

# SZAKDOLGOZAT



MISKOLCI EGYETEM

## Petri háló alapú folyamatmodellezés és alkalmazásai

**Készítette:**

Hornyák Bence

Programtervező informatikus

**Témavezető:**

Dr. Kovács László

MISKOLC, 2021

**MISKOLCI EGYETEM**

Gépészmérnöki és Informatikai Kar

Alkalmazott Matematikai Intézeti Tanszék

**Szám:**

## **SZAKDOLGOZAT FELADAT**

Hornyák Bence (IYWK7C) programtervező informatikus jelölt részére.

**A szakdolgozat tárgyköre:** kulcsszavak, hasonló

**A szakdolgozat címe:** Petri háló alapú folyamatmodellezés és alkalmazásai

**A feladat részletezése:**

*Ide kell a feladatkiírásban szereplő szöveget betenni.*

*(Kisebb tagolás lehet benne, hogy jól nézzzen ki.)*

**Témavezető:** Dr.Kovács László

**A feladat kiadásának ideje:**

.....  
szakfelelős

## EREDETISÉGI NYILATKOZAT

Alulírott **Hornyák Bence**; Neptun-kód: IYWK7C a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának végzős Programtervező informatikus szakos hallgatója ezennel büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában nyilatkozom és aláírással igazolom, hogy *Petri háló alapú folyamatmodellezés és alkalmazásai* című szakdolgozatom saját, önálló munkám; az abban hivatkozott szakirodalom felhasználása a forráskezelés szabályai szerint történt.

Tudomásul veszem, hogy szakdolgozat esetén plágiumnak számít:

- szószerinti idézet közlése idézőjel és hivatkozás megjelölése nélkül;
- tartalmi idézet hivatkozás megjelölése nélkül;
- más publikált gondolatainak saját gondolatként való feltüntetése.

Alulírott kijelentem, hogy a plágium fogalmát megismertem, és tudomásul veszem, hogy plágium esetén szakdolgozatom visszautasításra kerül.

Miskolc, ..... év ..... hó ..... nap

.....

Hallgató

1.

szükséges (módosítás külön lapon)

A szakdolgozat feladat módosítása

nem szükséges

.....

dátum

.....

témavezető(k)

2. A feladat kidolgozását ellenőriztem:

témavezető (dátum, aláírás):

konzulens (dátum, aláírás):

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. A szakdolgozat beadható:

.....

dátum

.....

témavezető(k)

4. A szakdolgozat ..... szövegoldalt

..... program protokollt (listát, felhasználói leírást)

..... elektronikus adathordozót (részletezve)

.....

..... egyéb mellékletet (részletezve)

.....

tartalmaz.

.....

dátum

.....

témavezető(k)

5.

bocsátható

A szakdolgozat bírálatra

nem bocsátható

A bíráló neve: .....

.....

dátum

.....

szakfelelős

6. A szakdolgozat osztályzata

a témavezető javaslata: .....

a bíráló javaslata: .....

a szakdolgozat végleges eredménye: .....

Miskolc, .....

.....

a Záróvizsga Bizottság Elnöke

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés</b>	<b>1</b>
<b>2. A BPEL és folyamatainak bemutatása</b>	<b>3</b>
<b>3. Az üzleti folyamatok elemeinek leképzése</b>	<b>6</b>
3.1. A leképzés menete . . . . .	6
3.2. <invoke> . . . . .	7
3.3. <assign> . . . . .	7
3.4. <validate> . . . . .	9
3.5. <throw> . . . . .	9
3.6. <wait> . . . . .	9
3.7. <empty> . . . . .	10
3.8. <sequence> . . . . .	10
3.9. <if> . . . . .	10
3.10. <while> . . . . .	10
3.11. <repeatUntil> . . . . .	11
3.12. <forEach> . . . . .	12
3.13. <pick> . . . . .	12
3.14. <flow> . . . . .	13
<b>4. Petri-hálók és alkalmazásaik</b>	<b>15</b>
4.1. A Petri-hálók matematikai modellje . . . . .	15
4.2. Színezett Petri-hálók . . . . .	15
<b>5. A hálón végezhető elemzések</b>	<b>18</b>
5.1. Háló korlátosság és puffer kapacitási ellenőrzés . . . . .	18
5.2. Saját modell alaphálóra . . . . .	18
5.3. Az alkalmazott, kibővített modell színezett hálóra . . . . .	20
5.4. A validációs számítás algoritmus . . . . .	21
5.5. Mintafeladat . . . . .	23
<b>6. Megvalósítás</b>	<b>25</b>
6.1. Kezdetek . . . . .	25
6.2. Felépítés . . . . .	26
6.3. FileManager / Parser . . . . .	26
6.4. Converter . . . . .	27
6.5. Analyzer . . . . .	27
6.6. Kezdeti nehézségek . . . . .	27
6.7. A converter . . . . .	28

6.8. Vizualizáció . . . . .	29
<b>7. Összefoglalás</b>	<b>30</b>
<b>8. Mellékletek</b>	<b>31</b>
8.1. A minta BPEL folyamat forráskódja . . . . .	31
8.2. További leképázések . . . . .	32
8.3. <scope> . . . . .	32
8.4. <receive> . . . . .	33
8.5. <reply> . . . . .	34
<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>35</b>

# 1. fejezet

## Bevezetés

A BPEL (*Business Process Execution Language*) nyelv létrejötte elsődlegesen a Web szolgáltatások területéhez kapcsolódik, de a nyelv mint általános munkafolyamat (*workflow*) leíró nyelv, más alkalmazási témakörökhöz is köthető. A BPEL szerepét, fontosságát jól mutatja az a tény is, hogy igen gazdag irodalom található az egyes alkalmazási területekről és speciális szabvány kiegészítésekről.

A BPEL aktualitását jelzi, hogy a megvalósító motorok köre is folyamatosan bővül. Ugyan már lassan 15 év eltelt a szabvány bevezetése óta, a meglévő nagyobb rendszerek (Oracle BPEL Process Manager, IBM WebSphere Process Server, Microsoft BizTalk Server, SAP SAP Exchange Infrastructure) alternatívájaként most is jelennek meg új végrehajtó motor implementációk. A Wikipédia forrása szerint [2] a közelmúltban az alábbi szabad szotver implementációk születtek (1.1. táblázat).

1.1. táblázat. A BPEL nyelv szabad szoftveres implementációi.

Termék neve	Fejlesztő	Megjelenés éve	Licensz
JBPM	JBoss	2016	Apache
Apache ODE	ASF	2016	Apache
Activiti	Alfresco	2014	Apache

Annak ellenére, hogy napjainkra már több BPEL motor elérhető és használatos, a BPEL szerkesztők és különösen a BPEL validációs rendszerek köre igen szegényes. Ezen tapasztalatokból kiindulva a dolgozat célja egy olyan BPEL validációs rendszer elkészítése, amely a BPEL rendszerek egyik fontos tulajdonságát, a terhelés korlátosságát (*bounded model*)

vizsgálja. A korlátosság azt jelzi, hogy minden csomópontban van egy felső korlát a végrehajtható feladatok számára, intenzitására vonatkozóan. Ha a rendszer nem teljesíti ezt a kritériumot, akkor túlcserül valamely megmunkáló/tároló helyen. Az elemzés során a korlátosság ténye mellett, a korlát értékei is fontos vizsgálandó jellemzők.

A meglévő tervezői rendszerekben legtöbbször szimulációval történik a főbb paraméterek, a korlátosság vizsgálata. Ezen megközelítésnek rendszerint két problémája van: a vizsgálat teljessége (azaz valóban minden lehetséges esetet áttekintettük-e) illetve a végrehajtási idő (a szimulációk futtatása hosszabb időt is igénybe vehet).

---

A dolgozatban a BPEL folyamatok Petri-háló alapú vizsgálatát végzem el. A Petri-háló alapú reprezentáció egy elfogadott és többek által alkalmazott megközelítés. A kidolgozott rendszer inputként egy BPEL modell leírását várja és kimenetként az elemzés eredményét illetve a folyamatok nyomkövetését adja vissza.



## 2. fejezet

# A BPEL és folyamatainak bemutatása

A BPEL szabvány alapjai a 2000-es évek közepén jöttek létre az üzleti folyamatok szabványos leírására, elsősorban a Web szolgáltatás (*Web Service*, a továbbiakban röviden WS) alapú környezetre fókuszálva [3]. A nyelv célja definiálni az egyes WS folyamatok vezérlését, koordinálását a kívánt üzleti logika megvalósítására. A BPEL modell magja a folyamatok leírására szolgál, melyekhez együttműködő partnereket szimbolizáló modulok kapcsolódhatnak. A folyamaton belüli lépéseket, végrehajtási algoritmust az aktivitási elemekkel írhatjuk le. A folyamatokhoz változók is rendelhetők, melyek a kapcsolódó adatkezelést reprezentálják. Az egyes processz modulok üzenetváltással kommunikálhatnak egymással.

A BPEL nyelv a WS környezetből adódóan szorosan kötődik az XML alapú adattároláshoz. A BPEL modell XM állományként áll elő, melyben az egyes séma megköteket az XMLSchema szabvány biztosítja. Az XMLSchema nyelv lehetővé teszi az XML dokumentumok strukturális és tartalmi ellenőrzését. A sémanyelv gazdag integritási elem készlettel rendelkezik és támogatja a típusok származtatását is. Az elemi adatkezelő műveletek, szabályok és kifejezések megadásánál az XPath szabványt kell alkalmazni.

A BPEL nyelv tulajdonságaival és alkalmazási lehetőségeivel számos kutatás foglalkozott már az elmúlt évtizedben. A BPEL nyelv nagy előnye a deklaratív formalizmus, mellyel nem szükséges az egyes modulok kódjába beleégetni az üzleti szabályokat. Az elosztott környezet esetén fontos, hogy az egyes üzleti szabályok illeszthetők, integrálhatóak és validálhatóak legyenek [16]. A BPEL modell fejlesztése ezen célkitűzések teljesítésére irányult. Több dolgozatban (például [14]) a BPEL nyelv, mint cél modellezési nyelv jelenik meg, s más szabvány folyamat modellezési nyelv, mint UML, BPEL-re történő konvertálását vizsgálják.

