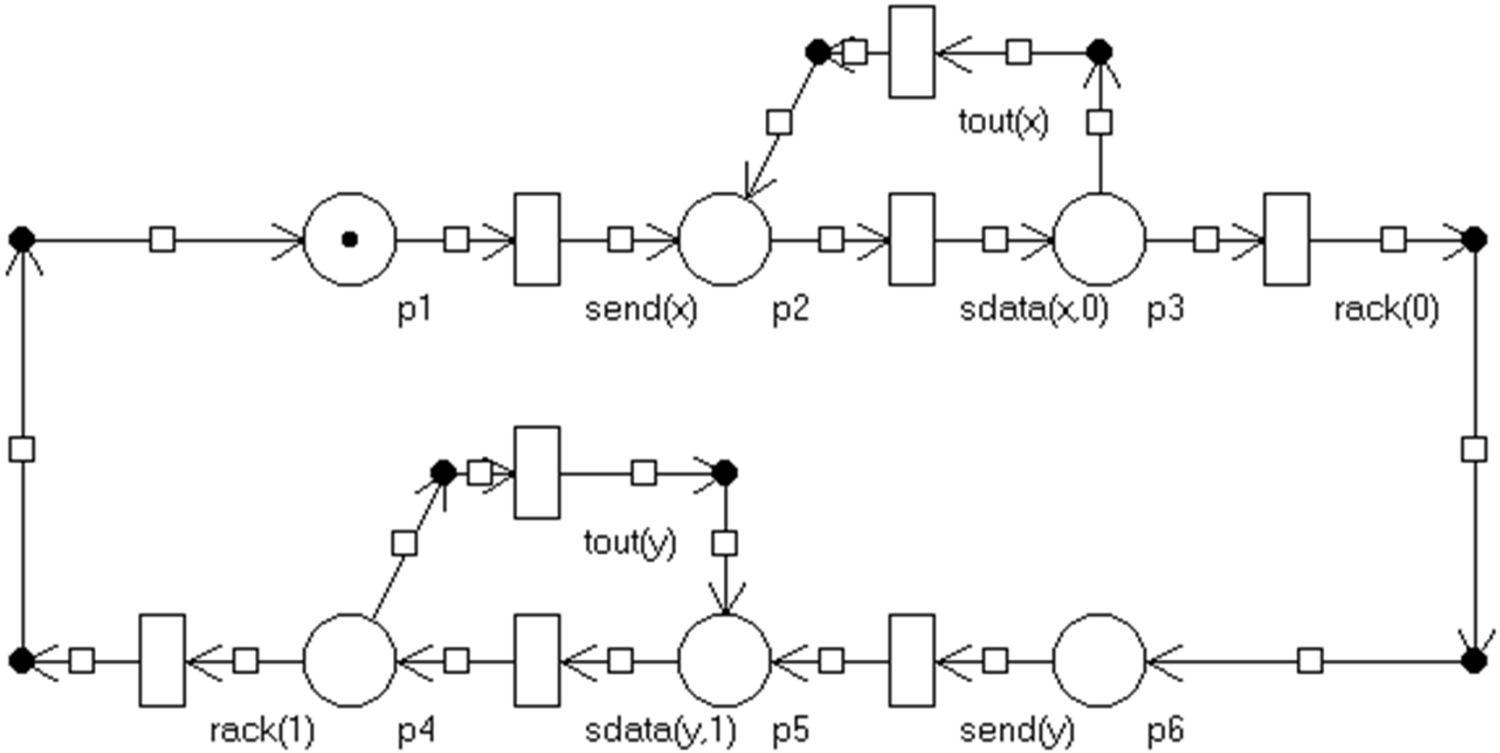



```
const int N=10;

typedef int[0,1] bit_t;
typedef int[0,2] value_t;
typedef int[0,N] error_t;
```

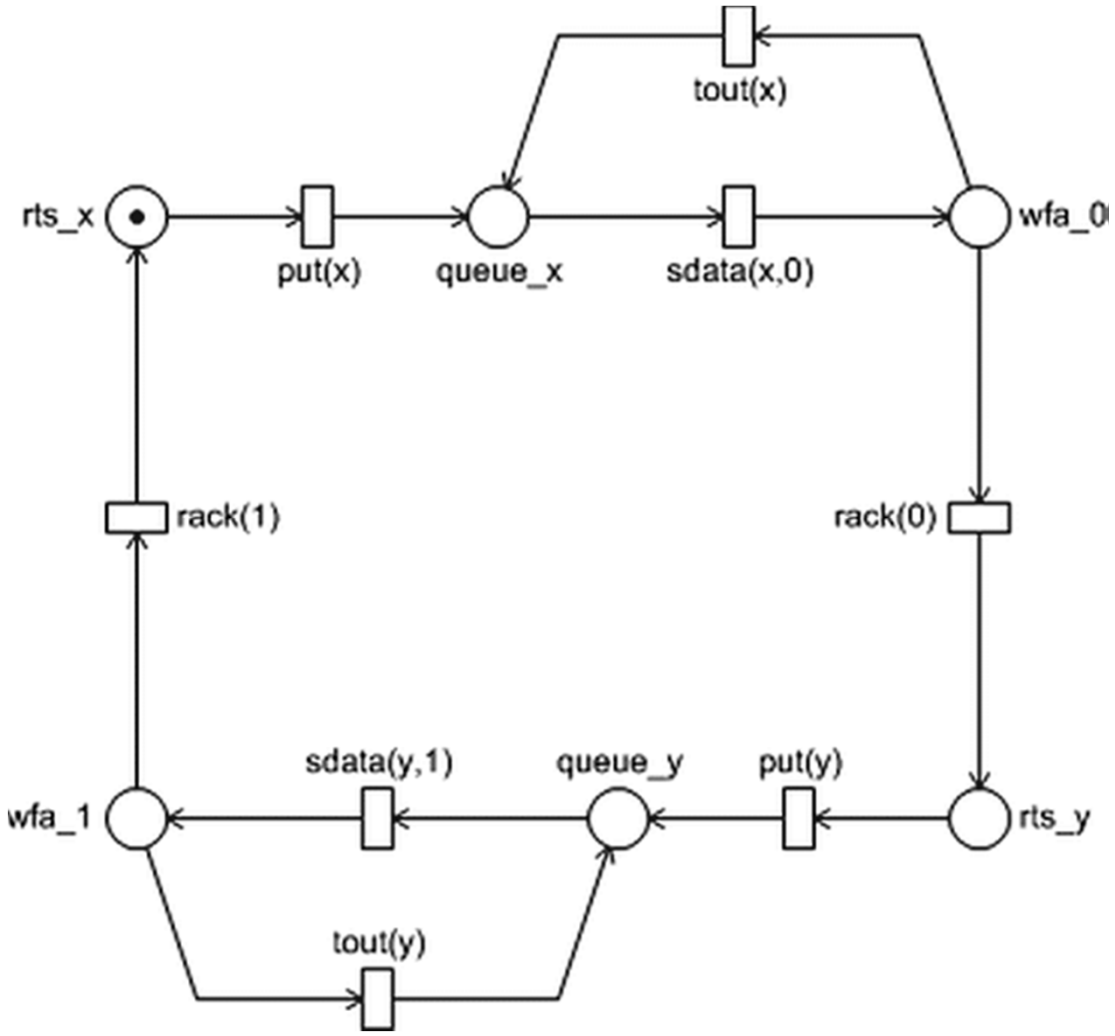
```
value_t val_d, val_a;
error_t err_d, err_a;

chan data_in, ack_in;
urgent chan data_out, ack_out;
```



