

2. MODELIRANJE KOMUNIKACIJE KONAČNIM AUTOMATOM

Konačni automat je osnovni model koji se primjenjuje u analizi i sintezi telekomunikacijskih procesa, i to za opis i istraživanje komunikacije i koordinacije procesa.

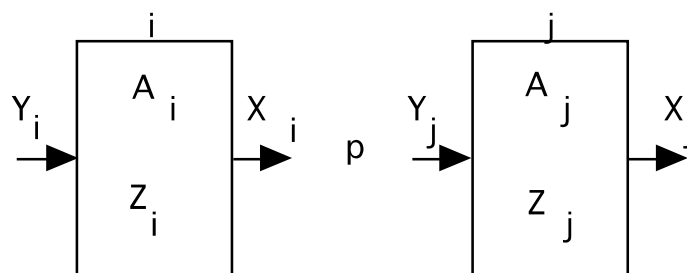
2.1. OPIS PROCESA KONAČNIM AUTOMATOM

Svaki se proces P_i modelira automatom A_i . Skup stanja S_i izvodi se iz skupa uvjeta C_i , a skup prijelaza T_i iz skupa događaja E_i razlikujući prijelaze uz predaju (x_{ji}) i prijam (y_{ki}), te unutrašnje prijelaze (z_{li}). Stanje procesa P_i u nekom trenutku označava se sa $s_{ji} \in S_i$. Ponašanje automata opisano je funkcijom sljedećeg stanja:

$$S_i(t+1) = \delta_i(S_i(t), T_i(t)).$$

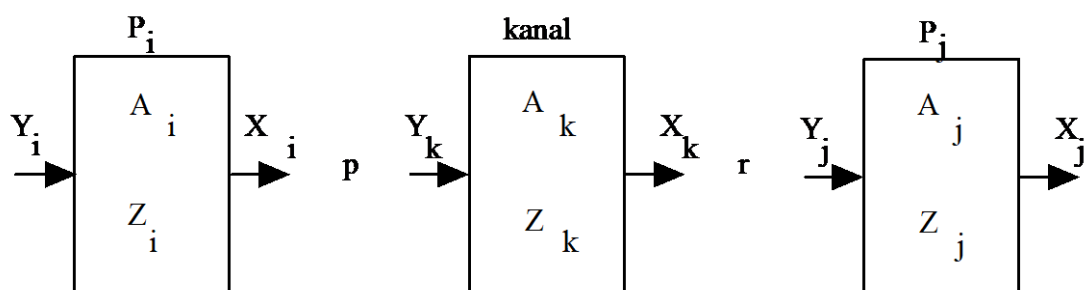
Komunikacijski kanal se u model može uvesti na dva načina. Prema prvom načinu kanal se ne modelira posebnim automatom, već se uključi posredno, preko prijelaza vezanih uz prijam i predaju informacijskih jedinica (sl.2.1). Kanalu $K(i, j)$ pridružena su stanja $K_s(i, j)$, a komunikaciji jednom informacijskom jedinicom odgovara uređeni slijed događaja:

$$x_{pi}, K_s(i, j) = p, y_{pj}.$$



Slika 2.1. Komunikacija između dva automata

Takav opis ne dopušta nikakvu obradu informacijske jedinice između predaje i prijama, pa tako ni djelovanje smetnji. Prema drugom načinu, kanal se može modelirati automatom A_k kao i sami procesi (sl.2.2).



Slika 2.2. Komunikacijski kanal modeliran automatom

U tom se primjeru komunikacija između P_i i P_j opisuje automatima A_i , A_k i A_j preko kanala $K(i, k)$ i $K(k, j)$ uz slijed događaja:

$$x_{pi}, K_S(i, k) = p, y_{pk}, x_{rk}, K_S(k, j) = r, y_{rj}.$$

pri čemu $p = r$ opisuje komunikaciju bez pogreške, a $p \neq r$ s pogreškom.

