

PROJEKTOWANIE ZDECENTRALIZOWANYCH STRUKTUR KOMPUTEROWYCH SYSTEMÓW STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM¹

Paweł Wontorski

mgr inż., Politechnika Warszawska, Wydział Trans-
portu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Rail-Mil
Computers, ul. Kosmatki 82, 03-982 Warszawa, tel.:
+48 517 141 987, e-mail: 6077@pw.edu.pl

Andrzej Kochan

dr inż., Politechnika Warszawska, Wydział Trans-
portu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel.:
+48 22 234 7882, e-mail: ako@wt.pw.edu.pl

***Streszczenie.** W artykule przedstawiono koncepcję projektowania zdecentralizowanych struktur komputerowych systemów sterowania ruchem kolejowym (srk). W formułowaniu założeń posłużono się praktycznymi aspektami projektowania i instalacji urządzeń srk. Zaproponowano podejście oparte na agregacji urządzeń wewnętrznych srk do autonomicznych zespołów urządzeń wewnętrznych, jako szczególnego typu punktów rozdzielczych (węzłowych) struktury urządzeń i połączeń. Jest to podejście alternatywne do tradycyjnego, opartego na modelu z pełną centralizacją. Strukturę urządzeń i połączeń scharakteryzowano poprzez wybrane właściwości (liczba i rozmieszczenie węzłów, stopień centralizacji, topologia sieci), a następnie zdefiniowano za pomocą grafu, gdzie wierzchołki stanowią punkty rozdzielcze a krawędzie – połączenia. W rozważaniach wskazano trzy główne kierunki suboptymalizacji modelu: kosztowy, niezawodnościowy i dotyczący dostępności systemu.*

Słowa kluczowe: sterowanie ruchem kolejowym, decentralizacja, grafy, suboptymalizacja

1. Wprowadzenie

Rozmieszczenie urządzeń jest podstawowym etapem i zagadnieniem projektowania systemu sterowania ruchem kolejowym (srk) na posterunku lub szlaku. Zakłada się następującą kolejność etapów projektowania: opracowanie założeń techniczno-ekonomicznych i ruchowych, zaprojektowanie układu torowego, zaprojektowanie rozmieszczenia urządzeń zewnętrznych (plan schematyczny), zaprojektowanie konfiguracji urządzeń wewnętrznych. Z liczby i rozmieszczenia urządzeń srk wynika treść pozostałej części projektu.

Rozmieszczenie urządzeń zewnętrznych, mimo że projektant podejmuje pewne decyzje lokalizacyjne, determinowane jest głównie układem torowym i zasadami projektowania. Większa dowolność (w przestrzeni dopuszczalnych rozwiązań) charakteryzuje procesy: kształtowania sieci kablowej (połączeń zewnętrznych) i konfiguracji urządzeń wewnętrznych. Projekt połączeń wewnętrznych (pomiędzy urzą-

¹ Wkład autorów w publikację: Wontorski P. 50%, Kochan A. 50%

dzeniami wewnętrznymi) jest zazwyczaj zdeterminowany konfiguracją urządzeń wewnętrznych i zasadami projektowania zawartymi w dokumentacjach techniczno-ruchowych urządzeń.

Podstawowy model struktury komputerowych urządzeń wewnętrznych srk na posterunku przewiduje umieszczenie wszystkich urządzeń w jednym pomieszczeniu (budynku) zwanym przekaźnikownią. Jest to model zhierarchizowany i mocno scentralizowany. Z przekaźnikowni wyprowadzone są połączenia zewnętrzne do urządzeń zewnętrznych, prowadzone do nich bezpośrednio lub pośrednio (przez punkty rozdzielcze). Do punktów rozdzielczych prowadzone są kable grupowe (magistralne), a od punktów do urządzeń ułożone są kable indywidualne. Na niektórych, zwłaszcza dużych stacjach, stosuje się rozwiązania, w których przynajmniej niektóre urządzenia wewnętrzne instalowane są w budynkach lub kontenerach poza budynkiem przekaźnikowni. Nie ma jednak spójnej metody projektowania i optymalizacji (suboptymalizacji) modeli takich struktur.

