

GRZEGORZ KAROŃ

dr hab. inż., prof. PŚ, Politechnika Śląska, Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, tel. 326034159, e-mail: grzegorz.karon@polsl.pl

RYSZARD JANECKI

dr inż., Katedra Transportu, Uniwersytet Ekonomiczny, ul. 3 Maja 50, 40-280 Katowice, tel. 322577536, e-mail: Ryszard.janecki@ue.katowice.pl

RENATA ŻOCHOWSKA

dr hab. inż., prof. PŚ, Politechnika Śląska, Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, tel. 326034121, e-mail: renata.zochowska@polsl.pl

ALEKSANDER SOBOTA

dr hab. inż., prof. PŚ, Politechnika Śląska, Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, tel. 326034121, e-mail: aleksander.sobota@polsl.pl

PIOTR SOCZÓWKA

mgr inż., Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, tel. 326034159, e-mail: piotr.soczowka@polsl.pl

MARCIN JACEK KŁOS

dr inż., Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, tel. 326034115, e-mail: marcin.j.klos@polsl.pl

Charakterystyka wybranych zagadnień inżynierii systemów na przykładzie tworzenia koncepcji Kolei Metropolitalnej w GZM¹

Streszczenie: W artykule przedstawiono wybrane, kluczowe zagadnienia inżynierii systemów oraz modelu V na przykładzie tworzenia projektu systemu Kolei Metropolitalnej (KM) dla obszaru Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii (GZM). Uwzględniono etapy dotyczące metodologii projektowania koncepcji Kolei Metropolitalnej (M-K-KM) oraz konstrukcji koncepcji Kolei Metropolitalnej (K-KM). Omówiono m.in. założenia systemowe metodologii tworzenia koncepcji systemu oraz zastosowanie modelu V jako narzędzia inżynierii systemów. Zaprezentowano ogólne wytyczne dla projektów wysokiego poziomu i szczegółowej koncepcji systemu KM.

Słowa kluczowe: inżynieria systemów, Kolej Metropolitalna, koncepcja systemu transportowego

Wprowadzenie

Stały wzrost motoryzacji indywidualnej i związane z tym zatłoczenie układów drogowo-ulicznych w miastach Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii (GZM) skutkuje m.in. niezadowalającym poziomem jakości życia w metropolii. Jedną z możliwości poprawy sytuacji jest wzrost znaczenia i pozycji kolei w obsłudze przemieszczeń mieszkańców i gości Metropolii poprzez budowę systemu Kolei Metropolitalnej, obsługującej przewozy w granicach metropolii.

W projekcie Koncepcji Kolei Metropolitalnej (K-KM) dla obszaru GZM zastosowano zasady inżynierii systemów dotyczące m.in.:

- określenia listy wymagań systemowych funkcjonalnych, efektywności i weryfikacji;
- opracowania wariantowych sposobów spełniania wymagań systemowych, co daje podstawę do przygotowania specyfikacji systemu KM, będącej zbiorem wytycznych dla dalszych prac na etapach tworzenia projektu wysokiego poziomu (projektu koncepcyjnego) i projektu szczegółowego;

- przełożenia wymagań systemowych funkcjonalnych na wymagania projektowe podsystemów oraz ich elementów – na etapie projektu wysokiego poziomu.

Celem artykułu jest przedstawienie wybranych, kluczowych zagadnień inżynierii systemów oraz modelu V na przykładzie tworzenia projektu systemu Kolei Metropolitalnej (KM) dla obszaru Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii (GZM), z uwzględnieniem etapów dotyczących metodologii projektowania koncepcji systemu (M-K-KM) oraz budowy koncepcji systemu (K-KM).

Założenia systemowe metodologii tworzenia koncepcji systemu

Przyjęto, że pod pojęciem metodologia należy rozumieć przejrzyste i czytelnie określony, niezawodny system metod, reguł i procedur badawczych, które pozwalają opracować dane zagadnienie [1] – w tym przypadku zagadnieniem było przygotowanie Koncepcji Kolei Metropolitalnej (K-KM) na obszarze Związku Metropolitalnego GZM [2]. Koncepcja Kolei Metropolitalnej jest systemem stworzonym w celu budowy, wdrożenia i rozwoju innego systemu, którym jest system przewozowy Kolei Metropolitalnej. Metodologię dla K-KM (M-K-KM) [3] można określić również jako zbiór wytycznych wskazujących, jak skonstruować projekt koncepcyjny Kolei Metropolitalnej (KM). Jest to początkowa faza działań (rys. 1), których finalnym rezultatem będzie stworzenie i wdrożenie do eksploatacji systemu Kolei Metropolitalnej na obszarze GZM [4].



Rys. 1. Zasadnicze fazy tworzenia Kolei Metropolitalnej na obszarze GZM z zastosowaniem inżynierii systemów
Źródło: [4]

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2020. Procentowy udział wkładu autorów w publikację: G. Karoń 17%, R. Janecki 17%, R. Żochowska 17%, A. Sobota 17%, P. Surówka 16%, M. J. Kłós 16%.

Podejście systemowe do projektowania systemu [5-8], [9], [10-16]:

- jest myśleniem systemowym obejmującym sposób konceptualizacji, analizowania i rozwiązywania problemów z wykorzystaniem koncepcji z dziedziny teorii systemów, obejmujące m.in. strukturę systemu oraz proces koncepcyjny do opracowywania rozwiązań i ich wdrażania;
- wykorzystuje główne komponenty, którymi są: cele i kryteria efektywności systemu, zasoby systemu, elementy systemu wraz z funkcjami, atrybutami oraz miernikami efektywności, interakcje w systemie i zarządzanie systemem;
- uwzględnia współzależności części tworzących system oraz związki przyczynowo-skutkowe;
- skupia się na obrazie ogólnym i finalnym celu projektu, co oznacza rozpatrywanie części systemu tylko w zależności od ich wkładu w całość;
- pozwala, dzięki holistycznemu charakterowi, uniknąć zbyt wąskiego rozpatrywania problemów; planowanie systemu, czyli tworzenie jego modelu musi zatem obejmować:
 - cele i kryteria efektywności systemu,
 - otoczenie i ograniczenia systemu,
 - zasoby systemu,
 - elementy systemu, ich funkcje, atrybuty oraz mierniki efektywności,
 - interakcje pomiędzy poszczególnymi elementami systemu,
 - zarządzanie systemem;
- w tworzeniu planu systemu, czyli budowie jego modelu, odbywa się poprzez procedury iteracyjne z zastosowaniem pętli sprzężenia zwrotnego (interakcje: cele systemu \leftrightarrow plany systemu, cele systemu \leftrightarrow wymogi systemu) oraz wprowadzenie faz analizy systemowej (wymagania i kryteria odnoszone do każdego celu oraz alternatywne sposoby jego osiągnięcia), a także faz syntezy systemowej (integracja wybranych sposobów działania określonych na etapie analizy systemu i stworzenie modelu, czyli planu systemu);
- wykorzystuje instrumentarium w postaci inżynierii systemów obejmującej cały system i cykl jego życia (rys. 2), przy czym cykl życia systemu obserwowany jest z co najmniej dwóch podstawowych perspektyw – perspektywy przedsięwzięcia (przedsiębiorstwa) oraz z perspektywy inżynierii systemów.