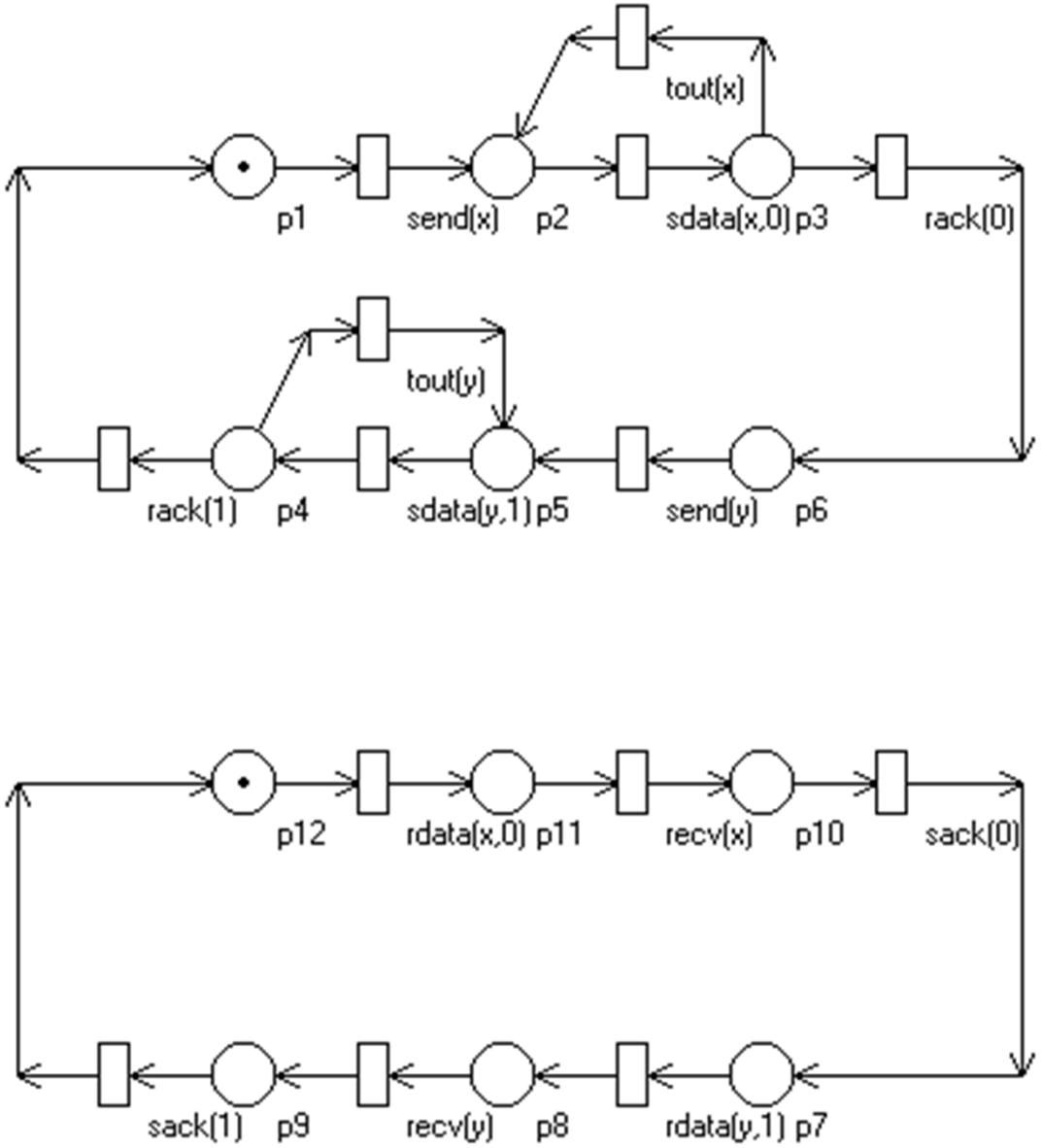
Küldő folyamat Petri háló modellje



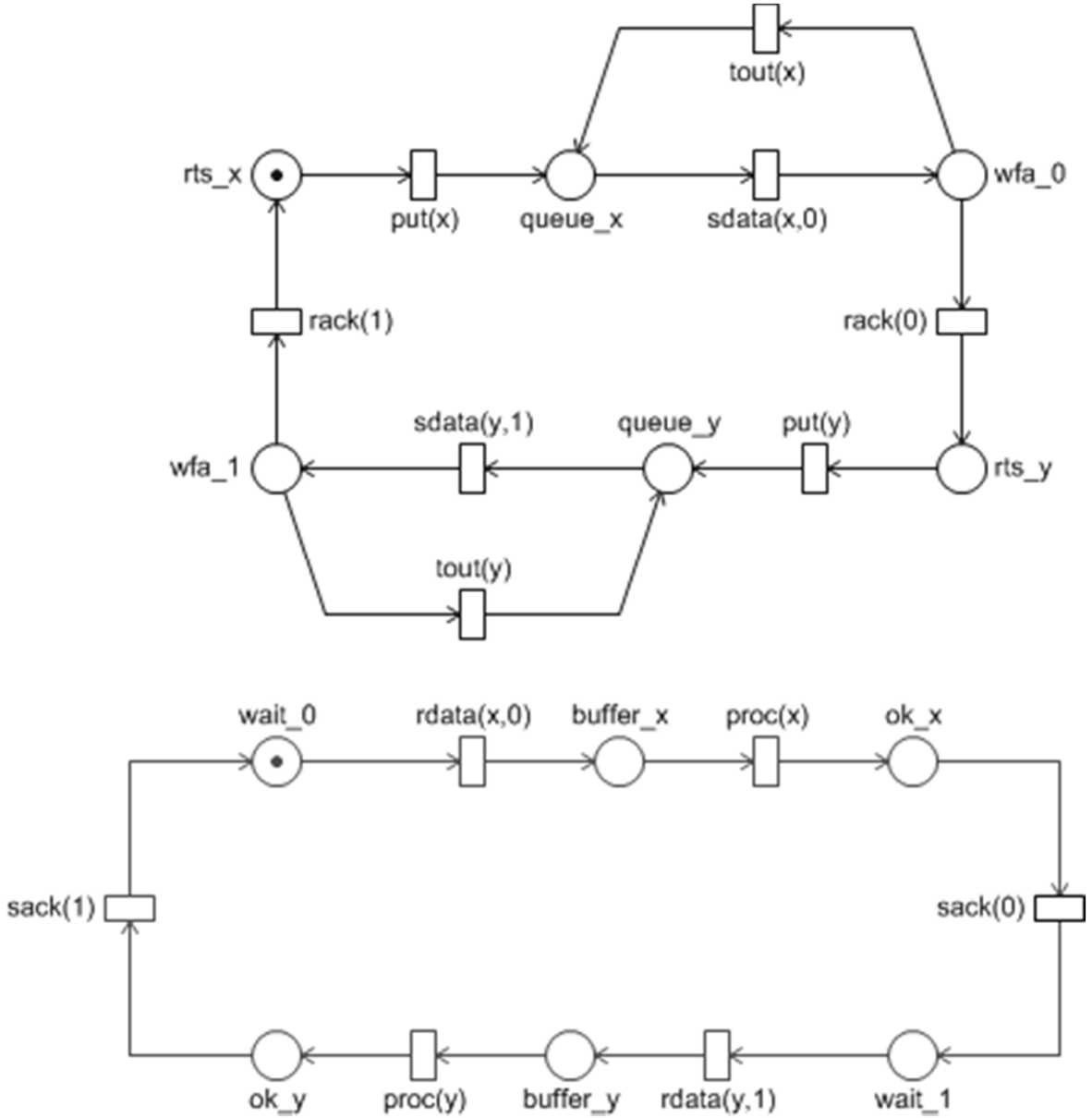
Küldő folyamat Petri háló modellje



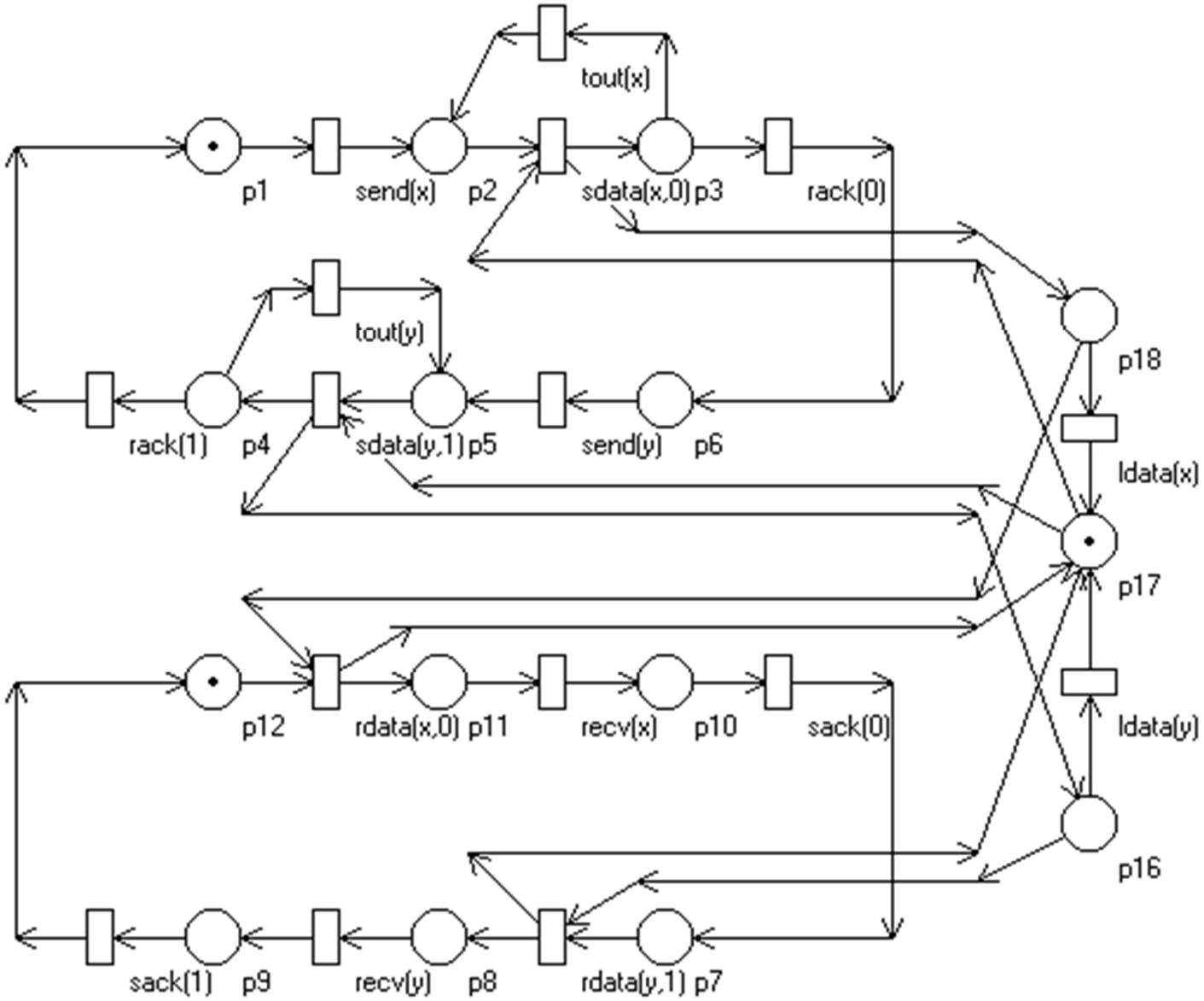
Fogadó folyamat Petri háló modellje



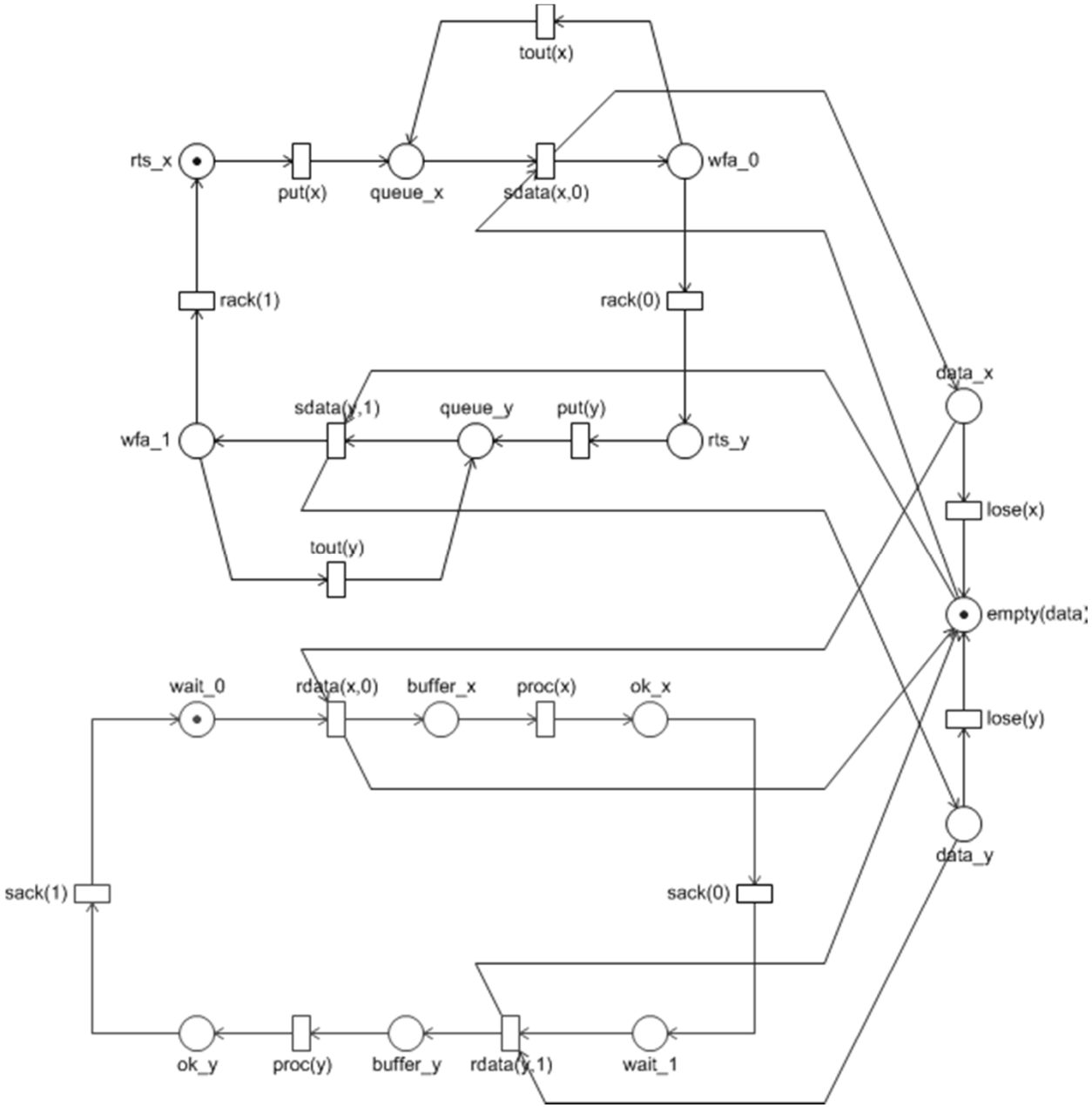
Fogadó folyamat Petri háló modellje



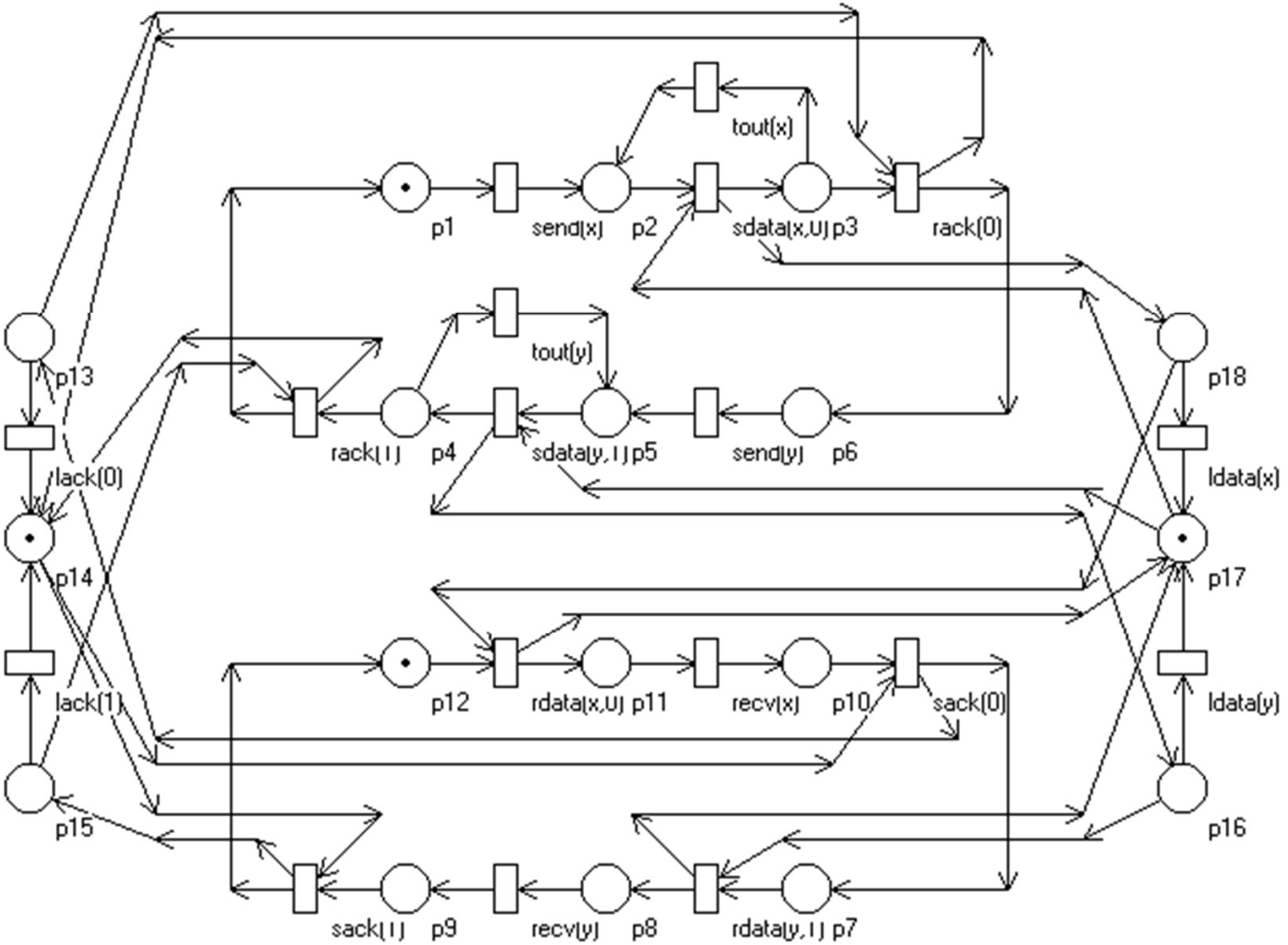
Adat csatorna és az átvitel



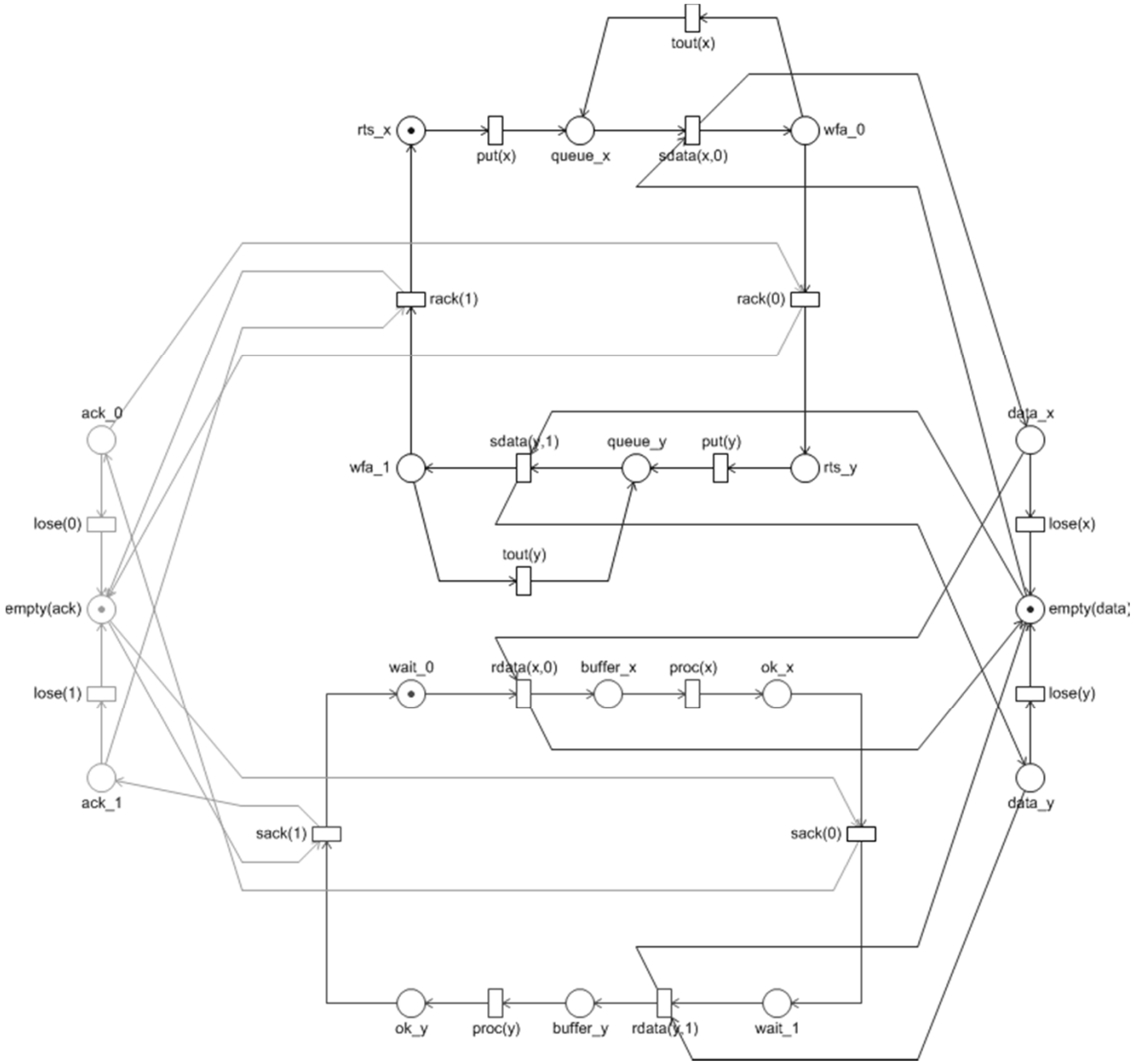
Adat csatorna és az átvitel

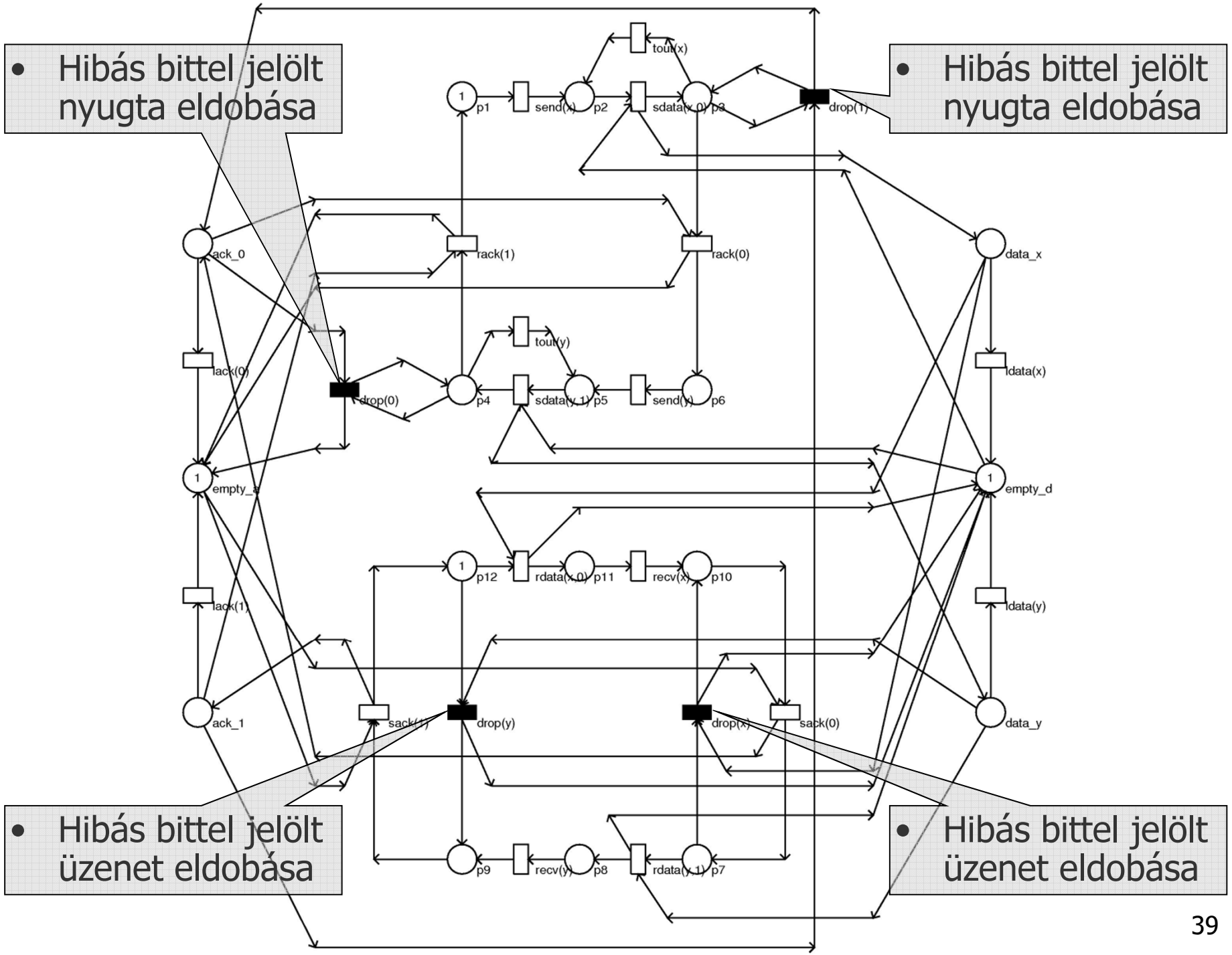