Stanje sustava S_t komunicirajućih procesa opisano je združenim skupom stanja svih automata i svih kanala u trenutku promatranja t :

$$\begin{vmatrix} s_1 & K_S(1, 2) & \dots & K_S(1, N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_S(i, 1) & K_S(i, 2) & \dots & s_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_S(N, 1) & K_S(N, 2) & \dots & s_N \end{vmatrix}$$

Skup stanja sustava dobiva se uzastopnom izvedbom prijelaza uz zadano početno stanje.

Međudjelovanje procesa opisuju promjene stanja, odnosno struktura stanja, te sljedovi prijelaza, odnosno sljedovi informacijskih jedinica na kanalima. Stupanj usklađenosti skupa procesa može se definirati kao mogućnost zaključivanja o stanju svih procesa na osnovi poznavanja stanja samo jednog ili nekoliko procesa, a za komunikaciju važno je poznavati sljedove informacijskih jedinica.

Karakteristike sustava komunicirajućih procesa mogu se odrediti istraživanjem strukture stanja iz koje se izvode sljedovi prijelaza ili obrnutim postupkom.

2.2. ISTRAŽIVANJE KOMUNIKACIJE OBRADOM SLJEDOVA PRIJELAZA

2.2.1. Određivanje sljedova prijelaza

Pri određivanju sljedova prijelaza primjenjuje se opis automata grafom G sa značenjem dijagrama stanja. Dijagram stanja mora biti strogo povezan, a također mora postojati barem jedan usmjereni put koji prolazi početnim stanjem.

Slijed prijelaza opisan je kao svaki put u grafu G koji počinje i završava u početnom stanju, a ne prolazi početnim stanjem (pravi ciklus). Nužan uvjet za analiziranje je konačan broj konačnih sljedova događaja. Sljedovi su konačni ako ne postoje ciklusi u grafu koji ne prolaze početnim stanjem. Tada je i broj sljedova konačan. Svi putovi u grafu koji predodređuju sljedove prijelaza dobivaju se algoritmom generiranja matrica prijelaza automata višeg reda.

Neka je:

M	matrica prijelaza za graf G
m_{ij}	element matrice prijelaza M koji sadrži skup svih prijelaza između stanja s_i i s_j
M_i	i -ti redak matrice prijelaza
$P_{ij}^{(k)}$	skup svih putova između stanja s_i i s_j dužine k
$\Pi_{ij} = P_{ij}^{(1)}$	skup svih putova između stanja s_i i s_j dužine 1
$P_{11}^{(k)}$	sljed događaja dužine k .

Slijed događaja dužine k određuje se ovako:

$$P_{11}^{(k)} = \Pi_{1x1} \Pi_{x1x2} \dots \Pi_{x_{k-1}1},$$

a x_1, x_2, \dots, x_{k-1} međusobno različiti i različiti od 1.

Pri određivanju sljedova prijelaza primjenjuje se operacija množenja matrica prijelaza. Za automate s n stanja $C = A \cdot B$ daje:

$$c_{ij} = \sum a_{iu} \cdot b_{uj}.$$

Slijed prijelaza dužine k može se izvesti određivanjem elemenata matrice prijelaza k -tog reda na poziciji (1, 1):

$$m_{11}^{(k)} = P_{11}^{(k)}.$$

Postupak je sljedeći:

1. odredite M ,
2. odredite M' zamjenom elemenata na glavnoj dijagonali od M nulama,
3. $k = 1$,
4. $M_1^{(k)} \cdot M'$,

5. zamijenite sve nepravne cikluse nulom; rezultat je $M_1^{(k+1)}$,
6. $k = k+1$,
7. za $k < n$ vratite se na 4; za $k = n$ postupak je završen,
8. $P_{11}^{(k)} = m'_{11}(k)$, $k = 1, 2, \dots, n$ su sljedovi događaja.