W Metodologii tworzenia Koncepcji Kolei Metropolitalnej przyjęto, że podejście systemowe zapewni zastosowanie nowoczesnych rozwiązań, lepsze wykorzystanie rozwiązań już istniejących, zintegrowanie wiedzy, techniki i technologii transportowych. Dzięki takim założeniom możliwa jest integracja wymienionych elementów wiedzy, techniki i technologii na wszystkich etapach cyklu życia systemu (rys. 2) Kolei Metropolitalnej – rozpoczynając od etapu projektu koncepcyjnego (koncepcji)².

Podczas opracowania koncepcji KM jako systemu, zastosowano narzędzia z zakresu inżynierii systemów – dziedziny zaliczanej do badań stosowanych – definiowanej jako „nauka poświęcona tworzeniu całości złożonych systemów w celu zagwarantowania najefektywniejszego zaprojektowania, dopasowania, przetestowania oraz działania wszystkich tworzących je podsystemów” [13]. Wykorzystano m.in. następujące wymiary takiego podejścia:

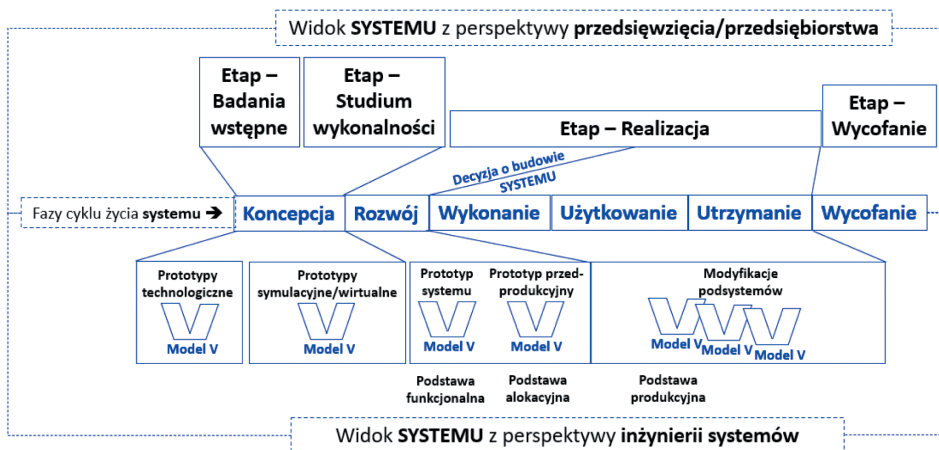
- multidyscyplinarny zespół:
 - wykonujący wielofunkcyjną, interdyscyplinarną, jednoczesną pracę,
 - współpracujący z interesariuszami systemu, przy czym głównymi interesariuszami są klienci, użytkownicy końcowi i twórcy systemu,
 - twórcy należący do zespołu (projektowanie i budowa systemu) współpracują z użytkownikami systemu (obsługa i utrzymanie systemu) i klientami systemu (finansują system i są jego właścicielami),
 - twórcy systemu określają poprzez kontakty z pozostałymi interesariuszami:
 - » jakie potrzeby/aspiracje powinien spełniać system,
 - » formułują, na podstawie potrzeb/aspiracji, wymagania systemowe, które definiują użyteczność systemu, a więc to, co dokładnie system powinien realizować;
- strukturę, elementy i modularyzację tworzonego systemu:
 - obejmuje budowę funkcjonalną i fizyczną systemu,
 - elementy i podsystemy są tworzone w taki sposób, aby spełniały funkcje niezbędne do realizacji celów i odpowiadały wymaganiom klientów systemu,
 - jednym z priorytetów jest sposób, w jaki ma funkcjonować system, by wymagania interesariuszy zostały spełnione;
- cykl życia systemu, który oznacza uwzględnienie w pracach związanych z jego tworzeniem wszystkich faz (rys. 2),
- cykl życia systemu z perspektywy przedsięwzięcia/przedsiębiorstwa – obejmuje etapy zorientowane na zarządzanie, w którym podejmowane są m.in. decyzje inwestycyjne dotyczące tego, czy system powinien przechodzić do kolejnego etapu (badania wstępne, studia wykonalności, realizacja, wycofanie), czy też powinien zostać zmodyfikowany, anulowany lub wycofany, przy czym uwzględniane są kryteria decyzyjne dotyczące ryzyka, kosztów, harmonogramu, funkcjonalności etc.; perspektywa przedsiębiorstwa dotyczy nie tylko systemu będącego przedmiotem zainteresowania, ale także jego podsystemów i elementów, które składają się na strukturę systemu; podsystemy i elementy mogą mieć krótszą żywotność niż system zainteresowania, w którym są osadzone, i podczas życia systemu zainteresowania mogą wymagać modyfikacji;
- cykl życia systemu z perspektywy inżynierii systemów – inżynieria systemów jest wykorzystana najpierw do opracowania prototypów technologicznych lub symulacyjnych (wirtualnych) w fazie koncepcji obejmującej etapy badań wstępnych oraz studium wykonalności;

² Sześć zasadniczych etapów cyklu życia systemu omówiono m.in. w [16]