2. Możliwości kształtowania struktury systemu srk

Kształtowanie zasadniczej struktury urządzeń zewnętrznych srk oraz planu kablowego na posterunku ruchu i szlaku następuje na etapie projektu budowlanego. Większość decyzji szczegółowych zapada jednak podczas opracowywania projektu wykonawczego. Możliwości tworzenia struktury systemu srk zależą od typu i właściwości wybranych urządzeń. Czynnikiem, które zwiększają możliwości jej elastycznego kształtowania są m.in.:

- **modułowość architektury urządzeń komputerowych** – umożliwiająca grupowanie modułów wykonawczych w zespoły pracujące autonomicznie względem nadrzędnego komputera (sterownika) zależnościowego;
- **skalowalność architektury urządzeń komputerowych** – umożliwiająca rozbudowę systemu do skali dopasowanej do obiektu;
- **miniaturyzacja urządzeń** – umożliwiająca zmieszczenie wielu modułów wykonawczych w małej przestrzeni, ograniczenie poboru mocy, łatwość w zapewnieniu właściwych warunków środowiska pracy;
- **programowa realizacja funkcji systemu** – umożliwiająca zmniejszenie udziału sprzętu (ang. *hardware*) w bezpiecznym i sprawnym działaniu systemu, w tym realizacji warstwy zależnościowej, na rzecz oprogramowania (ang. *software*);
- **cyfrowa bezpieczna transmisja danych** – umożliwiająca przesyłanie danych (meldunków, poleceń, komunikatów) między oddalonymi od siebie urządzeniami komputerowymi w sposób bezpieczny;
- **sieć światłowodowa** – zapewniająca szybką, bezpieczną (w znaczeniu *safety* i *security*), pewną, niezakłóconą transmisję danych, bardzo często istniejąca lub projektowana niezależnie od urządzeń srk;

- **urządzenia teletransmisyjne** – umożliwiające budowę praktycznie dowolnych topologii sieci transmisji danych;
- **wykorzystanie istniejącej infrastruktury kolejowej** – umożliwiające elastyczne dostosowanie istniejących obiektów do nowych funkcji (np. budynków dawnych nastawni wykonawczych) na liniach kolejowych objętych modernizacją.

Współcześnie istnieje wiele koncepcji systemowych rozwiązań, których architektura opiera się na idei pełnej decentralizacji. Należy do nich m.in. idea ADS (ang. *Autonomous Decentralised System*) – zdecentralizowanego systemu opartego na autonomicznych modułach ISEC (ang. *Intelligent Signalling Equipment Controller*) – inteligentnych sterownikach urządzeń sygnalizacyjnych [3].

Większość systemów sterowania ruchem kolejowym na polskim rynku (np. WT UZ, MOR-3, EbiLock) również posiada możliwość tworzenia autonomicznych zespołów urządzeń wewnętrznych. Takie zespoły mogą stanowić kasety wyniesione pakietów wykonawczych albo pojedyncze sterowniki obiektowe - zależnie od typu urządzeń. Nie ma bowiem przeszkód technicznych przed decentralizacją struktury komputerowych urządzeń srk.

Decyzja o decentralizacji urządzeń srk powinna zapadać w oparciu o racjonalne przesłanki. Kryteriami podstawowymi powinny być:

- koszty instalacji struktury systemu;
- niezawodność struktury systemu;
- dostępność systemu.

W dalszej analizie należy dążyć do osiągnięcia jak najwyższych wskaźników jakościowych oceny struktury systemu zbudowanych w oparciu o wymienione kryteria.

3. Założenia modelowania struktury systemu srk

Urządzenia sterowania ruchem kolejowym (srk) na posterunku lub szlaku dzielimy na wewnętrzne UW (komputery zależnościowe, sterowniki obiektowe) i zewnętrzne UZ (urządzenia wykonawcze, przytorowe). Połączenia zewnętrzne PZ to połączenia wyprowadzone są na zewnątrz przełącznikowni, kontenera lub szafy. Połączenia te łączą dwa różne urządzenia zewnętrzne między sobą, urządzenia zewnętrzne z wewnętrznymi, a także dwa różne urządzenia wewnętrzne, jeśli znajdują się w różnych lokalizacjach (budynkach, kontenerach). Wszystkie połączenia w obrębie jednego pomieszczenia, kontenera lub szafy tworzą zbiór połączeń wewnętrznych PW . Połączenia zewnętrzne PZ tworzą zewnętrzną sieć kablową, której węzły stanowią zbiór punktów rozdzielczych (węzłowych) PR .

Zespołem urządzeń wewnętrznych Z_{UW} określa się taki podzbiór zbioru urządzeń wewnętrznych UW (podsystem), który może pracować jako autonomiczna całość i obsługiwać odpowiadającą mu grupę urządzeń zewnętrznych, przy czym zespół może być:

- wyposażony w komputer zależnościowy – taki zespół określa się jako niezależny lub nadrzędny (ang. *master*) zespół (zbiór) urządzeń wewnętrznych Z_{UWM} ,
- nie wyposażony w komputer zależnościowy – taki zespół określa się jako zależny lub podrzędny (ang. *slave*) zespół (zbiór) urządzeń wewnętrznych Z_{UWS} .

Przyjęto założenie, że w jednym systemie zależnościowym może znajdować się jeden komputer (sterownik) zależnościowy kz (rys. 3), a więc tylko jeden zespół urządzeń wewnętrznych na posterunku stanowi zespół nadrzędny Z_{UWM} .