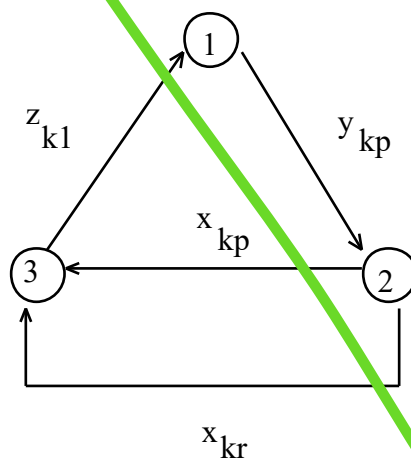
Primjer 2.1.

Automat-model kanala između procesa P_1 i P_2 čiji je dijagram stanja predodčen slikom 2.3 ima tri stanja i četiri prijelaza:

y_{kp} prijam poruke od P_1 ,
 x_{kp} predaja ispravne poruke P_2 ,
 x_{kr} predaja pogrešne poruke P_2 ,
 z_{k1} unutrašnji prijelaz.

Matrica prijelaza M je ovakva:

$$\begin{array}{c|cc} 0 & y_{kp} & 0 \\ 0 & 0 & x_{kp}, x_{kr} \\ z_{k1} & 0 & 0 \end{array}$$



Slika 2.3. Dijagram stanja za model kanala

Sljedovi prijelaza očiti su iz grafičkog prikaza:

y_{kp}, x_{kp}, z_{k1} i
 y_{kp}, x_{kr}, z_{k1} ,

a mogu se odrediti i opisanim algoritmom. Za taj je primjer $M' = M$ a postupak se izvodi u tri koraka:

$$M_1^{(1)} = [0 \quad y_{kp} \quad 0]$$

$$k = 1$$

$$M_1^{(2)} = [0 \quad 0 \quad (y_{kp}, x_{kp}), (y_{kp}, x_{kr})]$$

$$k = 2$$

$$M_1^{(3)} = [(y_{kp}, x_{kp}, z_{k1}), (y_{kp}, x_{kr}, z_{k1}) \quad 0 \quad 0]$$

Sljedovi prijelaza na poziciji $m_{11}^{(3)}$ jednaki su onima očitanim iz dijagrama stanja.

Istim algoritmom može se odrediti broj različitih sljedova dužine k iz matrice strukture automata D . Element d_{ij} matrice D određuje broj različitih prijelaza između stanja s_i i s_j , a $d_{11}^{(k)}$ opisuje broj različitih sljedova dužine k .

Komunikaciju u sustavu komunicirajućih procesa opisuju sve moguće N -torke sljedova, po jedan slijed iz svakog procesa. Zato je za sustave s više procesa istraživanje komunikacije vrlo složeno. U tom primjeru metoda je praktično primjenjiva samo na cikličke procese s jednim slijedom prijelaza za koje je moguće dobiti jedan slijed i na razini sustava.

Određivanje i ispitivanje svake N -torke općenito upućuje na izuzetno veliku prostornu i vremensku složenost algoritma. Kad se promatra komunikacija između samo dva procesa, složenost se bitno smanjuje.

Međutim, i dalje ostaju ograničenja svih pristupa koji se osnivaju na istraživanju komunikacije obradom sljedova prijelaza, a to su:

- jednostavna primjenjivost samo za sustave s dva procesa
- nemogućnost obrade procesa u kojima ciklusi ne prolaze početnim stanjem (rješenje se postiže ograničavanjem broja prolaza)
- nužan povratak u početno stanje s istom periodičnosti za oba procesa nakon konačnog broja interakcija među njima
- komunikacijski kanal s pogreškama ne može se uvesti neposredno.

2.2.2. Metoda duologa

Karakterističan postupak utemeljen na obradi sljedova prijelaza je metoda duologa, koja će biti predložena jednostavnim primjerom. Duologom se naziva zajednički slijed prijelaza za dva komunicirajuća automata.

Primjer 2.2.

Neka dva procesa P_A i P_B opisana automatima A i B komuniciraju tako da P_A šalje poruku p prema P_B koji je prima i vraća potvrdu r (sl.2.4).