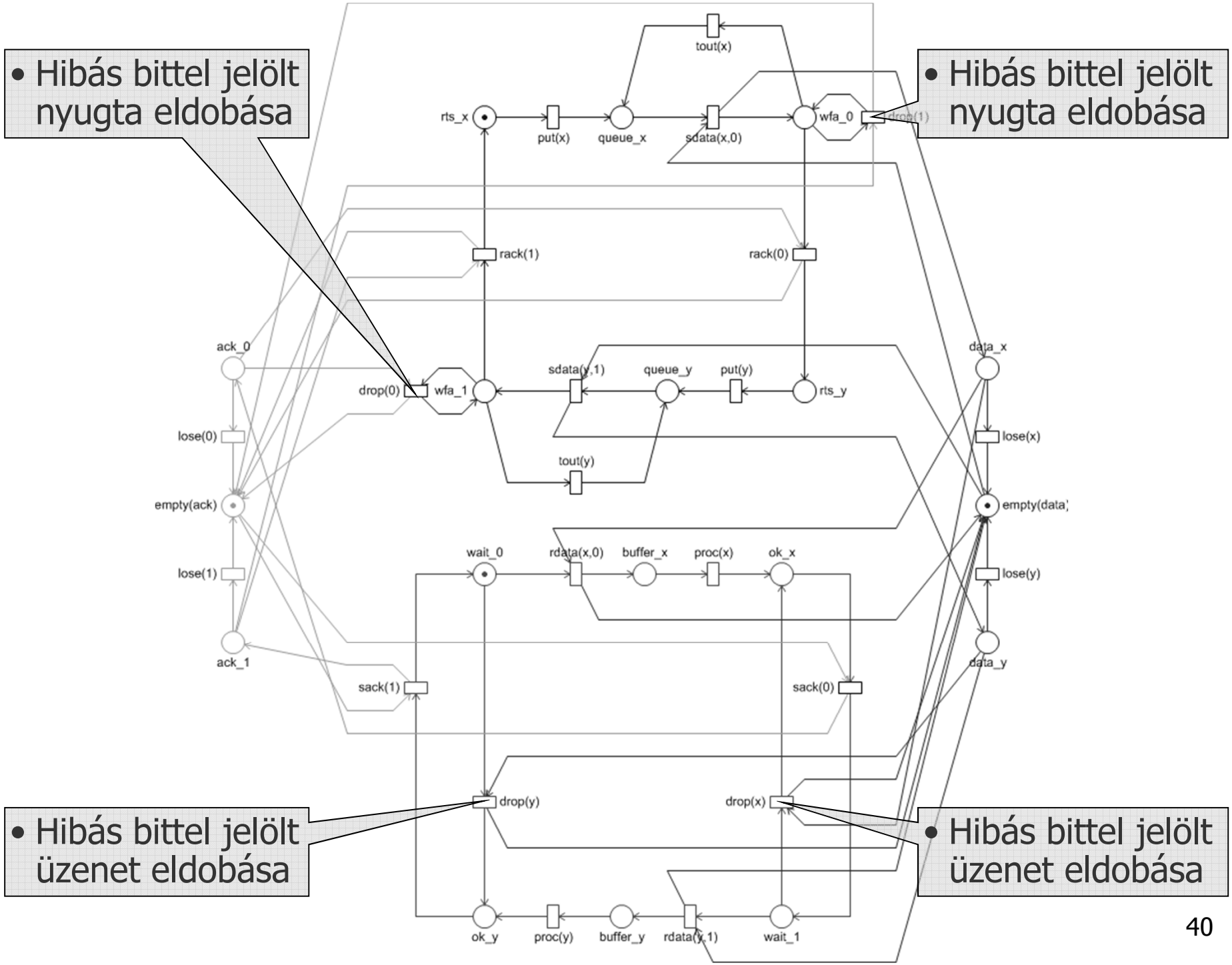
Nyugtázó csatorna



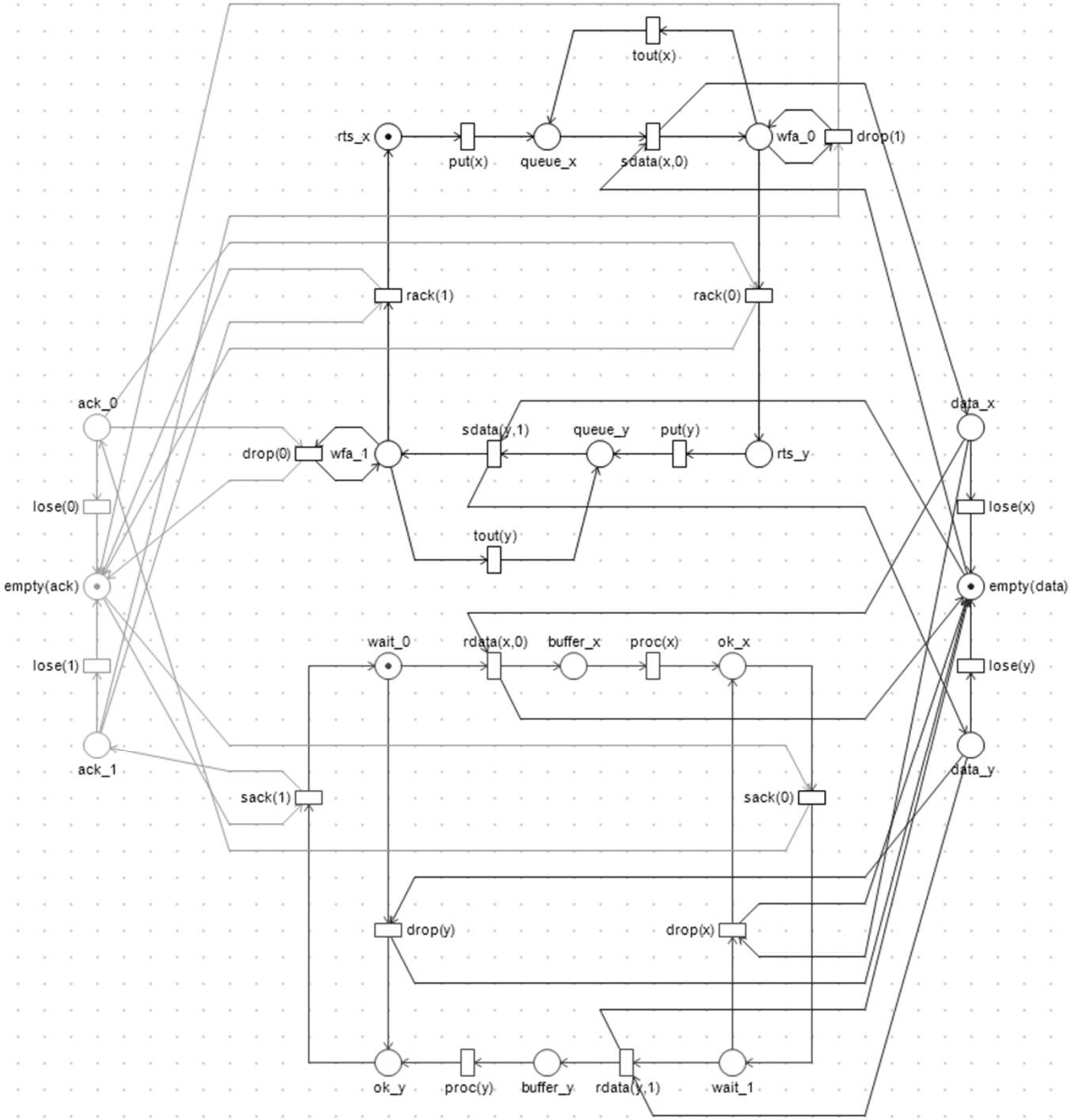
Nyugtázó csatorna



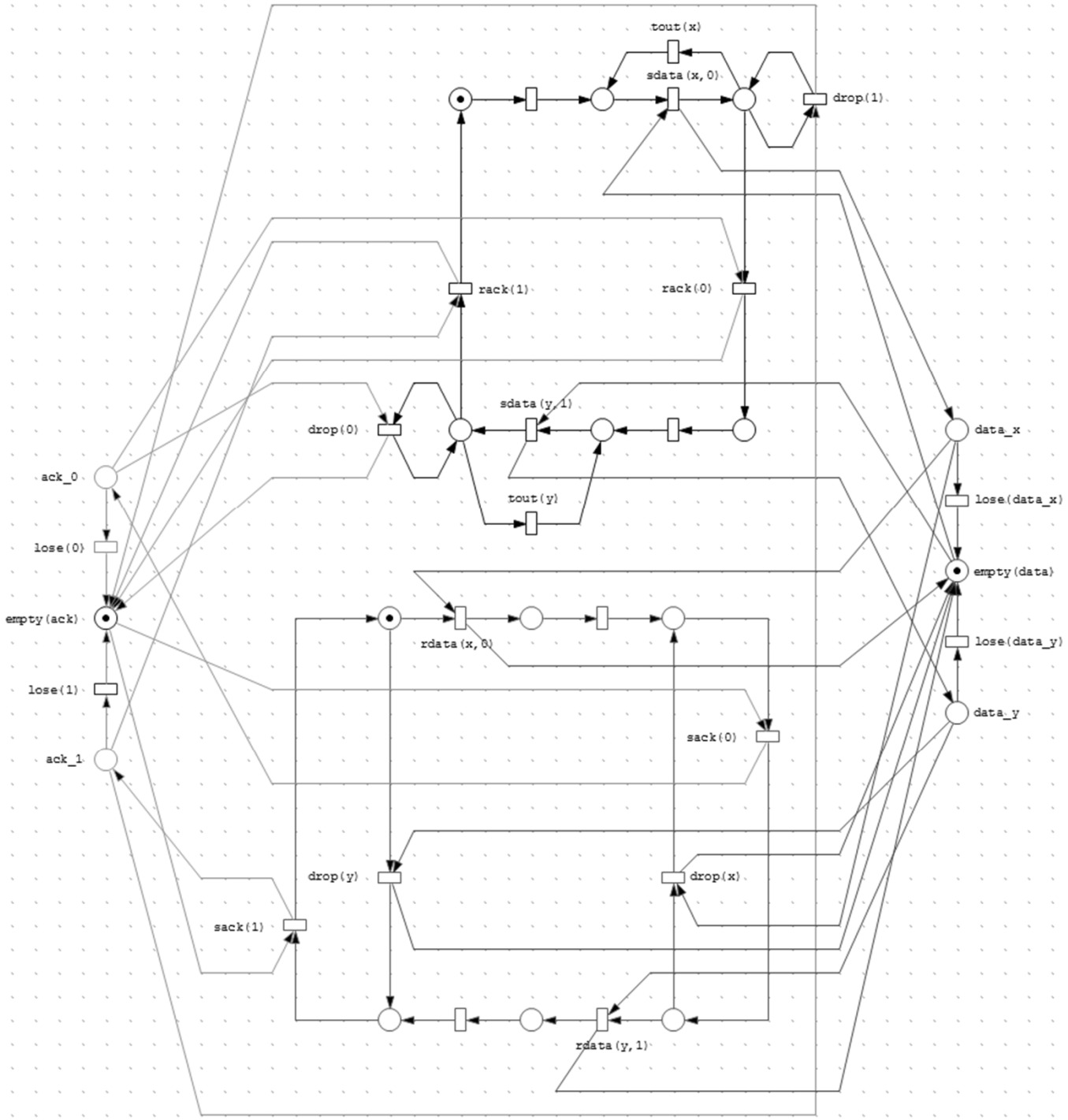

• Hibás bittel jelölt nyugta eldobása
• Hibás bittel jelölt nyugta eldobása
• Hibás bittel jelölt üzenet eldobása
• Hibás bittel jelölt üzenet eldobása
tout(x)
p1
send(x)
p2
sdata(x,0)
p3
drop(1)
ack_0
rack(1)
rack(0)
data_x
tout(y)
lack(0)
drop(0)
p4
sdata(y,1)
p5
send(y)
p6
ldata(x)
empty_s
empty_d
p12
rdata(x,0)
p11
recv(x)
p10
lack(1)
ldata(y)
ack_1
sack(1)
drop(y)
drop(x)
sack(0)
data_y
p9
recv(y)
p8
rdata(x,1)
p7


• Hibás bittel jelölt nyugta eldobása
• Hibás bittel jelölt nyugta eldobása
• Hibás bittel jelölt üzenet eldobása
• Hibás bittel jelölt üzenet eldobása
tout(x)
rts_x
put(x)
queue_x
sdata(x,0)
wfa_0
drop(1)
rack(1)
rack(0)
ack_0
drop(0)
wfa_1
sdata(y,1)
queue_y
put(y)
rts_y
data_x
lose(0)
lose(x)
tout(y)
empty(ack)
empty(data)
wait_0
rdata(x,0)
buffer_x
proc(x)
ok_x
lose(1)
lose(y)
ack_1
data_y
sack(1)
sack(0)
drop(y)
drop(x)
ok_y
proc(y)
buffer_y
rdata(y,1)
wait_1