Zatem zbiór urządzeń wewnętrznych na posterunku lub szlaku można podzielić na k zespołów urządzeń wewnętrznych, tak że:

$$UW = Z_{UWM} \cup Z_{UWS1} \cup Z_{UWS2} \cup \dots \cup Z_{UWS(k-1)} \cup \emptyset, \quad k \geq 1 \quad (1)$$

gdzie:

- UW – zbiór urządzeń wewnętrznych na posterunku lub szlaku,
- Z_{UWM} – niezależny (nadrzędny) zespół (zbiór) urządzeń wewnętrznych,
- Z_{UWS} – zależny (podrzędny) zespół (zbiór) urządzeń wewnętrznych,
- k – liczba zespołów urządzeń wewnętrznych Z_{UW} na posterunku lub szlaku,

Można wyróżnić trzy typy punktów rozdzielczych (węzłowych):

- niezależne (nadrzędne) zespoły urządzeń wewnętrznych Z_{UWM} ,
- zależne (podrzędne) zespoły urządzeń wewnętrznych Z_{UWS} ,
- pozostałe punkty rozdzielcze pr_p – bez urządzeń wewnętrznych.

Wszystkie punkty rozdzielcze na posterunku lub szlaku tworzą więc zbiór PR :

$$PR = \{PR_M, PR_S, PR_P\} \quad (2)$$

gdzie:

- PR – zbiór wszystkich punktów rozdzielczych na posterunku lub szlaku,
- PR_M – zbiór niezależnych (nadrzędnych) zespołów urządzeń wewnętrznych Z_{UWM} ,
- PR_S – zbiór zależnych (podrzędnych) zespołów urządzeń wewnętrznych Z_{UWS} ,
- PR_P – zbiór pozostałych punktów rozdzielczych pr_p .

Zgodnie z powyższym, każdy zespół urządzeń wewnętrznych Z_{UW} jest jednocześnie punktem rozdzielczym (węzłowym) pr . Jednak nie każdy punkt rozdzielczy jest zespołem urządzeń wewnętrznych, ale tylko taki, który posiada urządzenia wewnętrzne. Punkty rozdzielcze bez urządzeń wewnętrznych należące do zbioru PR_P to obiekty umożliwiające operacje łączenia kabli, rozprowadzania żył kablowych, dołączania źródeł energii elektrycznej (przykładami takich punktów są szafy kablowe i garnki kablowe) [8].

Strukturę połączeń i urządzeń srk można zapisać jako graf TS (rys. 1), którego wierzchołki stanowią punkty rozdzielcze (węzłowe) pr , a krawędzie połączenia zewnętrzne pz .

$$\begin{aligned}
 S &= \langle PR, PZ \rangle \\
 PR &= \{pr_1, pr_2, \dots, pr_{NPR}\} \\
 PZ &= \{pz_1, pz_2, \dots, pz_{NPZ}\} \\
 PZ &\subseteq \left\{ \{pr_i, pr_j\} : pr_i \neq pr_j \text{ i } pr_i, pr_j \in PR \right\}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

gdzie:

TS – graf struktury połączeń zewnętrznych i punktów rozdzielczych,
 PR – zbiór wierzchołków grafu mających interpretację punktów rozdzielczych,
 PZ – zbiór krawędzi grafu mających interpretację połączeń zewnętrznych,
 NPR – liczność (moc) zbioru PR ,
 NPZ – liczność (moc) zbioru PZ .

Graf TS jest spójny, mieszany (występują krawędzie skierowane i nieskierowane). Każdy wierzchołek grafu pr_i oznaczający punkt rozdzielczy ze zbioru PR może być opisany przez następujące cechy:

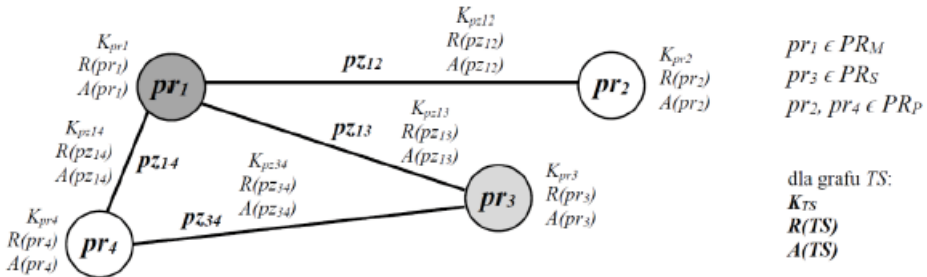
- K_{pr_i} – koszt i -tego punktu rozdzielczego,
- $R(pr_i)$ – niezawodność i -tego punktu rozdzielczego,
- $A(pr_i)$ – dostępność i -tego punktu rozdzielczego,

Każda krawędź grafu $pz_k = \{pr_i, pr_j\}$, oznaczająca połączenie zewnętrzne ze zbioru PZ może być opisana przez następujące cechy:

- $K_{pz_{ij}}$ – koszt k -tego połączenia między i -tym oraz j -tym punktem rozdzielczym,
- $R(pz_{ij})$ – niezawodność k -tego połączenia między i -tym a j -tym punktem rozdzielczym,
- $A(pz_{ij})$ – dostępność k -tego połączenia między i -tym a j -tym punktem rozdzielczym.