Automat A opisan je stanjima:

- a_0 pripravan za predaju poruke
- a_1 čeka potvrdu
- a_2 primio potvrdu

i prijelazima:

x_p predaja poruke
 y_r prijam potvrde
 z_a unutrašnji prijelaz.

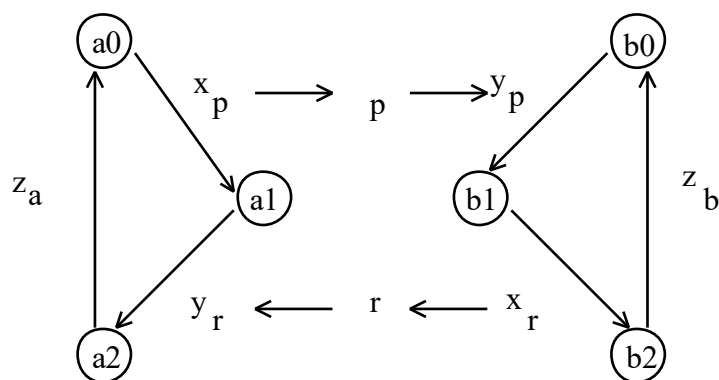
Automat B ima stanja:

b_0 pripravan za prijam poruke
 b_1 primio poruku
 b_2 predao potvrdu

i prijelaze:

y_p prijam poruke
 x_r predaja potvrde
 z_b unutrašnji prijelaz.

To je primjer najjednostavnije komunikacije kojom se usklađuje međudjelovanje procesa porukom i potvrdom. Očito je da je kanal prikriven i o njemu se može zaključivati posredno, tj. promatrajući prijelaze kojima se ostvaruje predaja i prijam informacijskih jedinica.



Slika 2.4. Model komunikacije dva automata

Sljedovi prijelaza mogu se promatrati za svaki automat zasebno, a i za sustav komunicirajućih automata u cjelini. Slijed prijelaza u metodi duologa naziva se unilog. U ovom primjeru svakom automatu odgovara po jedan unilog:

A: (x_p, y_r, z_a)
 B: (y_p, x_r, z_b) .

Duolog opisuje zajedničko ponašanje obaju automata, na primjer:

$A \times B_1: (x_p, y_p, x_r, y_r, z_a, z_b)$.

Međutim potpuni opis ponašanja može se dobiti samo ako se izvedu svi duolozi:

$$\begin{aligned} A \times B_2: & (x_p, y_p, x_r, y_r, z_b, z_a) \\ A \times B_3: & (x_p, y_p, x_r, z_b, y_r, z_a), \end{aligned}$$

a to pokazuje jedno od praktičnih ograničenja metode, jer i pri jednostavnim procesima broj duologa može biti velik. U čemu je razlika izvedenih duologa kada svi pokazuju jednak rezultat - uspješno završenu komunikaciju? Prvi duolog opisuje situaciju u kojoj je proces P_A "brži" od procesa P_B , a u svim ostalima "brži" je P_B . Izmjena informacijskih jedinica osigurava koordinirani rad, jer neovisno o "brzini" procesi počinju i završavaju u početnim stanjima (a_0, b_0) i jednaka im je periodičnost prolaza početnim stanjem. Dakle, uvijek je potrebno provjeriti sve duologe da bi se ustanovila ispravnost komunikacije.

2.3. ISTRAŽIVANJE KOMUNIKACIJE OBRADOM STRUKTURE STANJA

2.3.1. Globalno stanje

Komunikaciju se može istražiti polazeći i od strukture stanja pojedinih procesa iz koje se izvodi skup globalnih stanja sustava, odnosno automat koji opisuje cijeli sustav. Takvo istraživanje komunikacije primjenljivo je i na sustave s više od dva procesa. Također su dopušteni ciklusi koji ne prolaze početnim stanjem, te različita periodičnost procesa. To posljednje nije osobito važno za komunikacijske protokole za koje je karakteristična baš jednaka periodičnost.