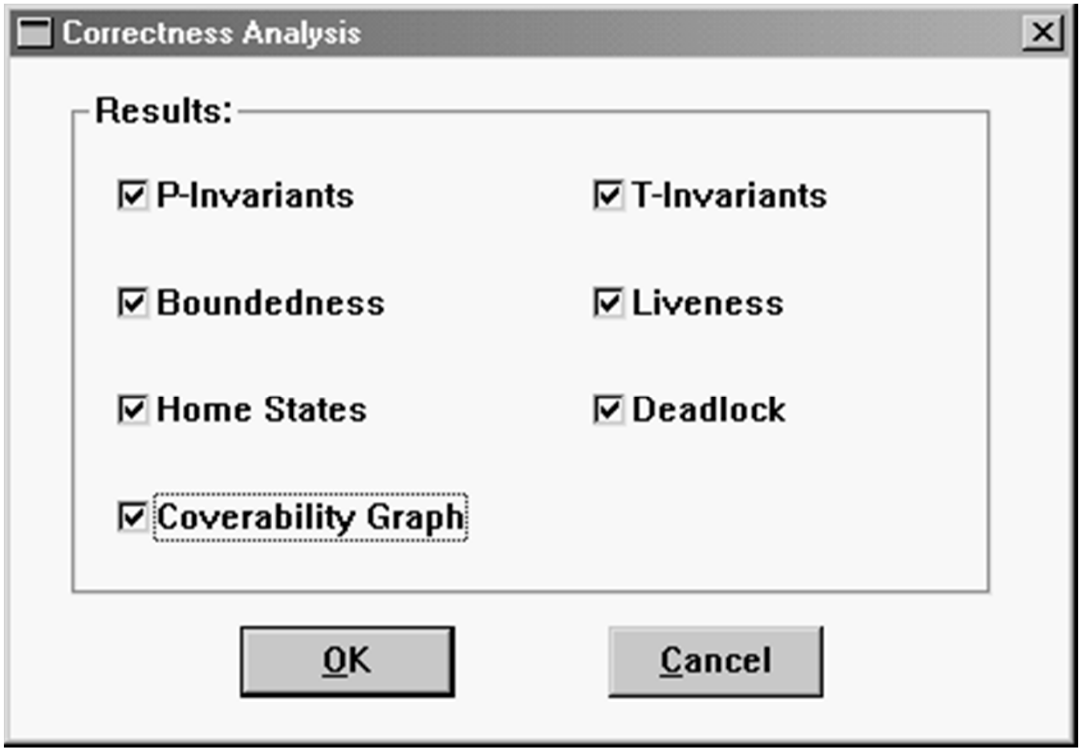
PetriDotNet: A teljes modell



Snoopy: A teljes modell



DNAnet: A modell dinamikus tulajdonságai

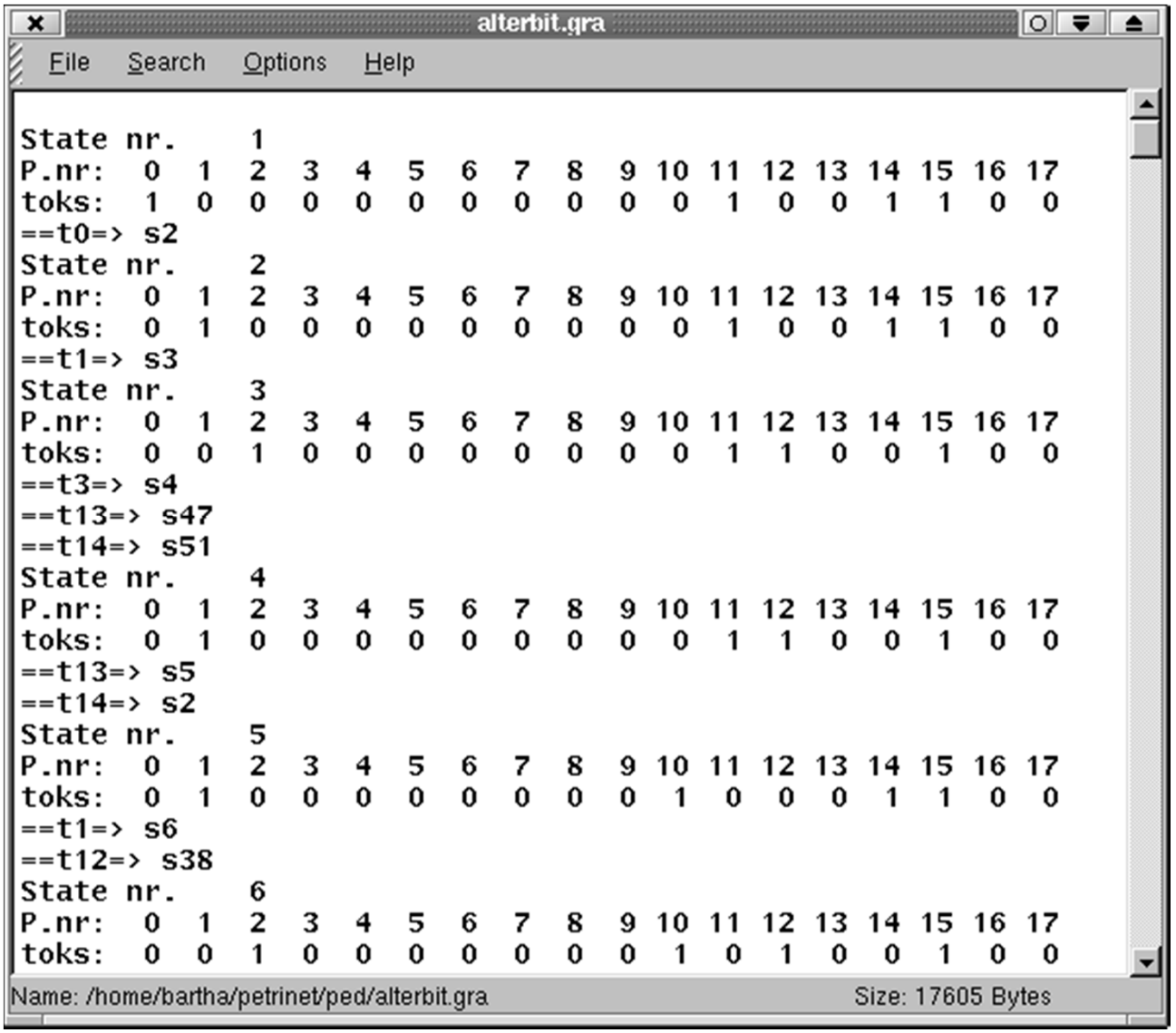



```
Net is bounded.

Deadlock is not possible.

Net is live.

Net has home states.

Coverability graph generation statistics:
108 unique markings
1 strongly connected components
108 hash table entries used
1 was the longest hash list length
1 was the average hash list length
27 was the maximum stack height
3 was the maximum component stack height
```

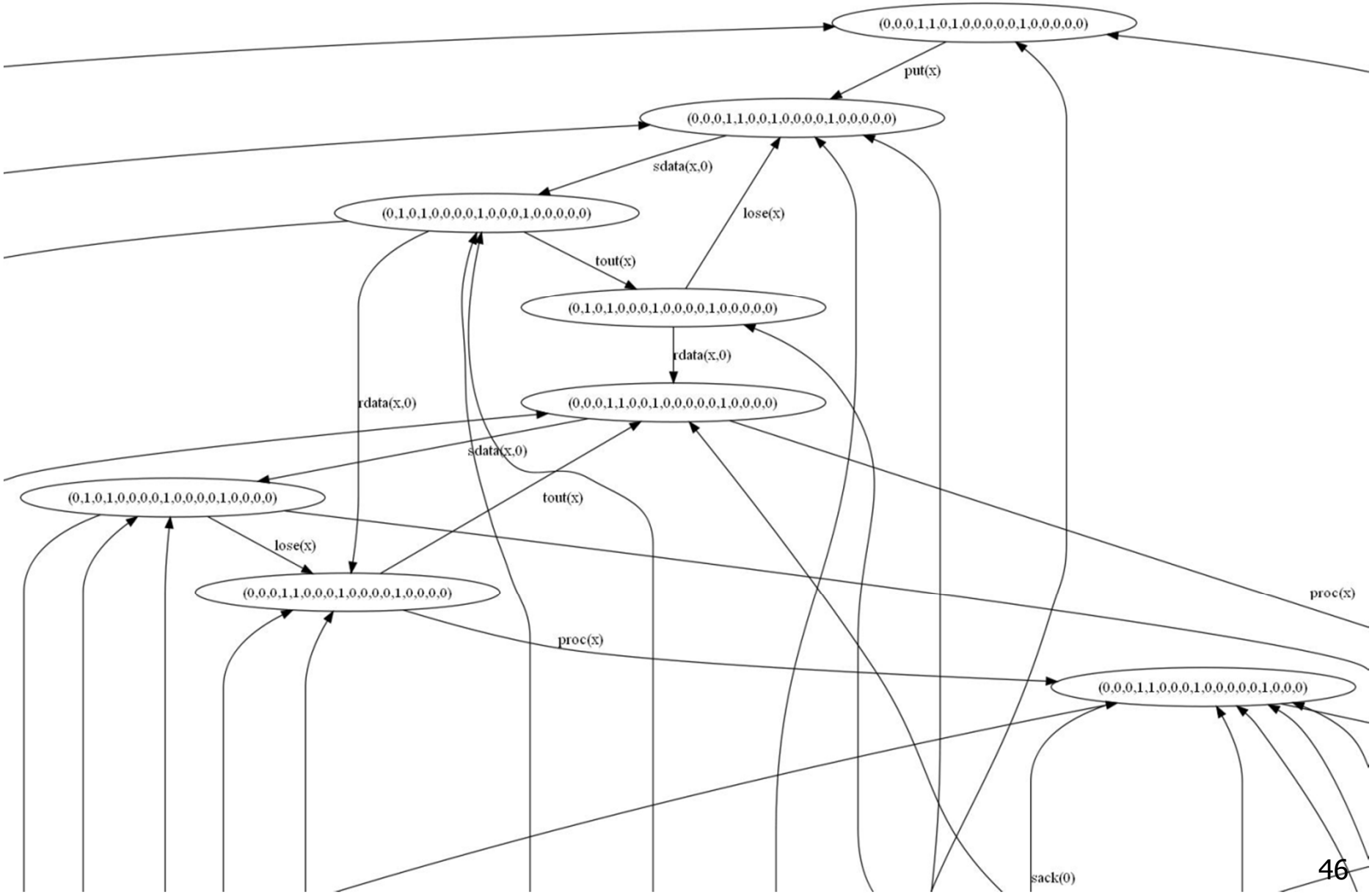
DNAnet: Fedési (elérhetőségi) gráf (részlet)

```
Current: 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0
Child: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0  (main.send(x))

Current: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0
Child: 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1  (main.sdata(x,0))

Current: 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1
Child: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1  (main.tout(x))
Child: 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0  (main.rdata(x,0))
Child: 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0  (main.ldata(x))

Current: 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0
Child: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0  (main.tout(x))

Current: 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0
Child: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0  (main.tout(x))
Child: 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0  (main.recv(x))

Current: 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0
Child: 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0  (main.tout(x))
Child: 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0  (main.sack(0))

Current: 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0
Child: 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0  (main.rack(0))
Child: 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0  (main.tout(x))
Child: 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0  (main.lack(0))
```