Zatem struktura systemu w postaci grafu TS może być opisana przez następujące cechy:

- K_{TS} – koszt całkowity instalacji struktury systemu,
- $R(TS)$ – niezawodność struktury systemu,
- $A(TS)$ – dostępność struktury systemu.

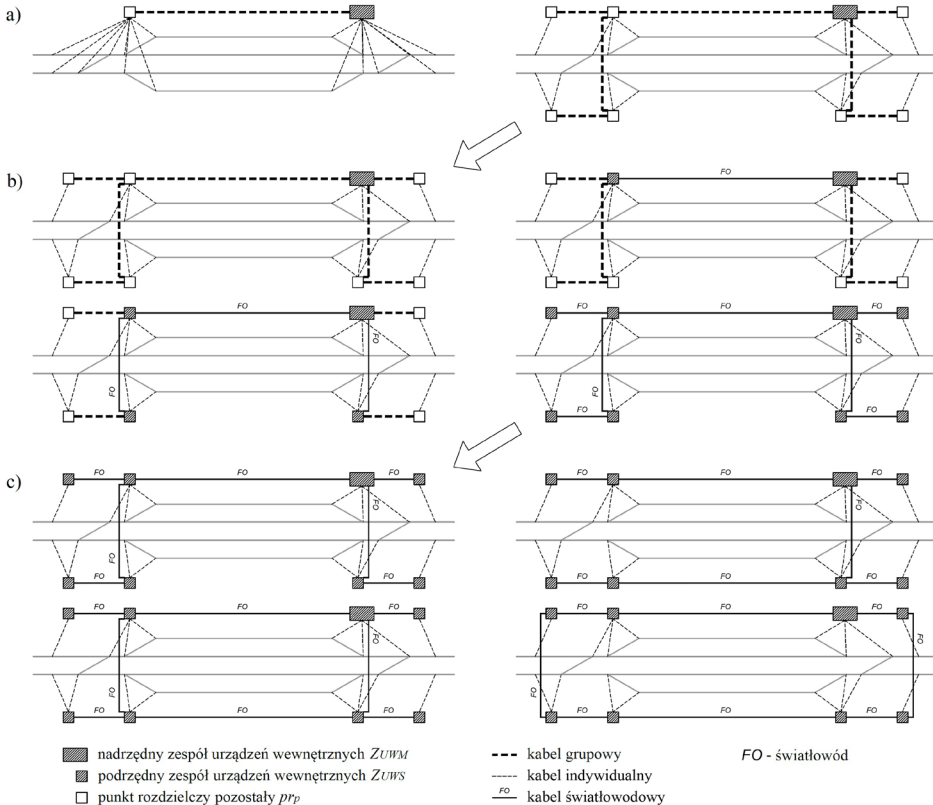


Rys. 1. Model struktury systemu srk w postaci grafu TS
 Źródło: opracowanie własne

4. Właściwości zdecentralizowanej struktury systemu srk

W ramach metody zdefiniowano następujące właściwości opisujące model struktury urządzeń sterowania ruchem kolejowym i sieci kablowej łączącej te urządzenia:

- **liczba i rozmieszczenie punktów rozdzielczych w terenie (gęstość punktów rozdzielczych)** – właściwość pozwalająca określić minimalne wyposażenie struktury systemu w punkty rozdzielcze, zapewniające prawidłowe zasilanie oraz transmisję danych do urządzeń zewnętrznych (wykonawczych); liczba punktów rozdzielczych zależy od liczby, typu i rozmieszczenia urządzeń zewnętrznych srk (rys. 2a);
- **stopień centralizacji urządzeń wewnętrznych S_{CUW}** – właściwość wyrażona przez stosunek liczby zespołów urządzeń wewnętrznych L_{ZUW} (w tym przekąźnikowni i pozostałych zespołów urządzeń wewnętrznych) do liczby wszystkich punktów rozdzielczych na posterunku lub szlaku L_{PR} (rys. 2b);
- **topologia połączeń zewnętrznych (sieci kablowej) na poziomie połączeń magistralnych między punktami rozdzielczymi** – właściwość określająca układ połączeń między punktami rozdzielczymi, w tym między przekąźnikownią i pozostałymi zespołami urządzeń wewnętrznych (rys. 2c).