Istraživanje se provodi određivanjem skupa globalnih stanja $R(S)$ u koja prelazi sustav iz početnog stanja S_0 . Pritom svako novo stanje nastaje promjenom stanja samo jednog procesa.

Ograničenja takvog pristupa, primjerice broj globalnih stanja i broj poruka istovremeno prisutnih na kanalu isključivo su praktične naravi.

Algoritam je sljedeći:

1. početno stanje sustava je S_0 .
2. odredite skup **svih stanja** $R(S)$ za koja prijelazi nisu analizirani. Ako je $R(S)$ prazan skup postupak je završen.
3. za svako stanje $S_t \in R(S)$ odredite skup **sljedećih stanja** $R'(S)$.
4. svako stanje za koje je $R'(S)$ prazan skup označuje stanje blokiranja sustava. Funkcija $\delta_i(S_i(t), T_i(t))$ nije definirana ni za jedan i . Ne postoji unutrašnji prijelaz ili prijelaz uz predaju informacijske jedinice koji se može izvesti. Skupovi stanja svih kanala $K_S(i, j)$ su prazni skupovi.
5. svako stanje S_t u kojemu se ne može izvesti prijelaz uz prijam poruke izaziva pogrešku prijama i valja ga izbaciti iz $R'(S)$.

6. svako stanje S_t u kojem prijelaz izaziva predaju poruke uz prekoračenje kapaciteta kanala valja izbaciti iz $R'(S)$ ako se kontrola komunikacije provodi potvrdom jer znači pogrešku. Prijelaz izvedite ako se provodi vremenska kontrola komunikacije.
7. dodajte preostale članove skupa $R'(S)$ skupu $R(S)$ ako već nisu uključeni u $R(S)$.
8. ponovite 2.

Struktura podataka koja se obrađuje, izvodi i pamti odgovara dijagramu stanja (grafu izvedbe, stablu izvedbe) skupa procesa čiji se element - grana između dva čvora opisuje obama stanjima, oznakom prijelaza i oznakom procesa u kojemu se prijelaz odvio.

Koncepcija globalnog stanja skupa komunicirajućih procesa nije dovoljna za opisivanje njihova međusobnog odnosa. Zbog toga je dijagram stanja nužno interpretirati i s gledišta svakog procesa - izdvajanjem i provjerom pojedinačnih sljedova stanja i prijelaza.

Najpoznatije metode koje se zasnivaju na obradi strukture stanja su metoda promjene stanja i metoda pridruženih stanja.

2.3.2. Promjena stanja

Postupak promjene, odnosno perturbacije stanja temelji se na konceptu globalnog stanja, tj. zajedničkog stanja sustava komunicirajućih procesa koje se dobiva iz stanja pojedinih procesa. Zajedničko stanje sadrži stanja svih pojedinih procesa u nekom trenutku promatranja.