A létrehozott BPEL modellnyelv tulajdonságait és alkalmazhatóságát aktívan vizsgálták a 2000-es évek második felében. Ennek keretében a [4] dolgozat az elkészített BPEL modellek dinamikus nyomkövetésére, monitorizására mutat be hatékony algoritmusokat. A modell főbb elágazási és szinkronizációs elemeihez kapcsolódó elemzéseket a [15] dolgozat foglalja össze. A BPEL üzleti folyamatok magasabb szintű, a folyamat egységeszt alapú elemzésére ad javaslatot a [12].

A BPEL nyelv egyik gyakori alkalmazási területe a workflow rendszerek fejlesztése. Több irányban is történtek lépések, hogy a BPEL munkafolyamat modelljét különböző alkalmazási területeken használják. Ezen kísérletek között megemlíthetők a grid és tudományos workflow folyamatok [17] és a mobil alkalmazások fejlesztése [7]. A témakörhöz kapcsolódóan megemlíthető, hogy sokan a BPEL-t tekintették az univerzális

---

workflow leíró nyelvnek, s javaslatok is születtek a BPEL központú workflow szemléletre [18]. A hazai vonatkozású fejlesztések körében kiemelhető a BPEL rendszerek formális validációjára irányuló vizsgálatok köre [10]. A validációs elemzések mellett a modell komplexitás meghatározására is találunk példákat a nemzetközi irodalomban [6].

BPEL nyelv kiterjesztésére is több dolgozat született, mint például az elosztott rendszerekre történő kiterjesztés [5]. A kiterjesztések körét a [9] dolgozat foglalja össze. Ennek az egyes kritériumait és karakterisztikáját a 2.1. táblázat foglalja össze.

2.1. táblázat. A BPEL kiterjesztéseinek összefoglaló táblázata.

Terület	Paraméterek
Kritériumok	<p>Lehetőség a kiszervezésre</p> <p>Rugalmasság</p> <p>Funkcionalitás</p> <p>Fenntarthatóság</p> <p>Teljesítmény</p> <p>Újrafelhasználhatóság</p> <p>Robusztusság</p> <p>Használhatóság</p>
Felhasználás	<p>Vezérlési folyamat</p> <p>Adatintegráció</p> <p>Kifejezések és hozzárendelő utasítások</p> <p>Nagy mennyiségű adat kezelése</p> <p>Egyéb</p> <p>Szolgáltatás társítása</p> <p>Szolgáltatás meghívása</p> <p>Változó hozzáférés</p>
Munkafolyam dimenziója	<p>IT infrastruktúra</p> <p>Processz logika</p> <p>Szervezés</p>
Helye a BPM életciklusban	<p>Modellezés</p> <p>IT finomítás</p> <p>Statikus analízis, ellenőrzés</p> <p>Deployment</p> <p>Munkavégzés</p> <p>Megfigyelés</p>

## 3. fejezet

# Az üzleti folyamatok elemeinek leképzése

### 3.1. A leképzés menete

A BPEL nyelv az egymással együttműködő modulok működését szimulálja. A BPEL modellben a folyamat lépéseit tevékenységnek *activity* nevezzük. A tevékenységek lehetnek elemiek és összetettek. Tipikus elemi tevékenységek:

- más funkció meghívása,
- üzenet küldés/fogadás,
- változók módosítása,
- várakozás, szinkronizálás.

Az elemi tevékenységekből összetett folyamatok építhetők fel szekvencia, párhuzamosítás és ciklus elemek segítségével.

A BPEL szabvány tevékenység készletének bemutatásánál csak a legfontosabb elemekre térünk most ki. A szabvány részletei a <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.html> weboldalról érhetők el.

A BPEL definíció egyértelműsíti a folyamat kezdetét és inicializálja is a megfelelő paraméterekkel. A Petri háló erre nem tér ki, ezért bevezetünk egy opcionális *START* tranzíciót. Ennek feladata, a megfelelő tokenek legenerálása a folyamat indításához. A folyamat zárása szintén egyértelmű a BPEL szabványban. Petri háló kapcsán beszélhetünk a háló leállításáról, ha már semmilyen hely és tranzíció nem produkál új token, nem várakozik és nem nyel el token. A köztes elemek leképzése általánosan nem bonyolult, de megvizsgálhatók alternatív leképzési módok.

Az alkalmazás jelölésrendszere: A rendszer a helyeket P-vel, míg a tranzíciókat T-vel indexeli. A helyek után listázza az adott helyen levő tokeneket. A jelenleg lépésben levő tranzíciók pedig színes kitöltést kapnak. Alább egy pár, esetenként nem triviális elem leképzése látható, a többi elem leképzése és magyarázata a mellékletek között található.

## 3.2. <invoke>

Egy BPEL vagy épp egy webszolgáltatás meghívására szolgál és definiálja a szolgáltatás feladatát is.

```
<invoke partnerLink="NCName"
  portType="QName"?
  operation="NCName"
  inputVariable="BPELVariableName"?
  outputVariable="BPELVariableName"?>
  <catch faultName="QName"? ... >*
  activity
</catch>
<toParts>?
  <toPart part="NCName" fromVariable="BPELVariableNm"/>+
</toParts>
<fromParts>?
  <fromPart part="NCName" toVariable="BPELVariableNm"/>+
</fromParts>
</invoke>
```

A grafikus megjelenítése a 3.1. ábrán látható.



3.1. ábra. Az invoke grafikus jelölése az Oracle BPEL designer-ben

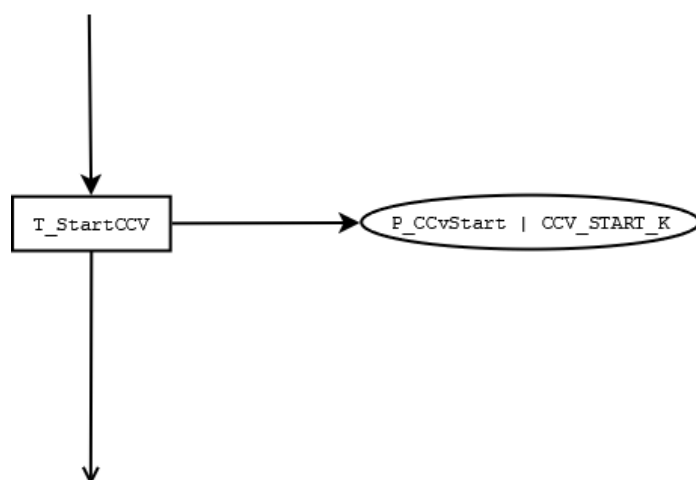
Használatát a programrészek újrafelhasználhatósága indokolja, valamint az átláthatósági alapelvek. Például, az ábrán látható CCvalidation használható ATM-es pénz felvét, egyenleglekérdezés, vagy egyéb ATM nél végezhető művelet során.

Leképzés során ügyelni kell arra, hogy az invoke paramétereinek megfelelő tokenek keletkezzenek és legyenek átadva a részháló start elemének.

## 3.3. <assign>

Egy változó értékadására szolgáló esemény. Ellentétben egy imperatív értékadással egy <assign> blokkban bármennyi értékadás, másolás történhet, amíg azt a kliens kezelni tudja, így logikailag egy egységbe zárja a műveleteket.

```
<assign validate="yes|no"? standard-attributes>
  (
    <copy keepSrcElementName="yes|no"?
    from-spec
    to-spec
```



3.2. ábra. Az <invoke> leképzése petri hálóra

```

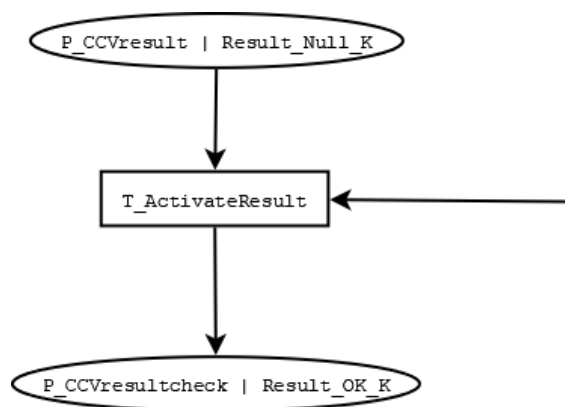
</copy>
</assign>

```

Az érték hozzárendelése nagyon egyszerűen átírható egy tranzícióra ami a megfelelő tokenek színét módosítja. A grafikus megjelenítése a 3.3. ábrán látható. A színmódosítás egyszerűen a token nevének átírását jelenti.



3.3. ábra. Az assign grafikus jelölése az Oracle BPEL designer-ben



3.4. ábra. Az assign leképzése petri hálóra

Az ábrán egy változós értékadásra látható példa. Hasonló módon kezelendő a blokkosított értékadás, a különbség, hogy a több token jöhet és távozhat több forrásba is.

### 3.4. <validate>

Egy sémára validálja az XML (BPEL) állományt.

```
<validate variables="BPELVariableNames" standard-attributes>
  standard-elements
</validate>
```

Mivel a Petri háló nem tartalmaz validációs elemeket, ezért a <validate> nem képződik le.

### 3.5. <throw>

Egy rész processzen belül fault generálására szolgál.

```
<throw faultName="QName"
  faultVariable="BPELVariableName"?
  standard-attributes>
  standard-elements
</throw>
```

Nagyon egyszerűen egy *fault* tokent generáló tranzíció komponens. Explicit hálórésze nincs, hanem a megfelelő inputtokenek megléte vagy hiánya generálja egy tranzíció során.

