

Grzegorz Bocewicz

Wydział Elektroniki i Informatyki
Politechnika Koszalińska,
Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, Poland,
E-mail: bocewicz@ie.tu.koszalin.pl

Model oceny odporności multimodalnych sieci transportowych

Słowa kluczowe: sieci multimodalne, systemy transportowe, harmonogramowanie cykliczne, odporność na zakłócenia, procesy multimodalne, przestrzeń stanów, cykliczne przebiegi ustalone

Streszczenie: Dynamiczny rozwój infrastruktury komunikacji miejskiej obejmującej linie autobusowe, trolejbusowe, tramwajowe, linie metra, kolei podmiejskiej, itp. składające się na tzw. Multimodalne Sieci Transportowe (MTN - Multimodal Transportation Network) rodzi wiele nowych problemów. Wśród ważniejszych z nich warto wymienić problemy planowania obsługi ruchu pasażerskiego występujące w sytuacjach związanych z awariami elementów infrastruktury transportowej, wypadkami losowymi czy też z obsługą imprez masowych. Wiadomo, że istnienie rozwiązań dopuszczalnych gwarantujących zakładaną przepustowość infrastruktury MTN warunkuje jej odporność na ww. zakłócenia. Rozważany deterministyczny model MTN zakłada strukturę połączonych stacjami przesiadkowymi, pracujących w zamkniętych cyklach linii komunikacji miejskiej, pozwalającą obsługiwać ruch pasażerski na wybranych kierunkach, np. północ-południe. Obsługiwane na tych kierunkach strumienie pasażerów modelowane są jako multimodalne procesy transportowe, tzn. procesy realizowane na odcinkach wykonujących się lokalnych procesów cyklicznych. Wprowadzone miary odporności, umożliwiające ocenę rozważanych wariantów infrastruktury MTN, pozwalają na wyznaczenie warunków spełnienia, których gwarantuje zakładaną jakość obsługi ruchu pasażerskiego. Umożliwiają, zatem zarówno planowanie obsługi pasażerów na wybranych trasach, jak i kształtowanie struktury rozbudowywanej i/lub modernizowanej sieci komunikacji miejskiej.

Robustness of Multimodal Transportation Networks

Keywords: multimodal networks, transportation systems, cyclic scheduling, robustness, multimodal processes, state space, cyclic steady state

Abstract: This paper describes a declarative approach to modeling a multimodal transportation network (MTN) composed of multiple connecting transport modes, such as bus, tram, light rail, subway and commuter rail, where within each mode, service is provided on separate lines or routes. The considered model of a network of multimodal transportation processes (MTPN) provides a framework to address the needs for transportation networks robustness while taking into account their capacity and demand requirements. Therefore the work focuses on evaluation of the network robustness allowing distinguished multimodal processes to continue in order to accomplish trips following an assumed set of multimodal chains connecting transport modes between origins and destinations. Consequently, a solution to the problem of prototyping robust transits on a given multimodal network is implemented and tested. The conditions that guarantee the network robustness, taking into account disruptions of supply and demand as well as operational control, are provided. The aim of investigations is to provide a tool for evaluating the robustness of a network of multimodal transportation processes as well as different travel modes through a transportation network.

1. Wprowadzenie

Systemy komunikacji miejskiej obejmujące różne media (linie metra, linie tramwajowe, trolejbusowe, autobusowe, a także linie kolejki podmiejskiej) tworzą Multimodalne Sieci

Transportu pasażerskiego (MTN - Multimodal Transportation Network), których liczba i trasy poszczególnych linii oraz ilość obsługujących je jednostek transportowych, a także związane z nimi ograniczenia narzucane na przepustowość, częstotliwość obsługi, dopuszczalną szybkość itp., determinują różne zachowania systemu, a w konsekwencji różne efektywności realizacji różnych wariantów podróży. Z każdym wariantem podróży skojarzony jest proces multimodalny reprezentujący strumień pasażerów transferowanych za pośrednictwem różnych modów (środków transportu – procesów lokalnych).

Problemy planowania procesów multimodalnych występujących m.in. w planowaniu produkcji, łańcuchów dostaw, transportu towarów i/lub pasażerów itp. [1, 3, 5, 6, 8, 15, 16, 20], a w szczególności problemy związane z ich marszrutowaniem i harmonogramowaniem, należą do problemów NP-trudnych [7, 12].

Problemy planowania MTN dotyczą zwykle maksymalizacji przepustowości (liczonej, jako liczba transportowanych pasażerów na jednostkę czasu) danego procesu multimodalnego (lub ich zbioru) i wiążą się z minimalizacją cyklu pracy lokalnych procesów cyklicznych reprezentujących różne rodzaje środków transportu (np. linie tramwajowe, autobusowe, itp.), umożliwiających realizację wykorzystywanych przez nie procesów multimodalnych. Równie istotną rolę odgrywają zagadnienia akcentujące wpływ struktury MTN na jej odporność w sytuacjach związanych z występowaniem zakłóceń np. związanych z awariami sieci trakcyjnych, stacji przesiadkowych, jednostek taboru, itp.

W przedstawionym kontekście, niniejsza praca podejmuje problem wyznaczania struktury MTN o gwarantowanej odporności na wybrane rodzaje zakłóceń, w szczególności gwarantującej utrzymanie przepustowości transportu pasażerskiego na zakładanym poziomie. Szczególna uwaga poświęcona została zakłóceniom prowadzącym do wystąpienia blokad (skutkujących m.in. zatorami drogowymi). Zakładając, że znane są środki transportu, czasy przejazdu pomiędzy kolejnymi stacjami danej linii oraz mechanizmy ich synchronizacji na stacjach przesiadkowych poszukiwany jest rozkład jazdy poszczególnych linii MTN, gwarantujący najkrótszy czas transportu pasażerów na zadanej trasie.

W literaturze przedmiotu [9, 10, 13, 14], odczuwalny jest brak pozycji podejmujących wątek badań problemów harmonogramowania procesów multimodalnych uwzględniających ograniczenia narzucane przez odporność MTN. Na użytek dalszych rozważań przyjęto, że sieci MTN mogą być modelowane, jako Systemy Współbieżnych Procesów Cyklicznych (SCCP – Systems of Concurrent Cyclic Processes) [2, 4]. Znane podejścia do harmonogramowania SCCP wykorzystują metody programowania matematycznego i metody max-plus algebry [10, 18], techniki programowania z ograniczeniami [3, 4], sieci Periego [17], itp. Wykorzystywane w nich modele umożliwiają ocenę zachowań procesów lokalnych (np. reprezentujących środki transportu publicznego) w kontekście możliwości ich cyklicznej realizacji, nie pozwalają jednak na ocenę odporności procesów multimodalnych realizowanych na tych procesach. Niniejsza praca koncentruje się więc na problemie oceny odporności na zakłócenia MTN i poszukiwaniu warunków gwarantujących zadany poziom odporności tak SCCP, jak i realizowanych na nich procesów multimodalnych. Praca stanowi kontynuację prac [2, 3, 4, 5, 19].

Rozdział 2 wprowadza w koncepcję MTN i ich reprezentację w terminach systemów współbieżnych procesów cyklicznych. Wprowadza również pojęcie odporności sieci na zakłócenia w realizacji dostaw, w szczególności na zakłócenia strukturalne i zakłócenia funkcjonalne (związane z ich zachowaniem). Rozdział 3 z kolei, przedstawia sformułowanie problemu poszukiwania warunków gwarantujących zwiększenie odporności sieci MTN. Rozdział 4 wyprowadza te warunki, a kolejne rozdziały 5 i 6 opisują wyniki eksperymentu weryfikującego proponowane warunki oraz wnioski z nich wynikające.

2 Multimodalna Sieć Transportowa

Multimodalna sieć transportowa przykładowego systemu miejskiego transportu publicznego może być modelowana w kontekście obsługi pasażerskiej oferowanej przez linie autobusowe i tramwajowe oraz linie metra. Linie te tworzą cykliczne trasy wykorzystujące wspólne stacje przesiadkowe. Środki transportu obsługujące poszczególne linie jak i marszruty związanych z nimi tras pasażerów traktowane, jako pewna kompozycja ich różnych fragmentów, składają się na strukturę procesów odpowiednio lokalnych i multimodalnych. Pozwala to traktować (modelować) multimodalną sieć transportową, jako sieć współbieżnie realizowanych procesów cyklicznych.

2.1. Struktura Sieci Procesów Multimodalnych

Multimodalna sieć transportowa rozumiana jako sieć, przemieszczających się wzdłuż cyklicznych tras, środków transportu (autobusów i tramwajów – patrz rys. 1a), może być modelowana jako System Współbieżnych Procesów Cyklicznych, patrz rys. 1b). W sieci tej pasażerowie przemieszczają się (podróżują) wzdłuż dwóch ustalonych tras: północ-południe (linia niebieska - mP_1) i zachód-wschód (linia czerwona - mP_2). Rozważane trasy wyznaczające marszruty procesów multimodalnych, skompletowane są z fragmentów linii transportu publicznego (np. autobusowych i tramwajowych). W rozważanym przypadku do transportu pasażerów wzdłuż wyznaczonych tras wykorzystywane są dwie linie autobusowe (P_2, P_4) oraz trzy linie tramwajowe (P_1, P_3, P_5).

