

Modell Alapú Diagnosztika Diszkrét Módszerekkel
kutatási és fejlesztési feladatok és esettanulmányok

Hangos Katalin

PE Villamosmérnöki és Információs Rendszerek Tanszék

MTA SzTAKI, Folyamatirányítási Kutató Csoport

Tartalom

1. Rendszerek és modellek
2. Kvalitatív modellek és diszkrét eseményű rendszerek
 - szabályrendszerek
 - Petri hálók, színes Petri hálók
3. Irányítás és diagnosztika
 - operátori eljárások
4. Meghibásodás, veszély és hatáselemzésen alapuló diagnosztika
 - HAZOP és FMEA
 - kétirányú következtetésen alapuló diagnosztika
5. Események követésén alapuló diagnosztika
 - hibamodellezés
 - diagnosztizálás tervezése

Rendszerek és modellek

Rendszer- és irányításelmélet: Részterületek

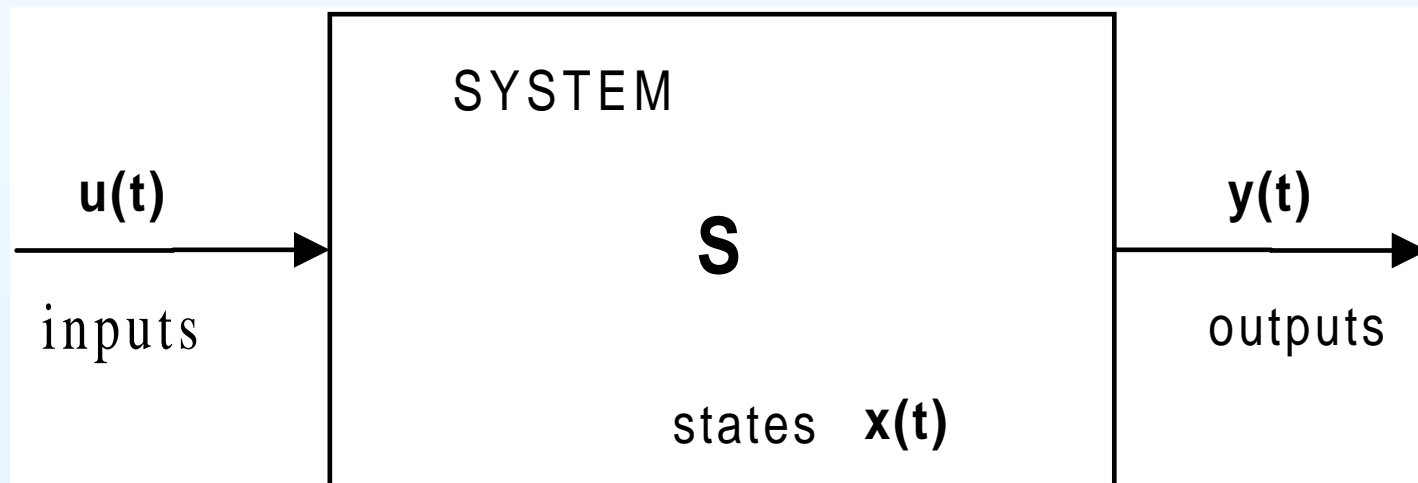
- **rendszermodellezés** (realizáció-elmélet)
- **identifikáció**
 - kísérlettervezés, jelfeldolgozás
 - modell paraméter és struktúra becslés
- **rendszer-analízis**: megfigyelhetőség, irányíthatóság, stabilitás
- **irányítástervezés**
 - szabályozások: értéktartó, zavarelnyomó, stabilizáló stb.
 - optimális irányítások
 - **diszkrét vezérlési szekvenciák**
- **diagnosztika**

Jelek és rendszerek

(**S**) rendszer: jeleken végez műveletet

$$y = \mathbf{S}[u]$$

- bemenetek (u) és kimenetek (y); állapotok (x)



Rendszer jelfolyam-ábrája

A modellezési feladat

- **adott:** modellezendő rendszer, modellezési cél
- **meghatározandó:** matematikai modell, amely leírja a rendszer viselkedését az adott célra



$$\frac{dh}{dt} = \frac{v_{be}}{A} sz_{be} - \frac{v_{ki}}{A} sz_{ki}$$

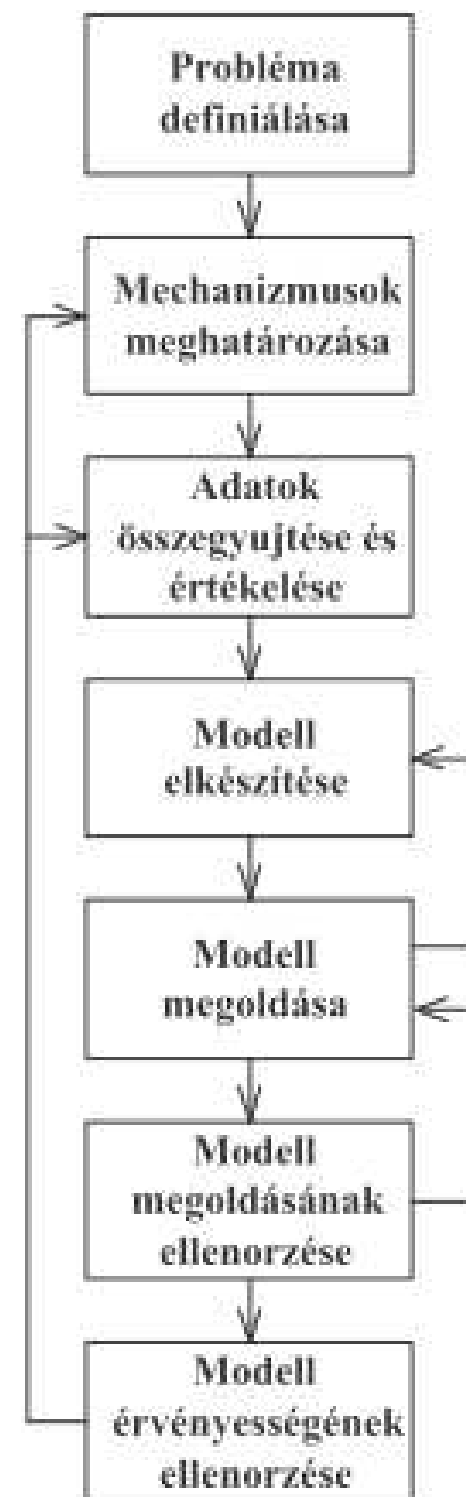
$$\frac{dT}{dt} = \frac{v_{be}}{Ah} (T_{be} - T) sz_{be} + \frac{Q_H}{c_p \rho Ah} k$$

$$h(0) = h_0 \quad , \quad T(0) = T_0$$

7 lépéses modellezési eljárás

Differenciálegyenletek:
dinamikus mérlegegyenletekből

Algebrai kiegészítő egyenletek



Kvalitatív modellek

Logikai értékek és műveletek

Logikai értékek: **true** (igaz), **false** (hamis)

Az **and** (és) művelet műveleti táblája

$a \wedge b$		
$a \downarrow b \rightarrow$	false	true
false	false	false
true	false	true

Az **impikáció** műveleti táblája

$a \rightarrow b$		
$a \downarrow b \rightarrow$	false	true
false	true	true
true	false	true