Rys. 2. Struktura systemu srk i opisujące je właściwości: a) liczba i rozmieszczenie punktów rozdzielczych, b) stopień centralizacji urządzeń wewnętrznych, c) topologia połączeń zewnętrznych

Źródło: opracowanie własne

Stopień centralizacji urzędzeń wewnętrznych na posterunku wyrażony jest zależnością:

$$S_{CUW} = \frac{L_{ZUW}}{L_{PR}} \quad (4)$$

gdzie:

S_{CUW} – stopień centralizacji urzędzeń wewnętrznych,

L_{ZUW} – liczba zespołów urzędzeń wewnętrznych (Z_{UW}),

L_{PR} – liczba wszystkich punktów rozdzielczych (w tym wszystkich Z_{UW}).

Można wyróżnić następujące stopnie (poziomy) centralizacji urzędzeń wewnętrznych na posterunku:

- **pełna centralizacja** - wszystkie urzędzenia wewnętrzne zainstalowane są w jednym budynku (pomieszczeniu) czyli przekąźnikowni (rys. 3a);
- **częściowa decentralizacja zespołowa** - urzędzenia wewnętrzne występują na posterunku w więcej niż jednym zespole (grupie), zwanym zespołem urzędzeń wewnętrznych (Z_{UW}), przy czym na posterunku nadal występują także punkty rozdzielcze bez urzędzeń wewnętrznych pr_p (rys. 3b);
- **pełna decentralizacja zespołowa** - urzędzenia wewnętrzne występują na posterunku zgrupowane w zespołach urzędzeń wewnętrznych (Z_{UW}), przy czym dokładnie wszystkie punkty rozdzielcze zostały zastąpione przez Z_{UW} ;
- **częściowa decentralizacja obiektowa** – urzędzenia wewnętrzne występują na posterunku zgrupowane w zespołach urzędzeń wewnętrznych (Z_{UW}), przy czym wszystkie punkty rozdzielcze zostały zastąpione przez Z_{UW} , a liczba zespołów urzędzeń wewnętrznych (Z_{UW}) przekracza liczbę potencjalnych punktów rozdzielczych;
- **pełna decentralizacja obiektowa** – przy każdym urządzeniu zewnętrznym zainstalowane są urzędzenia wewnętrzne (sterownik), zatem każdy Z_{UW} zawiera pojedynczy moduł wykonawczy; brak punktów rozdzielczych poza przekąźnikownią.

Tabela 1. Stopnie centralizacji urzędzeń wewnętrznych srk S_{CUW}

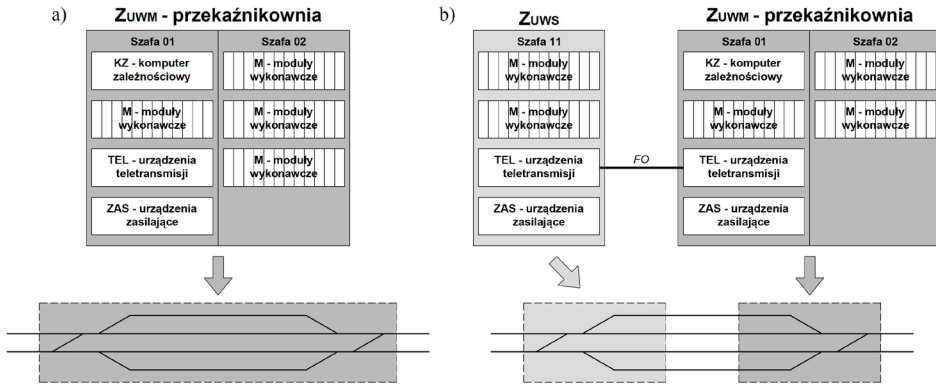
L.p.	Stopień centralizacji	Wartość S_{CUW}
1.	pełna centralizacja	$1/L_{PR}$
2.	częściowa decentralizacja zespołowa	$1/L_{PR} < S_{CUW} < 1$
3.	pełna decentralizacja zespołowa	1
4.	częściowa decentralizacja obiektowa	$1 < S_{CUW} < (N + 1)$
5.	pełna decentralizacja obiektowa	$N + 1$

Źródło: opracowanie własne

gdzie:

L_{PR} – liczba wszystkich punktów rozdzielczych

N – liczba wszystkich urzędzeń zewnętrznych (wykonawczych)



Rys. 3. Przykładowe struktury organizacji urządzeń wewnętrznych:

a) pełna centralizacja, b) częściowa centralizacja zespołowa

Zródło: opracowanie własne

W analogiczny sposób można sformułować właściwości opisujące model struktury urządzeń sterowania ruchem kolejowym i sieci kablowej łączącej te urządzenia na szlaku. W tym przypadku pełna centralizacji oznacza brak urządzeń wewnętrznych na samym szlaku i umieszczenie tych urządzeń na stycznych do szlaku posterunkach.