Przyjmuje się, że klasa SCCP obejmuje dwa rodzaje procesów:

- **procesy lokalne** (reprezentujące środki transportu publicznego – P_1, P_2, P_3, P_4, P_5), których operacje są cyklicznie powtarzane wzdłuż ustalonych marszrut (sekwencji kolejno wykorzystywanych zasobów). Dla systemu z rys. 1b) linia obejmująca stacje R_1, R_2, R_8, R_9 obsługiwana jest przez dwa autobusy, modelowane przez dwa strumienie o wspólnych marszrutach: P_2, P'_2 . Marszruty procesów lokalnych są definiowane następująco:

$$p_1 = (R_7, R_2, R_3), p_2 = p'_2 = (R_1, R_2, R_8, R_9), p_3 = (R_1, R_5, R_4), p_4 = (R_3, R_4, R_6), \\ p_5 = (R_8, R_{10}, R_9),$$

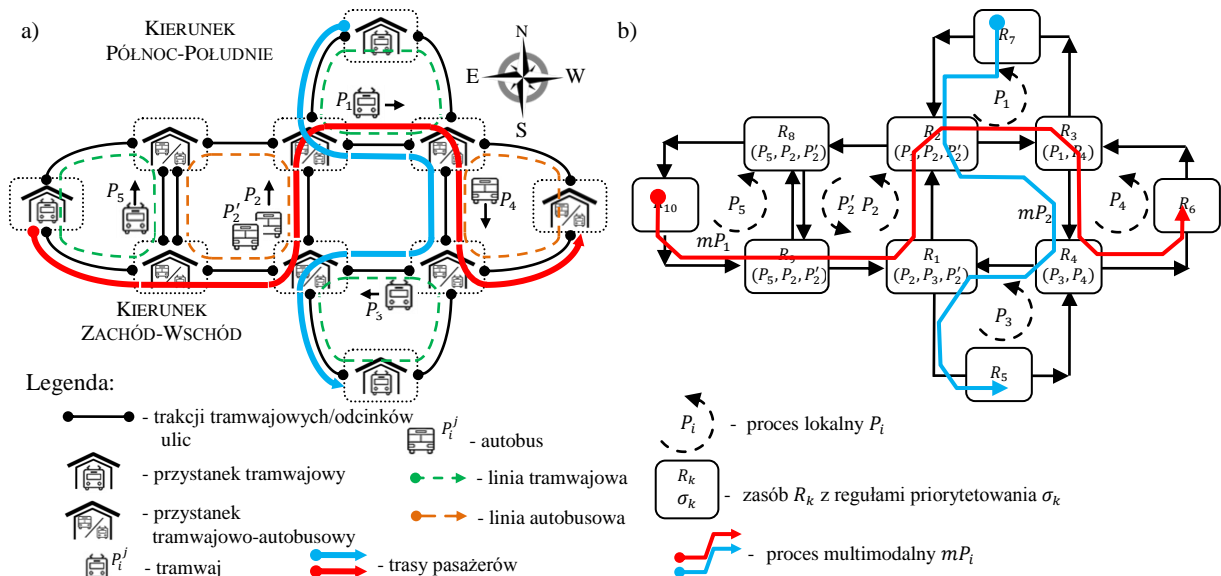
gdzie i -ta operacja (realizowana na zasobie R_k) procesu P_j (lub jego strumienia) jest oznaczana jako $o_{i,j}$, z kolei $t_{i,j}$, oznacza czas jej wykonywania.

- **procesy multimodalne** (mP_1, mP_2) reprezentujące strumienie pasażerów. Operacje procesów multimodalnych realizowane są cyklicznie wzdłuż marszrut będących kompozycją fragmentów marszrut procesów lokalnych, reprezentujących środki wykorzystywane przez pasażerów do przemieszczania się wzdłuż danej trasy. Dla systemu z rys. 1b) marszruty procesów multimodalnych są definiowane następująco:

$$mP_1 = ((R_{10}, R_9), (R_9, R_1, R_2), (R_2, R_3), (R_3, R_4, R_6)), \\ mP_2 = ((R_7, R_2, R_3), (R_3, R_4), (R_4, R_1, R_5)),$$

gdzie: i -ta operacja (realizowana na zasobie R_k) procesu multimodalnego mP_j oznaczana jest przez $mo_{i,j}$ a $mt_{i,j}$ - oznacza czas jej wykonywania.

Operacje tego typu procesów realizowane są na dwóch rodzajach zasobów: *własnych* (z których każdy jest wykorzystywany przez tylko jeden proces danego rodzaju - R_5, R_6, R_7, R_{10}) i *współdzielonych* (z których każdy jest wykorzystywany przez więcej niż jeden proces danego rodzaju - $R_1 - R_4, R_8, R_9$).



Rys. 1 Przykład Multimodalnej sieci transportowej a) oraz odpowiadający jej model SCCP b)

Procesy lokalne wykorzystują zasoby dzielone w trybie wzajemnego wykluczania tzn. w danym momencie na zasobie może być realizowana operacja tylko jednego procesu (mogą być natomiast realizowane jednocześnie operacje procesów różnego rodzaju: lokalnego i multimodalnego).

Dostęp do zasobów współdzielonych procesów lokalnych, odbywa się w kolejności ustalonej przez reguły priorytetowania Θ . Przyjmuje się, że $\Theta = \{\sigma_1, \dots, \sigma_k, \dots, \sigma_{lk}\}$, gdzie: σ_k – jest sekwencją, której elementy określają porządek, z jakim procesy lokalne otrzymują dostęp do zasobu R_k . W przypadku systemu z rys. 1b) dostęp do zasobów współdzielonych jest określony przez następujące reguły:

$$\sigma_1 = (P_2, P_3, P_2'), \sigma_2 = (P_1, P_2, P_2'), \sigma_3 = (P_1, P_4), \sigma_4 = (P_3, P_4), \sigma_8 = (P_5, P_2, P_2'), \\ \sigma_9 = (P_5, P_2, P_2').$$

Rozpoczęcie kolejnej operacji procesu następuje natychmiast po zakończeniu operacji bieżącej pod warunkiem, że zasób niezbędny do jej wykonania jest dostępny (nie jest zajęty a odpowiednie reguły priorytetowania zezwalają na dostęp do zasobu). W czasie oczekiwania na zajęty zasób, proces nie zwalnia zasobu przydzielonego do realizacji poprzedniej operacji [4]. Ponadto przyjmuje się, że procesy są niewyłączalne, a czasy i kolejność wykonywania operacji przez procesy nie zależą od zakłóceń zewnętrznych.

Przedstawione parametry składają się na strukturę SCCP determinującą jego zachowanie. Formalnie, struktura SCCP jest definiowana jest jako następująca n -tka [4]:

$$SC = ((R, SL), SM), \quad (1)$$

gdzie:

$R = \{R_k \mid k = 1, \dots, lk\}$ – zbiór zasobów,

$SL = (P, U, O, T, \Theta)$ – struktura procesów lokalnych, gdzie:

$P = \{P_i \mid i = 1 \dots ln\}$ – zbiór procesów lokalnych, P_i – i -ty proces,

$U = \{p_i = (p_{i,1}, \dots, p_{i,j}, \dots, p_{i,lr(i)}) \mid i = 1 \dots ln\}$ – zbiór marszrut procesów lokalnych, p_i – i -ta marszruta, $p_{i,j} \in R$ – zasób wymagany przy realizacji j -tej operacji procesu P_i ,

$O = \{O_i = (o_{i,1}, \dots, o_{i,j}, \dots, o_{i,lr(i)}) \mid i = 1 \dots ln\}$ – zbiór sekwencji operacji, $o_{i,j}$ – j -ta operacja procesu P_i ,

$T = \{T_i = (t_{i,1}, \dots, t_{i,j}, \dots, t_{i,lr(i)}) \mid i = 1 \dots ln\}$ – zbiór sekwencji czasów wykonania operacji, $t_{i,j}$ – czas wykonania operacji $o_{i,j}^h$,

$\Theta = \{\sigma_k = (s_{k,1}, \dots, s_{k,d}, \dots, s_{k,lh}) \mid k = 1 \dots lk\}$ – zbiór reguł priorytetowania, σ_k – reguła priorytetowania dla zasobu R_k , $s_{k,d}$ – proces lokalny, lh – długość reguły σ_k ,
 $SM = (mP, mU, mO, mT)$ – struktura procesów multimodalnych, gdzie:
 $mP = \{mP_i \mid i = 1 \dots lw\}$ – zbiór procesów multimodalnych mP_i , lw – liczba procesów
 $mU = \{mp_i = (mp_{i,1}, \dots, mp_{i,j}, \dots, mp_{i,lm(i)}) \mid i = 1 \dots lw\}$ – zbiór marszrut procesów lokalnych, mp_i – i -ta marszruta,
 $mO = \{mO_i^h = (mo_{i,1}, \dots, mo_{i,j}, \dots, mo_{i,lm(i)}) \mid i = 1 \dots lw\}$ – zbiór sekwencji operacji, $mo_{i,j}$ – j -ta operacja procesu mP_i ,
 $mT = \{mT_i = (mt_{i,1}, \dots, mt_{i,j}, \dots, mt_{i,lm(i)}) \mid i = 1 \dots lw\}$ – zbiór sekwencji czasów wykonania operacji, $mt_{i,j}$ – czas wykonania operacji $mo_{i,j}$.

2.2. Zachowanie Sieci Procesów Multimodalnych

W systemach współbieżnych procesów cyklicznych, zachowanie jest zwykle reprezentowane [2, 3, 4], w postaci harmonogramów określających momenty rozpoczęcia wszystkich realizowanych w nich operacji. Przykładem tego jest harmonogram z rys. 2b) determinujący sposób realizacji procesów struktury SC z rys. 2a).

Harmonogram ten ilustruje **zachowanie cykliczne** tzn. takie, w którym kolejne stany systemu osiągalne są ze stałym okresem (operacje procesów lokalnych i multimodalnych powtarzane są z okresem: $\alpha = 7$ u.j.t.).