### 3.6. <wait>

Időre vonatkoztatva várakoztat. Például 5000 tick vagy 14:00:23 (hh:mm:ss)

```
<wait standard-attributes>
  standard-elements
  (
    <for expressionLanguage="anyURI"?>duration-expr</for>
    |
    <until expressionLanguage="anyURI"?>deadline-expr</until>
  )
</wait>
```

Megadható egy részhálóval ami valójában egy oszcillátor és a megfelelő iteráció után folytat tokent küld. Továbbá létezik úgynevezett időérzékeny háló, ahol az elemek tokenátadási sebessége ismert, vagy állítható. Ezzel időzítőt lehet létrehozni. Esetenként hardware-es óra is használható

### 3.7. <empty>

No-op (*no operations*) esemény szinkronizációra szolgál.

```
<empty standard-attributes>
  standard-elements
</empty>
```

Beiktatható egy semleges tranzíció és hely.

### 3.8. <sequence>

Sorozatot ad meg.

```
<sequence standard-attributes>
  standard-elements
  activity+
</sequence>
```

Egyszerűen csak tranzíciók és helyek összefűzése.

### 3.9. <if>

<if> Standard kétirányú elágazás. Logikai XPATH kifejezést vár.

```
<if standard-attributes>
  standard-elements
  <condition>bool-expr</condition>
  activity
  <elseif>*<condition>bool-expr</condition>
  activity
</elseif>
  <else>?
  activity
</else>
</if>
```

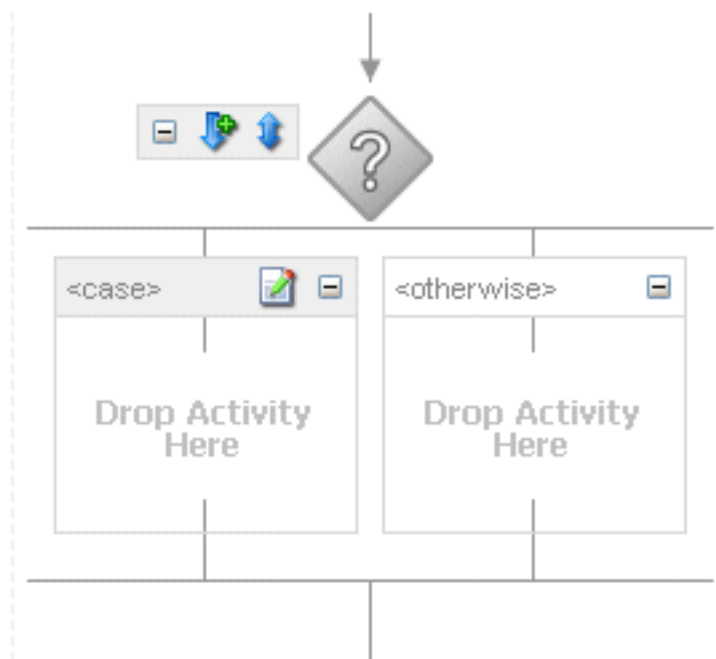
Egy tranzíció, mely tokenek függvényében más felé küldi tovább, vagy generál tokeneket. Ez lehet egy helyen összegyűlt tokenek mennyisége, vagy egy adott helyen egy specifikus színű token megléte, vagy nemléte. Analóg módon egy *Switch-Case* elágazás is definiálható vele. A PBEL-es grafikus megjelenítése a 3.5. ábrán látható.

### 3.10. <while>

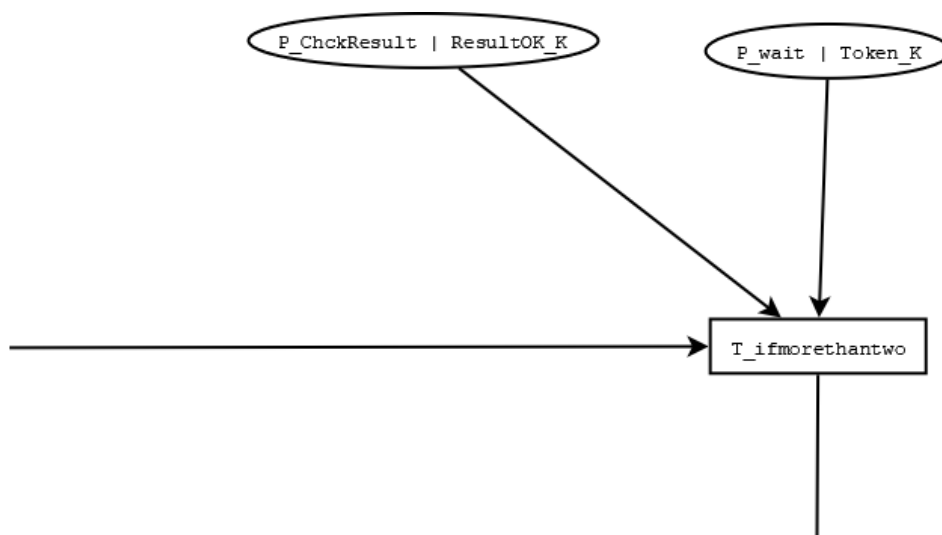
Elöltesztelési ciklus. Addig iterál, amíg az ciklus feltétel igaznak értékelődik ki.

```
<while standard-attributes>
  <condition>bool-expr</condition>
  activity
</while>
```





3.5. ábra. Az if grafikus jelölése az Oracle BPEL designer-ben



3.6. ábra. Az if Egy hálóképzése

Egy tranzíció, mely token függvényében a folyamat egy korábbi pontjára csatol vissza, vagy éppen egy későbbire, a feltétel hamis logikai állapota esetén. A feltétel persze egy színes token jelenléte, vagy tokenek száma is lehet.

### 3.11. <repeatUntil>

Egy hátultesztelős ciklusnak feleltethető meg, amely akkor enged tovább, ha a feltétel igaz.

```
<repeatUntil standard-attributes>
  standard-elements
```

```

    activity
    <condition expressionLanguage="anyURI"?>bool-expr</condition>
</repeatUntil>

```

A <while>-al analóg módon megadható a Petri-hálós leképzése.

### 3.12. <forEach>

Végig iterál a gyerekelemeneken. Megadható párhuzamos feldolgozás is. Egy *Complete condition* segítségével megadható egy break utasítás ami kilép a ciklusból.

```

<forEach counterName="BPELVariableName" parallel="yes|no">
  <startCounterValue expressionLanguage="anyURI"?>
    unsigned-integer-expression
  </startCounterValue>
  <finalCounterValue expressionLanguage="anyURI"?>
    unsigned-integer-expression
  </finalCounterValue>
</forEach>

```

Egyszerű loop utasítás, azonban párhuzamosítás esetén a részhálóból megfelelő példányszámot generáltatunk.

### 3.13. <pick>

Üzenetek várására vagy időtúllépés eseményre figyel. Ezek bármelyike a szubprocessz végrehajtásához vezet.

```

<pick createInstance="yes|no"? standard-attributes>
  standard-elements
  <onMessage partnerLink="NCName"
    portType="QName"?
    operation="NCName"
    variable="BPELVariableName"?
    messageExchange="NCName"?>+
    <correlations>?
      <correlation set="NCName" initiate="yes|join|no"? />+
    </correlations>
    <fromParts>?
      <fromPart part="NCName" toVariable="BPELVariableName" />+
    </fromParts>
    activity
  </onMessage>
  <onAlarm>*
    (
      <for expressionLanguage="anyURI"?>duration-expr</for>
      |
      <until expressionLanguage="anyURI"?>deadline-expr</until>
    )

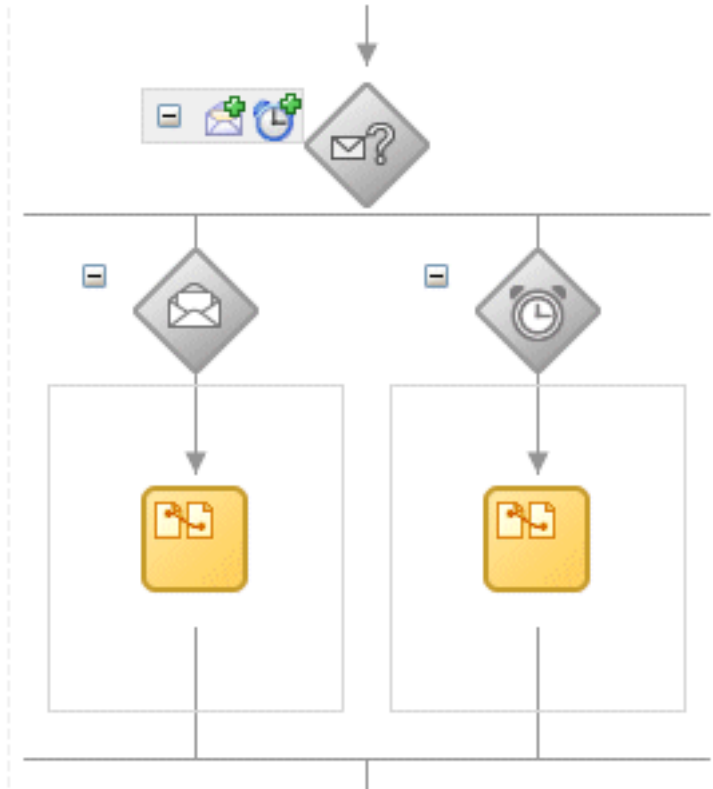
```

```

    activity
  </onAlarm>
</pick>

```

A grafikus megjelenítése a 3.7. ábrán látható.



3.7. ábra. A pick grafikus jelölése az Oracle BPEL designer-ben

Összetartó hálóval és egy tranzícióval képezhető le.

### 3.14. <flow>

Konkurens elemek deklarálására szolgál. Linkek segítségével megadható függőségi viszony a gyerekek között.