Wymienione wyżej właściwości nie wyczerpują listy możliwych do sformułowania parametrów opisujących strukturę urządzeń i połączeń na posterunku lub szlaku.

5. Kryteria suboptymalizacji modelu struktury systemu srk

5.1. Kryterium kosztu instalacji systemu srk

Rozmieszczenie urządzeń wewnętrznych na posterunku lub szlaku powinno być zrealizowane w taki sposób, aby koszt całkowity urządzeń zewnętrznych i wewnętrznych oraz połączeń wewnętrznych i zewnętrznych był jak najniższy. Przyjęto następujące założenia:

- liczba i rozmieszczenie, a więc i koszt urządzeń zewnętrznych K_{UZ} są zdeterminowane układem torowym i zasadami projektowania;
- koszt połączeń wewnętrznych K_{PW} jest zdeterminowany konfiguracją urządzeń wewnętrznych i wprost proporcjonalny do kosztu tych urządzeń K_{UW} ,
- bilansowaniu podlegać będą: koszt urządzeń wewnętrznych srk K_{UW} i koszt połączeń zewnętrznych K_{PZ} .

Zatem:

$$\Delta K_{UW} \leq \Delta K_{PZ} \quad K_{UZ} = const \quad K_{PW} \sim K_{UW} \quad (5)$$

gdzie:

ΔK_{UW} – zmiana kosztu urządzeń wewnętrznych K_{UW} w wyniku podziału zbioru urządzeń wewnętrznych UW na więcej niż jeden zespół urządzeń wewnętrznych Z_{UW} ;

ΔK_{PZ} – zmiana kosztu połączeń zewnętrznych K_{PZ} w wyniku podziału zbioru urządzeń wewnętrznych UW na więcej niż jeden zespół urządzeń wewnętrznych Z_{UW} .

Zmiana kosztu urządzeń wewnętrznych w wyniku zwiększenia liczby zespołów urządzeń wewnętrznych Z_{UW} będzie zazwyczaj oznaczać jego wzrost. Składnikami kosztu, które najprawdopodobniej ulegną zwiększeniu będą:

- koszt dodatkowych kontenerów (przy czym w przypadkach szczególnych można wykorzystać już istniejące obiekty, takie jak budynki dawnych nastawni wykonawczych, czy już istniejące szafy aparaturowo-zasilające);
- koszt dodatkowych urządzeń wewnętrznych srk (wzrost kosztu może być stosunkowo niewielki, ze względu na stałą liczbę modułów wykonawczych – sterowników obiektowych; mogą być potrzebne dodatkowe procesory, magistrale, karty wejść-wyjść, także do obsługi pojedynczych sygnałów, które trzeba obsłużyć niezależnie);
- koszt dodatkowych urządzeń zasilających (ze względu na sumaryczny wzrost liczby urządzeń), ale zależne zespoły urządzeń wewnętrznych dzięki doprowadzeniu zasilania z przekaźnikowni nie muszą wymagać urządzeń zasilania gwarantowanego;
- koszt dodatkowych urządzeń cyfrowej transmisji danych (dodatkowe przełączniki sieciowe, modemy, rutery, przełącznice);
- koszt urządzeń wentylacyjnych, klimatyzacyjnych, oświetlenia, zasilania na potrzeby bytowe, ale koszty te mogą być zredukowane do minimum przy zastosowaniu mniejszych szaf aparaturowo-zasilających zamiast kontenerów.

Zmiana kosztu połączeń zewnętrznych w wyniku zmniejszenia sumarycznej długości połączeń kablowych (głównie kabli grupowych) będzie zazwyczaj zmianą polegającą na zmniejszeniu kosztu całkowitego połączeń zewnętrznych. Składnikami kosztu, które najprawdopodobniej ulegną zmniejszeniu będą:

- koszt kabli grupowych (wielożyłowych kabli magistralnych łączących punkty rozdzielcze);
- koszt punktów rozdzielczych zastąpionych przez zespoły urządzeń wewnętrznych;
- koszt robót ziemnych (ze względu na ułożenie kabli światłowodowych na posterunkach i szlakach w wielu przypadkach możliwe będzie wykorzystanie włókien światłowodowych istniejących lub instalowanych niezależnie od projektu urządzeń srk, niekiedy jednak zmniejszenie kosztów robót ziemnych będzie niewielkie ze względu na konieczność ułożenia kabla światłowodowego i kabla zasilającego).

Składnikami kosztu, które najprawdopodobniej ulegną zwiększeniu będą:

- koszt kabli światłowodowych (prowadzonych między punktami rozdzielczymi);

- koszt kabli zasilających (prowadzonych między punktami rozdzielczymi);
- koszt wykonania połączeń kabli światłowodowych i zasilających.

Należy zaznaczyć, że poważna część wyżej wymienionych oraz możliwych ponadto do poniesienia kosztów jest zależna od wielu czynników i uwarunkowań lokalnych na posterunku lub linii. Na potrzeby konstrukcji modelu niezbędne było przyjęcie pewnych uproszczeń.