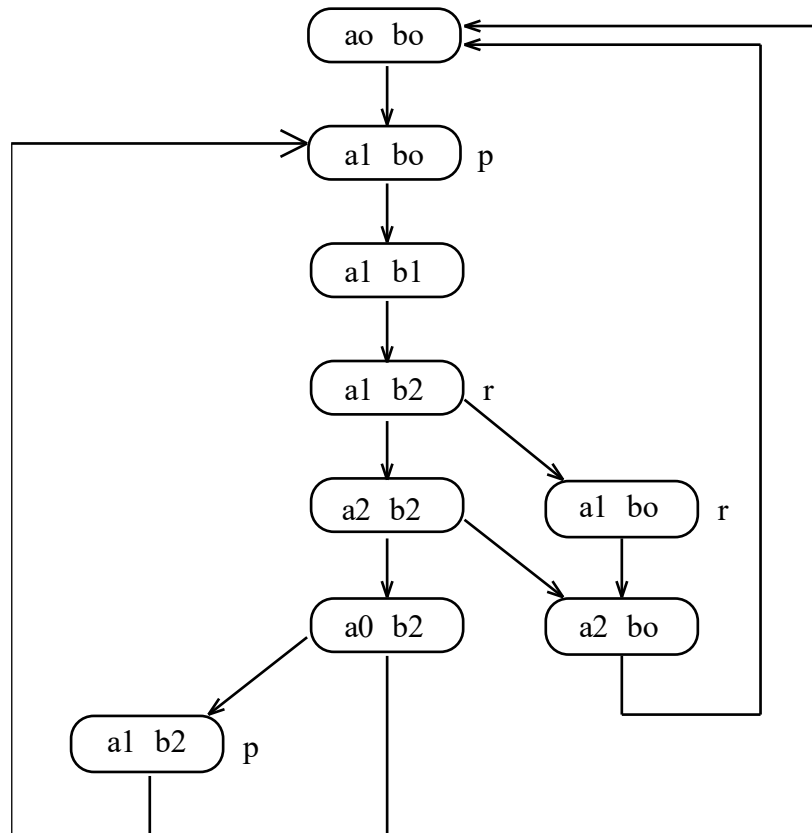
Primjer 2.3.

Za procese koji komuniciraju prema modelu sa slike 2.4 odredite globalni dijagram stanja, uz početno zajedničko stanje (a_0, b_0) .

Ako se primijeni algoritam objašnjen u poglavlju 2.3.1, dolazi se do globalnog dijagrama stanja predloženog slikom 2.5. Uz oznake zajedničkih stanja procesa naveden je i sadržaj (stanje) kanala.

U početnom stanju (a_0, b_0) mogao se izvesti samo prijelaz x_p u automatu A i prijeći u novo stanje $(a_1, b_0)p$ s porukom p na kanalu.

U stanju $(a_1, b_2)r$ mogu nastati dva prijelaza, y_r (prijam potvrde u A) i z_b (unutarnji prijelaz u B). Ta su dva prijelaza paralelni i mogu se izvesti istodobno, svaki u drugom automatu. Paralelni prijelazi uzrokuju razgranjivanje u grafu zajedničkih stanja.