Predikátumok és szabályok

Predikátum: "atomi" logikai (**true**, **false**) értékő változó

Példák

$$p_1 = (\kappa = \mathbf{on}) \ ; \ p_2 = (T < 300) \ ; \ p_3 = (h = \mathbf{low})$$

$$p_4 = (error = \text{"tank overflow"})$$

Szabály szintaxisa: implikáció

if *condition* **then** *consequence*;

condition \rightarrow *consequence*

ahol *condition* és *consequence* logikai kifejezések

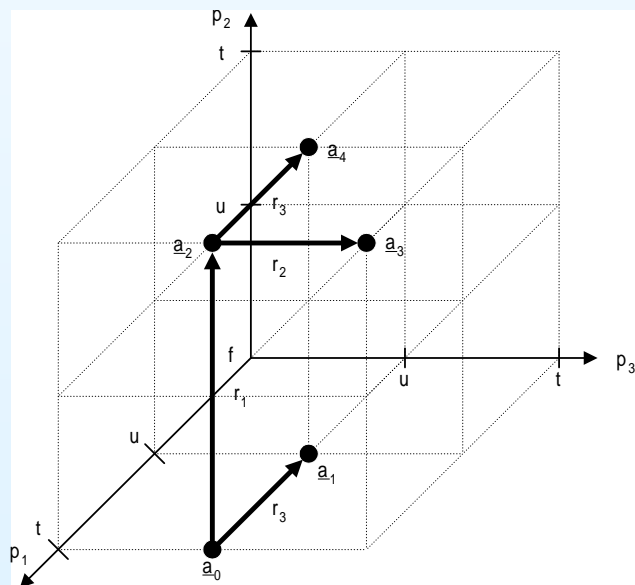
Szabályrendszerek, következtetés

Tény-bázis: predikátumok halmaza

Szabályok: relációkat határoznak meg a predikátumok között

Szabályok használata: **következtetés**

- *előrefelé haladó következtetés:* tények következményeit határozza meg
- *hátrafelé haladó következtetés:* tények okait határozza meg (**diagnosztika!**)



Előjel műveletek

Eőjel értékek: +, 0 -

Előjel összeadás és szorzás műveleti táblái

$a \oplus_S b$	+	0	-	?
+	+	+	?	?
0	+	0	-	?
-	?	-	-	?
?	?	?	?	?

$a \otimes_S b$	+	0	-	?
+	+	0	-	?
0	0	0	0	0
-	-	0	+	?
?	?	0	?	?

Tulajdonságok:

- *növekvő bizonytalanság összeadásnál*
- aritmetikai műveletekhez hasonló tulajdonságok

Nagyságrendi aritmetika

Nagyságrendi érték halmazok

$$Q = \{H, N, L, 0\} \quad , \quad Q_E = \{H, N, L, 0, e+, e-\}$$

Nagyságrendi összeadás műveleti táblája

$[a] + [b]$	0	L	N	H
0	0	L	N	H
L	L	N	H	$e+$
N	N	H	$e+$	$e+$
H	H	$e+$	$e+$	$e+$

Additív hibával terhelt érzékelő

Algebrai modell egyenlet: $v^m = v + \chi \cdot E$

$[v] \in \mathcal{Q}, [v]^m \in \mathcal{Q}_e, \chi \in B_{-1} = \{-1, 0, 1\}$

A megoldás táblázata

$[v^m]$	$[\chi]$	$[v]$	mode
N	0	N	normal
H	0	H	normal
L	0	L	normal
0	0	0	normal

$e+$	1	H	faulty
H	1	N	faulty
N	1	L	faulty
L	1	0	faulty
N	-1	H	faulty
L	-1	N	faulty
0	-1	L	faulty
$e-$	-1	0	faulty

A szamovár tömegmérlege

Differenciálegyenlet diszkretizálva: $h^T = h + \chi_I \cdot v - \chi_O \cdot v$

$[h], [h]^T \in \mathcal{Q}_e, \chi_I, \chi_O \in \mathcal{B}, [v] = N$

Konstans bemenet melletti megoldás

$[h]^T$	$[h](t_0)$	χ_I	χ_O
(N, N, N)	N	$(1,1,1)$	$(1,1,1)$
(L, L, L)	L	$(1,1,1)$	$(1,1,1)$
...
(N, N, N)	N	$(0,0,0)$	$(0,0,0)$
...
$(e+, e+, H)$	N	$(1,1,1)$	$(0,0,0)$
$(e+, H, N)$	L	$(1,1,1)$	$(0,0,0)$
...
$(e-, 0, L)$	N	$(0,0,0)$	$(1,1,1)$
$(e-, e-, 0)$	L	$(0,0,0)$	$(1,1,1)$
...

Petri hálók

Petri háló modell – absztrakt leírás: $\mathbf{PN} = (P, T, I, O)$

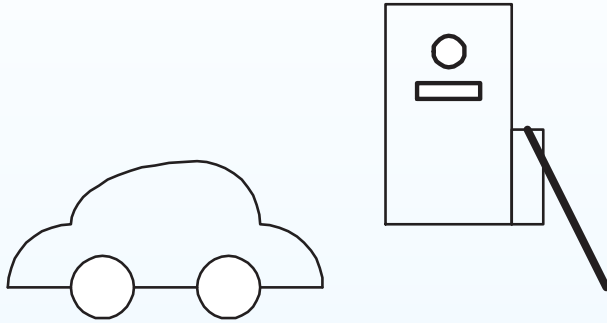
Statikus leírás (szerkezet)

- **Helyek (feltételek)** halmaza: P
- **Átmenetek (események)** halmaza: T
- **Bemeneti (előfeltétel) függvény:** $I : T \rightarrow P^\infty$
- **Kimeneti (következmény) függvény:** $O : T \rightarrow P^\infty$

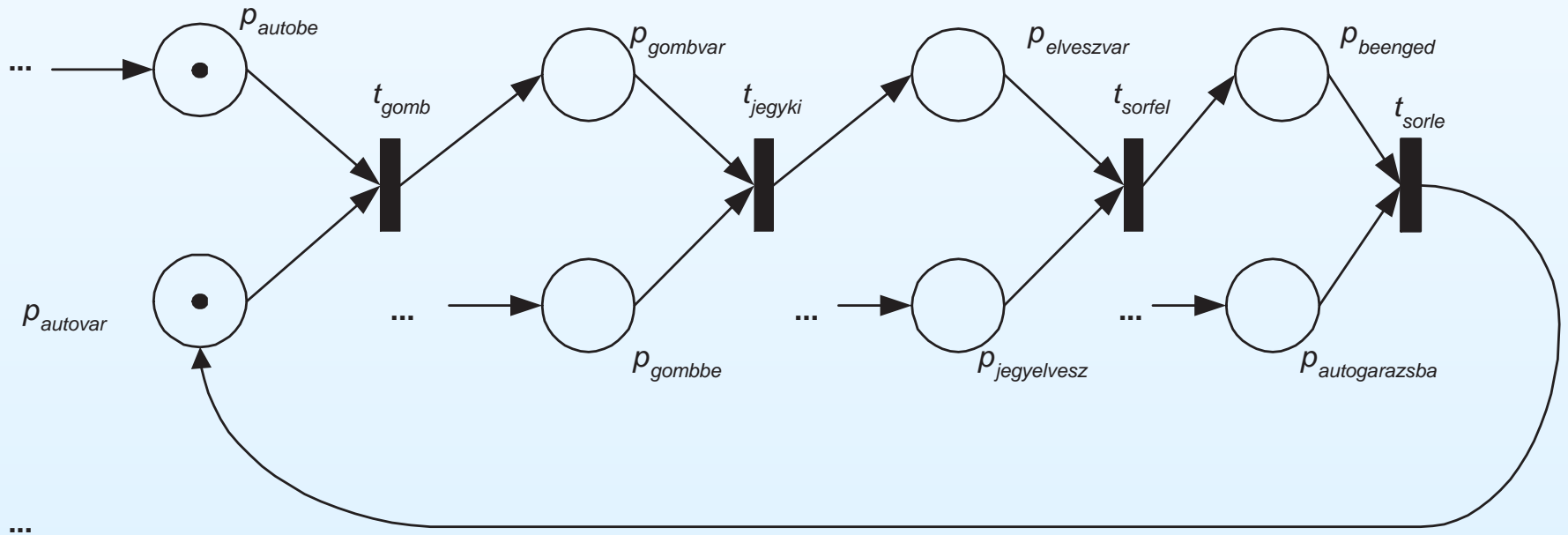
Grafikus ábrázolás: páros irányított gráffal