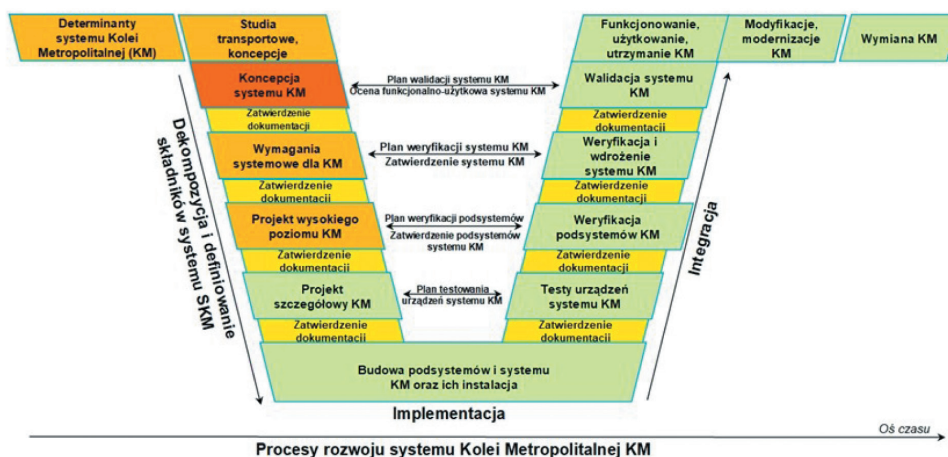
następnie w fazie rozwoju opracowywane są prototypy systemu oraz prototyp przedprodukcyjny; w fazach wykonania, użytkowania i utrzymania inżynieria systemów ma zastosowanie w procesach modyfikacji (przeprojektowania), gdy pojawiają się niepożądane i nieoczekiwane zmiany, na przykład z powodu błędów projektowych, awarii albo konieczności uwzględnienia nowych wymagań spowodowanych zmianami technologii, oddziaływania konkurencji lub spodziewanych zagrożeń dla funkcjonalności systemu. Na rysunku 3 przedstawiono zastosowanie inżynierii systemów z modelem V do odwzorowania procesu projektowania systemu Kolei Metropolitalnej (KM) z wyróżnionym dokumentem systemowym pt. „Koncepcja systemu KM”.

Efektem takiego sposobu przygotowania projektu koncepcyjnego systemu Kolei Metropolitalnej powinien być, dostosowany do obecnych i przyszłych wymagań i potrzeb, nowoczesny kolejowy system przewozowy w Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii. W związku z tym Kolej Metropolitalną (KM) w projekcie koncepcyjnym rozpatruje się jako system przewozowy, w którym sposób rozważania problemów skupia się na całości zagadnienia (ujęcie holistyczne), a nie tylko na poszczególnych jego elementach. Kolej Metropolitalna jest więc celowym zbiorem określonych części składowych oraz relacji między nimi i charakteryzuje się następującymi cechami oraz zasadami właściwymi dla systemów [13]:

- w systemie występują zróżnicowane oddziaływania części systemu na system i odwrotnie oraz części pomiędzy sobą; forma tych relacji określana jest jako struktura systemu, np. struktury hierarchiczna lub sieciowa, obserwuje się w niej holistyczne postrzeganie danego zjawiska lub efekty synergii;
- systemy mają dynamiczny charakter przejawiający się w określonych działaniach wynikających z realizowanych celów i zadań przez dany system;
- zbiór części systemu jest obiektem szczególnie zainteresowania, gdyż można je zmieniać, dostosowując do nowo formułowanych celów;
- systemy realizują swoje cele i zadania, wobec czego tworzenie systemu należy rozpoczynać od sformułowania jego celu;
- systemy można dzielić stopniowo, wyróżniając podsystemy, które same w sobie są systemami, oraz elementy stanowiące najmniejsze (elementarne) części systemu;
- systemy, podsystemy i elementy systemu mają określone atrybuty, wyrażające ich stan jakościowy lub ilościowy; w przypadku Kolei Metropolitalnej charakteryzują ten system takie atrybuty jak: wielkość potoków pasażerskich determinująca organizację przewozów, dostępność, poziom nowoczesności infrastruktury transportu kolejowego obecnie i w perspektywie planistycznej oraz jakość oferty przewozowej i świadczonych usług na konkurencyjnym rynku, cechujących się określonymi parametrami np. czasem podróży etc.;



Rys. 2. Model cyklu życia systemu w perspektywach przedsięwzięcia oraz inżynierii systemów z zastosowaniem modelu V
Źródło: opracowanie własne na podstawie [16]



Rys. 3. Odwzorowanie w modelu V procesu projektowania systemu Kolei Metropolitalnej (KM) z wyróżnionym dokumentem systemowym pt. „Koncepcja systemu KM”
Źródło: opracowanie własne na podstawie [4]

- systemy mają swoje granice i otoczenie; na otoczenie składa się wszystko, co ma wpływ na działania lub wynik działań systemu, a znajduje się poza kontrolą konceptualizatorów systemu;
- każdy system ma określoną strukturę złożoną z elementów i podsystemów połączonych ze sobą siecią wzajemnych relacji;
- systemy, także ich podsystemy i elementy systemowe, realizują swoje cele i zadania poprzez przetwarzanie wkładu na wyniki w trakcie danego procesu, przy czym,
 - wkład:
 - » może mieć formę zasobów materialnych i niematerialnych, a także kroków niezbędnych do tego, aby system działał, dawał wyniki i realizował wyznaczone cele i zadania,
 - » powinien być możliwy do kontrolowania i monitorowania,
 - » może być sprzężeniem zwrotnym w samym systemie,
 - proces:
 - » to zespół działań, dzięki którym system fizycznie przetwarza wkład na wyniki,
 - » posiada m.in. następujące pożądane atrybuty: spełnia zadania systemu, efektywnie osiąga oczekiwane wyniki, minimalizuje zużycie wkładu oraz szkodliwe efekty,
 - wyniki:
 - » to rezultaty docelowe działania systemu lub cele istnienia systemu,
 - » mają charakter zróżnicowany: wyniki pożądane przyczyniają się do osiągnięcia celów, wyniki niepożądane lub szkodliwe utrudniają realizację celów i/ lub negatywnie wpływają na otoczenie, wyniki neutralne – nie wpływają na osiągnięcie celów;
- systemy mają ograniczenia, które utrudniają osiągnięcie celów i realizację zadań; w systemach może dochodzić do konfliktów pomiędzy zadaniami poszczególnych składników jego struktury, co negatywnie wpływa na funkcjonowanie systemu; rozwiązanie danego konfliktu tego rodzaju osiąga się poprzez integrację systemu;
- działanie wszystkich części systemu musi być skoordynowane, a system, który realizuje założone cele i spełnia wymogi dzięki skoordynowanej pracy, określany jest jako system zintegrowany;
- systemy mogą być otwarte i w ich tworzeniu należy uwzględnić otoczenie systemu lub zamknięte, a więc samodzielne i autonomiczne niewymagające odniesień do otoczenia.