Oznacza to, że każde zachowanie jest rozumiane jako sekwencja występujących po sobie stanów (kolejnych alokacji procesów oraz kolejno zmieniających się, zgodnie z regułami Θ , praw dostępu). W przypadku harmonogramu z rys. 2b jest to sekwencja 7 stanów: $S^0, S^1, S^2, \dots, S^6$. Formalnie **stan SCCP** S^r definiowany jest następująco [4]:

$$S^r = (Sl^r, mS^r), \quad (2)$$

gdzie Sl^r oznacz r -ty stan procesów lokalnych:

$$Sl^r = (A^r, Z^r, Q^r),$$

gdzie:

$A^r = (a_1^r, a_2^r, \dots, a_k^r, \dots, a_{lk}^r)$ – **alokacja** procesów lokalnych w r -tym stanie, $a_k^r \in P \cup \{\Delta\}$; $a_k^r = P_i$ – alokacja oznaczająca, że zasób R_k jest zajęty przez proces P_i , $a_k^r = \Delta$ – oznacza, że zasób R_k jest wolny.

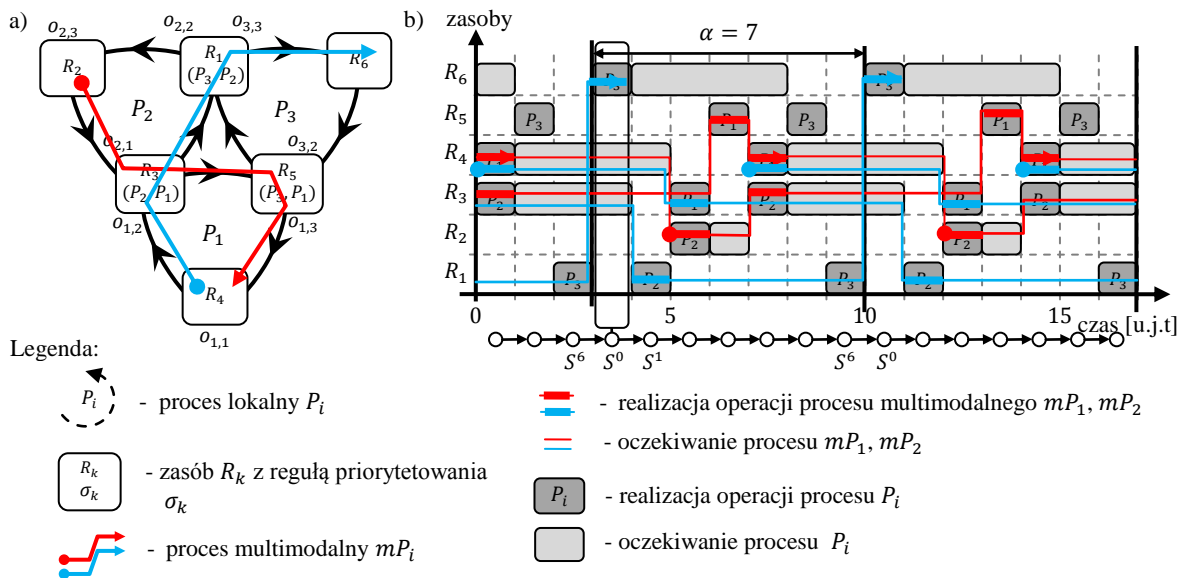
$Z^r = (z_1^r, z_2^r, \dots, z_k^r, \dots, z_m^r)$ – **sekwencja semaforów** r -tego stanu, $z_k^r \in P$ – **semafor** określający proces (jeden z elementów reguły σ_k^0), który ma prawo dostępu do zasobu R_k w następnej kolejności; tj. $z_k^r = P_i$ oznacza, że w następnej kolejności dostęp do zasobu R_k ma proces P_i .

$Q^r = (q_1^r, q_2^r, \dots, q_k^r, \dots, q_m^r)$ – **sekwencja indeksów semaforów** r -tego stanu, q_k^r – **indeks** determinujący pozycję wartości semafora z_k^r w regule priorytetowania σ_k^0 , $z_k^r = s_{k,(q_k^r)}$, $q_k^r \in \mathbb{N}$. Na przykład jeśli semafor z_2^r wskazuje na proces P_1 : $z_2^r = P_1$, który jest drugim elementem reguły priorytetowania σ_2^0 to $q_2^r = 2$.

mS^r – oznacza r -ty stan procesów multimodalnych:

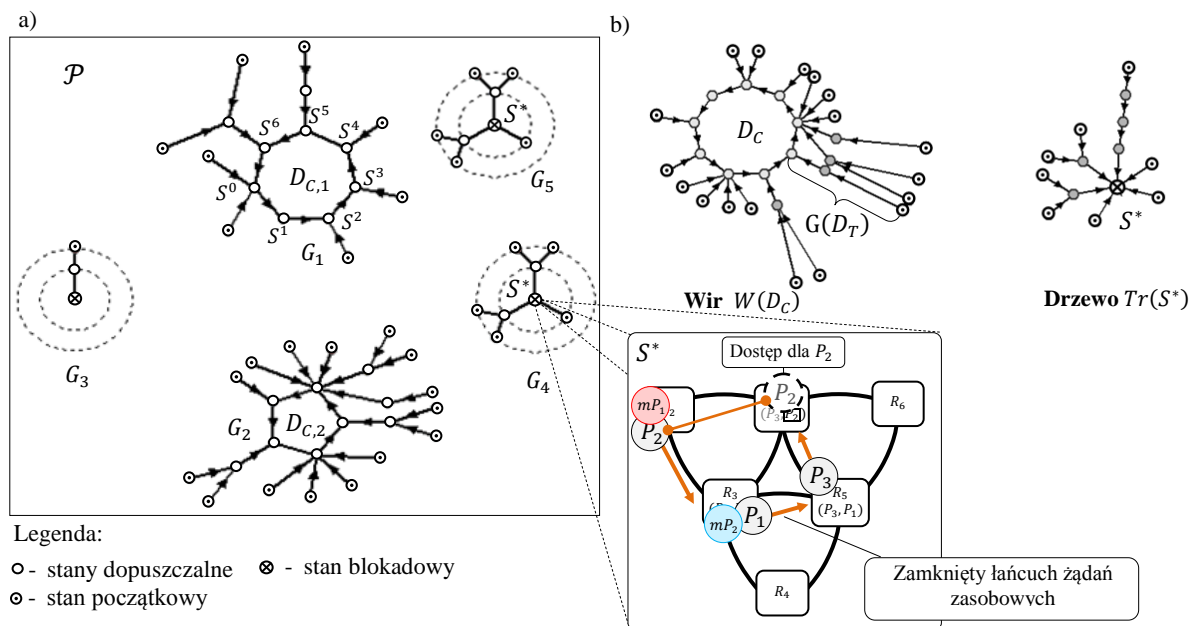
$$mS^r = (mA_1^r, \dots, mA_i^r, \dots, mA_l^r),$$

gdzie: $mA_i^r = (ma_{i,1}^r, ma_{i,2}^r, \dots, ma_{i,k}^r, \dots, ma_{i,m}^r)$ – sekwencja alokacji procesów multimodalnych w r -tym stanie, $ma_{i,k}^r \in \{mP_i, \Delta\}$, $ma_{i,k}^r = mP_i$ – oznacza, że zasób R_k jest zajęty przez proces mP_i , $ma_{i,k}^r = \Delta$ – oznacza, że zasób R_k jest wolny.



Rys. 2. Przykład struktury SCCP a) oraz osiągalnego w min harmonogramu cyklicznego b)

Zachowania systemu scharakteryzowane różnymi sekwencjami kolejno osiągalnych stanów S^r (2) można zilustrować w postaci graficznej, jako **przestrzeń stanów \mathcal{P}** . Przykład ilustrujący tę możliwość dla systemu z rys. 2a), przedstawia rys. 3a). Przyjmując teorio-grafową interpretację przestrzeni \mathcal{P} odpowiadający jej digraf reprezentuje para: $\mathcal{P} = (\mathbb{S}, \mathbb{E})$, gdzie: \mathbb{S} – oznacza zbiór stanów dopuszczalnych SCCP [4], $\mathbb{E} \subseteq \mathbb{S} \times \mathbb{S}$ – oznacza zbiór łuków reprezentujących przejścia między stanami SCCP (przejścia odbywają się zgodnie z funkcją $S^f = \delta(S^e)$ opisaną w [4]).



Rys. 3 Przestrzeń stanów \mathcal{P} dla systemu o strukturze z rys 2a), oraz jej podstawowe komponenty b)

Zachowania cykliczne przedstawione na rys. 3a) związane są z występowaniem w przestrzeni \mathcal{P} podgrafów cyklicznych (np. digraf G_1). Rozpoczęcie realizacji procesów z dowolnego stanu digrafu G_1 skutkuje osiągnięciem (na przykład za pośrednictwem stanów przejściowych) stanów należących do cyklu (stany oznaczone kolorem niebieskim). Zbiór takich stanów nazywany jest **cyklicznym przebiegiem ustalonym**.

Formalnie, cykliczny przebieg ustalony jest sekwencją $D_C = (S^{d_1}, \dots, S^{d_i}, S^{d_{i+1}}, \dots, S^{d_{ld}})$, różnych stanów dopuszczalnych: $S^{d_i}, S^{d_{i+1}} \in \mathbb{S}$, w której każda kolejna para stanów spełnia wyrażenie: $S^{d_{i+1}} = \delta(S^{d_i})$, $i = 1 \dots (ld - 1)$ oraz $S^{d_1} = \delta^{lp}(S^{d_{ld}})$.