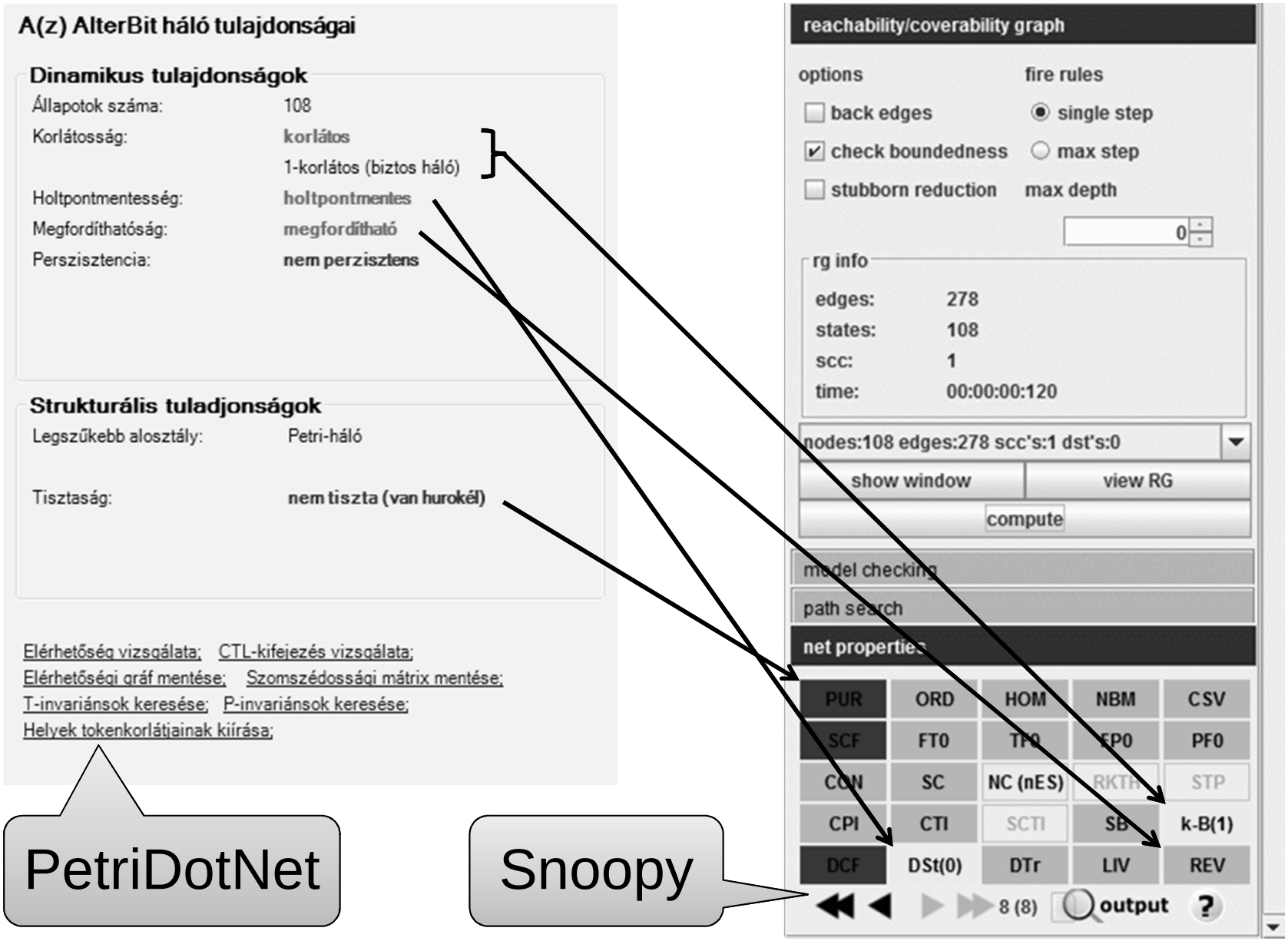
INA: Elérhetőségi gráf



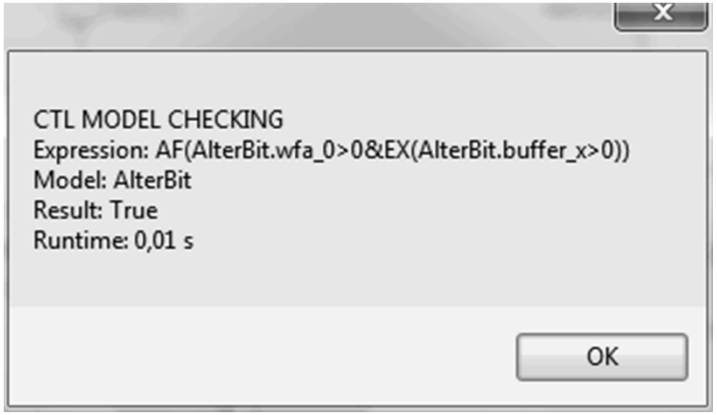
PetriDotNet: Elérhetőségi gráf rajzolása (GraphViz)



A modell analízise: dinamikus tulajdonságok



PetriDotNet: CTL modellellenőrzés



AF(AlterBit.wfa_0>0 & **EX**(AlterBit.buffer_x>0)) ⇒ True

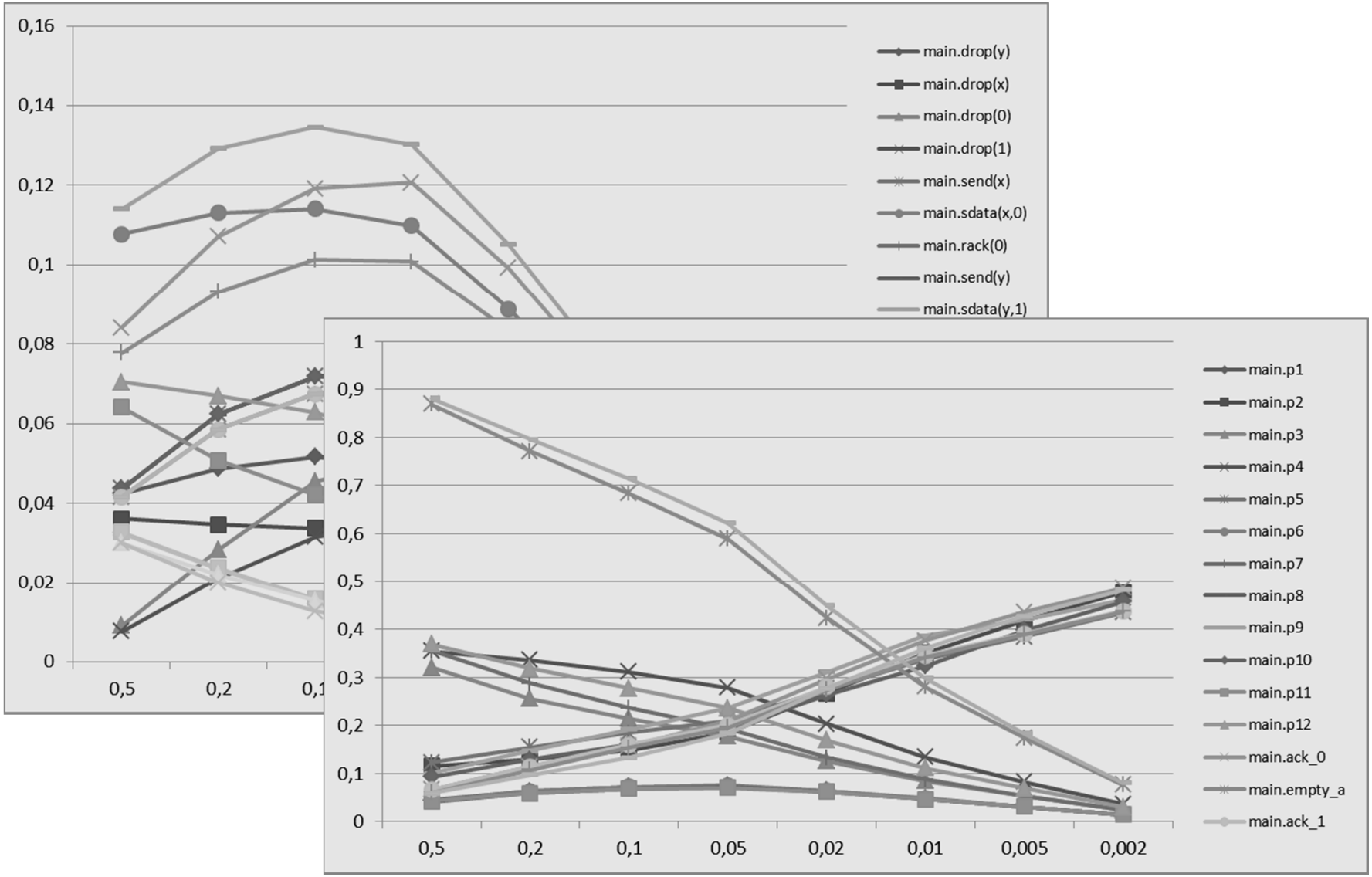
AG(**AF**(AlterBit.buffer_y>0)) ⇒ False

AF(**EG**(AlterBit.buffer_x=0)) ⇒ True

EF(AlterBit.wfa_0>0 & AlterBit.data_x=0) ⇒ True

AF(AlterBit.queue_x>0 & **AX**(AlterBit.wfa_0>0 & AlterBit.data_x>0)) ⇒ True

DNAnet: időzített rendszer szimulációja

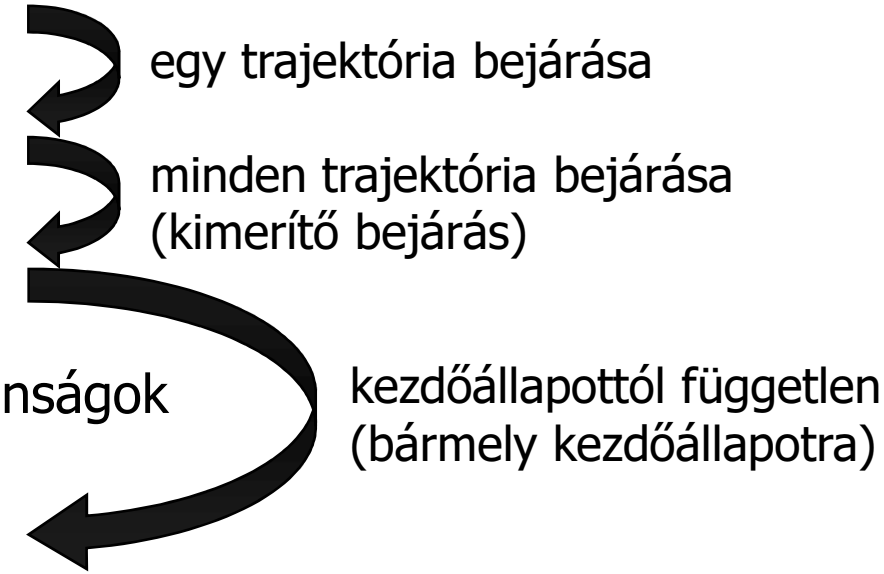


Petri háló modellek „tesztelése”
Szimuláció, token játék algoritmusai

Vizsgálati lehetőségek

Az elemzés mélysége szerint:

- Szimuláció
- Állapottér bejárása
  - elérhetőségi gráf analízis
  - dinamikus (viselkedési) tulajdonságok
- Strukturális tulajdonságok
  - invariáns analízis



ha mindez nem vezet eredményre

- Algebrai közelítés, részleges döntés

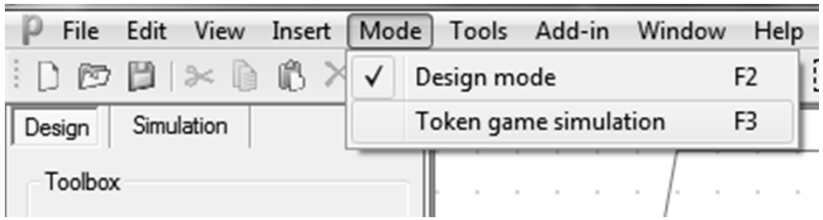
Diszkrét rendszerek szimulációja

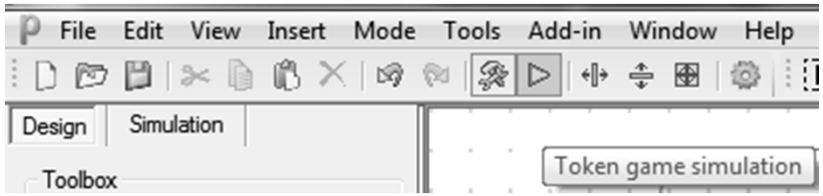
- Cél: a vizsgált rendszer „valósághű” modellezése
  - valósághű ~ validáció (modell megfelelőség)
- Szimuláció folyamatmodellek esetén
  - tevékenységorientált (eseményorientált)
  - csak az események időpontjait tartjuk nyilván
    - tevékenységek kezdete és vége (vagy időtartama)
    - erőforrások lefoglalása és elengedése

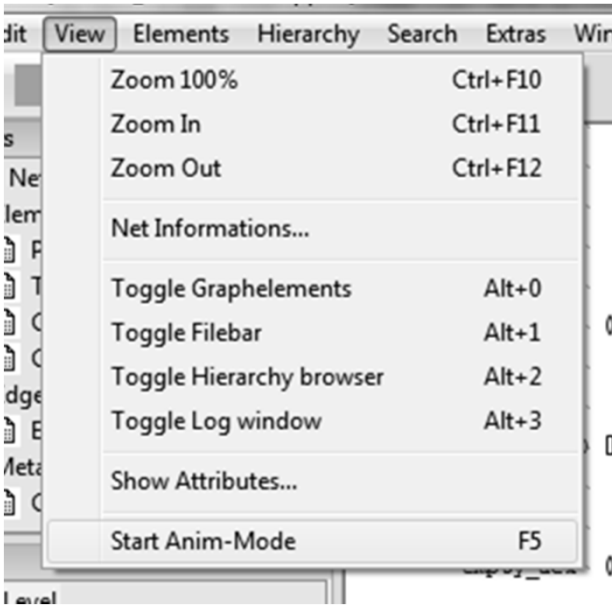
Petri hálók szimulációja

- A rendszer lehetséges trajektóriáinak vizsgálata
- Petri háló állapota: token eloszlás (jelölés)
  - állapotváltás = tüzelés
  - trajektóriák az állapottérben = tüzelési szekvenciák
- Petri háló nemdeterminisztikus
  - a nem-determinizmust is modellezni kell
  - valódi (ál-)véletlen generálásra van szükség
  - állapottér bejárása: interaktív szimuláció (választás)