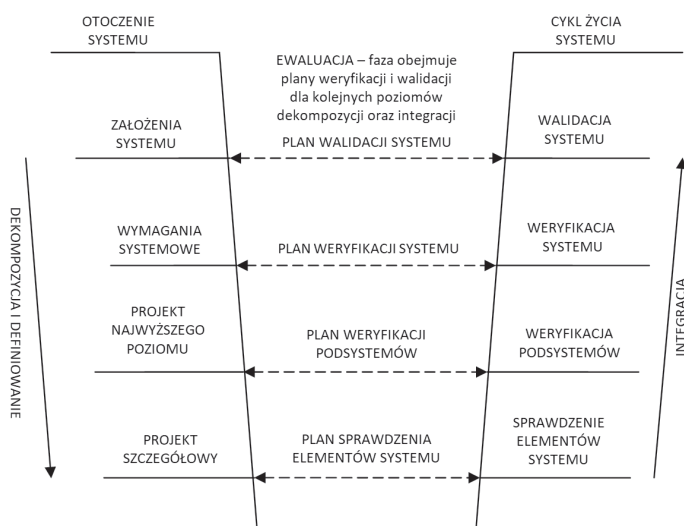
Model V jako narzędzie inżynierii systemów

Inżynieria systemów jest oparta na ogólnej teorii systemów i dzięki takiej podstawie teoretycznej umożliwia zastosowanie wielu różnych modeli systemów [5-8], [9], [10-16]. W przypadku K-KM zaproponowano model V [2], w którym występują określone fazy (rys. 4):

- faza definiowania i dekompozycji problemów w ujęciu systemowym – obejmuje formułowanie założeń systemu,

definiowanie wymagań systemowych, opracowanie projektu wysokiego poziomu zawierającego rozwiązania w zakresie podsystemów, opracowanie projektu szczegółowego będącego precyzowaniem elementów systemu, prowadzącym do jego realizacji; faza definiowania i dekompozycji ma charakter analizy zstępującej, będącej rozłożeniem tworzonego systemu na części składowe odpowiadające określonym problemom ujętym systemowo;

- faza integracji części składowych systemu (synteza systemowa) – obejmuje łączenie i koordynację poszczególnych elementów systemu (działań), które łączone są w podsystemy i tworzą konstruowany system (warianty systemu) przy założeniu, że system ten spełnia zdefiniowane wymagania oraz realizuje potrzeby i wymagania interesariuszy systemu;
- faza ewaluacji rezultatów osiągniętych przez części systemu i cały system – sprawdzenia wyników systemu obejmująca plany weryfikacji i walidacji dla kolejnych poziomów faz dekompozycji oraz integracji; jest również oceną proponowanych wariantów systemu.



Rys. 4. Schemat ideowy modelu V inżynierii systemów

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]

Główne składniki, będące określonymi poziomami modelu V (rys. 4), można syntetycznie scharakteryzować w następujący sposób.

Poziom założeń systemu obejmuje w zakresie:

- celów i zadań – zdefiniowanie potrzeb i wymogów interesariuszy systemu; opracowanie podstawowego planu sprawdzania (walidacji → użyteczności funkcjonalnej) systemu na końcowym etapie realizacji;
- koniecznych działań do wykonania – identyfikację interesariuszy powiązanych z systemem; przygotowanie opisu systemu z punktu widzenia jego interesariuszy, zawierającego m.in. ich aspiracje oraz wymogi, w tym wymogi efektywności kosztów i czasu; dokonanie wyboru kluczowych mierników wydajności systemu (jego wyników);

- rezultatów podjętych działań – dokument opisujący istotę systemu, w tym potrzeby i wymogi interesariuszy, ograniczenia (zakres systemu); dokument będący planem walidacji systemu, definiujący podejście, które zostanie użyte do sprawdzenia poprawności realizacji projektu.

Poziom wymagań systemowych odpowiednio w zakresie:

- celów i zadań – odzwierciedlenie potrzeb/aspiracji i wymogów interesariuszy oraz aktualnych możliwości związanych z budową systemu poprzez zdefiniowanie zbioru wymagań systemowych zapewniających spełnienie potrzeb i wymogów interesariuszy;
- koniecznych działań do wykonania – określenie wymagań systemowych w procesie iteracyjnym obejmującym pozyskiwanie informacji, specyfikowanie wymogów, ich analizę i przegląd; dokumentowanie, weryfikacja i zarządzanie wymaganiami; opracowanie sposobów weryfikacji i akceptacji systemu;
- rezultatów podjętych działań – dokument zawierający wymagania systemowe, funkcjonalne, efektywności i weryfikacji; dokument będący planem weryfikacji i akceptacji systemu w odniesieniu do wymagań systemowych.

W projekcie wysokiego poziomu:

- cele i zadania – to przełożenie wymagań funkcjonalnych systemu na wymogi projektowe podsystemów;
- konieczne działania do wykonania – badania zależności pomiędzy elementami tworzącymi system i rozdzielanie wymagań systemowych na poszczególne podsystemy (budowa macierzy identyfikowalności); grupowanie zidentyfikowanych funkcji i wymogów odbywa się zgodnie z tzw. architekturą systemu, będącą konfiguracją głównych składników systemu, umożliwiającą realizację funkcji systemu; każdy główny podsystem (element konfiguracji) powinien spełniać jedną lub zbiór podstawowych funkcji (wymagań) systemowych wymienionych w dokumencie wymagania systemowe; określenie występujących płaszczyzn kontaktu pomiędzy systemami; określenie i wybór alternatywnych rozwiązań złożonych z elementów konfiguracji przy uwzględnieniu syntezy komponentów (gotowe rozwiązania, ponownie wykorzystywane, nowe rozwiązania); opracowanie sposobów weryfikacji podsystemów tworzących system;
- rezultaty podjętych działań – powstanie ramowego projektu systemu, który spełnia wszystkie wymogi; opracowanie architektury systemu, dzięki czemu wszystkie wymagania systemowe są rozdzielone pomiędzy główne podsystemy (elementy konfiguracji); dokument będący planem weryfikacji i akceptacji podsystemów; dokument będący planem integracji elementów konfiguracji.