Stany przestrzeni \mathcal{P} prowadzące do wspólnego przebiegu cyklicznego D_C składają się na spójny digraf nazywany **wirem** $W(D_C)$ (rys. 3b).

$$W(D_C) = G(D_C) \dot{\cup} \left(\bigcup_{\forall D_T \in DT(D_C)} G(D_T) \right), \quad (3)$$

gdzie:

$G(D_C)$ – digraf, na który składają się stany przebiegu D_C ,

$G(D_T)$ – digraf, na który składają się stany przebiegu przejściowego D_T prowadzącego do przebiegu D_C , $D_T \in DT(D_C)$, gdzie: $DT(D_C)$ – zbiór wszystkich przebiegów przejściowych prowadzących do D_C ,

$G_1 \dot{\cup} G_2$ – suma digrafów (Ross i Wrigh 2008) $G_1 = (V_1, E_1)$ i $G_2 = (V_2, E_2)$: $G_1 \dot{\cup} G_2 = (V_1 \cup V_2, E_1 \cup E_2)$, $\bigcup_{G_i \in G^*} G_i = G_1 \dot{\cup} G_2 \dot{\cup} \dots \dot{\cup} G_a$, dla $G^* = \{G_1, G_2, \dots, G_a\}$.

Przykład wiru został przedstawiony na rys. 3b). Jak widać, rozpoczęcie realizacji procesów z jakiegokolwiek stanu należącego do tego wiru prowadzi, w konsekwencji, do przebiegu cyklicznego D_C .

Oczywiście nie każdy stan przestrzeni \mathcal{P} prowadzi do takiego przebiegu. Większość z nich prowadzi do stanów blokadowych (oznaczanych symbolem \otimes), które w praktyce oznaczają zatrzymanie systemu w wyniku wystąpienia zamkniętego łańcucha żądań zasobowych.

Przykład blokady (spowodowanej powstaniem zamkniętego łańcucha żądań zasobowych) został zilustrowany na rys. 3 a). W stanie S^* proces P_2 oczekuje na zwolnienie zasobu R_3 przez proces P_1 , proces P_1 oczekuje na zwolnienie zasobu R_5 przez proces P_3 , z kolei proces P_3 oczekuje na dostęp do zasobu R_1 . Dostęp do zasobu R_1 jest możliwy tylko dla procesu P_2 , który nie może do niego dotrzeć gdyż jest zablokowany przez P_1 . W praktyce z tego typu sytuacją mamy do czynienia, gdy autobusy (tramwaje) ustawiają się w innej kolejności niż wymagana na danej stacji kolejność ich obsługi. W rozważanym przypadku autobus P_2 obsługiwany jako pierwszy jest ostatni w kolejce. Blokady tego typu prowadzą do zatrzymania pracy systemu.

Stany prowadzące do blokady składają się na drugi rodzaj digrafów zachowań, tzw. **drzew** (rys. 3b):

$$Tr(S^*) = \bigcup_{\forall D_T \in DT(S^*)} G(D_T), \quad (4)$$

gdzie:

$G(D_T)$ – digraf, na który składają się stany przebiegu przejściowego D_T prowadzącego do stanu blokadowego S^* , $D_T \in DT(S^*)$, gdzie: $DT(S^*)$ – zbiór wszystkich przebiegów przejściowych prowadzących do stanu blokadowego S^* .

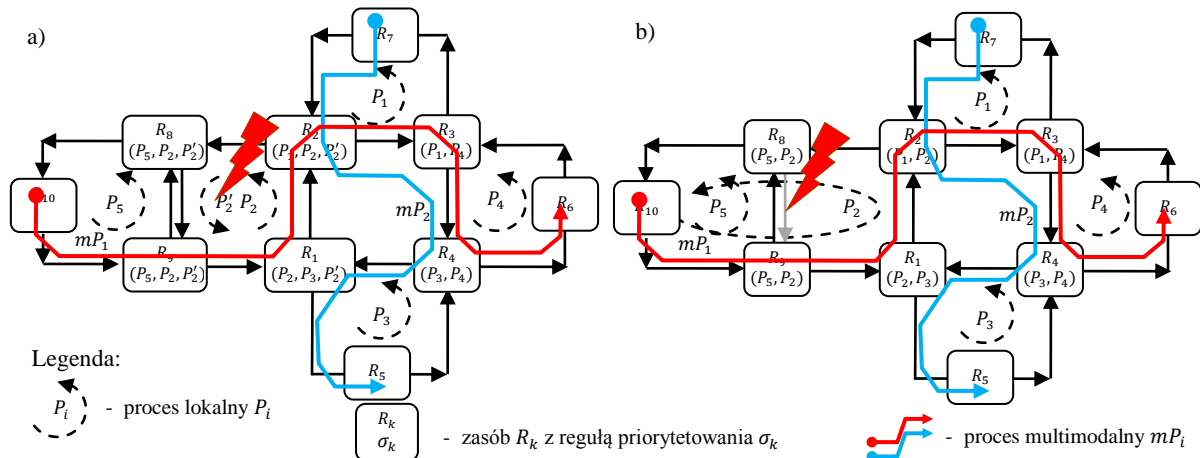
Wiry i drzewa stanowią dwa podstawowe komponenty przestrzeni stanów \mathcal{P} . Wiry umożliwiają ocenę istnienia cyklicznych przebiegów ustalonych (determinujących bezkolizyjny i bezblokadowy transport pasażerów w MTN) z kolei drzewa pozwalają określić stany „niebezpieczne” prowadzące do blokad (np. zatorów ulicznych).

2.3. Zakłócenia w realizacji procesów

Wyznaczanie przestrzeni stanów jest przedmiotem szeregu badań [2, 3, 4]. Jedną z własności rozważanych SCCP jest to, że raz osiągnięte ustalone zachowanie (przebieg cykliczny D_C

gwarantujący spełnienie żądań użytkownika, blokada S^*) nie ulega zmianie aż do momentu zmiany warunków pracy systemu (np. zamiany parametrów struktury SC). Zmiana tego typu warunków może być spowodowana szeregiem zewnętrznych zakłóceń. Wśród zakłóceń w realizacji procesów można wyróżnić zakłócenia dwojakiego rodzaju:

- zakłócenia strukturalne: zakłócenia dotyczące zamiany struktury SC obejmujące m.in.: dodanie lub usunięcie procesu (np. nowy autobus) – patrz rys. 4a), zmiany marszrut procesów spowodowane uszkodzeniem linii transportowych (np. trakcji tramwajowych/odcinków ulic) – patrz rys. 4b), uszkodzeń zasobów (np. stacji autobusowych), itp.
- zakłócenia w zachowaniu: zakłócenia dotyczące zamiany sposobu realizacji procesów (zakłócenia stanu systemu S^r) obejmujące:
 - o opóźnienia w trakcie realizacji operacji (zmiana czasu trwania operacji $t_{i,j}$). Systemy SCCP poddane tego typu zakłóceniom charakteryzują się umiejętnością samodzielnego powrotu do przebiegów cyklicznych [5],
 - o zakłócenia w procesie sterowania, prowadzące do zmian aktualnych praw dostępu do zasobów współdzielonych (zmiana wartości semaforów Z^r i związanych z nimi indeksów Q^r). Do tego typu zakłóceń należy zaliczyć awarię sygnalizacji świetlnej, semaforów kolejowych, itp.



Rys. 4 Przykład zakłóceń strukturalnych w systemie z rys.1, uszkodzenie strumienia P_2 a), uszkodzenie połączenia $R_8 - R_9$ b)

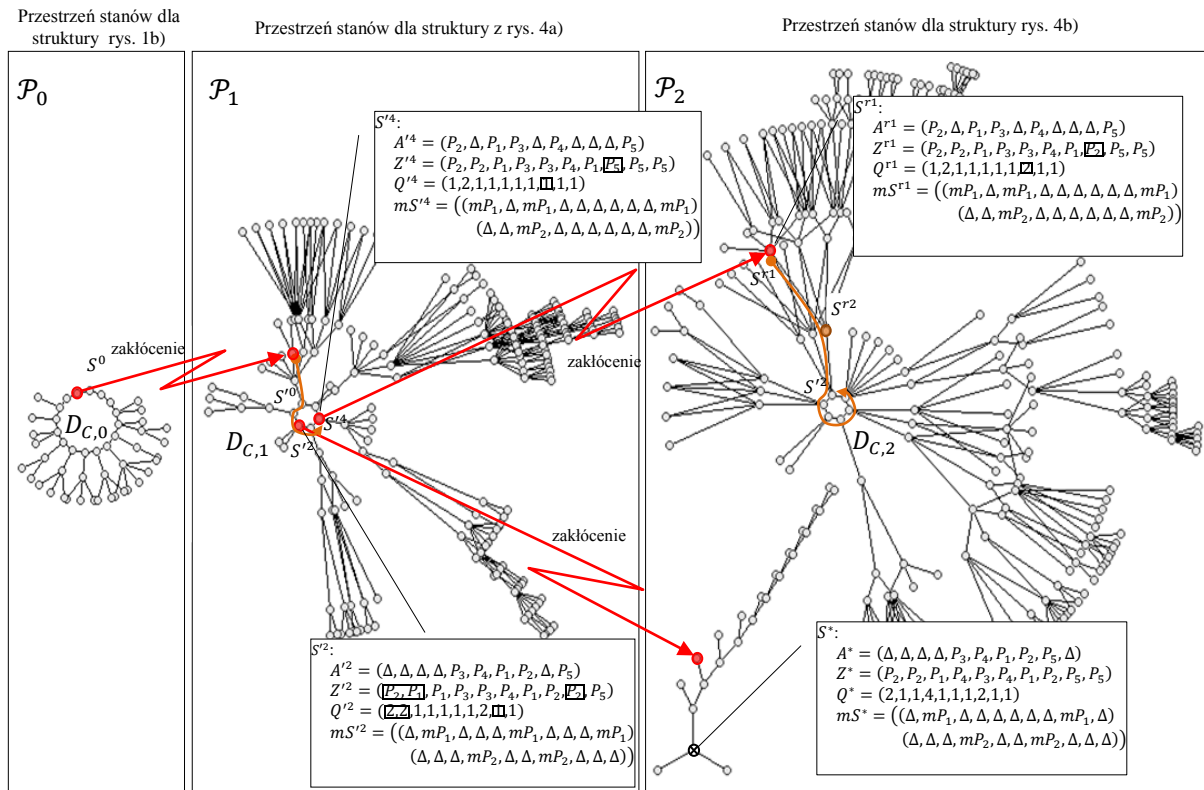
Przykładowe zakłócenia strukturalne zostały przedstawione na rys. 4. Zakłócenia polegały na usunięciu strumienia P_2 (autobus linii P_2 doznał awarii) – patrz rys. 4a) a następnie uszkodzeniu połączenia między zasobami R_8 i R_9 - patrz rys. 4b). W wyniku uszkodzenia zmianie uległa marszruta procesu lokalnego P_2 na: $p_2 = (R_1, R_2, R_8, R_{10}, R_9)$ - w praktyce oznacza to, że autobus P_2 zmienił trasę kursowania.