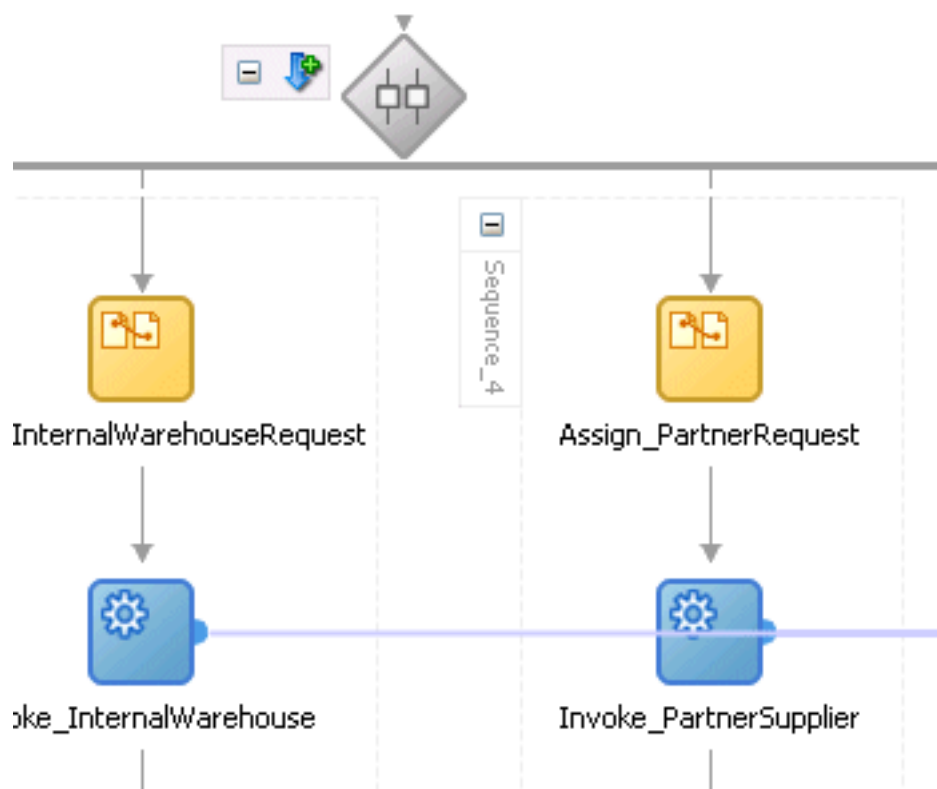
```

<flow standard-attributes>
  standard-elements
  <links>?
    <link name="NCName" />+
  </links>
  activity+
</flow>

```

A grafikus megjelenítése a 3.8. ábrán látható.

Leképzése egyszerű, hisz a megfelelő gyerek elemek nem szekvenciálisan helyezkednek el, hanem párhuzamosan.



3.8. ábra. A flow grafikus jelölése az Oracle BPEL designer-ben

## 4. fejezet

# Petri-hálók és alkalmazásai

### 4.1. A Petri-hálók matematikai modellje

A Petri-háló egy matematikai leírómodell elosztott rendszerek bemutatására. A modellt Carl Adam Petri készítette. A modell nagyon hasonlít a programozók körében elterjedt folyamat ábrára. A háló irányított élekből, helyekből és átmenetekből (*mint elemek*) áll. Az élek csak két különböző típusú elem között állhatnak. A helyeken jelölő objektumok, úgynevezett tokenek állhatnak. A tokenek csak diszkrét számban fordulhatnak elő egy helyen, és a token átvitele atomi folyamat, azaz nem félbeszakítható. A tokenek elláthatóak attribútummal is, ilyen esetben a tokeneket "kiszínezzük" és színezett petri hálóról beszélünk.

A Petri háló alapvető matematikai modellje egy páros, irányított és súlyozott multigráf  $PN(P, T, A, W, S)$ , ahol

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ : a helyek véges halmaza,
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_M\}$ : egy véges tranzíció halmaz,
- $P \cap T = \emptyset$ ,
- $A \subseteq P \times T \cup T \times P$ : az élek halmaza,
- $W : F \Rightarrow N^+$ : az élsúlyok halmaza,
- $S : P \Rightarrow N^+$ : a kezdőállapot.

### 4.2. Színezett Petri-hálók

Az elemi színezett háló felírható, mint egy

$$CPN(P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, S)$$

struktúra, ahol

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ : a helyek véges halmaza,
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_M\}$ : egy véges tranzíció halmaz,
- $A \subseteq P \times T \cup T \times P$ : az élek halmaza,

- $\Sigma$ : a színek halmazainak halmaza,
- $V$ : a változók halmaza, ahol  $\forall v \in V$ : változóhoz egy  $Type[v] \in \Sigma$  típus rendelhető,
- $C : P \rightarrow \Sigma$ : a helyekhez színeket rendelő függvény,
- $G : T \rightarrow EXP_R$ : az egyes tranzíciókhoz kapcsolódó validációs, ellenőrzési kifejezés (logikai értékű),
- $E : A \rightarrow EXP_R$ : az egyes élekhez kapcsolódó kifejezés, amely a kapcsolódó hely színhalmazához tartozó értéket vehet fel,
- $S : P \Rightarrow N^+$ : a kezdőállapot.

Adott  $CPN(P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, S)$  színezett hálózhoz az alábbi kezelő funkciók köthetők:

- $M(p)$ : a jelölő (*marker*) függvény, melynek értéke a  $p$  helyhez kapcsolódó tokenek halmaza (színezett Petri háló esetén az  $M(p)$  elemek színeinek illeszkedni kell a  $C(p)$  színhalmazhoz),
- $M_0(p)$ : helyek induló tokenkészlete,
- $Var(t)$ : a tranzíciók viselkedését leíró változók halmaza,
- $b(v)$ : az adott  $v$  változó értékét megadó kifejezés, ahol  $b(v) \in Type[v]$ .

Egy  $t$  tranzíció esetén a  $Var(t)$  kifejezés a tranzícióhoz rendelt változók együttese, ahol a változók a  $G(t)$  vagy  $E$  (a:  $t$ -hez kötődő él) kifejezésekben szerepelnek. Az egyes esetekhez tartozó halmazok tehát az alábbiak.

$$Var(t) = \begin{cases} \{n, d\}, & \text{ha } t = SendPacket, \\ \{n, d, success\}, & \text{ha } t = TransmitPacket, \\ \{n, d, k, data\}, & \text{ha } t = ReceivePacket, \\ \{n, success\}, & \text{ha } t = TransmitAck, \\ \{n, k\}, & \text{ha } t = ReceiveAck. \end{cases}$$

A hálóban egy tranzíció akkor engedélyezett (*ready*), ha a bemenő helyeknél a kívánt tokenszám megtalálható. Jelölt hálók esetében:

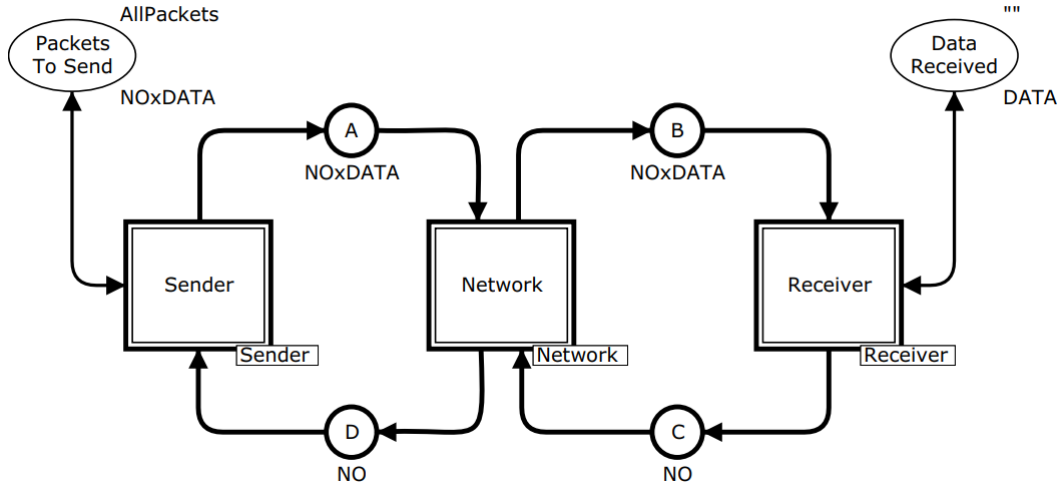
$$M'(p) = M(p) - I(p, t) + O(p, t) : \forall p \in P,$$

ahol

- $I : F \Rightarrow N^+$  : bejövő áram, intenzitás
- $O : F \Rightarrow N^+$  : kimenő áram. intenzitás

A hierarchikus CPN rendszerben az átláthatóság növelése érdekében összefogó modulokat is lehet alkalmazni. Egy modul más elemi egységek együttese, tárolója (4.1. ábra).

A moduloknál fontos szerepet kapnak az átadó helyek, melyeken keresztül a tokenek bejöhethetnek a modulba illetve kiléphetnek a modulból. Az ilyen port jellegű helyek lehetnek bemeneti portok (IN) illetve kimeneti portok (OUT).



4.1. ábra. Rendszerséma 3 modullal

A CPN rendszerek egyik hasznos tulajdonsága, hogy lehetőséget adnak a felépített modell formális ellenőrzésére, validálására és értékelésére. A formális ellenőrzés egyik leggyakoribb eszköze az állapottér (*state space*) modell, ahol az állapottér egy olyan irányított gráf, melyben a csomópontok a háló egy lehetséges  $M(CPN)$  jelölési állapota. Azaz a háló struktúrája rögzített, de az egyes elemeknél a tokenek és változók halmaza, azok állapota változhat. A véges állapottér modellt rendszerint szimulációkal állítják elő.

Az állapottér modellből kiindulva további elemzésekre ad lehetőséget a komponens gráf modell (*Strongly Connected Component Graph*, röviden SCC) formalizmus. Az SCC gráfból a rendszer általános viselkedési szabályaira lehet következtetni. Az SCC gráf olyan gráf, melynek csomópontjai az állapottér azon diszjunkt részhalmazai, ahol egy részhalmaz bármely két elemére igaz, hogy az egyik elem elérhető a másiktól.