- **Csúcsok:** helyek (P) és átmenetek (T) (partíciók)
- **Élek:** bemeneti és kimeneti függvény (I, O)

Példa: parkológarázs kapu – 1



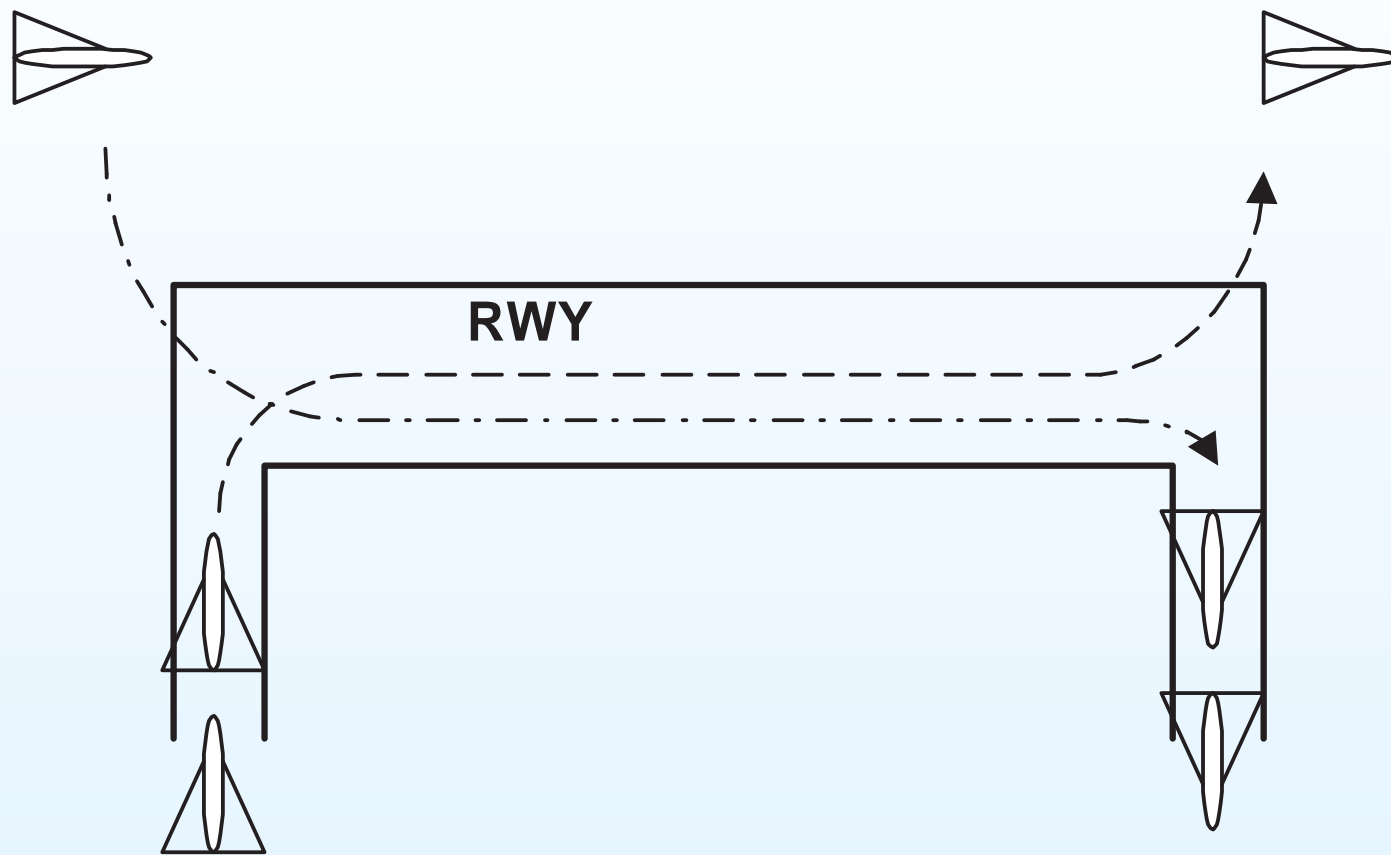
Petri háló modell - grafikus leírás



Kiterjesztett Petri háló modellek

- **Hierarchikus Petri hálók**
- **Időzített Petri hálók:** feliratokkal
 - óra: beépített (vagy spec. "forrás" hely)
 - átmenetekhez tüzelési idő
 - (helyekhez várakozási idő)
- **Színezett Petri hálók:** feliratokkal
 - jelzőpontok (token-ek) diszkrét értékkészletűek ("szín")
 - helyekhez megengedett színhalmaz
 - átmenetekhez és élekhez (diszkrét) függvények

Egyszeru példa: Futópálya



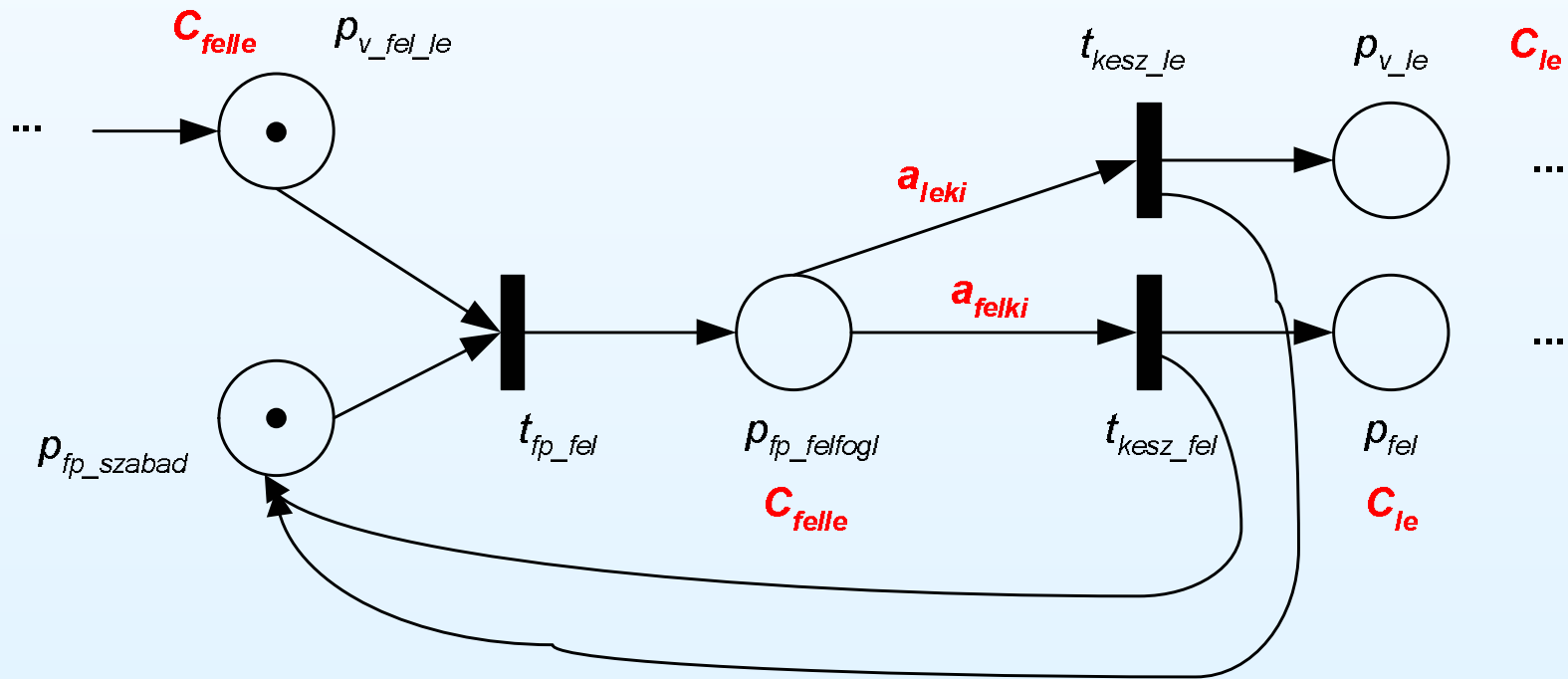
Futópálya színes Petri háló modell

Színezett Petri háló modell: "feliratok"