W sytuacji pojawienia się takiej serii zakłóceń powstaje pytanie, czy uda się utrzymać cykliczne zachowanie systemu?

Na rys. 5 przedstawiono przestrzenie stanów $\mathcal{P}_0, \mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2$ generowane przez struktury SCCP ulegającego kolejnym uszkodzeniom. W przypadku pierwszego uszkodzenia zmiana przestrzeni stanów z \mathcal{P}_0 na \mathcal{P}_1 powoduje przejście systemu ze stanu S^0 do S^{t1} , który prowadzi do przebiegu cyklicznego $D_{C,1}$. Zakłócenia tego typu (usuwanie procesów), na ogół, nie zmieniają cyklicznego charakteru przebiegu procesów. Zakłócenia tego typu były przedmiotem badań opisywanych w [5].

W przypadku kolejnego zakłócenia (usunięcie połączenia $R_8 - R_9$) zachowanie systemu nie jest już tak oczywiste. Na rys. 5 przedstawiono dwa potencjalne scenariusze dalszej pracy systemu, zależne od stanu, w którym wystąpiło zakłócenie. Wystąpienie zakłócenia jest

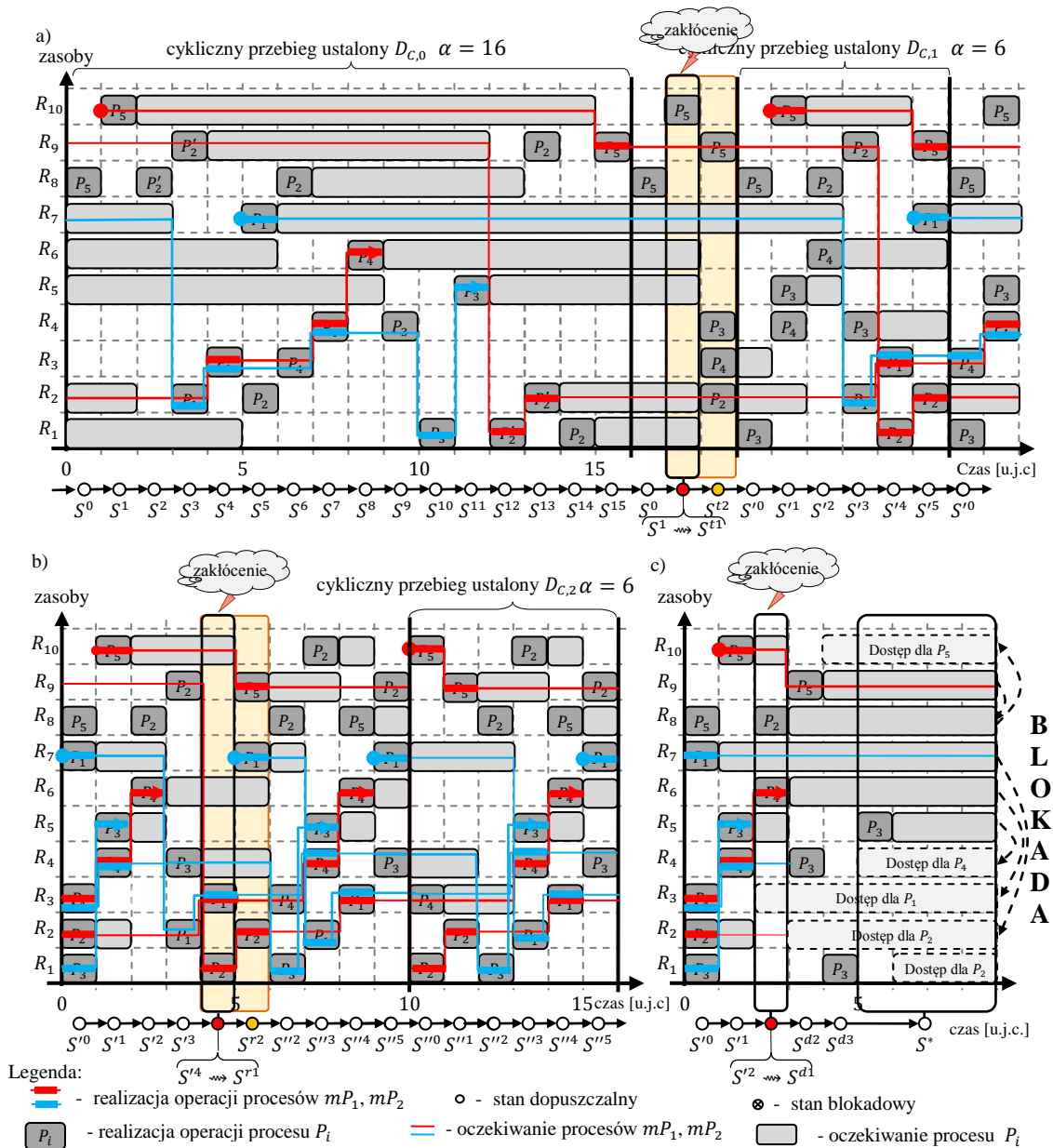
równoznaczne ze zmianą przestrzeni stanów na \mathcal{P}_2 , w której stan S^{i4} przechodzi w stan S^{r1} , a stan S^{i2} przechodzi w stan S^{d1} (w wyniku zmiany marszruty procesu P_2 zmianie ulegają niektóre wartości semaforów i indeksów – oznaczone zostały one ramką \square).



Rys. 5 Zmiana przestrzeni stanów spowodowana zakłóceniami z rys. 4

Jak łatwo zauważyć wystąpienie zakłócenia w stanie S^{i4} skutkuje zaburzeniem pracy systemu w postaci przebiegu przejściowego (stany S^{r1} , S^{r2}) prowadzącego do nowego przebiegu cyklicznego $D_{C,2}$. Z kolei zakłócenie w stanie S^{i2} (patrz rys. 6c) skutkuje przebiegiem prowadzącym do blokady S^* . Haromonogramy ilustrujące opisane powyżej przejścia zostały przedstawione na rys. 6.

Jak widać, wystąpienie zakłócenia strukturalnego w SCCP powoduje zamianę przestrzeni stanów i co za tym idzie aktualnego stanu systemu. Dalsze zachowanie systemu zależy od tego czy nowo osiągnięty stan jest częścią wiru (prowadzącego do cyklu – jak S^{r1}) czy drzewa (prowadzącego do blokady – jak S^{d1}).



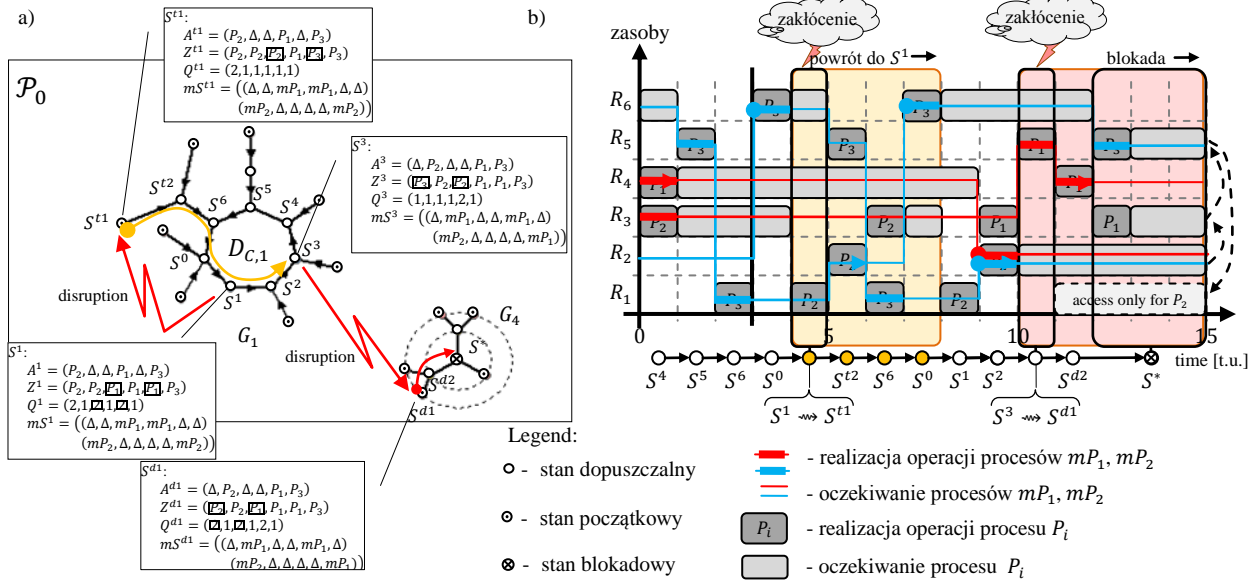
Rys. 6. Harmonogramy ilustrujące zmiany zachowań SCCP spowodowane zakłóceniami strukturalnymi: prowadzące do cyklicznego przebiegu ustalonego – zakłócenie z rys. 4a) a) i zakłócenie z rys. 4b) b), prowadzące do blokady c)

2.4 Zakłócenia w procesie sterowania

Zmiana struktury SC spowodowana wystąpieniem zakłóceń strukturalnych prowadzi do zmiany przestrzeni stanów (np. zmiana P_0 na P_1 i P_1 na P_2). Do sytuacji tego typu nie dochodzi jednak w przypadku zakłóceń w zachowaniu, a w szczególności zakłóceń w procesie sterowania. Zakłócenia tego typu nie prowadzą do fizycznego uszkodzenia struktury (uszkodzenia połączenia, usunięcie procesu, itp.) i co za tym idzie do zmiany przestrzeni stanów. Oznacza to, że zmiana aktualnego stanu systemu, spowodowana wystąpieniem zakłócenia, odbywa się w obrębie tej samej przestrzeni.