Az elemzések során az alábbi főbb tulajdonságok elemzésére szokás kitérni:

- Reachability Properties,
- Boundedness Properties,
- Home Properties,
- Liveness Properties,
- Fairness Properties.

## 5. fejezet

# A hálón végezhető elemzések

### 5.1. Háló korlátosság és puffer kapacitási ellenőrzés

A háló egy adott helye akkor tekinthető korlátos (*bounded*) helynek, ha bármely jelölésnél a tokenek száma az adott helynél nem megy egy adott korlát fölé. A Petri háló korlátos, ha minden helye korlátos hely. A háló korlátossága az egyik leggyakoribb és legfontosabb minőségi jellemzője a Petri hálóknak.

A háló alap tulajdonságainak, beleértve a korlátosságának az elemzésére több módszer is létezik, melyek közül kiemelhető a

- komponens/elérhetőségi gráf elemzése (SCC),
- dekompozíciós módszerek.

A mátrix reprezentáció esetén transzformációs mátrixok segítségével írják fel a Petri háló dinamikáját. Az alapstruktúra az ún. incidencia  $M$  mátrixban kerül megadásra, melynek elemei az alábbi jelentéssel bírnak:  $A_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^-$ , ahol

- $a_{ij}^+$  : az élerősség az  $i$ . tranzícióból a  $j$ . kimeneti hely felé
- $a_{ij}^-$  az élerősség az  $i$ . tranzícióhoz a  $j$ . bemeneti hely felől.

A mátrix alapvetően a tokenek számának a változását mutatja az egyes tranzíció átmenetek esetére. A Petri háló működési alapegyenlete a következő alakban adható meg:

$$M_k = M_{k-1} + Au_k,$$

ahol  $M_k$  jelöli a háló markereinek (tokenek) státuszát a  $k$ . lépésben. Az  $u$  vektor a helyek tüzelési státuszt írja le.

A fenti modellen alapuló elérhetőség vizsgálatok felhasználhatóak a korlátosság elemzésére [13]. A kapcsolódó egyenletek hatékony, lineáris programozási megoldása szintén ismert [11].

### 5.2. Saját modell alaphálóra

Modellünkben korlátosságnak egy folyam-gráf megközelítését dolgoztuk ki. A hálóban a következő típusú helyeket definiáljuk:

- forrás hely,



- nyelő hely,
- köztes hely.

Feltesszük, hogy csak a köztes helyeken lehet tokeneket tárolni, csak ott vannak pufferek. A hálóban az élekhez egy  $I_x$  token áramlás erősséget definiálunk, ahol  $x$  jelöli az él indexét. A forrás helyekhez egy  $Q_x$  forrás erősség indexet adunk meg. A hálóban az alábbi kapacitás korlátokat vezetjük be:

- $C_x$  : az  $x$ . tranzíció maximális erőssége,
- $C_y$  : az  $y$ . nyelő maximális folyam erőssége.

A tranzícióknál a bemenő élek vonatkozásában kétféle működési módot értelmezzünk:

- AND-mód: akkor van tüzelés, ha minden bejövő élnél megvan az al elvárt tokenszám, van szinkron,
- OR-mód: akkor van tüzelés, ha megjelenik valamely bemeneten egy token, nincs szinkron.

A hálóban az alábbi megkötések élnek a folyamerősségekre:

- forrás helyek esetén:  $\sum_y I_y = Q_x$  ( $y$ : kimenő élek),
- nyelő helyek esetén:  $\sum_y I_y \leq C_x$  ( $y$ : bejövő élek),
- belső helyek esetén:  $\sum_{y(ki)} I_y \leq \sum_{y(be)} I_y$ ,
- tranzíciók esetén:
  - $\sum_y I_y \leq C_x$  ( $y$ : bejövő élek),
  - $\sum_{y(ki)} I_y = \sum_{y(be)} I_y$ ,
  - $\forall$  kimenő  $x, y$  élre  $I_x = I_y$ .

Az AND típusú tranzakciók esetén még ezen felül teljesül, hogy  $\forall$  bejövő  $x, y$  élre:  $I_x = I_y$ .

Az egyes belső helyeken a pufferbe áramló tokenek eredő intenzitása:

$$F = \sum_{x(\text{belső hely})} \left( \sum_{y(x \text{ bejövő él})} I_y - \sum_{y(x \text{ kimenő él})} I_y \right)$$

Az  $F$  függvény 0 értéke esetén nincs szükség belső pufferre.

A fenti feladatot egy LP programozási feladatnak is tekinthetjük, ahol a változók az élek  $I_x$  nem negatív intenzitásai és a célfüggvény:

$$F \Rightarrow \min$$

alakú.

### 5.3. Az alkalmazott, kibővített modell színezett hálóra

A színezett Petri-hálók esetén több különböző típusú tokenek élnek a rendszerben. A kapacitás vizsgálatnál ekkor az egyes tranzícióknál eltérő lehet a kapacitás korlát (a maximális folyam erősség) a különböző típusú tokenek esetén. Emiatt külön kell vizsgálni az egyes típusok folyam erősségét, nem lehet összevonni őket.

A színezett hálóban az élekhez  $I_x^c$  token áramlás erősségeket definiálunk, ahol  $x$  jelöli az él indexét és  $c$  a színkód. A forrás helyekhez  $Q_x^c$  forrás erősség indexeket adunk meg a különböző  $c$  színekre vonatkozólag. A hálóban az alábbi kapacitás korlátokat vezetjük be:

- $C_x^C$ : az  $x$ . tranzíció maximális erőssége a  $c$  szín esetén
- $C_y^C$ : az  $y$ . nyelő maximális folyam erőssége a  $c$  szín esetén

A hálóban az alábbi megkötések élnek a folyamerősségekre:

- forrás helyek ( $x$ ) esetén:  $\forall c$  színre:  $\sum_y \text{kimenő élek } I_y^C = Q_x^C$
- nyelő helyek ( $x$ ) esetén:  $\forall c$  színre:  $\sum_y \text{bejövő élek } I_y^C \leq C_x^C$
- belső helyek esetén:  $\forall c$  színre:  $\sum_y \text{kimenő élek } I_y^C \leq \sum_y \text{bejövő élek}$
- tranzíciók ( $x$ ) esetén:

$$\forall c \text{ színre } \sum_{y \text{ kimenő élek}} I_y^C = \sum_{y \text{ bejövő élek}} I_y^C$$

$$\sum_{c \text{ színek}} \left( \frac{1}{C_x^C} \left( \sum_{y \text{ bejövő élek}} I_y^C \right) \right) \leq 1$$

$$\forall c \text{ színre: } \forall \text{ kimenő}(y, z) \text{ élre: } I_y^C = I_z^C$$

- az AND típusú tranzakciók esetén még ezen felül teljesül, hogy  $\forall c$  színre:  $\forall$  bejövő  $(y, z)$  élre  $I_y^C = I_z^C$

Az egyes belső helyeken a bufferbe áramló tokenek eredő intenzitása:

$$F = \sum_{c \text{ színek}} \left( \sum_{x \text{ belső hely}} \left( \sum_{y \text{ bejövő élek } x\text{-nél}} I_y^C - \sum_{y \text{ kimenő helyek } x\text{-nél}} I_y^C \right) \right).$$

Az  $F$  függvény 0 értéke esetén nincs szükség belső bufferre. A fenti feladat egy lineáris programozási feladatnak (röviden LP) is tekinthető, ahol a változók az élek  $I_x$  nem negatív intenzitásai és a célfüggvény  $F \rightarrow \min$  alakú.

## 5.4. A validációs számítás algoritmusa

A hálót leíró struktúra három alappilléren nyugszik: helyek, tranzíciók, élek.

A helyek esetén az alábbi attribútumokat tárolja a rendszer:

- **id**: az egyedi azonosító kód,
- **inputs**: bejövő élek,
- **outputs**: kimenő élek,
- **tokens**: tárolt tokenek,
- **Q**: forrás intenzitás,
- **border**: pozíció jelző, belső vagy határ pozíció.

A tranzíciók jellemzői:

- **id**: egyedi azonosító kód,
- **inputs**: bejövő élek,
- **outputs**: kimenő élek,
- **C**: feldolgozási intenzitás,
- **mode**: működési mód (AND, OR).

Az élek attribútumai:

- **id**: azonosító kód,
- **input**: induló elem,
- **output**: cél elem,
- **alfa**: az él kapacitás jelzője,
- **inner**: él típusa, belső vagy határ.