Élfüggvény: $a_{felki} : \text{if } val(p_{fp_lefogl}) = \uparrow \text{ then } true$

$a_{fel} = val(p_{fp_lefogl}) , val(p_{fel}) = a_{fel}$

Szinhalmoz: $C_{felle} = \{ \uparrow , \downarrow \}$



Diagnosztika: meghibásodás detektálás és azonosítás

Predikción alapuló diagnosztika

Elvi feladatkitűzés

Adott:

- *A meghibásodási módok száma N_F (0=normal)*
- *Prediktív rendszermodellek minden meghibásodási módra*

$$y^{(Fi)}(k+1) = \mathcal{M}^{(Fi)}(\mathcal{D}[1, k]; p^{(Fi)}) \quad , \quad k = 1, 2, \dots$$

- *A mért adatok egy rekordja: $D[0, k] = \{ (u(\tau), y(\tau) \mid \tau = 0, \dots, k) \}$*
- *Veszteségfüggvény $J^{(Fi)}$, $i = 0, \dots, N_F$*

$$J^{(Fi)}(y - y^{(Fi)}, u) = \sum_{\tau=1}^k [r^{(i)T}(\tau) Q r^{(i)}(\tau)] \quad , \quad r^{(i)}(\tau) = y(\tau) - y^{(Fi)}(\tau) \quad , \quad \tau = 1, 2, \dots$$

Kiszámítandó: A rendszer aktuális meghibásodási módja, amely az a modell index i amelyekre a veszteségfüggvény minimális.

Meghibásodás-azonosítás

Identifikáció alapuló diagnosztika

Elvi feladatkitűzés

Adott:

- A meghibásodási módok száma N_F (0=normal)
- Prediktív *parametrikus rendszermodellek* minden meghibásodási módra

$$y^{(Fi)}(k+1) = \mathcal{M}^{(Fi)}(\mathcal{D}[1, k]; p^{(Fi)}) \quad , \quad k = 1, 2, \dots$$

- A mért adatok egy rekordja: $D[0, k] = \{ (u(\tau), y(\tau) \mid \tau = 0, \dots, k) \}$
- egy paramétereiktől függő *veszteségfüggvény* $J^{(Fi)}$, $i = 0, \dots, N_F$

$$J^{(Fi)}(p^{(estFi)} - p^{(Fi)}) = \rho^{(i)T} Q \rho^{(i)} \quad , \quad \rho^{(i)} = p^{(estFi)} - p^{(Fi)}$$

Kiszámítandó: A rendszer aktuális meghibásodási módja, amely az a modell index i amelyikre a veszteségfüggvény minimális.

Meghibásodás-azonosítás

*Diagnosztika meghibásodás és veszélyelemzési
információk felhasználásával*

Veszély és működképeségi analízis – HAZOP

Hazard and Operability analysis: eredménye táblázatban

System: Secondary cleaning of the coke ovens gas (COG)

Process parameter: Solution spray pressure

Subsystem: Secondary acid catch (SAC)

Guide word	Deviation	Possible causes	Consequence
Low	Low pressure	Solution circulation pump is not operating Pipe, valve or flange failure	Outgoing COG ammonia content high Solution flows to the environment
High	High pressure	Sprays blocked Pipe blocked	Outgoing COG ammonia content high

Meghibásodás és hatás analízis – FMEA

Fault Mode Effect Analzsis: eredménye táblázatban

System: Secondary cleaning of the coke ovens gas (COG)

Component	Failure mode	Failure mode causes	Local effects	System effects
Solution circulation pump (P-1)	Casing failure	corrosion	Loss of solution supply Solution spill	High ammonia content in outgoing COG
	Pump stops	loss of power supply	Loss of solution supply	High ammonia content in outgoing COG

Megfeleltetés a HAZOP és FMEA táblák elemei között

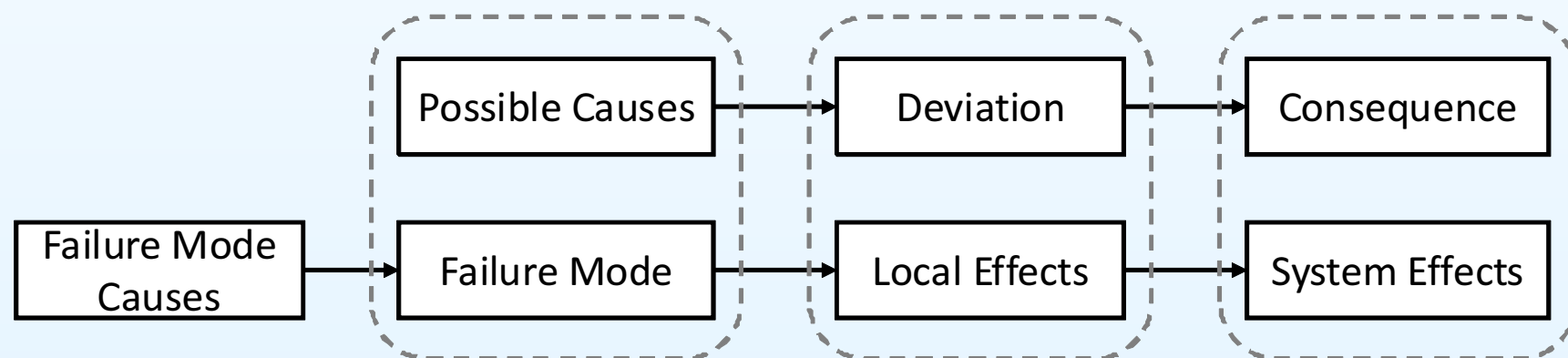
Közös szintaxis az elemekre: kettések

<Deviation> = (<Guide word> <Measured variable>)

<Failure mode> = (<Component id> <Failure type>)

<Cause> = (<Guide word> <Variable>), etc.

e.g.: <Low> <SCT.Level>, <SCT> <Leakage>



Következtetés az egyesített HAZOP-FMEA táblán

Szabályok a HAZOP és FMEA táblákból

Datalog szabályok a táblázat egy sorából

Precondition = Fault mode | Cause | Deviation
| Precondition \wedge Precondition

Conclusion = Consequence | Deviation | Cause

HAZOP: a mérhető eltérések (*Deviation*) okait (*Cause*) keressük

visszafelé haladó következtetés

FMEA: a rejtett meghibásodások (*Fault mode*) következményeit (*Consequence*) keressük

előrefelé haladó következtetés

A diagnosztikai következtetés 1

Adott:

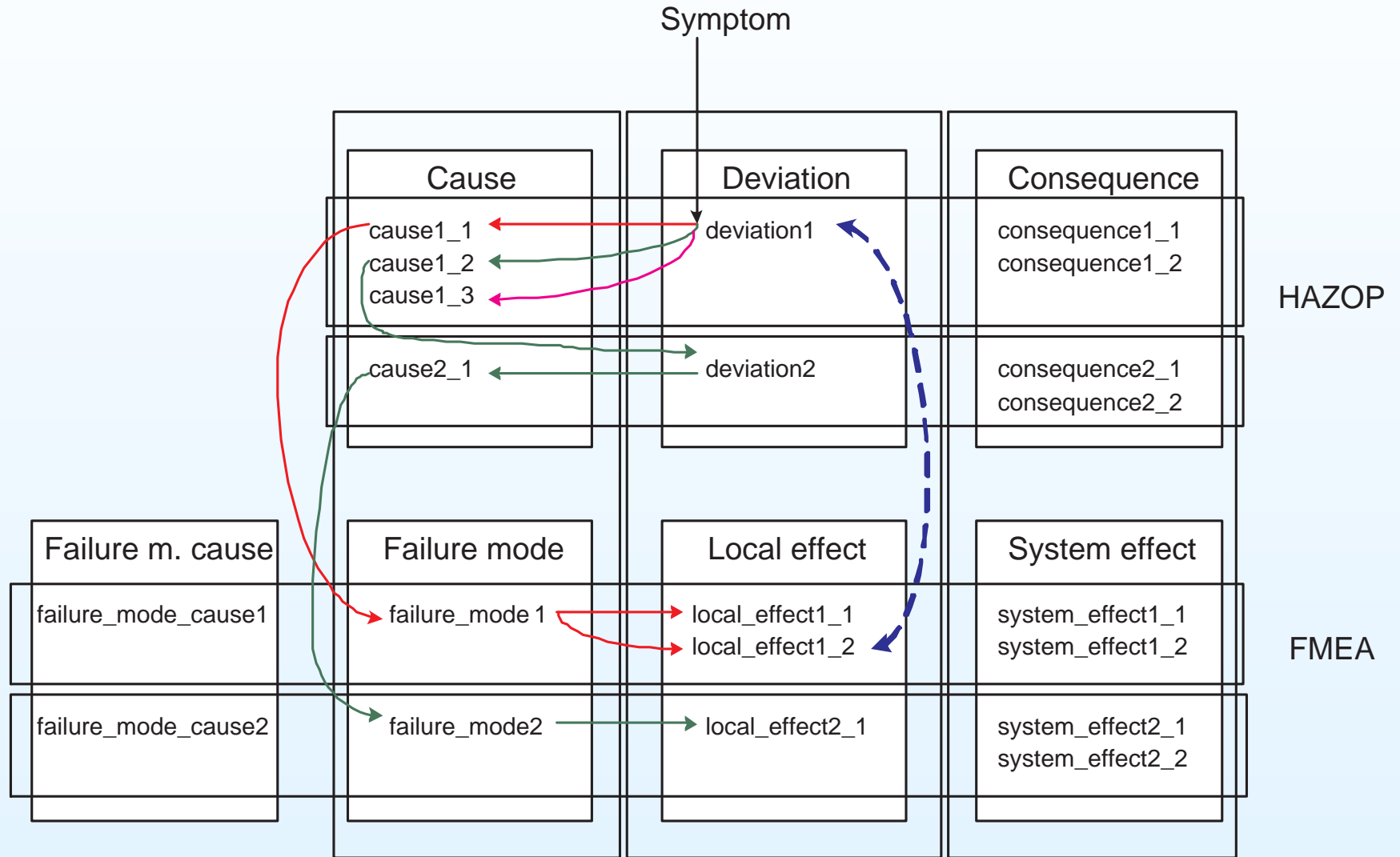
- a mért értékekből előállított *Deviation*-ok
- az egyesített HAZOP-FMEA táblázatok

Keressük: azokat a "gyökér-okokat" (*Fault mode*), amelyek összhangban vannak a *Deviation*-okkal (és az egyéb mért értékekkel).

Két fázisú megoldás:

1. *visszafelé haladó következtetéssel* előállítjuk a lehetséges okokat,
2. *előrefelé haladó következtetéssel* szűkítjük ezek halmazát

A diagnosztikai következtetés 2



Példa

Deviation	Possible causes	Consequences
<NO><Feed to TB (F2)>	(1) <VB><is><closed> (2) <VA><is><closed> (3) <L><is><ruptured> (4) <L><is><blocked> (5) <NO><Feed to PA>	* <NO><Feed to press> * <NO><Feed to VC>
<NO><Feed to PA (F1)>	(1) <TA><is><broken> (2) <TA><is><leaked> (3) <LT><is><leaked> (4) <TA><is not><filled> (5) <PA><does not possess> <capability to pump>	* <NO><Feed to press> * <NO><Feed to VA>

Component	Description	Failure mode	Possible causes	Effects	
				Local	System
VB	TB inflow control valve	Closed	mechanical fail closed operator closed	<NO><Feed to TB>	<NO><Feed to press>
		Opened	mechanical fail opened operator opened	<MORE><Feed to TB>	<MORE><Feed to press>
		Stuck	maintenance failure corrosion	<LESS><Feed to TB>	<LESS><Feed to press>
TA	Bulk tank TA	Broken	corrosion vehicle damage operator damage	<NO><Feed to PA>	<NO><Feed to press>
		Leaked	corrosion	<LESS><Feed to PA>	<LESS><Feed to press>

Operátori eljárások követésén alapuló diagnosztika

Operátori eljárások

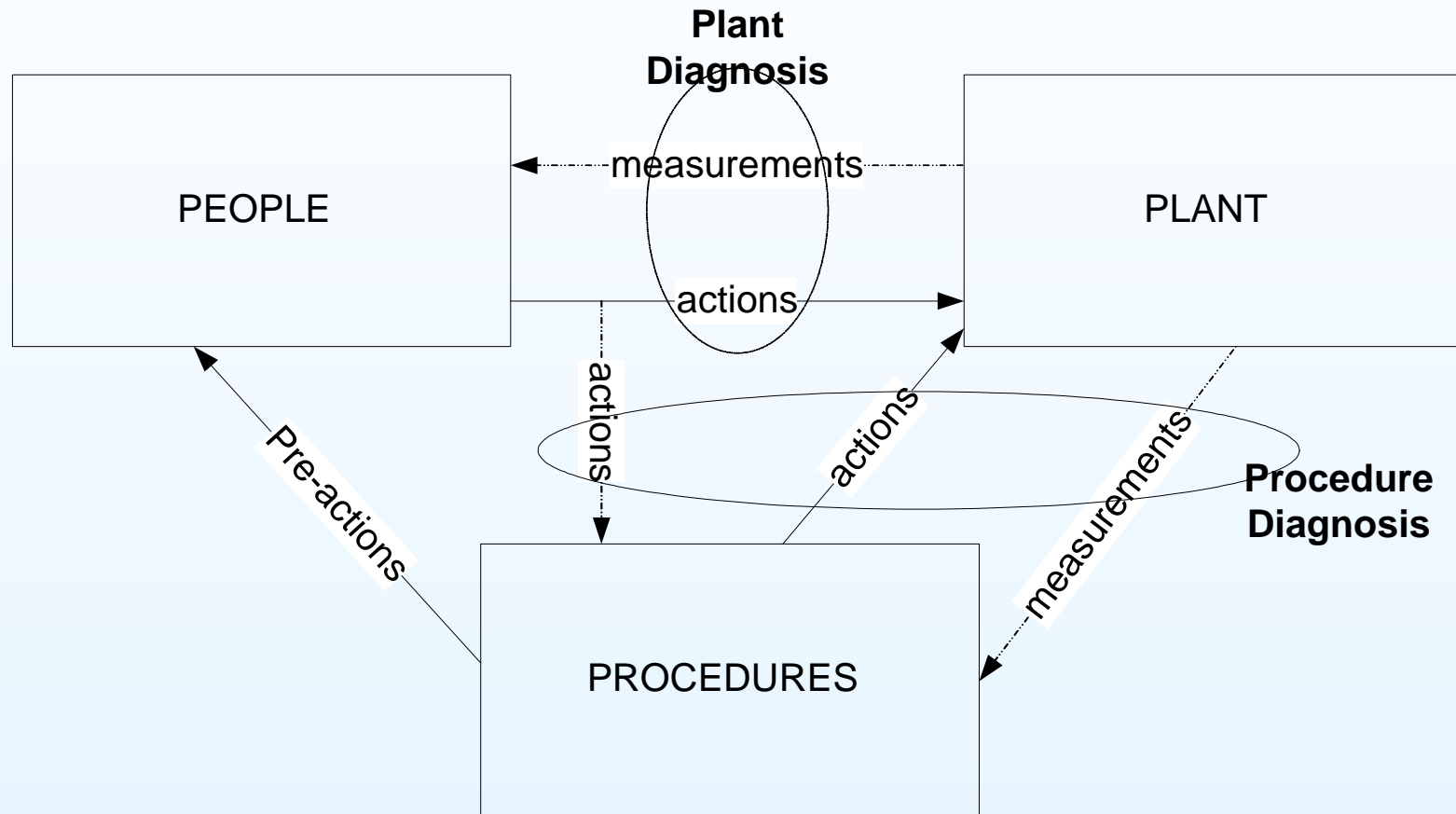
Diszkrét, soros és párhuzamos lépéseket is tartalmazó vezérlési eljárások.