Przykład ilustrujący tego typu sytuację przedstawia rys. 7. Rozważane zakłócenie polega na zmianie aktualnych praw dostępu do zasobów (poprzez zmianę semaforów Z^1 i odpowiadających im indeksów Q^1). Przykładowo, zakłócenie w stanie S^1 polega na zmianie praw dostępu do zasobu R_3 (z P_1 na P_2) i R_5 (z P_1 na P_3). Zmiana tego typu powoduje

przejście systemu w stan S^{t1} , z którego w dalszej kolejności (poprzez stan S^{t1} i S^6) możliwy jest powrót do przebiegu cyklicznego $D_{C,1}$. W praktyce zakłócenie takie może oznaczać awarię sygnalizacji na stacjach R_3 i R_5 , skutkującą zmianą kolejności obsługi autobusów i tramwajów na tych stacjach. Innym przykładem, tym razem prowadzącym do blokady (patrz rys. 7b) jest zakłócenie w stanie S^3 .



Rys. 7 Przestrzeń stanów \mathcal{P}_0 dla systemu z rys. 2 otrzymana w wyniku zakłócenia procesu sterowania a), harmonogram ilustrujący zmianę zachowania systemu b)

Analogicznie jak miało to miejsce w przypadku zakłóceń strukturalnych, możliwość powrotu systemu do przebiegu cyklicznego po zakłóceniu w procesie sterowania jest warunkowana możliwością przejścia systemu w stan wchodzący w skład wiru.

3. Sformułowanie Problemu

Istnienie wśród stanów, będących skutkiem zakłócenia, stanów prowadzących do przebiegu cyklicznego świadczy o zdolności systemu do samoorganizacji. Zdolność ta decyduje o odporności systemu na zaistniałe zakłócenie. Przyjęto, że odporność tą wyraża się jako:

$$Rob(dist) = \frac{NC(dist)}{NT(dist)} \quad (5)$$

gdzie:

- $Rob(dist)$ - odporność SCCP na zakłócenie $dist$; $Rob(dist) \in [0,1]$; $Rob(dist) = 0$ – oznacza brak odporności tzn. zakłócenie $dist$ zawsze doprowadzi do blokady; $Rob(dist) = 1$ - oznacza pełną odporność na zakłócenie $dist$, bez względu na stan wystąpienia zakłócenia system zawsze powraca do przebiegu cyklicznego,
- $NC(dist)$ - liczba stanów przestrzeni \mathcal{P}_{dist} (przestrzeni stanów uzyskanej w wyniku zakłócenia $dist$) prowadzących do przebiegów cyklicznych,
- $NT(dist)$ - liczba wszystkich stanów przestrzeni \mathcal{P}_{dist} , $NT(dist) = |\mathcal{S}_{dist}|$.

Zgodnie z (5) odporność systemu na zakłócenie $dist$, we wszystkich omawianych do tej pory przykładach, należy traktować jako stosunek liczby stanów składających się na wiry do wszystkich stanów przestrzeni \mathcal{P}_{dist} . Uzyskana w ten sposób wartość określa naturalną odporność (oznaczaną dalej jako $Rob_0(dist)$) determinowaną przez strukturę systemu SC (1). Ze względu na to, że w wielu przypadkach spotykanych w praktyce [2, 3, 4], przestrzeń stanów \mathcal{P}_{dist} zawiera w większości digrafy typu drzewo, wartość $Rob_0(dist)$ nie

przekracza 0.5. Z tego względu prowadzone są badania, których celem jest uzyskanie odporności SCCP na poziomie większym niż $Rob_0(dist)$. Badania tego typu koncentrują się na prototypowaniu struktur o zadanej odporności, na określony zbiór zakłóceń, lub poszukiwaniu warunków pozwalających zwiększyć tą odporność. W pracy podjęto próbę wyznaczenia tego typu warunków dla zakłóceń w procesie sterowania. W tym ujęciu rozważany problem ma postać: Dana jest sieć MTN modelowana przez SCCP o strukturze SC (1) oraz znana jest odporność systemu $Rob_0(dist)$ na zakłócenia w procesie sterowania. Poszukiwana jest odpowiedź na pytanie: Czy istnieją warunki (np. określające sposób sterowania systemem,), które gwarantują uzyskanie odporności $Rob(dist) > Rob_0(dist)$?

4. Odporność SCCP

Przyjmijmy, że rozważane są wyłącznie zakłócenia w procesie sterowania (np. zakłócenia sygnalizacji – patrz rys. 7). Zgodnie z wcześniejszą uwagą (patrz punkt 2.4) oznacza to, że w wyniku zakłócenia, przestrzeń stanów nie ulega zmianie: $\mathcal{P}_{dist} = \mathcal{P}$. W przestrzeni tej wyłącznie stany należące do wirów pozwalają na powrót do przebiegu cyklicznego (patrz rys. 7). Oznacza to, że zwiększenie odporności (5) sprowadza się do zagwarantowania możliwości osiągnięcia przebiegów cyklicznych ze stanów nie należących do wirów. Innymi słowy, rozważany problem sprowadza się do odpowiedzi na pytanie: Czy w przestrzeni \mathcal{P} możliwe jest przejście między strukturami typu drzewo i wir (rys. 8a)?

Jak widać na rys. 8a) przejście takie jest warunkowane istnieniem stanu będącego jednocześnie elementem drzewa i wiru. Istnienie takich stanów w przestrzeni \mathcal{P} nie jest jednak dopuszczalne [3]. Przejścia tego typu mogą się odbywać jedynie w wyniku modyfikacji elementów (tj. semaforów i indeksów) odpowiednich stanów (np. S^* i S^4). W tym celu wykorzystuje się własności dotyczące stanów o wspólnej alokacji.

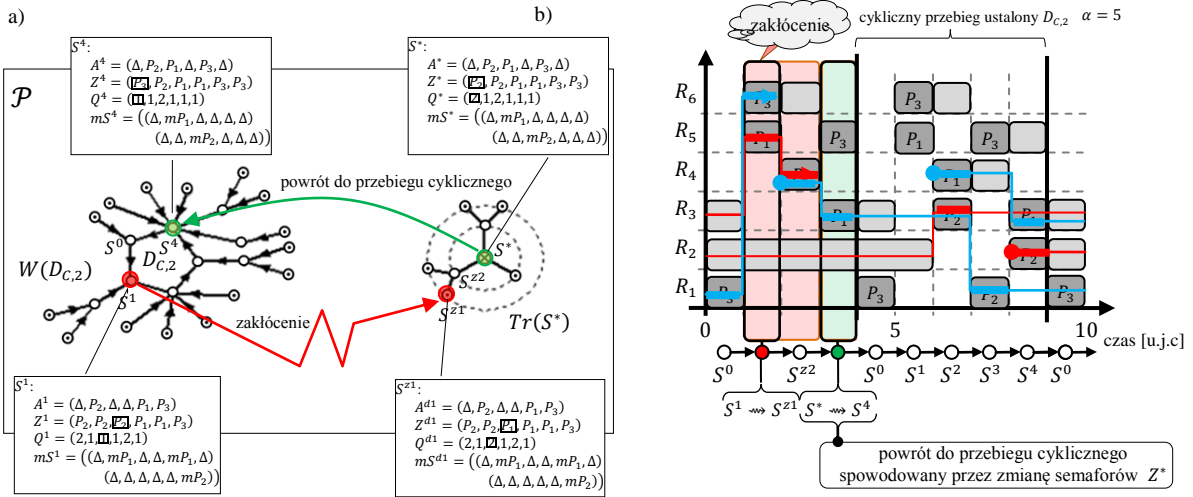
Rys. 8b) przedstawia realizację operacji procesów systemu z rys. 2, spowodowaną zakłóceniem w stanie S^1 (zakłócenie polega na zamianie praw dostępu do zasobu R_3). W wyniku zakłócenia system przechodzi w stan S^{z1} , który prowadzi do blokady (stan S^*). Należy zwrócić uwagę, że alokacja procesów lokalnych stanu S^* jest identyczna jak alokacja w stanie S^4 : $A^* = A^4$. W praktyce oznacza to, że w stanie S^* środki transportu (autobusy i tramwaje) znajdują się na tych samych stacjach co w stanie S^4 . Blokada jest więc spowodowana nieprawidłowym przydziałem praw dostępu do zasobów (sygnalizacji określającej kolejność obsługi na stacjach). Oznacza to, że w celu powrotu systemu do przebiegu cyklicznego wystarczy zmienić odpowiednie prawa dostępu do zasobów. W rozważanym przypadku zmiana taka sprowadza się do zmiany semaforów z Z^* na Z^4 (na zasobie R_1 dostęp P_2 zmieniony zostaje na dostęp dla P_3).