Slika 2.5. Graf stanja sustava komunicirajućih automata

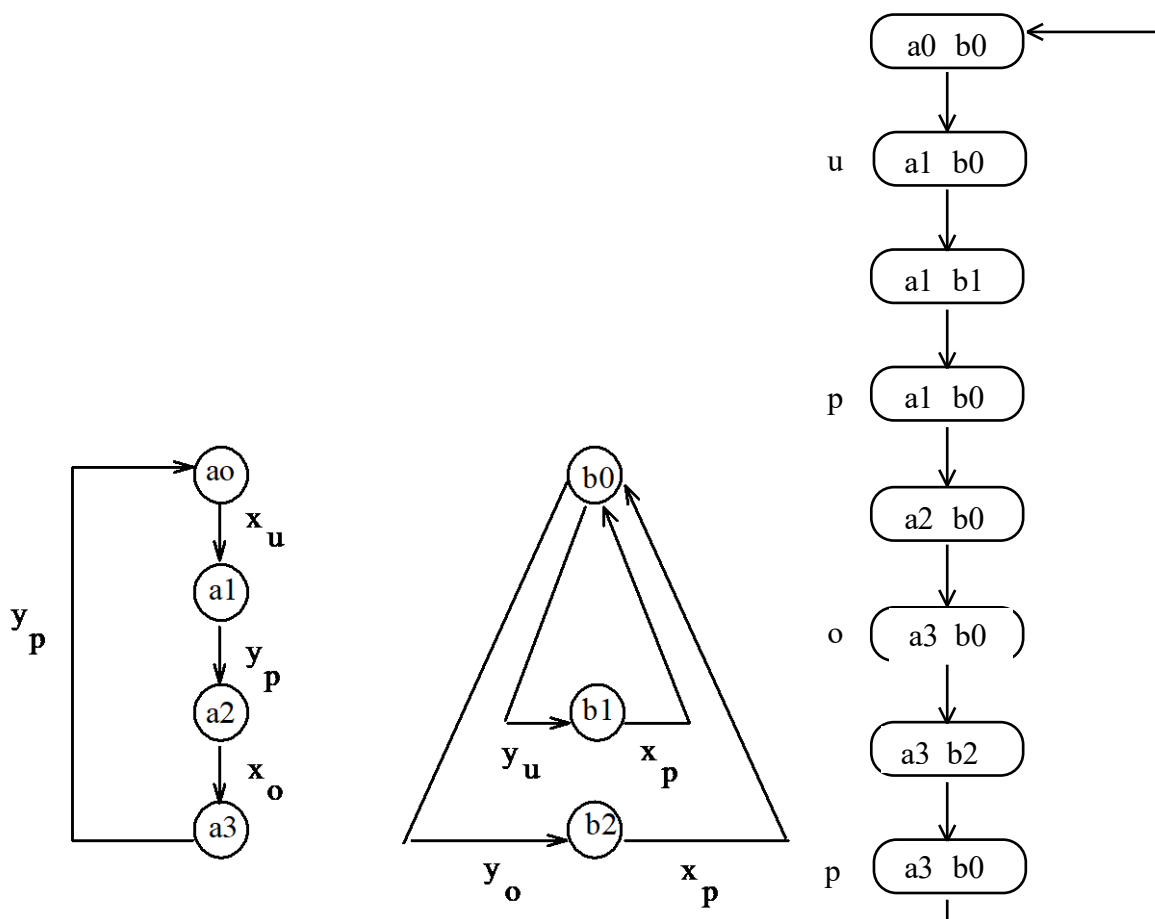
Stanje (a_2, b_0) zajedničko je sljedeće stanje za (a_2, b_2) uz prijelaz z_b i $(a_1, b_0)r$ uz prijelaz y_r . To je ilustracija prikladnosti metode, jer svako novo ostvarivanje komunikacije ne mora izazvati generiranje novog stanja, kao što izaziva nove sljedove prijelaza u metodi duologa.

Automati se obvezno sinkroniziraju u stanju $(a_1, b_0)p$, u kojemu čekaju na prijam potvrde, odnosno poruke. Logika komuniciranja onemogućuje "preveliku" neusklađenost automata.

Različita periodičnost procesa nije prepreka primjeni te metode. Također, metoda promjene stanja može se praktično primijeniti i na više od dva procesa. Zajedničko stanje je složenije, sadrži toliko pojedinačnih stanja koliko ima procesa, ali sva ostala obilježja metode se ne mijenjaju.

Primjer 2.4.

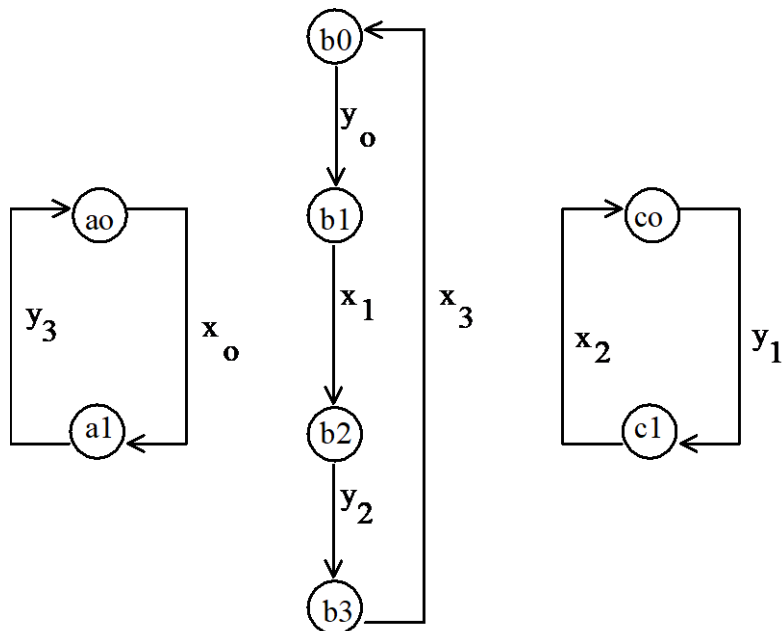
Automat A odašilje automatu B naloge za upisivanje (u) u memoriju i očitavanje (o), a automat B potvrđuje (p) provedbu svake operacije. Automat A prolazi početnim stanjem samo jednom, a B izvede pritom dva prolaza (sl.2.6).