Fajtái:

- indítási, leállítási, üzemmód-váltási
- biztonsági
- szabályozási

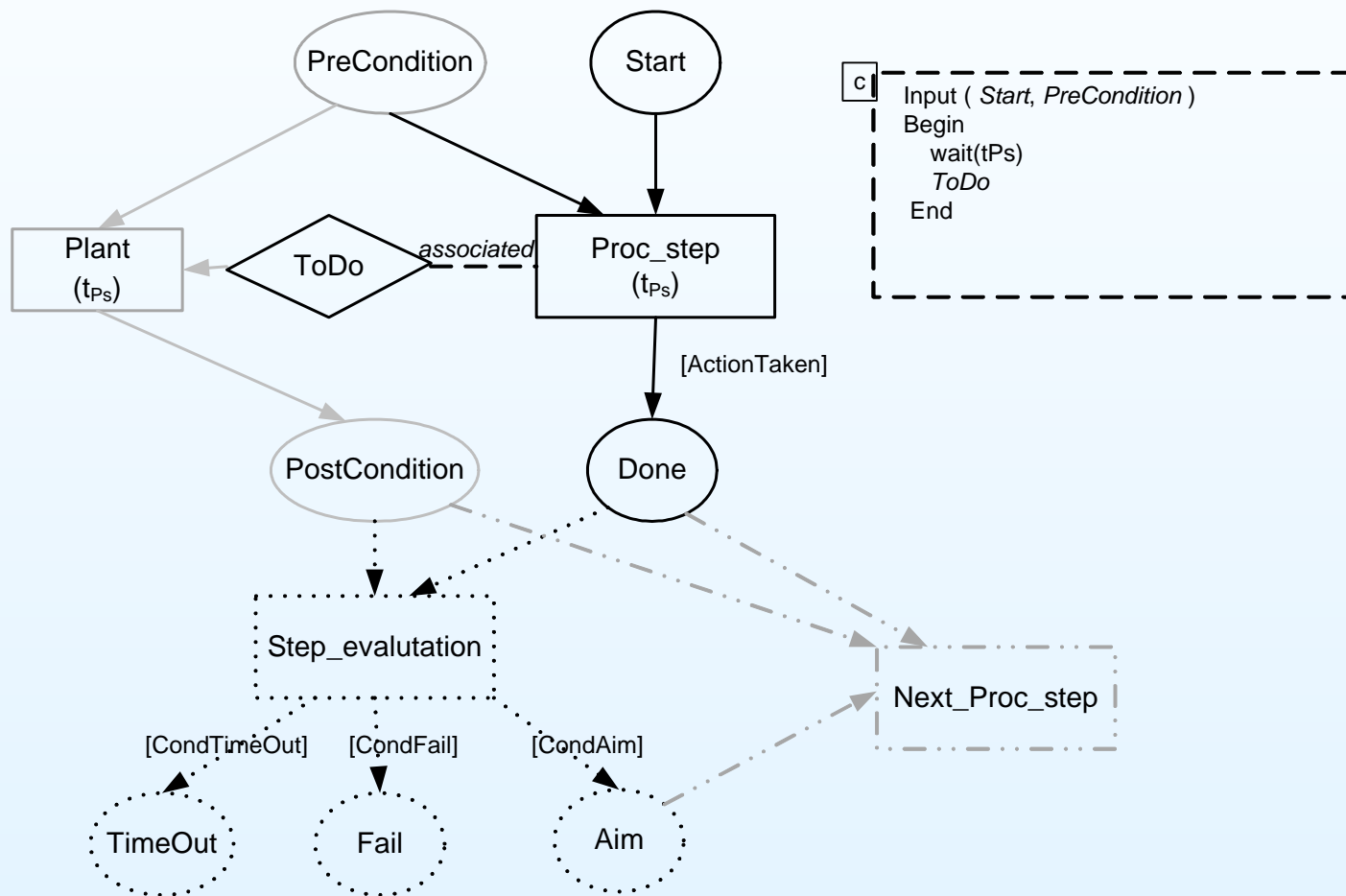
Elemi: diszkrét lépések

Az operátori eljárások környezete

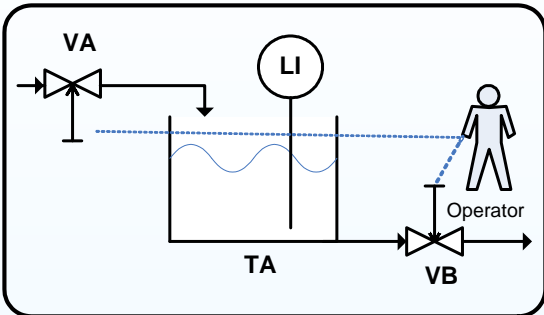


Egy eljárás lépés formális leírása

Színezett Petri hálóval (CPN)