Poziom projektu szczegółowego obejmuje w zakresie:

- celów i zadań – przejście od formy wstępnego projektu ramowego (projektu wysokiego poziomu) do projektu, który jest możliwy do wdrożenia;

- koniecznych działań do wykonania – zaprojektowanie systemu złożonego ze skonfigurowanych podsystemów, które zawierają odpowiednio wybrane komponenty; dla każdego komponentu zidentyfikowanego w projekcie wysokiego poziomu należy wykonać projekt szczegółowy; opracowanie planu sprawdzenia (testów) elementów projektu szczegółowego systemu; sprawdzenie poszczególnych komponentów pod względem tego, czy spełniają przydzielone wymagania i są odpowiednie do zamierzonego celu (testowanie elementów); przygotowanie „prototypu” systemu i przygotowanie dokumentacji projektu;
- rezultatów podjętych działań – powstanie projektu szczegółowego systemu, który spełnia wszystkie wymagania; dokument zawierający szczegółową specyfikację projektową na poziomie komponentów.

Na poziomie integracji wraz z weryfikacją oraz walidacją:

- cele i zadania – odzwierciedlają stopniową integrację komponentów, podsystemów i systemu; sprawdzenie i weryfikacja komponentów, podsystemów i systemu pod kątem spełnienia wszystkich wymagań systemowych; walidację systemu pod kątem prawidłowości jego skonstruowania i jego użyteczności dla interesariuszy;
- konieczne działania do wykonania – to przeprowadzenie integracji elementów systemu zgodnie z przygotowanym planem integracji i wymogami projektu wysokiego poziomu; stworzenie środowiska integracji i weryfikacji, które odwzorowuje środowisko funkcjonowania systemu, co daje możliwości przetestowania elementów systemu w trybie ex-ante; testowanie efektów każdego kroku integracji pod kątem funkcjonalności zintegrowanego podsystemu; przeprowadzenie ukierunkowanych do góry sprawdzenia, weryfikacji i walidacji według opracowanych planów;
- rezultaty podjętych działań – pozwalają na potwierdzenie zgodności wdrożonego systemu ze wszystkimi wymogami i ograniczeniami; potwierdzenie poprawności zaimplementowania systemu; ujęte są w dokumencie zawierającym opis czynności, które były wykonane wraz z wynikami (plan integracji, testy integracyjne, plan weryfikacji i walidacji, w tym procedury i wyniki).

Poziom rozwoju, budowy i wdrożenia systemu obejmuje w zakresie:

- celów i zadań – tworzenie nowych lub usprawnianie już istniejących systemów;
- koniecznych działań do wykonania – finalne wytworzenie (skonstruowanie) systemu i jego testowanie; po przeprowadzeniu testów akceptujących system zostaje zainstalowany, wdrożony i staje się częścią otoczenia użytkownika; w ramach rozwoju następują usprawnienia systemu już funkcjonującego;
- rezultatów podjętych działań – przekształcenie projektu koncepcyjnego w kompletny, materialny produkt końcowy, jakim jest zbudowany system.

Zastosowanie modelu V inżynierii systemów – metodologia opracowania Koncepcji Kolei Metropolitalnej W przygotowanej metodologii dla projektu Koncepcji Kolei Metropolitalnej (M-K-KM) [3,4] sformułowano wytyczne dotyczące modelu V i zastosowania metod inżynierii systemów, odnoszące się między innymi do następujących etapów projektowania:

- poziomu założeń systemowych,
- poziomu wymagań systemowych,
- poziomu projektu wysokiego poziomu,
- poziomu projektu szczegółowego,
- fazy rozwoju, budowy i wdrożenia systemu,
- fazy integracji, weryfikacji oraz walidacji elementów i całego systemu.

Wytyczne dotyczące modelu V na poziomie założeń systemowych sformułowane zostały następująco [4]:

- założenia systemu mają w zrozumiały sposób dostarczyć wiedzy dla wszystkich interesariuszy na temat stworzonych dwóch systemów: koncepcji Kolei Metropolitalnej, a w niej systemu Kolei Metropolitalnej w zakresie funkcjonowania, obsługi, utrzymania i rozwoju;
- założenia systemu powinny być podstawą wymagań systemowych i kolejnych, bardziej szczegółowych etapów budowania systemu Kolei Metropolitalnej, przy czym założenia te nie powinny zawierać wymagań tak szczegółowych, aby wskazywać określone rozwiązania techniczno-technologiczne, ponieważ na tym poziomie modelu V nie powinny zostać wykluczone różne alternatywne rozwiązania systemowe Kolei Metropolitalnej;
- dokumentacja założeń systemu powinna być sporządzona zarówno w formie tekstowej, jak i graficznej w sposób zrozumiały, przystępny i odpowiedni dla wszystkich interesariuszy systemu, a jednocześnie dokumentacja musi być na tyle szczegółowa, aby mogła zostać wykorzystana do zmian i aktualizacji systemu w procesie iteracyjnego konstruowania Koncepcji Kolei Metropolitalnej, a także podczas całego cyklu życia systemu Kolei Metropolitalnej.

Wytyczne dotyczące modelu V na poziomie wymagań systemowych to [4]:

- sformułowanie wymagań systemowych dla systemów złożonych, jakimi są Koncepcja, jak i docelowy system Kolei Metropolitalnej (m.in. z powodu wielu interesariuszy niekiedy o sprzecznych interesach/aspiracjach) cechować powinno bardzo staranne ich definiowanie, gdyż popełnienie błędów na tym etapie powoduje problemy z określeniem zależności pomiędzy częściami przedmiotowych systemów; prawidłowe sformułowanie wymagań systemowych jest warunkiem spełnienia/realizacji przez system wymagań wszystkich interesariuszy;
- sformułowanie wymagań systemowych dotyczących całości tworzonego systemu uwarunkowane jest rozwiązaniem następujących zagadnień:
 - oszacowania pracochłonności,
 - pomiaru jakości proponowanych wymagań systemowych,

- wypracowania kompromisów w odniesieniu do sprzecznych wymagań interesariuszy,
- szybkiego reagowania na zmieniające się wymagania.