A kapacitás vizsgálatot végző rutin az alábbi tevékenységeket hajtja végre. Új LP feladat létrehozása a **prop** változóba:

```
prop = Init_LpProblem(Minimize)
```

Az optimalizálási probléma változóinak inicializálása:

```
tr_vars = LpVariable("Iv", tr_items, lowBound=0, cat='Continuous')
```

Együtthatók meghatározása és beállítása:

```
for pp in places:  
    if pp.border == 0:  
        costs[11] = costs[11] +/- 1
```

A célfüggvény meghatározása:

```
Init_lpSum([costs[i] * tr_vars[i] for i in tr_items])
```

Belső pontok súlyának meghatározása:

```
for pp in places:
    if pl.border == 0:
        for e in pl.inputs:
            wgts[e] = wgts[e] + 1
        for e in pl.outputs:
            wgts[e] = wgts[e] - 1
        cnts = 0
```

Az egyenlőtlenség rendszer együtthatóinak meghatározása:

```
Init_lpSum([wgts[i] * tr_vars[i] for i in tr_items]) >= cnts
if pl.border == 1:
    for e in pl.outputs:
        wgts[e] = wgts[e] + 1
    cnts = pl.Q

Init_lpSum([wgts[i] * tr_vars[i] for i in tr_items]) == cnts
if pl.border == 2:
    for e in pl.inputs:
        wgts[e] = wgts[e] + 1
    cnts = -pl.Q

Init_lpSum([wgts[i] * tr_vars[i] for i in tr_items]) <= cnts
for tr in self.transitions:
    for e in tr.inputs:
        wgts[e] = wgts[e] + 1
    for e in tr.outputs:
        wgts[e] = wgts[e] - 1

Init_lpSum([wgts[i]*tr_vars[i] for i in tr_items]) == 0
    for e in tr.inputs:
        wgts[e] = wgts[e] + 1
    cnts = tr.C

Init_lpSum([wgts[i] * tr_vars[i] for i in tr_items]) <= cnts

if tr.mode == 'AND':
    for e in range(1, len(tr.inputs)):
        Init_lpSum([wgts[i] * tr_vars[i] for i in tr_items]) == 0
    for e in range(1, len(tr.outputs)):
        Init_lpSum([wgts[i]*tr_vars[i] for i in tr_items]) == 0

if tr.mode == 'OR':
    for e in range(1, len(tr.outputs)):
```

```

e1 = tr.outputs[0]
e2 = tr.outputs[e]
wgts[e1] = 1
wgts[e2] = -1
Init_p.lpSum([wgts[i]*tr.vars[i] for i in tr_items]) == 0

```

Az optimalizálási probléma megoldása, majd az eredményeinek a kiírása:

```

prob.solve()
prob.print()

```

## 5.5. Mintafeladat

Vegyünk egy 4 helyből és 2 tranzícióból álló rendszert. A helyekből egy nyelő, egy forrás és kettő belső hely. A rendszerben 6 él van az ábrán megadott módon. A gráfban a sárga elem a helyeket, zöld a tranzíciókat jelöli. A csomópont elemében az első jel a hely kódja, a második a kapcsolódó kapacitás érték. A modellben a kisebb indexű tranzíció AND tulajdonságú, a másik OR tulajdonságú.

A rendszerben 6 (nem negatív) változó jelenik meg:  $\{0 : Iv_0, 1 : Iv_1, 2 : Iv_2, 3 : Iv_3, 4 : Iv_4, 5 : Iv_5\}$

Az élek indexelése:

$$0 : 1 \rightarrow 5$$

$$1 : 5 \rightarrow 2$$

$$2 : 2 \rightarrow 6$$

$$3 : 6 \rightarrow 3$$

$$4 : 3 \rightarrow 5$$

$$5 : 6 \rightarrow 4$$

A rendszerhez az alábbi egyenlőtlenségek kapcsolódnak:

$$C_1 : Iv_0 = 20$$

$$C_2 : Iv_1 - Iv_2 \geq 0$$

$$C_3 : Iv_3 - Iv_4 \geq 0$$

$$C_4 : Iv_5 \leq 25$$

$$C_5 : Iv_0 - Iv_1 + Iv_4 = 0$$

$$C_6 : Iv_0 + Iv_4 \leq 50$$

$$C_7 : Iv_0 - Iv_4 = 0$$

$$C_8 : Iv_2 - Iv_3 - Iv_5 = 0$$

$$C_9 : Iv_2 \leq 50$$

$$C_{10} : Iv_3 - Iv_5 = 0$$

A kapcsolódó célfüggvény:

$$1 \cdot Iv_1 + -1 \cdot Iv_2 + 1 \cdot Iv_3 + -1 \cdot Iv_4 \Rightarrow \min$$

Az LP feladat megoldható és a kapott megoldás:

$$\begin{aligned}
 Iv_0 & : 20.0 \\
 Iv_1 & : 40.0 \\
 Iv_2 & : 40.0 \\
 Iv_3 & : 20.0 \\
 Iv_4 & : 20.0 \\
 Iv_5 & : 20.0 \\
 Cost & = 0.0
 \end{aligned}$$

Tehát a mintarendszerben nincs szükség belső pufferre. Ha lecsökkentjük a második tranzíció folyamerősségét, az akkor nem kapunk érvényes megoldást.

Infeasible

$$\begin{aligned}
 Iv_0 & : 10.0 \\
 Iv_1 & : 20.0 \\
 Iv_2 & : 20.0 \\
 Iv_3 & : 10.0 \\
 Iv_4 & : 10.0 \\
 Iv_5 & : 10.0
 \end{aligned}$$

## 6. fejezet

# Megvalósítás

### 6.1. Kezdetek

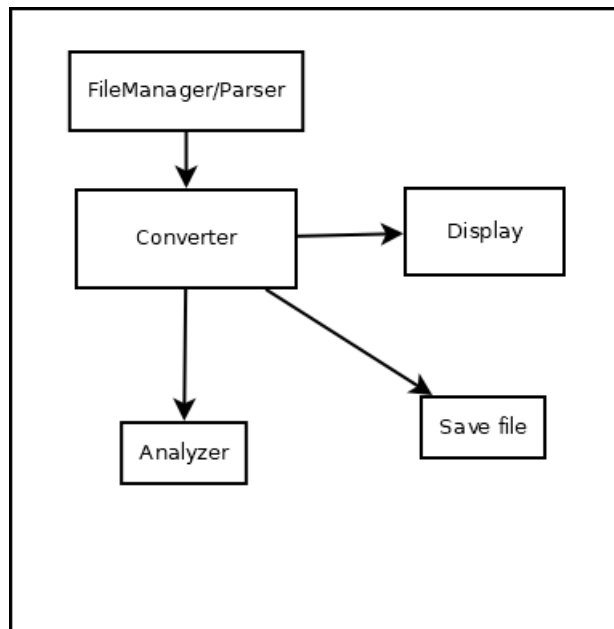
Még a téma megfogalmazása előtt eldöntöttem, hogy a szakdolgozatomhoz tartozó programot C# nyelven fogom írni. Ennek legfőbb oka az eddig megszerzett nyelvi jártasságom. Magát a nyelvi verziót és a program alatt futó keretrendszert viszont a feladathoz igazítottam. Először a .NET Core 5 lett kiválaszva de kényelmi okokból, illetve mivel a platformfüggetlenség nem volt elsődleges szempont ezért a .NET 4.7.2-es verziója lett a projekt keretrendszere. Egy érdekes tapasztalat, hogy a NuGet pkg-eket legtöbbször nem sikerül a fejlesztőknek egy éven belül frissíteni, ezért sokszor nem célszerű az éppen legfrissebb .NET verziót használni. (A kívánt pkg-k frissülése után a projekt is .NET 4.8-ra lett migrálva.) A NuGet a C# csomagkezelője. Már megírt modulok találhatóak rajta, melyek között van ingyenes és licenszelhető is. A C# alatt elérhető leggyakrabban használt fő alkalmazástípusok, a(z):

- ASP Web projekt és a hozzá választható FrontEnd
- Windows Console alkalmazás (Főként utility projektekhez használják)
- Windows Forms "klasszikus" ablakos alkalmazás gombokkal és textboxokkal. (Leginkább a kétezres évek formavilága)
- WPF (Windows Presentation Forms) Az előző egy "felújított" változata. Ez lényegesen több opciót biztosít a felhasználói felület testreszabására.

A projektválasztás a Windows Forms alkalmazástípusra esett. (továbbiakban WF) A WF ugyan csak egyszerű grafikai megjelenítést tesz lehetővé, de egy gráf, vagy háló folyamatok könnyedén megjeleníthetőek. A WF cserébe könnyebben szerkeszthető mint egy WPF XAML nyelven leírt felülete, és kevesebb erőforrást is igényel.

## 6.2. Felépítés

A fentebb említett verziókülönbségek miatt a projektet csak 4.7.2-es .NET alatt lehetett létrehozni. A projekt eredetileg egy TDK-hoz készült, később viszont módosítva lett. Az alkalmazás felépítése a következő:



6.1. ábra. Az alkalmazás vázlatos felépítése

**FileManager / Parser** Feladata az XML file beolvasása, és tagolása. Az így feldolgozott adat kerül átalakításra a program későbbi szakaszában.

**Converter** A program fő része. Feladata a már tagolt adathalmaz átalakítása. Az átalakított adathalmaz DLV formátumba kerül, majd gráfleíró nyelvre. (DOT) Az így előállított háló menthető egy fileba.

**Display** Megjelenítő modul a konvertált háló UI-ra rajzolásáért felelős. Kis háló esetén az animáció is lehetséges.

**Analyzer** A hálón végezhető elemzéseket végzi el. Majd ezek eredményét megjeleníti, illetve elmenti.

## 6.3. FileManager / Parser

A File manager a C# hagyományos XML megoldásait használja, ez az **XmlDocument** és **XmlReader** osztály illetve a hozzá tartozó metódusok. A felhasználói felületen a felhasználó által kiválasztott file kerül a managerbe. A C# támogatja az XML fileok hagyományos XPath alapú feldolgozását, azonban elérhető egy gyorsabb XML feldolgozás LINQ-val. A LINQ a C# nyelvbe integrált query nyelv. Szintaktikája az SQL éhez hasonló annyi különbséggel, hogy a 'SELECT' a query végére kerül az eleje helyett. Ez főként a kódban előforduló lekérdezések elkülönülése miatt lett így tervezve.



## 6.4. Converter

A Converter a program fő modulja. A leképzés fejezetben felsorolt nyelvi elemeket dolgozza fel és készíti el a részhálókat, amiket aztán összefűz. Konverzió során az XML soronként kerül feldolgozásra. Egy átolvasás után a nem szorosan illeszkedő részek, mint részhálók, segéd folyamatok stb. külön szálak kerülnek feldolgozásra aszinkron módon. Ezzel a konverziós idő (a modelltől függően) rövidül. A konverzió gyakorlatilag egy keresés egy Dictionaryben. A Dictionary egy kulcsot vár ami alapján egy értéket ad vissza. (Pont, mint egy valós szótár, ahol a kulcs az idegen nyelvű szó, az érték pedig a szó magyar megfelelője). Egy kisebb méretű Dictionary keresés durván  $O(n)$ , ha  $n$  darab elemre keresünk, ugyanis a `Dictionary.Contains()` egy elemre  $O(1)$  komplexitású. Keresés után ezeket még rendezni kell és összefűzni. Ez utóbbi szintén minden elemre végbemegy, de ve egyidejűleg egy validáció is. A konverzió során az XML elem attribútumai és gyerekei alapján kerül az elem a háló egy adott pontjára. Ez egy újabb  $O(n)$  lépés. Ha a rész szálak kész vannak és a fő szál is elkészült a részek egy hálóba lesznek rendezve ami  $O(s)$ , ahol az  $s$  a részhálók száma. Idáig a program tehát  $O(2n + s)$  lépést tesz meg.