Powyższy przykład pokazuje, że w pewnych sytuacjach (w podprzestrzeniach odpowiadającym strukturalom typu drzewo) możliwy jest powrót do przebiegu cyklicznego, w wyniku zamiany aktualnych wartości semaforów (sygnalizacji). Jest to możliwe pod warunkiem, że stany między, którymi dochodzi do przejścia charakteryzują się tą samą alokacją procesów. Spostrzeżenie to prowadzi do następującej własności:

Własność 1

Jeżeli w przestrzeni \mathcal{P} istnieją dwa stany $S^a \in V_{Tr}(S^*)$, $S^b \in V_W(D_{C,2})$ (gdzie: $V_{Tr}(S^*)$ – zbiór stanów należących do drzewa $Tr(S^*)$ (4), $V_W(D_{C,2})$ – zbiór stanów należących do wiru $W(D_{C,2})$ (3)) posiadające wspólną alokację procesów lokalnych: $A^a = A^b$; to wir $W(D_{C,2})$ (i tym samym przebieg cykliczny $D_{C,2}$) jest osiągalny z drzewa $Tr(S^*)$.

□



Rys. 8. Przykład powrotu do przebiegu cyklicznego w przestrzeni stanów z rys. 3

Istnienie stanów pozwalających na powrót do przebiegu cyklicznego zwiększa odporność systemu na zakłócenia w procesie sterowania. Ocena istnienia takich stanów (jak i określenia ich liczby) wymaga przeszukiwania przestrzeni pod kątem wspólnych alokacji procesów. W sytuacji gdy znany jest cykliczny przebieg ustalony $D_{C,1}$ (będący częścią wiru $W(D_{C,1})$) oraz drzewo $Tr(S^*)$, wyznaczanie stanów o wspólnej alokacji sprowadza się do przeglądu wszystkich dopuszczalnych par stanów, tzn. elementów zbioru $V_W(D_{C,1}) \times V_{Tr}(S^*)$. Odpowiedni algorytm ma postać:

Algorytm

function STATESCOALL ($W(D_{C,1}) = (V_W(D_{C,1}), E_W(D_{C,1})), Tr(S^*) = (V_{Tr}(S^*), E_{Tr}(S^*))$)

$AC \leftarrow \emptyset$

forall $S^a \in V_{Tr}(S^*)$

forall $S^b \in V_W(D_{C,1})$

if $A^a = A^b$ **then** $AC \leftarrow AC \cup (S^a, S^b)$

end

end

end

return AC

end

gdzie: $W(D_{C,1}) = (V_W(D_{C,1}), E_W(D_{C,1}))$, $Tr(S^*) = (V_{Tr}(S^*), E_{Tr}(S^*))$ – dane wejściowe: wir związany z przebiegiem $D_{C,1}$ i drzewo prowadzące do blokady S^* ,

AC – zbiór par (S^a, S^b) stanów o wspólnej alokacji.

Wynikiem **Algorytmu** jest zbiór AC par stanów (S^a, S^b) posiadających wspólne alokacje: $AC \subseteq V_W(D_{C,1}) \times V_{Tr}(S^*)$. Przyjmując dla uproszczenia, że rozważane digrafy $(W(D_{C,1}), Tr(S^*))$ posiadają tę samą liczbę stanów (oznaczaną przez ld) złożoność obliczeniową proponowanego Algorytmu 1 szacuje funkcja kwadratowa $f(ld) = \mathcal{O}(ld^2)$.

Prezentowany algorytm umożliwia ocenę osiągalności tylko dwóch wybranych digrafów $W(D_{C,1}), Tr(S^*) \in DG$ (DG – zbiór digrafów przestrzeni \mathcal{P}). Badanie osiągalności między wszystkimi digrafami zbioru DG sprowadza się do oceny osiągalności każdej pary tego zbioru. Złożoność obliczeniowa tego typu procedury wynosi: $f(ld, dg) = \frac{1}{2}(dg^2 - dg) \cdot ld^2$ ($dg = |DG|$).

Wielomianowy charakter funkcji złożoności obliczeniowej sprawia, że problem oceny osiągalności wirów jest problemem „łatwym” (typu P).

Należy zaznaczyć, że wszystkie stany tworzące pary zbioru AC pozwalają na powrót do przebiegu cyklicznego w wyniku zmiany odpowiednich wartości semaforów. Wykorzystanie tych stanów w procesie powrotu systemu do przebiegu cyklicznego, zwiększa zatem odporność systemu na zaistniałe zakłócenia:

$$Rob(dist) = \frac{|VW|+|AC|+|AD|}{NT(dist)} \quad (6)$$

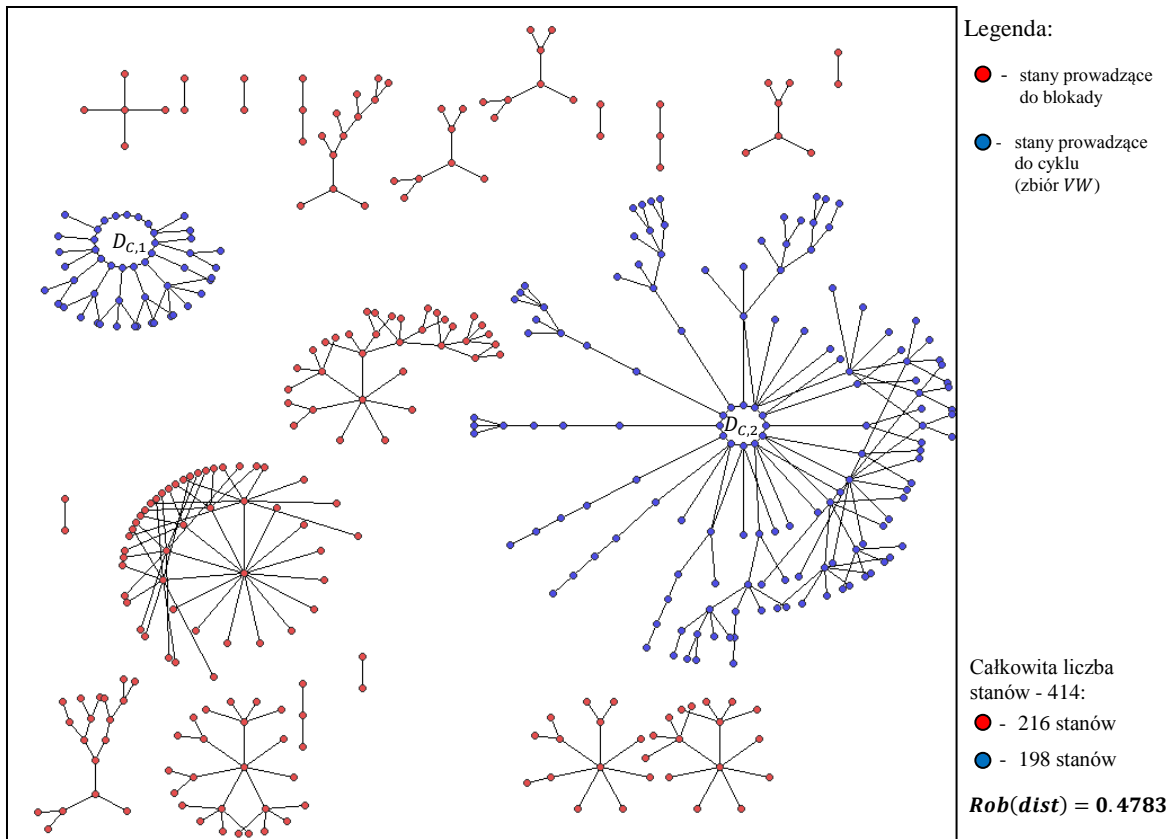
gdzie: VW – zbiór stanów tworzących wiry przestrzeni \mathcal{P} , AC – zbiór stanów o wspólnych alokacjach, AD - zbiór stanów prowadzących do stanów zbioru AC .

W odróżnieniu od (5), przy wyrażeniu (6), do stanów umożliwiających powrót do przebiegu cyklicznego oprócz stanów zbioru VW zalicza się również stany o wspólnych alokacjach (zbiór AC) oraz wszystkie stany do nich prowadzące (zbiór AD).