Wytyczne dotyczące modelu V na poziomie projektu wysokiego poziomu stanowią, że [4]:

- projekt wysokiego poziomu przedstawia ogólną strukturę systemu z wyróżnieniem wszystkich komponentów (części) systemu – podsystemów i ich elementów oraz wiążących je relacji; przy czym możliwe/celowe jest zastosowanie wielu zróżnicowanych sposobów podziału systemu, wynikające ze specyfiki systemu i jego podsystemów pod względem organizacyjnym, sprzętowo-technologicznym, funkcjonalnym itp.;
- każdy komponent systemowy w projekcie wysokiego poziomu należy definiować pod względem funkcjonalności i wydajności, ze szczególnym uwzględnieniem jego interfejsów z systemami zewnętrznymi i innymi komponentami;
- projektowanie wysokiego poziomu powinno być wykonywane iteracyjnie z uwzględnieniem m.in. następujących zadań:
 - opracowania kilku alternatywnych projektów wysokiego poziomu oraz ich porównanie m.in. pod względem wydajności, niezawodności, kosztów oraz innych kryteriów i wskazanie projektu rekomendowanego,
 - oceny alternatywnych projektów (według przyjętych kryteriów):
 - » kryteria wyboru, analizy oraz wyniki wskazujące na rekomendowany projekt alternatywny powinny być dokumentowane,
 - » jeśli istnieje kilka równie opłacalnych projektów alternatywnych, powinny one zostać poddane ocenie przez interesariuszy,
 - analizy i określenia wymagań systemowych:
 - » analiza wymagań systemowych jest niezbędna, aby przypisać je do komponentów systemu zidentyfikowanych w projekcie wysokiego poziomu,
 - » szczegółowe wymagania funkcjonalne i związane z nimi wymagania dotyczące wydajności są przydzielane do komponentów systemu,
 - » w procesie określania wymagań, szczegółowo analizowane są zależności między wymaganymi funkcjami systemu,
 - » dzięki temu procesowi każdy komponent jest tak niezależny od innych komponentów, jak to możliwe,
 - sporządzania opisu interfejsu:
 - » dla interfejsów zewnętrznych, tzn. interfejsów między systemem projektowanym a systemami zewnętrznymi,
 - » dla interfejsów wewnętrznych, tj. interfejsów między komponentami systemu,
 - » następnie należy przeprowadzić ocenę dla każdego interfejsu, aby określić, które normy są istotne, które standardy należy wdrożyć, a które standardy być może powinny być wprowadzane stopniowo – w ramach planów długookresowych,

- » po zapoznaniu się z odpowiednimi standardami danych, począwszy od zewnętrznych interfejsów systemu do wewnętrznych interfejsów, należy opracować dokumentację m.in. w zakresie rodzaju danych, formatu danych, zakresu wartości oraz częstości wymiany informacji w interfejsie.

Wytyczne dotyczące modelu V na poziomie projektu szczegółowego przedstawiają się następująco [4]:

- projekt szczegółowy powinien zawierać pełną specyfikację komponentów tworzących system, określać sposób, w jaki komponenty będą opracowane w celu spełnienia wymagań systemowych, a także określać szczegółowe działania projektowe dla gotowych (kupowanych) komponentów i dla niestandardowych (projektowanych) komponentów;
- projektowanie szczegółowe jest procesem iteracyjnym, w którym należy uwzględnić m.in. następujące zadania:
 - wytypowanie komponentów gotowych – tych, które będą nabywane,
 - opracowanie prototypów komponentów projektowanych,
 - opracowanie szczegółowych specyfikacji dla poszczególnych komponentów,
 - przegląd projektów szczegółowych każdego komponentu pod względem zapewnienia realizacji założonych celów i przyjętych wymagań systemowych,
 - spotkania koordynacyjne oraz przeglądy okresowe, regularne lub bieżące w celu monitorowania postępów i rozwiązywania problemów, integracji współbieżnych działań projektowych oraz łagodzenia ewentualnych przyszłych zagrożeń podczas integracji komponentów systemu,
 - konsultacje z interesariuszami w celu przeglądu i zatwierdzenia elementów projektu szczegółowego, zanim zespół wdrożeniowy zacznie budować system,
 - przygotowanie dokumentacji projektowej dotyczącej całego systemu;
- projektowanie szczegółowe systemu powinno uwzględniać wiele różnych czynników związanych z zaspokojeniem zróżnicowanych aspiracji interesariuszy, co wymaga optymalnej równowagi pomiędzy parametrami charakteryzującymi te czynniki; w związku z tym funkcja projektowa powinna rozważyć następujące cele:
 - projektowanie funkcjonalne, tj. z uwzględnieniem potencjału funkcjonalnego i osiągnięć systemu – aby zaprojektowany system mógł realizować zadania, które zapewnią osiągnięcie zaplanowanych celów,
 - projektowanie z uwzględnieniem określonej niezawodności działania systemu,
 - projektowanie z uwzględnieniem utrzymania sprawności systemu (utrzymania ruchu) – minimalizacja takich czynników jak czas obsługi, zaangażowane zasoby i koszty utrzymania,
 - projektowanie z uwzględnieniem czynnika ludzkiego – aspekty ergonomiczne, optimum układu człowiek – maszyna,

- projektowanie z uwzględnieniem technologii czynności – minimalizacja wymagań zasobowych,
- projektowanie z uwzględnieniem ekonomicznej wykonalności – celem jest minimalizacja kosztów cyklu życia, a nie tylko kosztów tworzenia systemu,
- projektowanie z uwzględnieniem akceptacji społecznej – system jako akceptowalna część systemu społecznego.

Wytyczne dotyczące fazy rozwoju, budowy i wdrożenia systemu to [4]:

- zapewnienie właściwego funkcjonowania systemu (czwarta faza cyklu rozwoju systemu) wymaga przejęcia przez twórców systemu odpowiedzialności za cały cykl jego życia;
- przestrzeganie zasady, że w cyklu rozwoju systemu, po jego wdrożeniu, system przestaje być produktem końcowym projektu, a zaczyna funkcjonować (eksploatacja);
- przejście do etapów budowy i wdrażania systemu może nastąpić po przyjęciu do realizacji projektu szczegółowego;
- w trakcie budowy (wytwarzania) systemu ważne jest porównywanie wyników planowanych z wynikami rzeczywistymi i podejmowanie ewentualnych działań naprawczych;
- w trakcie wytwarzania systemu należy nadal dokonywać oceny prowadzonych prac;
- w fazie realizacji systemu zachodzi potrzeba przeprowadzenia testów systemu docelowego – wykonują je zespoły projektantów, wykonawców i użytkowników oraz pozostałych interesantów;
- wdrażanie jest procesem polegającym na przekazaniu systemu użytkownikowi oraz interesariuszom, który to proces powinien być odpowiednio zaplanowany na wczesnym etapie realizacji systemu – tak, aby jego wdrażanie nastąpiło najpóźniej w momencie zakończenia wytwarzania systemu;
- po zakończeniu wdrażania należy użytkownikom przekazać odpowiednio przygotowane materiały do ich przeszkolenia w zakresie eksploatacji i konserwacji systemu.