5.2. Kryterium niezawodności struktury systemu srk

Zgodnie z Instrukcją Ie-100a „urządzenia srk powinny charakteryzować się jak najwyższą niezawodnością, dostępnością i podatnością utrzymaniową” [2], czyli *RAM* (ang. *Reliability, Availability, Maintainability*) [6]. Niezawodność systemu srk można definiować jako prawdopodobieństwo generowania stanów systemu, umożliwiających realizację przewozów zgodnie z przewidzianym planem. Dążenie do jak największej wartości tego prawdopodobieństwa, obok maksymalizacji poziomu bezpieczeństwa systemu, stanowi zasadniczą cechę i cel projektowania urządzeń srk [1].

W odniesieniu do kształtowania struktury urządzeń i połączeń srk należy rozważyć zagadnienie niezawodności sieci światłowodowej cyfrowej transmisji danych. Jeżeli struktura połączeń została opisana za pomocą grafu, to jego spójność wierzchołkową można wyrazić minimalną liczbą awarii w punktach węzłowych, które powodują awarię całej sieci połączeń. Spójność krawędziową grafu można wyrazić minimalną liczbą awarii połączeń między węzłami, które spowodują awarię całej sieci połączeń [7].

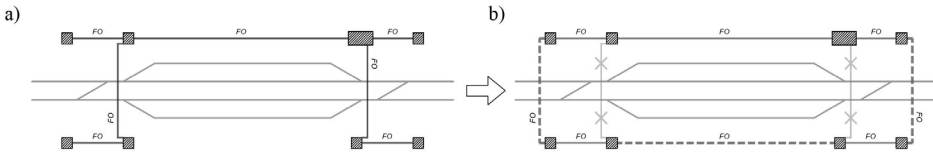
Przez $R_{pr_i, pr_j}(TS)$ oznaczono minimalną liczbę krawędzi, jaką trzeba usunąć z grafu, aby przerwać połączenie na wszystkich ścieżkach między węzłami pr_i oraz pr_j w grafie TS . Niezawodność deterministyczną grafu $R(TS)$ stanowi minimalna liczba krawędzi, jaka musi być usunięta z grafu TS , by przerwać wszystkie możliwe połączenia między co najmniej jedną parą różnych wierzchołków tej sieci [5]. Zatem:

$$R(TS) = \min_{pr_i, pr_j}(R_{pr_i, pr_j}(TS)) \quad (6)$$

Stąd wniosek, że im większa spójność grafu, tym większa niezawodność struktury połączeń. Zwiększanie spójności oznacza jednak zwiększanie liczby połączeń między węzłami, co jest równoznaczne z poważnym wzrostem kosztów całej instalacji. Niezawodność struktury połączeń oraz transmisji danych można zwiększyć także poprzez zastosowanie połączeń światłowodowych zamiast miedzianych.

Na rys. 4 przedstawiono przykładową strukturę sieci połączeń światłowodowych, która po wybudowaniu równoległego połączenia zapewniłaby redundancję głównego toru transmisji danych między głowicami stacji. Takie rozwiązanie generuje poważne koszty. Drugi etap modyfikacji: zmiana relacji krótkich połączeń między skrajnymi zespołami urządzeń wewnętrznych nie zmieniałoby kosztu całkowitego sieci, natomiast umożliwiłoby zbudowanie pełnego ringu i zapewnienie

wysokiej niezawodności sieci. Niezawodność struktury połączeń można zwiększyć stosując ring zwielokrotniony, nie tylko w rozumieniu redundancji żył lub włókien, ale również w sensie fizycznego rozdzielania w terenie poszczególnych torów ringu.



Rys. 4. Przykład działań zwiększających niezawodność sieci: a) struktura pierwotna połączeń: usunięcie dowolnego jednego połączenia powoduje awarię systemu, b) struktura zmodyfikowana połączeń (pełny ring): usunięcie dowolnego jednego połączenia nie powoduje awarii systemu

Zródło: opracowanie własne

5.3. Kryterium dostępności struktury systemu srk

Dostępność to „zdolność obiektu do utrzymywania się w stanie umożliwiającym wypełnienie wymaganych funkcji w danych warunkach w danej chwili lub w danym przedziale czasu, przy założeniu, że są dostarczane wymagane środki zewnętrzne” [2].

W odniesieniu do struktury systemu srk na posterunku lub szlaku zdefiniowano dostępność struktury systemu $A(TS)$ jako zdolność realizacji przez system procesu ruchowego na posterunku lub szlaku w sposób bezpieczny, także w warunkach ograniczonej sprawności i funkcjonalności (ograniczona dostępność). Ograniczenia te wynikają z czasowego wyłączenia z eksploatacji pewnych elementów struktury systemu (punktów węzłowych lub połączeń), bez których jednak nadal można prowadzić ruch po niektórych elementach układu torowego.