## 6.5. Analyzer

Az analyzer feladata az ötödik fejezetben leírtak gyakorlati alkalmazása az elkészült hálóra. Az analyzer eredetileg pythonban lett megírva. Ezt az indonkolta, hogy az akkori alapalkalmazáshoz külön készült, mintegy kiegészítőként. Később a programba integrálva lett. Először IronPython alatt került bele, később teljesen átírva AGLIB-hez, majd még egyszer átírva jelenlegi Google OR toolset leírónyelvre. Az IronPython a python nyelv .NET-en futó implementációja. Gyakorlatilag kicsit gyorsabb a hagyományos pythonnál de cserébe a platform-függetlenséget feláldozza. (Jelenleg viszont az új .NET verzió futtatható Linux és MacOS rendszeren is.) Az AGLIB egy analitikus csomag aminek csökkentett képességű verziója elérhető a NuGet rendszerén keresztül ingyen. (A teljes verzió viszont licenszköteles.) A jelenleg használt Google OR tools egy ingyenesen elérhető open source software csomag optimalizáláshoz, LP, CP programozáshoz, illetve útválasztásos és flow feladatok megoldásához. A csomag előnye a felépítésében rejlik. A probléma leírása után egy proto állomány készül, amit egy solver fog megoldani. A solver LP problémáknál a GLOP, de külső solver is használható. A solverek implementáltak több platformra is. Az elérhetőség és a független probléma-leírás eredménye, hogy az OR tools támogatott C++, C#, JAVA és Python nyelven is.

## 6.6. Kezdeti nehézségek

Miután körvanalazódott a feladat megvalósításának menete, létre hoztam egy kanban táblát a fejlesztési folyamatok nyomonkövetéséhez. (Ez a verziókezelővel együtt online, az Azure felületén érhető el.) A táblában különböző lebontásokban látható, a fő és rész egységek, valamint a feature-ök és tesztek. Az első lépés a BPEL nyelv megismerése volt. A BPEL-hez található anyagok nagy része hagyaték anyag, ugyanis a BPEL alapú folyamatkövetés kiszorult a népszerűségből. Ennek több velejárója van, de a legszembetűnőbb, az aktívan elérhető segítség hiánya, a már hiányos dokumentáció, vagy

éppen a dokumentációban felsorolt anyagok elérhetőségének hiánya. A program készítése során kellett generálni egy úgymond tanító anyagot, amely a program részeit érthetően elmagyarázza, és későbbiekben lehet használni a konverzió és a feldolgozás helyességének ellenőrzésére. Ezen tesztadatok legenerálása sokkal nagyobb nehézséget jelentett, mint vártam, vagy mint a program többi részének egy hiba utáni javítása. Ismerjük meg a generáláshoz szükséges feltételeket! A BPEL írására lehet egy sima szövegszerkesztőt alkalmazni, de ez nem célravezető, mivel a háttér XML validációja kézzel nehézkesen oldható meg. A leggyakrabban hivatkozott szerkesztő az ECLIPSE. Az IDE nem támogatja alapértelmezetten a BPEL szerkesztését, ezért egy beépülő szükséges. A rendszer egy url megadása ellenében az adott szerveren tárolt beépülők letöltését, regisztrációját és integrálását teszi lehetővé. A folyamat több helyen is félre tud siklani, először az Eclipse verziójának különbözetében, aztán a szerver által alkalmazott biztonsági beállításokon, legutoljára az operációs rendszer jogosultságkezelésén. Sajnos a legfrisebb verziójú Eclipse nem támogatja a már idejét múlt szerkesztőt, ezért v6.0 körüli IDE-t kell telepíteni. A telepítés sajnos csak hagyaték rendszeren végezhető el. (ez lehet mind Linux, mind Windows). A programnak Windows 2000/Xp a rendszerkövetelménye hisz egy durván 2000-2002 es rendszerről beszélhetünk. Szerencsére a hagyaték rendszerek terén előzőleg szerzett tapasztalataim segítségemre voltak. A kettő Windows dual-boot egy korhű gépre telepítése után az editor hajlandó volt települni, egy azt megelőző gyakorlatilag verzióhekkelés követően. A frisebb Eclipse-el el kellett hitetni, hogy az állomány friss, de nem szabad volt feltelepíttetni, hanem az így kinyert köteget kellett a másik gépen az Elcipse alá telepíteni manulisan. Az IDE beállításai után lehetőség nyílt egy program szerkesztésére, de ekkor még csak validálatlan formában. Ekkor kiderült, hogy a szekresztés befolyézához és validáiójához egy szerverre van szükség. A szerver lehet local szerver is. A jelenleg Oracle kézben levő rendszer ehhet nem ad segítséget, de interneten található hozzá segédanyag.[1] Az ebből megismert Apache és ODE szerver szintén csak korhű rendszeren tud futni. A helyzetet bonyolítja, hogy a Ode-War állományokhoz jre + jvm is szükséges. A jre egy bizonyos verziója viszont inkompatibilis az ode war állomány kifejezetten ahhoz tervezett verziójával. A jre, apache tomcat, ode verziók közösen nagyon kevés működő kombinációt engednek meg. Ennek ellenére, a telepítés befejeztével a legenerált minta még mindig nem ellenőrizhető, hiszen a szervernek futnia is kell. Ellenben a futó szerverbe fel kell regisztrálni az Oracle validációs szerverét, ahonnan egy aktuális sémát vár. A letöltött séma gyakorlatilag a BPEL verziót határozza meg. Sajnos ez a szerver 2010 óta nem működik, így a hosszadalmas munka után nem várt végeredményhez jutottam. Az így felállított rendszerrel 10 darab BPEL állományt generáltam, de mivel nagy része szerveresen állítható és kapcsolat nélkül helyfoglaló szöveg van kulcsfontosságú helyeken, így a minta felét el kellett dobni, mert szemmel láthatólag nem volt helyes. A mintagegenerálást két hónap elteltével később újra megpróbáltam egy virtuális gépen ezúttal, de ekkor még kevesebb eredmény született, ugyanis az Oracle ekkor kezdte a repository-k újraszervezését. Az egy hetes átszervezés után tapasztaltam, hogy a projektet nyugdíjazták, és jelenleg sem érhető el csak a hagyaték oldalon, de tényleges letölthető forrás nélkül. A dolgot ezen fejezetének írásakor az oldal még mindig nem elérhető.

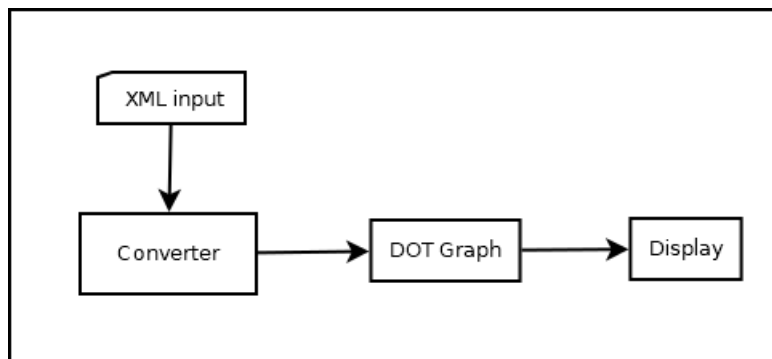
## 6.7. A converter

A konverzió kezelését különösen problémásnak gondoltam. Tanulmányaim során sose volt említve összetettebb adattípusok feldolgozása és azok közötti konverzió. Először

egy kétszeresen összetett adattípusban gondolkoztam ami gyakorlatilag egy véges, két dimenziós tömb, hiszen a BPEL csak véges számú elemet tartalmaz gyárilag, és a szabadon definiált elemekkel nem foglalkozunk. A tömb egyik dimenziója a bejövő BPEL elem, a másik pedig a hozzá tartozó előre meghatározott konverzió eredménye. Később eszembe juttott a szakmai gyakorlat alatt szerzett információ a C# ban natívan jelen levő összetett adatstruktúráiról. Így esett a választás végül a Dictionary-re. A Dictionary egy 'Key - Value' azaz kulcs és érték alapon működő tár. Használata során egy kulcssort kell gyártani a rekordok számára, és a kulcshoz tartozó értéket felvinni. A Dictionary runtime, azaz futás idő alatt bővíthető ha szükséges, de mivel csak előre definiált elemeket használunk, ezért ez kihasználatlan marad. Konverzió során külön kell kezelni a színes és egyszerű Petri-hálót. Az egyszerű hálós konverzió során sokat segített Christian Stahl által közzétett publikáció[8].

## 6.8. Vizualizáció

A vizualizáció az alábbi módon történik:



6.2. ábra. A vizualizáció menete

A Converter előállítja a hálót, ez ekkor még nem megjeleníthető petri háló struktúrában van. Ezt a struktúrát még át kell alakítani egy Gráfrajzoló program számára is érthető formátumba. A művelet szintén a converter végzi, ami a struktúrát tovább küldi az Analyzer számára, a gráfot pedig a rajzoló szubrutinnak. Az így kapott gráfot MS-AGL/AGLIB rajzolja ki a UI felületére. Ha a step-by-step vizualizáció ki van kapcsolva, akkor a kirajzolt gráf a végleges. Ha viszont be van kapcsolva, akkor a tokenek fel kerülnek az ábrára és minden 1 lépés alatt lezajló művelet eredménye frissíti az adatstruktúrát. A struktúrából új kép készül, ami ki kerül a UI-ra. Ha a képeket szeretnénk elmenthetjük, ami a forrásfájl mappájába, vagy ha nincs jogosultság, akkor a program mappájába kerül mentésre. Vizualizáció során nem szükséges folyamatosnak tűnő kép előállítása, ezért használható ez a módszer.