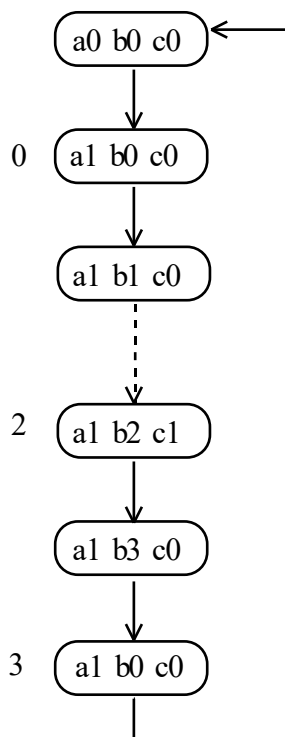
Slika 2.6. Procesi različite periodičnosti

Primjer 2.5.

Razmatra se komunikacija između tri procesa - A , B i C . Proces B posreduje između procesa A i C primajući nalog (0) od A i proslijeđujući ga (1) prema C . Na isti način prenosi i odziv (2) od C prema (3) procesu A . To je ujedno primjer za automat C modeliran komunikacijski kanal između procesa A i B (sl.2.7 i 2.8).



Slika 2.7. Sustav s tri procesa



Slika 2.8. Graf stanja za sustav s tri procesa

Kao treće, istraživanje sljedova prijelaza otežavaju petlje koje ne prolaze početnim stanjem. I za njih se može dokazati prikladnost primjene metode promjene stanja.

Stoga je povoljnije dalji razvoj postupaka zasnivati na obradi strukture stanja i uvesti, osobito zbog mogućnosti analize sustava u prisutnosti kvarova i smetnji, izravni model komunikacijskog kanala.

2.3.3. Pridružena stanja

Pridruženim stanjima smatraju se stanja iz različitih procesa za koja vrijedi sljedeće:

- svakom stanju a_i iz procesa P_A pridruženo je stanje b_j iz procesa P_B ako su a_i i b_j sadržani u istom zajedničkom stanju sustava komunicirajućih procesa
- sva stanja procesa P_B koja su pridružena stanju a_i iz procesa P_A tvore skup stanja pridruženih stanju a_i .

Poznavanje pridruženih stanja pokazuje relativnu usklađenost odvijanja procesa. Proces P_A koji je u stanju a_i "zna" da je proces P_B u jednom od stanja b_j pridruženih stanju a_i ili obratno. Pridružena stanja izvedena iz dijagrama stanja za primjer sa slike 2.5 su:

$$\begin{aligned} a_0 &\leftrightarrow (b_0, b_2) \\ a_1 &\leftrightarrow (b_0, b_1, b_2) \\ a_2 &\leftrightarrow (b_0, b_2) \\ b_0 &\leftrightarrow (a_0, a_1, a_2) \\ b_1 &\leftrightarrow (a_1) \\ b_2 &\leftrightarrow (a_0, a_1, a_2) \end{aligned}$$

U tom primjeru pridružena stanja ne govore "dovoljno" o stanju drugog procesa. Za tri stanja skup pridruženih stanja sadrži sva stanja drugog procesa, a potpuno se prepoznaje samo stanje predajnog procesa "čekanje potvrde" iz stanja "primljena poruka".

Pridružena stanja mogu se izvesti i bez generiranja skupa stanja.