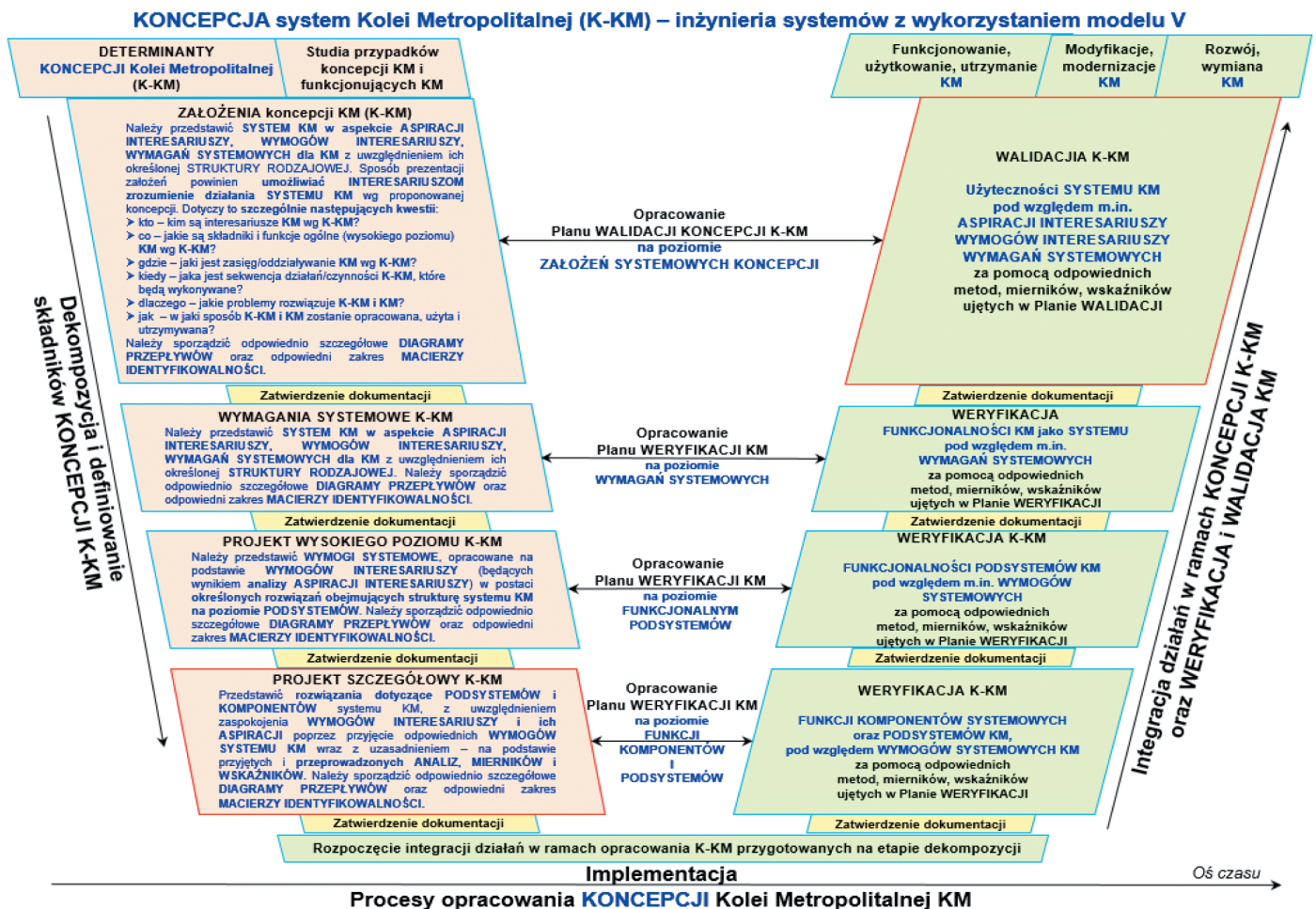
Wytyczne dotyczące integracji, weryfikacji oraz walidacji elementów i całego systemu to [4]:

- tok postępowania w fazie integracji obejmuje weryfikowanie poszczególnych komponentów, a następnie ich integrację w podsystemy – weryfikacja jest potwierdzeniem, że system spełnia przyjęte wymagania systemowe i w praktyce polega na zastosowaniu następujących technik:
 - test, będący bezpośrednim pomiarem działania,
 - demonstracja, czyli obserwacja działania systemu w oczekiwanym lub symulowanym otoczeniu,
 - inspekcja, będąca bezpośrednią obserwacją wymagań,
 - analiza z wykorzystaniem metod logicznych, matematycznych i graficznych;

- kolejność integracji komponentów w podsystemy wynika z planu integracji, w którym uwzględnione są etapowe testowanie i weryfikacja z zastosowaniem narzędzi zdefiniowanych w planach weryfikacji elementów, podsystemów i całego systemu, przy czym zastosowanie określonych narzędzi do testowania, w tym modeli symulacyjnych, wymaga starannego ich zweryfikowania przed wykorzystaniem do testowania elementów systemowych;
- w trakcie każdego przypadku weryfikacji należy rejestrować wszystkie akcje i odpowiedzi systemowe i poddawać je analizie np. w celu przyjęcia odpowiedniego trybu ewentualnej naprawy, korekty lub modyfikacji systemu;
- integracja trwa do momentu wytworzenia systemu zweryfikowanego i zintegrowanego, przy czym działanie to może wymagać zaangażowania różnych grup interesariuszy, ale nie należy ograniczać działań weryfikacyjnych – właściwy harmonogram realizowania tych czynności i ich liczba są przesłankami do zidentyfikowania wad systemu na wczesnym etapie procesu integracji;
- należy starannie prowadzić dokumentację dotyczącą procesów weryfikacji, m.in. plan integracji, zaktualizowany plan weryfikacji z procedurami przeprowadzania testów, macierz identyfikowalności, dokumentacja testów integracyjnych i ich wyników; dokumentacja powinna zawierać zaktualizowany opis czynności, które

- były wykonane i ich wyniki, dające w rezultacie odpowiedź na zgodność komponentów, podsystemów i systemu z wymaganiami funkcjonalnymi;
- walidacja systemu pozwala stwierdzić, że zintegrowany i zweryfikowany system jest możliwy do zbudowania i po zrealizowaniu będzie spełniał wszystkie wymagania interesariuszy – będzie dla nich w pełni użyteczny; walidacji podlega system, który przeszedł wszystkie etapy weryfikacji; proces ten pozwala upewnić się właścicielowi/operatorowi systemu, że działa on zgodnie z wymaganiami interesariuszy, zdefiniowanymi na etapie założeń systemu;
- w procesie walidacji należy postępować zgodnie z opracowanym i aktualizowanym planem walidacji systemu oraz starannie dokumentować jej wyniki;
- wdrożenie systemu rozpoczyna proces przejściowy, który wymaga monitorowania i oceny na podstawie wyników testów akceptujących, potwierdzających, że system działa zgodnie z przeznaczeniem, w swoim rzeczywistym środowisku; po okresie przejściowym następuje pełna praca systemu.