## 7. fejezet

# Összefoglalás

A dolgozat témaköre a BPEL nyelven létrehozott üzleti folyamatok modellezése és elemzése a Petri-háló alapú formalizmus segítségével. A kidolgozott mintarendszer inputként egy BPEL modell leírását várja és kimenetként az elemzés eredményét illetve a folyamatok nyomkövetését adja vissza.

A dolgozat keretében az alábbi eredményeket értem el:

- BPEL folyamatok Petri háló formalizmusra történő konverziója,
- LP alapú végeesség vizsgálat a Petri hálón,
- folyamatok grakus nyomon követése, szimuláció.

## 8. fejezet

# Mellékletek

### 8.1. A minta BPEL folyamat forráskódja

```
<!-- hworld BPEL Process [Generated by the Eclipse BPEL Designer] -->
<!-- Date: Sat Nov 09 19:05:12 CET 2019 -->

<bpel:process name="hworld"
  targetNamespace="http://eclipse.org/bpel/sample"
  suppressJoinFailure="yes"
  xmlns:tns="http://eclipse.org/bpel/sample"
  xmlns:bpel="http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/process/executable"
  >
  <!-- Import the client WSDL -->
  <bpel:import location="hworldArtifacts.wsdl" namespace="http://eclipse.org/bpel/sample"
  importType="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/" />

  <!-- ===== -->
  <!-- PARTNERLINKS -->
  <!-- List of services participating in this BPEL process -->
  <!-- ===== -->
  <bpel:partnerLinks>
  <!--
  The 'client' role represents the requester of this service. It is
  used for callback. The location and correlation information associated
  with the client role are automatically set using WS-Addressing.
  -->
  <bpel:partnerLink name="client"
    partnerLinkType="tns:hworld"
    myRole="hworldProvider"
    partnerRole="hworldRequester"
    />
  </bpel:partnerLinks>

  <!-- ===== -->
  <!-- VARIABLES -->
  <!-- List of messages and XML documents used within this BPEL process -->
```

```

<!-- ===== -->
<bpel:variables>
<!-- Reference to the message passed as input during initiation -->
<bpel:variable name="input"
messageType="tns:hworldRequestMessage"/>

<!-- Reference to the message that will be sent back to the
requester during callback
-->
<bpel:variable name="output"
messageType="tns:hworldResponseMessage"/>
</bpel:variables>

<!-- ===== -->
<!-- ORCHESTRATION LOGIC -->
<!-- Set of activities coordinating the flow of messages across the -->
<!-- services integrated within this business process -->
<!-- ===== -->
<bpel:sequence name="main">

<!-- Receive input from requestor.
Note: This maps to operation defined in hworld.wsdl
-->
<bpel:receive name="receiveInput" partnerLink="client"
portType="tns:hworld"
operation="initiate" variable="input"
createInstance="yes"/>
<bpel:empty name="FIX_ME-Add_Business_Logic_Here"></bpel:empty>
<!-- Asynchronous callback to the requester.
Note: the callback location and correlation id is transparently handled
using WS-addressing.
-->
<bpel:invoke name="callbackClient"
partnerLink="client"
portType="tns:hworldCallback"
operation="onResult"
inputVariable="output"
/>
</bpel:sequence>
</bpel:process>

```

## 8.2. További leképázések

### 8.3. <scope>

A gyerek elemek hatókörét lehet vele szabályozni.

```
<scope isolated="yes|no"? exitOnStandardFault="yes|no"?
```

```

standard-attributes>
standard-elements
<partnerLinks>?
    ... see above under <process> for syntax ...
</partnerLinks>
<messageExchanges>?
    ... see above under <process> for syntax ...
</messageExchanges>
<variables>?
    ... see above under <process> for syntax ...
</variables>
<correlationSets>?
    ... see above under <process> for syntax ...
</correlationSets>
<faultHandlers>?
    ... see above under <process> for syntax ...
</faultHandlers>
<compensationHandler>?
    ...
</compensationHandler>
<terminationHandler>?
    ...
</terminationHandler>
<eventHandlers>?
    ... see above under <process> for syntax ...
</eventHandlers>
activity
</scope>

```

Nem generál új elemet, csak a láthatósági, azaz visszacsatolási elemeket adja meg.

## 8.4. <receive>

Egy megfelelő üzenet után engedi a folyamatot továbbhaladni, így várakoztatáshoz használható. A <receive> típusú XML elemekhez tartozó sémaleírás:

```

<receive partnerLink="NCName"
  portType="QName"?
  operation="NCName"
  variable="BPELVariableName"?
  messageExchange="NCName"?>
  <fromParts>?
    <fromPart part="NCName" toVariable="BPELVariableNm"/>+
  </fromParts>
</receive>

```

A hálóban ezt egy tranzícióval könnyedén megoldhatjuk, hiszen csak egy specifikus üzenet token kell a továbblépéshez, és a többi addig az előző helyen parkoltatja.

## 8.5. <reply>

Üzenetküldő elem, ami <receive>; <onMessage>;<onEvent> események után léphet akcióba.

```
<reply partnerLink="NCName"
  portType="QName"?
  operation="NCName"
  variable="BPELVariableName"?
  messageExchange="NCName"?>
  <toParts>?
    <toPart part="NCName" fromVariable="BPELVariableNm"/>+
  </toParts>
</reply>
```

A lekezelése az előző példával analóg módon, annyi különbséggel, hogy a tokenek nem parkolnak, hanem tovább mennek és a tranzíció csak akkor generál új tokent ha üzenetet kap egy ágról.



# Irodalomjegyzék

- [1] Helloworld-bpeldesignerandode. <https://www.eclipse.org/bpel/users/pdf/HelloWorld-BPELDesignerAndODE.pdf>. Accessed: 2020.11.2.
- [2] List of bpel engines. [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_BPEL\\_engines.htm](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_BPEL_engines.htm). Accessed: 2019-10-30.
- [3] Tony Andrews, Francisco Curbera, Hitesh Dholakia, Yaron Goland, Johannes Klein, Frank Leymann, Kevin Liu, Dieter Roller, Doug Smith, Satish Thatte, et al. Business process execution language for web services, 2003.
- [4] Luciano Baresi and Sam Guinea. Towards dynamic monitoring of ws-bpel processes. In *International Conference on Service-Oriented Computing*, pages 269–282. Springer, 2005.
- [5] Luciano Baresi, Andrea Maurino, and Stefano Modafferi. Towards distributed bpel orchestrations. *Electronic Communications of the EASST*, 3, 2007.
- [6] Jorge Cardoso. Complexity analysis of bpel web processes. *Software Process: Improvement and Practice*, 12(1):35–49, 2007.
- [7] Gregory Hackmann, Mart Haitjema, Christopher Gill, and Gruia-Catalin Roman. Sliver: A bpel workflow process execution engine for mobile devices. In *International Conference on Service-Oriented Computing*, pages 503–508. Springer, 2006.
- [8] Sebastian Hinz, Karsten Schmidt, and Christian Stahl. Transforming bpel to petri nets. volume 3649, pages 220–235, 09 2005.
- [9] Oliver Kopp, Katharina Görlach, Dimka Karastoyanova, Frank Leymann, Michael Reiter, David Schumm, Mirko Sonntag, Steve Strauch, Tobias Unger, Matthias Wieland, et al. A classification of bpel extensions. *Journal of Systems Integration*, 2(4):3–28, 2011.
- [10] Máté Kovács, Dániel Varró, and László Gönczy. Formal analysis of bpel workflows with compensation by model checking. *Computer Systems Science and Engineering*, 23(5):349–363, 2008.
- [11] Jean B Lasserre and Philippe Mahey. Using linear programming in petri net analysis. *RAIRO-Operations Research*, 23(1):43–50, 1989.
- [12] Philip Mayer and Daniel Lübke. Towards a bpel unit testing framework. In *Proceedings of the 2006 workshop on Testing, analysis, and verification of web services and applications*, pages 33–42. ACM, 2006.

- [13] Tadao Murata. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4):541–580, 1989.
- [14] Chun Ouyang, Marlon Dumas, Stephan Breutel, and Arthur ter Hofstede. Translating standard process models to bpm. In *International Conference on Advanced Information Systems Engineering*, pages 417–432. Springer, 2006.
- [15] Chun Ouyang, Eric Verbeek, Wil MP van der Aalst, Stephan Breutel, Marlon Dumas, and Arthur HM ter Hofstede. Wofbpm: A tool for automated analysis of bpm processes. In *International Conference on Service-Oriented Computing*, pages 484–489. Springer, 2005.
- [16] Florian Rosenberg and Schahram Dustdar. Business rules integration in bpm—a service-oriented approach. In *Seventh IEEE International Conference on E-Commerce Technology (CEC’05)*, pages 476–479. IEEE, 2005.
- [17] Aleksander Slominski. Adapting bpm to scientific workflows. In *Workflows for e-Science*, pages 208–226. Springer, 2007.
- [18] Wil MP Van Der Aalst and Kristian Bisgaard Lassen. Translating unstructured workflow processes to readable bpm: Theory and implementation. *Information and Software Technology*, 50(3):131–159, 2008.

# Melléklet használati útmutatója

A dolgozat PDF változata (dolgozat.pdf) és az előállításához szükséges L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>Xforrásfájlok megtalálhatóak a mellékleten.

A mellékelt programok futtatásához Windows operációs rendszer és a .NET keretrendszer 4.8 as verziója szükséges. A Python kódok Python 3 alatt lettek tesztelve.

A program az .exe állománnyal indítható el. A program tartalmaz help providert, azaz futás közben a segítség használatával a program használata megismerhető.