Egy egyszerű operátori eljárás



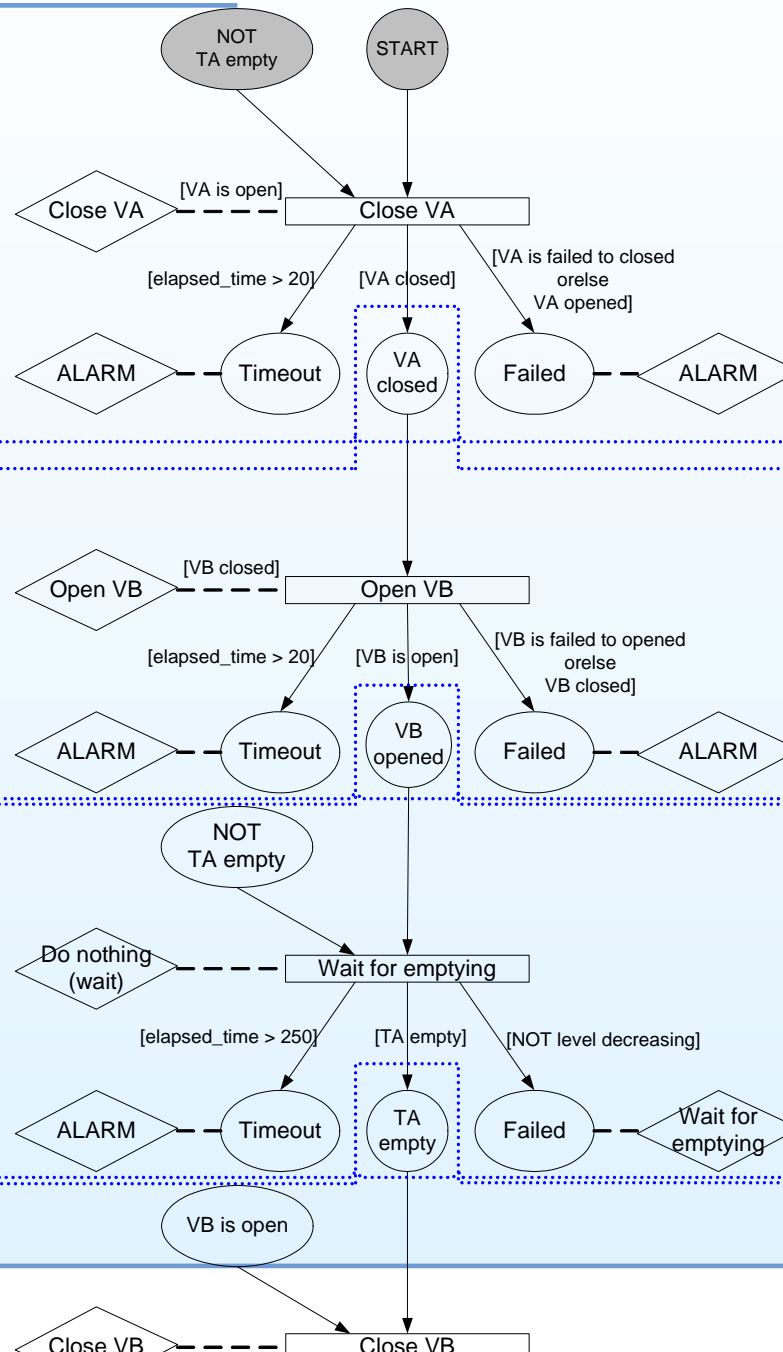
Procedure

Empty the tank TA for maintenance

Steps:

1. Close valve VA
2. Open valve VB
3. Check level decreasing in every 30 timestep (i.e. wait for emptying)
4. If tank TA is empty, close valve VB

* If anything goes wrong ring an ALARM



A diszkrét vezérlés hatása

Bemenet-kimenet eseménysorozatok

Univerzum minden bemenetre és kimenetre: pl.

$$Q_Z = \{q_i \mid i = 0, 1, \dots, m_Z\}$$

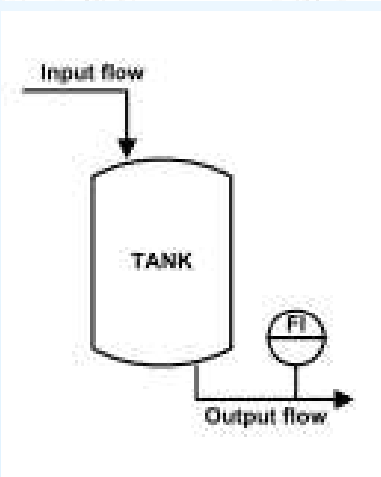
Esemény: $(t, [z(t)] = q_j)$

Egy bemenet-kimenet eseménysorozat események egy időzített sorozata

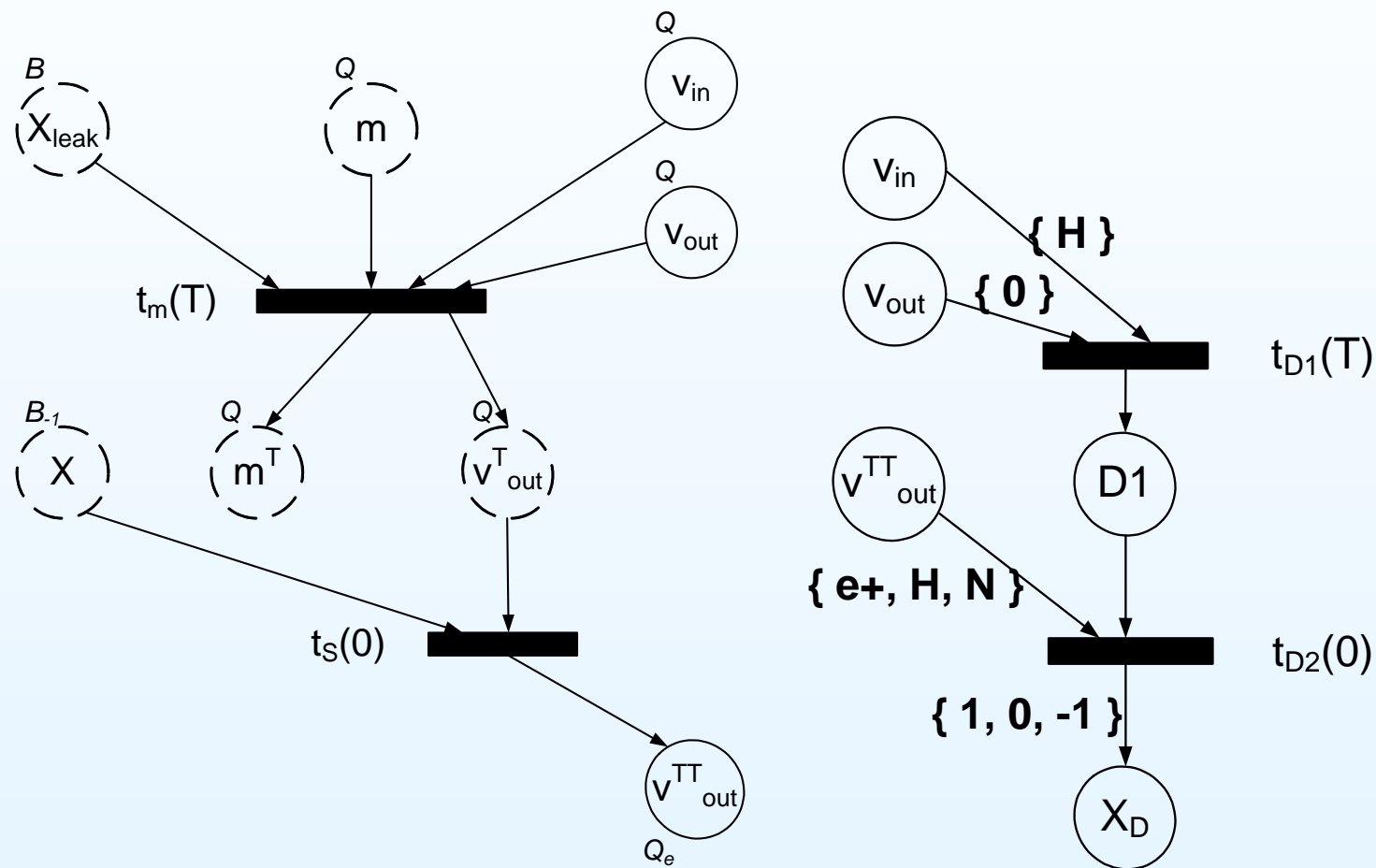
$$\mathcal{T}(t_0, t_F) = \{(t_0, [u(t_0)] = q_{u0}), (t_1, [y(t_1)] = q_{y1}), (t_2, [u(t_2)] = q_{u2}), \dots\}$$