Dostępność systemu można zwiększać przez takie ukształtowanie konfiguracji urządzeń wewnętrznych (podział pomiędzy zależne zespoły urządzeń wewnętrznych Z_{UWS}), aby wyłączenie z eksploatacji obsługiwanych przez nie urządzeń zewnętrznych powodowało jak najmniejsze ograniczenie dostępności systemu (jak najmniejsze ograniczenia ruchowe). Założono, że wyłączenie zespołu nadrzędnego Z_{UWM} powoduje wyłączenie całego obiektu.

Dostępność struktury systemu $A(TS)$ na posterunku lub szlaku można przedstawić jako minimalną liczbę zespołów urządzeń wewnętrznych Z_{UW} jaka musi być usunięta z grafu TS , aby całkowicie uniemożliwić przejazd pociągu przez posterunek lub szlak (przejazd bez zatrzymania przez cały obiekt lub wjazd i wyjazd różnymi torami).

Przez $A_{ti,tj}(TS)$ oznaczono minimalną liczbę zależnych zespołów urządzeń wewnętrznych Z_{UWS} , jaką trzeba usunąć z grafu, aby uniemożliwić przejazd pociągu przez posterunek lub szlak między co najmniej jedną parą ti oraz tj różnych torów szlakowych (dla posterunku) lub jedną parą różnych torów stacyjnych (dla szlaku). Dostępność struktury systemu $A(TS)$ stanowi minimalna liczba zależnych zespołów urządzeń wewnętrznych Z_{UWS} , jaka musi być usunięta z grafu TS , aby uniemożliwić przejazd pociągu przez posterunek lub szlak między co najmniej jed-

ną parą różnych torów szlakowych (dla posterunku) lub jedną parą różnych torów stacyjnych (dla szlaku). Zatem:

$$A(TS) = \min_{ti,tj}(A_{ti,tj}(TS)) \quad (7)$$

Można postawić tezę, że podział urządzeń wewnętrznych na większą liczbę zespołów z uwzględnieniem układu torowego i możliwości ruchowych, zwiększa dostępność systemu w stosunku do podziału na mniejszą liczbę zespołów, dokonanego w sposób dowolny. W ogólności modułowa budowa systemów srk zwiększa wskaźnik ich dostępności [4].

6. Podsumowanie

Komputerowe urządzenia srk umożliwiają wprowadzenie do praktyki projektowej i instalacyjnej rozwiązań, które nie były dotąd możliwe do zastosowania, a obecnie pozwalają na istotną racjonalizację struktury urządzeń srk i ich połączeń. Decentralizacja urządzeń wewnętrznych oparta na idei agregacji w autonomiczne zespoły urządzeń wewnętrznych i zastosowanie światłowodowej sieci transmisji danych pozwalają budować modele struktur urządzeń o różnym stopniu rozproszenia, co może obniżyć koszt całkowity i poprawić parametry niezawodnościowe oraz dostępność systemu. Przedstawiony zarys metody należy rozwijać w kierunku pełnego opisu matematycznego, możliwego do komputerowej implementacji i zastosowania w zautomatyzowanym środowisku projektowania.

Bibliografia

- [1] Dąbrowa-Bajon M., Grochowski K., Karbowski H., Zasady projektowania systemów i urządzeń sterowania ruchem kolejowym, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1981.
- [2] Instrukcja Ie-100a: Warunki bezpiecznej instalacji i eksploatacji urządzeń sterowania ruchem kolejowym na liniach kolejowych zarządzanych przez PKP PLK, Warszawa 2015.
- [3] Kunifuji, T., A proposal of autonomous decentralised software architecture for safety-related system and its application to railway signalling system, IEEE Eleventh International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS), Mexico City 2013.
- [4] Maciejewski M., Metoda budowy komputerowych systemów sterowania ruchem kolejowym, rozprawa doktorska, Wydział Transportu PW, Warszawa 2015.
- [5] Niezawodność deterministyczna i probabilistyczna sieci. Algorytmy wyznaczające niezawodność sieci. [www.asdpb.republika.pl/gis12.pdf], data dostępu: 30.08.2017.

-
- [6] PN-EN 50126, Zastosowania kolejowe. Specyfikowanie i wykazywanie Nieuszkodzalności, Dostępności i Podatności utrzymaniowej i Bezpieczeństwa (RAMS).
- [7] Problem niezawodności sieci [<http://www.mini.pw.edu.pl/MiNIWyklady/grafy/prob-sieci.html>], data dostępu: 30.08.2017.
- [8] Szydłowski J., Metoda automatycznego projektowania sieci kablowych srk, rozprawa doktorska, Instytut Transportu PW, Warszawa 1982.