Animáció (token game)

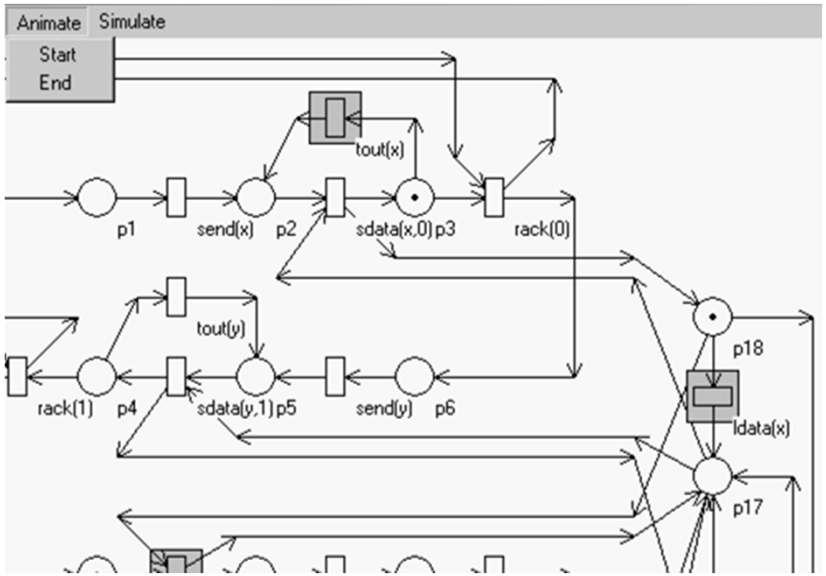


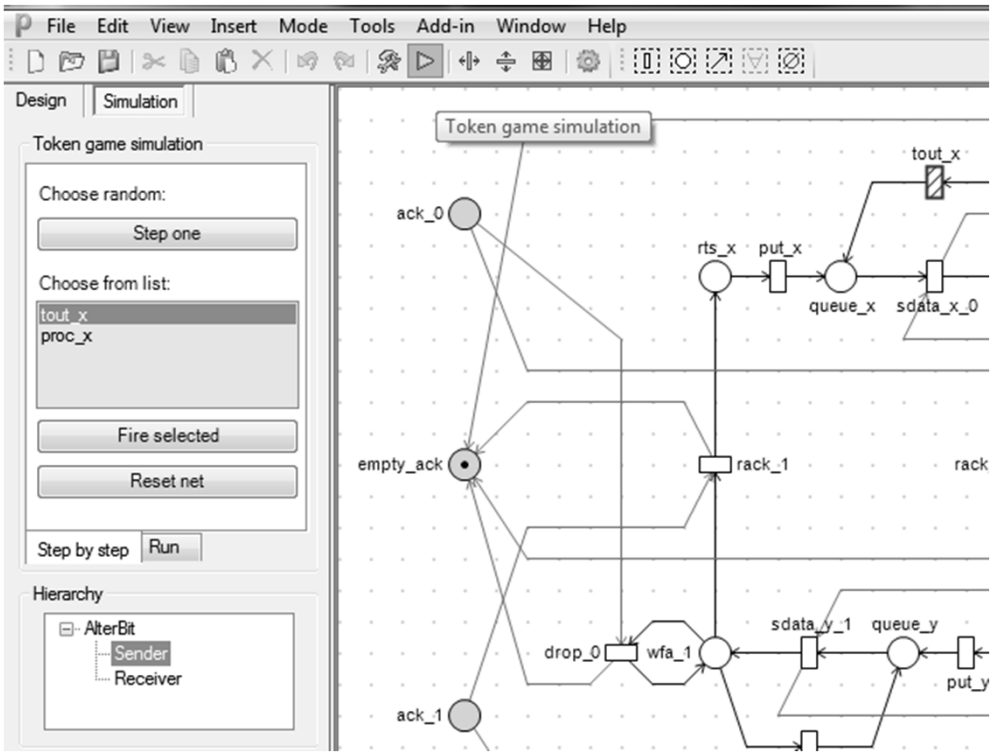


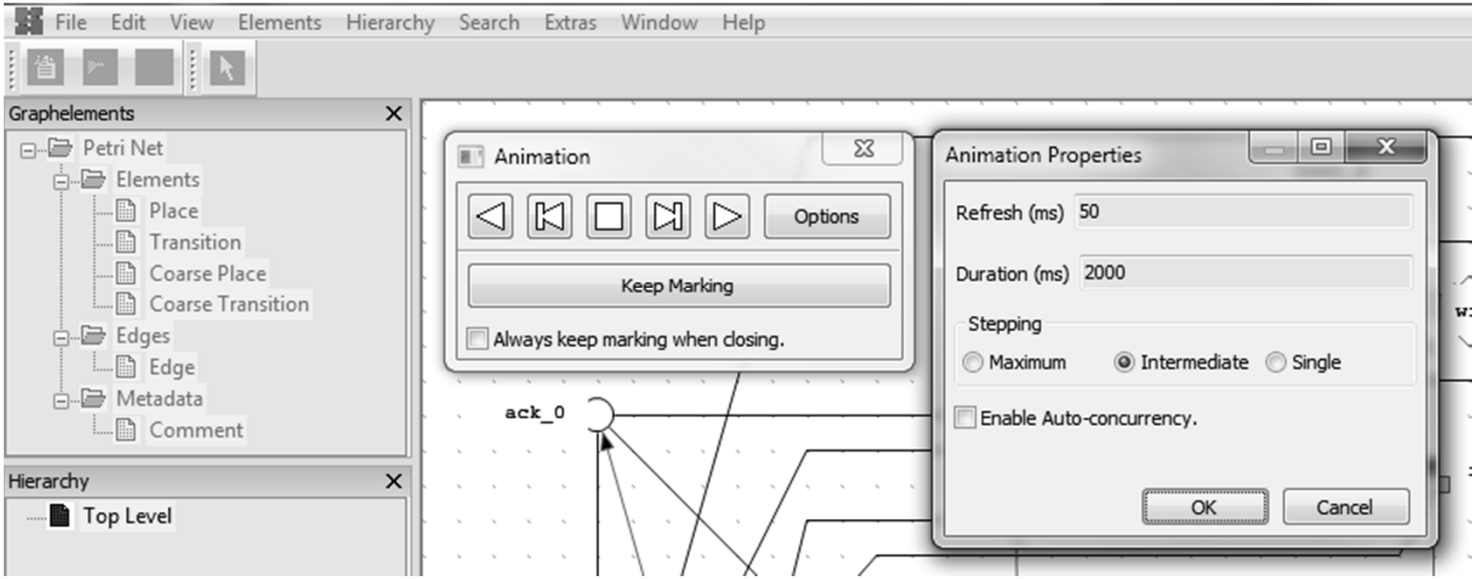


- A modell interaktív ellenőrzése
- Engedélyezett átmenetek jelölve (DNAnet)
- Jelölt átmenetre kattintva tüzel
- Előállítja az új tokeneloszlást
- Konkurens átmenetek:
  - manuálisan
  - PetriDotNet, Snoopy: véletlen választással is
- Befejezéskor visszaállítja a kezdeti tokeneloszlást

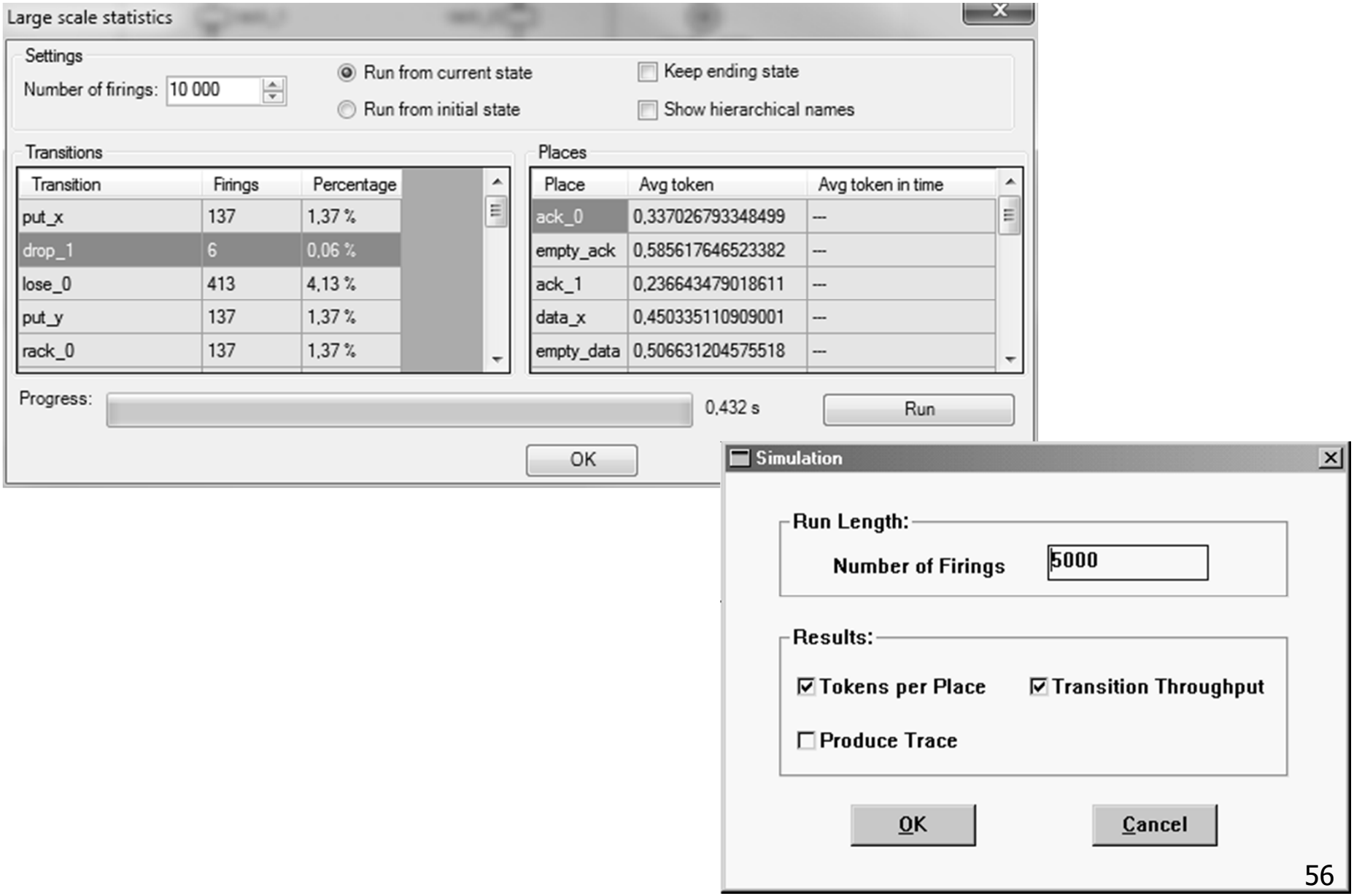
Animációs képernyő







Szimuláció


Large scale statistics
Settings
Number of firings: 10 000
Run from current state
Run from initial state
Keep ending state
Show hierarchical names
Transitions
Transition | Firings | Percentage
put_x | 137 | 1,37 %
drop_1 | 6 | 0,06 %
lose_0 | 413 | 4,13 %
put_y | 137 | 1,37 %
rack_0 | 137 | 1,37 %
Places
Place | Avg token | Avg token in time
ack_0 | 0,337026793348499 | ---
empty_ack | 0,585617646523382 | ---
ack_1 | 0,236643479018611 | ---
data_x | 0,450335110909001 | ---
empty_data | 0,506631204575518 | ---
Progress:
0,432 s
Run
OK
Simulation
Run Length:
Number of Firings
5000
Results:
Tokens per Place
Transition Throughput
Produce Trace
OK
Cancel

Egyszerű szimulációs algoritmus

while (true) do

Engedélyezett tranzíciók felmérése

if Van tüzelhető tranzíció?

then Végrehajtandó kiválasztása (nemdeterminisztikus)

else Szimuláció vége.