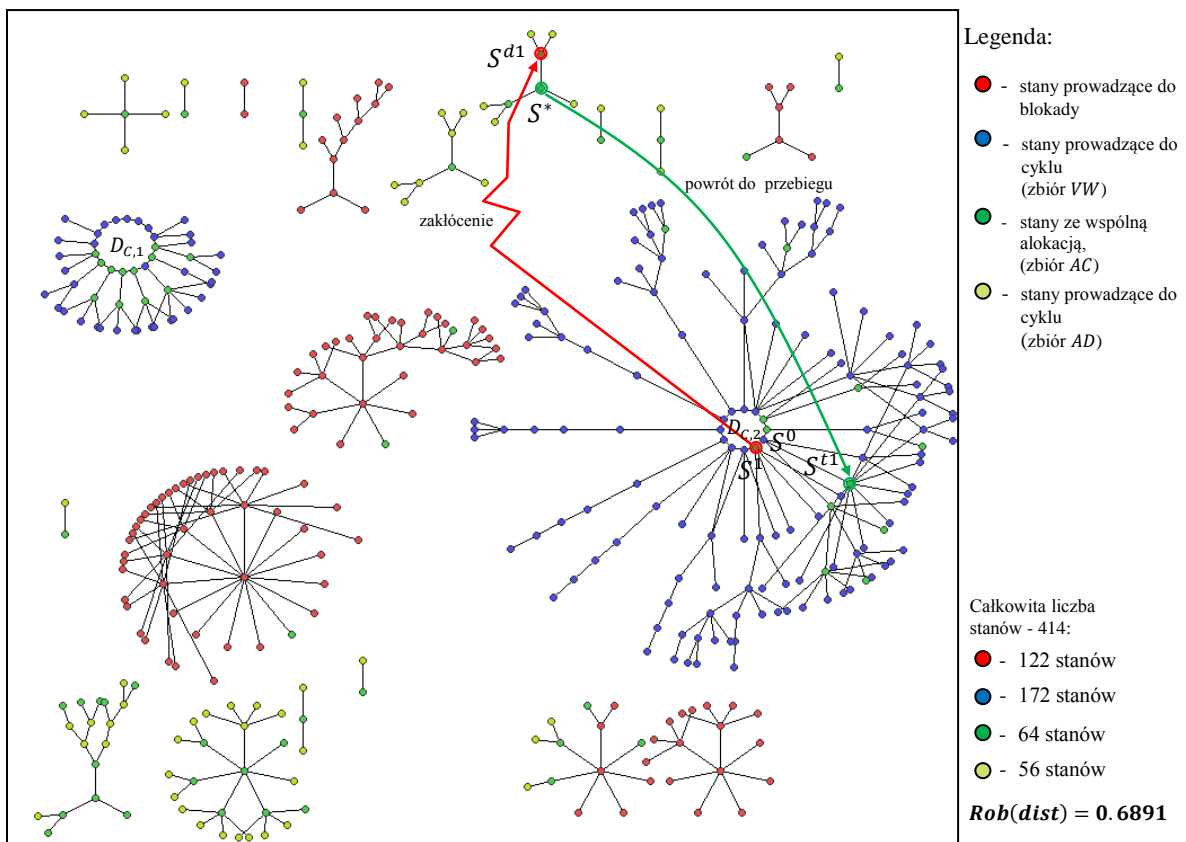
5. Eksperyment Obliczeniowy

Opracowane podejście do wyznaczania stanów o wspólnych alokacjach zostało wykorzystane do oceny odporności systemu z rys. 1 na zakłócenia pojawiające się w procesie sterowania. W tym celu wyznaczona została przestrzeń stanów \mathcal{P} - patrz rys. 9. Do jej wyznaczenia wykorzystano metodę przedstawioną w [3]. Przestrzeń \mathcal{P} zawiera 414 stanów, z czego 198 jest elementami wirów (w przestrzeni występują dwa wiry prowadzące do dwóch przebiegów cyklicznych). Odporność (5) takiego systemu na zakłócenia w procesie sterowani (zakłócenia, które nie prowadzą do zmiany przestrzeni stanów) wynosi $Rob(dist) = 0.4783$. W praktyce oznacza to, że ponad połowa zakłóceń (przy założeniu, że wszystkie zakłócenia są równo prawdopodobne) prowadzi do zatrzymania pracy systemu (blokady).

Odporność systemu można zwiększyć poprzez uwzględnienie, w procesie powrotu do przebiegu ustalonego, stanów o wspólnej alokacji. Stany te zostały wyznaczone w oparciu o algorytm 1. Rys. 10 przedstawia przestrzeń \mathcal{P} systemu z rys. 1 wraz ze stanami o wspólnej alokacji (zbiór AC) i stanami do nich prowadzącymi (zbiór AD). Dzięki znajomości tych stanów możliwy jest powrót do przebiegu cyklicznego nawet w sytuacji przejścia systemu w stan należący do drzewa. Przykład takiego przejścia przedstawia rys. 10 – przejście między stanami: $S^1, S^{d1}, S^*, S^{t1}, S^0$. Zaliczenie stanów zbioru AC i AD do zbioru stanów umożliwiających powrót zachowania systemu do przebiegu cyklicznego zwiększa jego odporność na zakłócenia do wartości: $Rob(dist) = 0.6891$.



Rys. 9. Przestrzeń stanów systemu z rys. 1



Rys. 10. Przestrzeń stanów systemu z rys. 1 z wyróżnionymi stanami o wspólnych alokacjach (zbiór AC) oraz stanami do nich prowadzącymi (zbiór AD)

4. Podsumowanie

W pracy omówiono podstawowe zakłócenia pracy systemów cyklicznych i/lub multimodalnych procesów koncentrując się na zakłóceniach powstających w procesie sterowania. Celem oceny odporności sieci MTN na tego typu zakłócenia wprowadzono miarę $Rob(dist)$ określającą zdolność systemu do powrotu do przebiegu cyklicznego.

Zwiększenie odporności MTN gwarantują warunki Własności 1 mówiącej, że powrót do przebiegu cyklicznego jest możliwy ze stanów należących do przebiegów blokadowych (drzew), które posiadają wspólną alokację, ze stanami przebiegów cyklicznych. Powrót do przebiegu cyklicznego z takich stanów jest możliwy w wyniku zamiany praw dostępu (semaforów) do zasobów współdzielonych. Analizowany przykład pokazał, że wyodrębnienie w przestrzeni stanów generowanych przez strukturę systemu dodatkowych stanów „bezpiecznych” pozwala na zwiększenie odporności systemu nawet o 44% (w rozważanym przypadku wartość $Rob(dist)$ zwiększyła się z 0.4783 na 0.6891).

Zaproponowany algorytm wyznaczania stanów o wspólnych alokacjach charakteryzuje się wielomianową złożonością obliczeniową. Pozwala to na wykorzystanie zaproponowanego podejścia w sieciach komunikacji miejskiej o skali spotykanej w praktyce. Wyprowadzone warunki, patrz Własność 1, ograniczają się jednak tylko do zakłóceń występujących w procesie sterowania. Oznacza to, że dalsze prace koncentrować się będą na warunkach obejmujących zakłócenia strukturalne.

Literatura

- [1] Bielli M, Boulmakoul A, Mouncif H. Object modeling and path computation for multimodal travel systems. *European Journal of Operational Research* 2006; 175(3): 1705-1730.
- [2] Bocewicz G. Reachability of multimodal processes cyclic steady states space. *Environmental Issues in Automotive Industry*, series: EcoProduction, Golińska P (Eds.): Springer Heidelberg, 2014: 129-162.
- [3] Bocewicz G, Banaszak Z. Declarative approach to cyclic scheduling of multimodal processes. *EcoProduction and Logistics, Emerging Trends and Business Practices*, series: EcoProduction, Golińska P (Eds.): Springer Heidelberg, 2013: 203-238.
- [4] Bocewicz G, Banaszak Z. Declarative approach to cyclic steady states space refinement: periodic processes scheduling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2013; 67(1-4): 137-155.
- [5] Bocewicz G, Banaszak Z, Nielsen I. Robustness of multimodal processes itineraries. *Proceedings of IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management and Control*. Saint Petersburg 2013: 2092-2097.
- [6] Boyac B, Geroliminis N. Estimation of the network capacity for multimodal urban systems. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service 2011; 16: 803-813.
- [7] Chiraphadhanakul V. Routing and scheduling models for robust allocation of slack. M.Sc. theses in Transportation and Operational research, Massachusetts Institute of technology, 2010.
- [8] Coronado Mondragon A E, Coronado Mondrago E S, Coronado Mondragon C E, Mung'au F, Estimating the performance of intelligent transport systems wireless services for multimodal logistics applications. *Expert Systems with Applications* 2012; 39(4): 3939-3949.
- [9] Guo Z. Transfers and path choice in urban public transport system. Ph.D. theses, Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [10] Heo S-K, Lee K-H, Lee H-K, Lee I-B, Park J H. A new algorithm for cyclic scheduling and design of multipurpose batch plants. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2003; 42(4): 836-846.

- [11] Hu Z-H. A container multimodal transportation scheduling approach based on immune affinity model for emergency relief. *Expert Systems with Applications* 2011; 38(3): 2632-2639.
- [12] Levner E, Kats V, Alcaide D, Pablo L, Cheng T C E. Complexity of cyclic scheduling problems: a state-of-the-art survey. *Computers & Industrial Engineering* 2010; 59(2): 352-361.
- [13] Li M. Robustness Analysis for Road Networks A framework with combined DTA models. Ph.D. theses, Delft University of Technology, 2008.
- [14] Liu L. Data model and algorithms for multimodal route planning with transportation networks. Ph.D. theses, Technische Universität München, 2010.
- [15] Ortúzar J D, Willumsen L G. Modelling transport. 3rd Edition John Wiley & Sons, West Sussex, England, 2002.
- [16] Petersen H L. Decision support for planning of multimodal transportation with multiple objectives. Ph.D. theses, Dept. of Transport, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, 2009.
- [17] Song J-S, Lee T-E. Petri net modeling and scheduling for cyclic job shops with blocking. In: *Computers & Industrial Engineering* 1998; 34(2): 281-295.
- [18] Von Kampmeyer T. Cyclic scheduling problems. Ph.D. theses, Fachbereich Mathematik/Informatik, Universität Osnabrück, 2006.
- [19] Wang B, Yang H, Zhang Z-H. Research on the train operation plan of the Beijing-Tianjin intercity railway based on periodic train diagrams. *Tiedao Xuebao/Journal of the China Railway Society* 2007; 29(2): 8-13.
- [20] Zografos K G, Androutsopoulos K N. Algorithms for itinerary planning in multimodal transportation Networks, *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems* 2008; 9(1): 175-184.