Tartály-szenzor példa

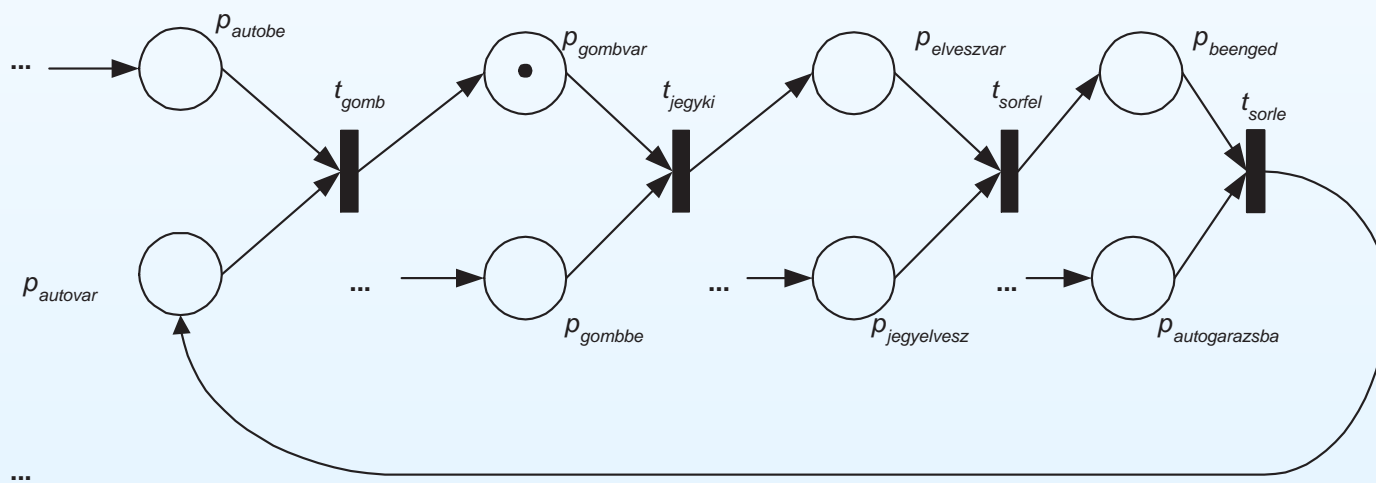
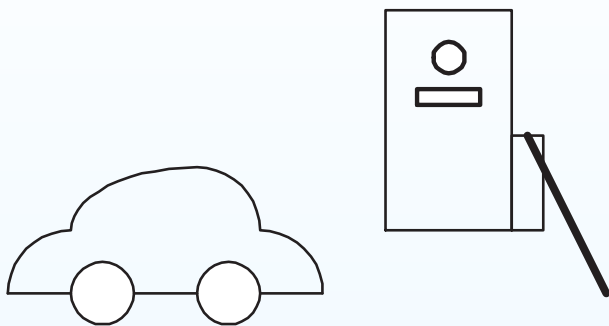
$[m]$ initial mass in tank	$[v_{in}]$ input flow sequence	$[z_{leak}]^*$ tank leakage	$[z_{meas}]^*$ sensor failure	$[v_T^m]$ measured flow sequence
LOW	(NORMAL, NORMAL, NORMAL)	0	NEG	(LOW, LOW, LOW)
LOW	(NORMAL, NORMAL, NORMAL)	1	POS	(LOW, LOW, LOW)
HIGH	(LOW, LOW, LOW)	1	0	(LOW, NO, NO)
HIGH	(LOW, LOW, LOW)	0	NEG	(LOW, NO, NO)
...
D NORMAL	(NO, NO, NO)	0	0	(LOW, NO, NO)
D NORMAL	(NO, NO, NO)	1	POS	(LOW, LOW, LOW)
NORMAL	(NO, NO, NO)	1	NEG	(e-, e-, e-)
NORMAL	(NO, NO, NO)	0	POS	(NORMAL, LOW, LOW)
D NORMAL	(NO, NO, NO)	0	NEG	(NO, e-, e-)
D NORMAL	(NO, NO, NO)	1	0	(NO, NO, NO)
...



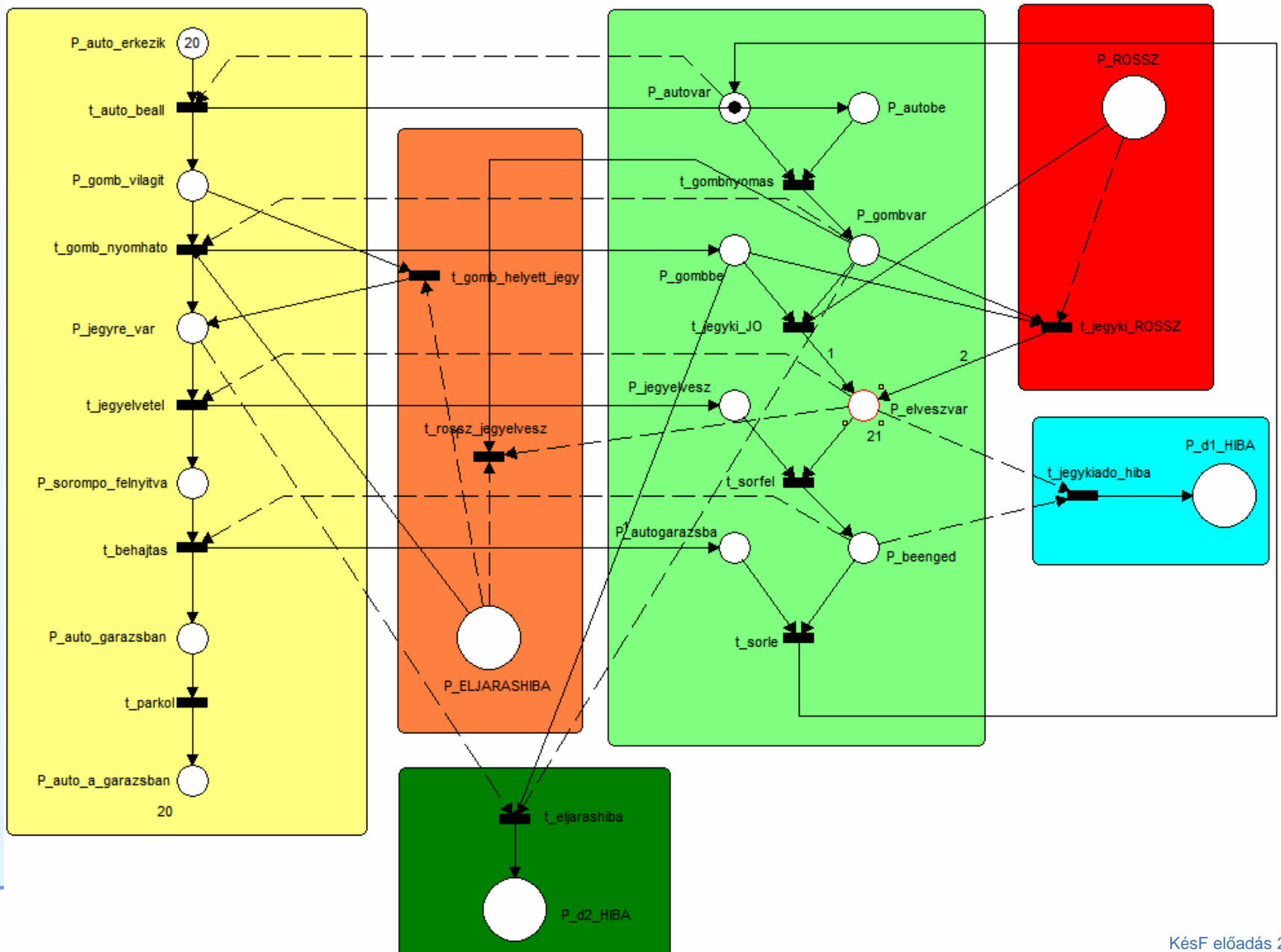
Tartály-szenzor modell és diagnózere



Garázskapu példa



Garázskapu operátori eljárással



Kapcsolódó tantárgyak és témák

- MI BSc
 - modellezés, diagnosztika: "**Modell alapú diagnosztika diszkrét módszerekkel**" (Hangos Katalin, VIRT Piglerné Lakner Rozália, SzTA)
 - folyamat-bányászat (Starkné Werner Ágnes, VIRT)
- MI MSc
 - rendszer-analízis, irányítástervezés: "Computer controlled systems" (Hangos Katalin, VIRT, Magyar Attila, VIRT, Piglerné Lakner Rozália, SzTA)
 - "Intelligens irányítórendszerek" (Piglerné Lakner Rozália, SzTA, Hangos Katalin, VIRT)
 - CPN alapú irányítástervezés és diagnosztika (Gerzson Miklós, VIRT)
- 5 éves egyetemi képzés
rendszermodellezés: "Folyamatmodellezés és model analízis"
(Piglerné Lakner Rozália, SzTA, Hangos Katalin, VIRT)