Tüzelés

end while

Tüzelhető tranzíciók listájának összeállítása

function *collect_fireable_transitions*(M)

// Tüzelhető tranzíciók halmaza

$L_{fireable} \leftarrow \emptyset$

for all $t \in T$ **do**

if *enabled*(t, M) **then** $L_{fireable} \leftarrow L_{fireable} \cup \{t\}$

return $L_{fireable}$

end function

Az állapotváltozás nagysága

Ha t tüzel M állapotban

- Új állapot: $M' = M + \mathbf{W}^{\mathrm{T}} \cdot e_t$
  - ahol e_t a t tranzíciónak megfelelő egységvektor
- Ahol **W** a súlyozott szomszédossági mátrix
  - $\mathbf{W} = [\mathrm{w}(t, p)]$
  - Dimenziója: $\tau \times \pi = |T| \times |P|$
  - Ha t tüzel, mennyit változik a p-beli tokenszám:

$$\mathrm{w}(t, p) = \begin{cases} \mathrm{w}^{+}(t, p) - \mathrm{w}^{-}(p, t) & \text{ha } (t, p) \in E \text{ vagy } (p, t) \in E \\ 0 & \text{ha } (t, p) \notin E \text{ és } (p, t) \notin E \end{cases}$$

Tüzelés

// Inicializálás

$M \leftarrow \mathrm{M}_0$

$L_{fireable} \leftarrow collect\_fireable\_transitions(M)$

while $L_{fireable} \neq \emptyset$ **do**

    // Tüzelés

    $t \leftarrow rnd(L_{fireable})$

    $M' \leftarrow M + \mathbf{W}^{\mathrm{T}} \cdot \underline{\mathrm{e}}_t$

    $L_{fireable} \leftarrow collect\_fireable\_transitions(M')$

    $M \leftarrow M'$

end while

Redundancia

- Miért kellene mindig megnézni az összes tranzíció tüzelhetőségét ($|T|$ db vizsgálat), ha csak az éppen tüzelt tranzíció környezete ($\bullet t \cup t \bullet$) változik?
  - Letiltódó tranzíciók
  - Engedélyeződő tranzíciók

Letiltódó tüzelések

- Egy t tranzíció tüzelése során letiltódhat
  - olyan t' tranzíció, melynek bemenete kapcsolódik $\bullet t$-hez
  - konfliktusban van t-vel: $\bullet t' \cap \bullet t \neq \emptyset$
- Numerikus meghatározás:
  - Az elvett tokenek száma: $M^- = \mathbf{W}^{-\mathbf{T}} \cdot \underline{e}_t$
  - t ősei (bemeneti helyei): $\bullet t \Rightarrow \{p \in P: M^-(p) > 0\}$
  - A t-vel konfliktusban levők: $T' = \{(\bullet t)\bullet\}$

Engedélyeződő tüzelések

- Egy t tranzíció tüzelése során engedélyeződhet
  - olyan t” tranzíció, melynek bemenete kapcsolódik $t\bullet$-hez
  - t engedélyezi t”-t: $\bullet t\text{”} \cap t\bullet \neq \emptyset$
- Numerikus meghatározás
  - A hozzátett tokenek száma: $M^{+} = \mathbf{W}^{+\mathbf{T}} \cdot \underline{\mathrm{e}}_t$
  - t utódai (kimeneti helyei): $t\bullet \Rightarrow \{p \in P\text{: } M^{+}(p) > 0\}$
  - A t által engedélyezettek: $T\text{”} = \{(t\bullet)\bullet\}$
- Elég ezeket (letiltódó + engedélyeződő) tranzíciókat újraértékelni!

Hatékony algoritmus: inicializálás

- Inicializálási fázis ugyanaz

// Inicializálás

$M \leftarrow \mathrm{M}_0$

$L_{fireable} \leftarrow \emptyset$

// Tüzelhető tranzíciók kezdeti halmaza

for all $t \in T$ **do**

    if $enabled(t, \mathrm{M}_0)$ **then** $L_{fireable} \leftarrow L_{fireable} \cup \{t\}$

Hatékony algoritmus: tüzelési ciklus

while $L_{fireable} \neq \emptyset$ **do**

// Tüzelés

$t \leftarrow rnd(L_{fireable})$

$M' \leftarrow M + \mathbf{W}^{\mathrm{T}} \cdot \underline{e}_t$

// Letiltottak eltávolítása

for all $t' \in \{(\bullet t)\bullet\}$ **do**

if $not(enabled(t', M'))$ **then** $L_{fireable} \leftarrow L_{fireable} \setminus \{t'\}$

// Engedélyezettek bevonása

for all $t'' \in \{(t\bullet)\bullet\}$ **do**

if $enabled(t'', M')$ **then** $L_{fireable} \leftarrow L_{fireable} \cup \{t''\}$

$M \leftarrow M'$

end while

Prioritás

- Tüzelési szabály kiegészül: t a.cs.a. tüzelhet, ha
  - engedélyezett és
  - nincs az ő $\pi(t)$ prioritásánál nagyobb prioritású engedélyezett
- Következmény:
  - $L_{fireable}$ nem halmaz, hanem halmazok $\pi \in \Pi$ prioritás szerint rendezett $L_{fireable}[\pi]$ vektora
  - tüzeléskor a legmagasabb prioritású nem üres $L_{fireable}[\pi]$ halmazból választunk nemdeterminisztikusan

Prioritásos algoritmus: inicializálás

// Inicializálás

$M \leftarrow \mathrm{M}_0$

for all $\pi \in \Pi$ **do**

    $L_{fireable}[\pi] \leftarrow \varnothing$

// Tüzelhető tranzíciók kezdeti halmaza

for all $t \in T$ **do**

    if $enabled(t, \mathrm{M}_0)$ **then** $L_{fireable}[\pi(t)] \leftarrow L_{fireable}[\pi(t)] \cup \{t\}$

Prioritásos algoritmus: tüzelési ciklus

while $\bigcup_{\pi\in\Pi} L_{fireable}[\pi] \neq \emptyset$ **do**

for $\pi = \pi_{max}$ **to** π_{min} **step -1 do** // Tüzelés

if $L_{fireable}[\pi] \neq \emptyset$ **then**

$t \leftarrow rnd(L_{fireable}[\pi])$

$M' \leftarrow M + \mathbf{W}^{T} \cdot \underline{e}_t$

exit for

end if

for all $\pi \in \Pi$ **do** // Engedélyezett tranzíciók

for all $t' \in \{(\bullet t)\bullet\}$ **do**

if $not(enabled(t', M'))$ **then** $L_{fireable}[\pi(t')] \leftarrow L_{fireable}[\pi(t')] \setminus \{t'\}$

for all $t'' \in \{(t\bullet)\bullet\}$ **do**

if $enabled(t'', M')$ **then** $L_{fireable}[\pi(t'')] \leftarrow L_{fireable}[\pi(t'')] \cup \{t''\}$

end for

$M \leftarrow M'$

end while

Időzítés

- „Fizikai” időfogalom bevezetése a modellezésbe
  - Események (tüzelések) adott idő alatt mennek végbe
- Lehetőségek:
  - nem időzített tranzíciók
  - időzített tranzíciók
- Tranzíciók időzítése
  - determinisztikus időzítés: konstans gyújtási idő
  - véletlen időzítés: a gyújtási idő valószínűségi változó
    - pl. exponenciális eloszlású: SPN (Stochastic Petri Net)
      - Markov folyamat, analízis Markov láncok elmélete alapján

Időzített Petri hálók működése

- Tüzelés fázisai:
  1. Tüzelhetőség kiértékelése
  2. Időzítés
     - Véletlen időzítésű engedélyezett tranzíciók sorsolnak
     - Legkisebb gyújtási idejű tranzíció(k egyike) tüzel
  3. Tüzelés végrehajtása
     - Logikai idő léptetése

Megoldandó problémák

- Időzített vs. nem időzített?
  - Megoldás: időzítetlen tranzíciók magas prioritásúak
  - Azonnali (immediate) tranzíció
- Mi van, ha több, konfliktusban levő időzített tranzíció egyike tüzel és letiltja mások tüzelését?
  - Alternatív definíciók:
    - időzítés újraindul
    - letelt idő megőrződik (reward saving)
  - SPN-nél statisztikai értelemben mindegy
    - exponenciális eloszlás örökifjú tulajdonsága miatt
    - $P(\xi \geq x+y \mid \xi \geq x) = P(\xi \geq y)$

Algoritmus: újrainduló időzítés

procedure *maintenance*(t, M)

// Azonnali tranzíciók karbantartása

for all $\pi \in \Pi$ **do**

for all $t' \in \{(\bullet t)\bullet\} \cap T_{immediate}$ **do**

if *not*$(enabled(t', M)$ **then** $L_{immediate}[\pi(t')] \leftarrow L_{immediate}[\pi(t')] \setminus \{t'\}$

for all $t'' \in \{(t\bullet)\bullet\} \cap T_{immediate}$ do

if $enabled(t'', M)$ **then** $L_{immediate}[\pi(t'')] \leftarrow L_{immediate}[\pi(t'')] \cup \{t''\}$

end for

...

Időzített tranzíciók kezelése

...

// futó időzítésű letiltott tranzíciók kivétele

for all $\tau > \tau_{simulation}$ **do**

for all $t' \in \{(\bullet t)\bullet\} \cap T_{timed} \cap L_{timed}[\tau]$ **do**

if $not(enabled(t', M)$ **then** $L_{timed}[\tau] \leftarrow L_{timed}[\tau] \setminus \{t'\}$

// új engedélyezett időzített tranzíciók felvétele

for all $t'' \in \{(t\bullet)\bullet\} \cap T_{timed}$ **do**

$\tau'' \leftarrow time(t'')$

if $enabled(t'', M)$ **then** $L_{timed}[\tau''] \leftarrow L_{timed}[\tau''] \cup \{t''\}$

end for

end procedure

Főprogram: inicializálás

// Inicializálás

$M \leftarrow \mathrm{M}_0$

$\tau_{simulation} \leftarrow 0$

for all $\pi \in \Pi$ **do**

$L_{immadiate}[\pi] \leftarrow \varnothing$

// Tüzelhető azonnali tranzíciók kezdeti halmaza

for all $t \in T_{immediate}$ **do**

if $enabled(t, \mathrm{M}_0)$ **then** $L_{immediate}[\pi(t)] \leftarrow L_{immediate}[\pi(t)] \cup \{t\}$

…

Főprogram: időzítetlen tranzíciók tüzelése

MAIN: **while** $\bigcup_{\pi \in \Pi} L_{immediate}[\pi] \neq \emptyset$ **do**

  for $\pi = \pi_{max}$ **to** π_{min} **step -1 do**

    if $L_{immediate}[\pi] \neq \emptyset$ **then**

      // Azonnali tranzíció tüzelése

      $t \leftarrow rnd(L_{immediate}[\pi])$

      $M' \leftarrow M + \mathbf{W}^{T} \cdot \underline{e}_t$

      $maintenance(t, M')$

      $M \leftarrow M'$

      exit for

    end if

  end for

end while

…

Főprogram: időzített tranzíciók tüzelése

…

if $\exists\tau \geq \tau_{simulation} : L_{timed}[\tau] \neq \emptyset$ **then**

// Idő léptetése

$\tau_{simulation} \leftarrow min(\{\tau : L_{timed}[\tau] \neq \emptyset\})$

// Időzített tranzíció tüzelése

$t \leftarrow rnd(L_{timed}[\tau_{simulation}])$

$M' \leftarrow M + \mathbf{W}^{T} \cdot \underline{e}_t$

$maintenance(t, M')$

$M \leftarrow M'$

goto MAIN

end if

end.