Na podstawie wymienionych wytycznych oraz metodologii M-K-KM [3] sporządzono syntetyczny opis modelu V dotyczący Koncepcji Kolei Metropolitalnej (K-KM) zamieszczony na rysunku 5.



Rys. 5. Syntetyczny opis modelu V dotyczącego Koncepcji Kolei Metropolitalnej (K-KM)
Źródło: [2]

Podsumowanie

Realizując proces projektowania koncepcji K-KM z zastosowaniem przedstawionych zasad inżynierii systemu, wykonano następujące zadania:

- ustalono interesariuszy projektu oraz zidentyfikowano ich aspiracje [19];
- zdiagnozowano podstawowe problemy transportowe w odniesieniu do przewozów publicznym transportem zbiorowym ze szczególnym uwzględnieniem transportu kolejowego o zasięgu metropolitalnym;
- sformułowano alternatywne rozwiązanie ogólne (lekkie metro naziemne);
- sformułowano wymogi interesariuszy (na podstawie analizy ich aspiracji) oraz wymagania systemowe;
- zdefiniowano cel główny oraz cele dodatkowe koncepcji KM i systemu KM;
- sformułowano założenia ogólne oraz szczegółowe dotyczące konstruowania KM;
- określono m.in. wymagania funkcjonalne systemu, które określają funkcje, jakie system musi wykonywać, aby spełnić wymogi interesariuszy, oraz odnoszące się do nich wymagania efektywności systemu;
- zdefiniowano warianty systemu KM [17];
- określono produkty i rezultaty oraz odpowiednie wskaźniki ich monitoringu.

Wymagany zakres oraz struktura treści dokumentu pn. „Koncepcja Kolei Metropolitalnej” (K-KM) określone w metodologii [3] – dokument pn. „Metodologia Tworzenia Koncepcji Kolei Metropolitalnej” (M-K-KM) – oraz zakres przedmiotu koncepcji K-KM – zakres kolejowego systemu transportowego o zasięgu metropolitalnym (KM), którego efektywność funkcjonowania wiąże się z obsługą potrzeb transportowych generowanych przez zróżnicowane zagospodarowanie przestrzenne obszaru GZM, oraz z integracją z pozostałymi, miejskimi systemami transportowymi obszaru GZM wskazują, że zarówno dokument K-KM jak i system KM w ujęciu systemowym są systemami złożonymi i powiązаныmi [9] ze sobą wieloaspektowo.

Takie uwarunkowania opracowania K-KM uzasadniły konieczność zastosowania inżynierii systemów w procesie projektowania K-KM i KM jak również przygotowanie odpowiedniej metodologii dla tego procesu według zasad inżynierii systemów, którego rezultatem jest wspomniana już metodologia M-K-KM [3].

Opracowanie Koncepcji Kolei Metropolitalnej należy traktować jako efektywny czynnik, przybliżający przygotowanie projektu, bezpośrednio zapewniającego stworzenie Kolei Metropolitalnej na obszarze GZM [18]. Wybór metod inżynierii systemów zapewnił oczekiwaną przez wszystkich interesariuszy wysoką jakość dokumentacji, m.in. dzięki procedurom weryfikacji i walidacji rozwiązań na każdym etapie opracowania koncepcji (K-KM), co zostało potwierdzone podczas wielokrotnych konsultacji z szerokim gronem interesariuszy. Zastosowanie podejścia systemowego pozwoliło uwzględnić uwarunkowania i czynniki oddziałujące na pasażerski transport kolejowy w Metropolii [20].

Literatura

1. Apanowicz J., *Metodologia ogólna*, Wydawnictwo Bernardinum, Pelplin – Gdynia 2002.
2. Janecki R., Karoń G., Sobota A., Żochowska R. i in., *Koncepcja Kolei Metropolitalnej dla Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii z wykorzystaniem metod inżynierii systemów*, Praca naukowo-badawcza Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej, Zamawiający: GZM. Katowice 2018
3. Janecki R., Karoń G., Sobota A., Żochowska R. i in., *Metodologia tworzenia Koncepcji Kolei Metropolitalnej z wykorzystaniem metod inżynierii systemów*, Biuro Usług Inżynierskich „CONCEPT”, Zamawiający: Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolia, Katowice 2018.
4. Janecki R., Karoń G., Sobota A., Żochowska R., *Raport z opracowania tematu „Metodologia tworzenia Koncepcji Kolei Metropolitalnej z wykorzystaniem metod inżynierii systemów”*, Katowice, maj 2019.
5. Best Practices for Using Systems Engineering Standards. Office of the Deputy Assistant Secretary of Defense Systems Engineering 3030 Defense Pentagon, 2017.
6. Bonnett C.F., *Practical Railway Engineering*, Imperial College Press, 1996.
7. INCOSE Systems Engineering Handbook, International Council on Systems Engineering, 2006.
8. INCOSE Working Group. Systems engineering in transportation projects – A library of case studies. 2016.
9. Karoń G., *Kształtowanie potoków ruchu w sieci transportowej z wykorzystaniem inżynierii systemów*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2019.
10. Kossiakoff A., Sweet W.N., Seymour S.J., Biemer S.M., *Systems engineering principles and practice*, 2nd ed. John Wiley & Sons Inc., 2011.
11. MITRE Systems Engineering Guide, MITRE Corporate Communications and Public Affairs, 2014.
12. NASA Systems Engineering Handbook, NASA, December 2007.
13. Nicholas J. M., Steyn H., *Zarządzanie projektami. Zastosowanie w biznesie, inżynierii i nowoczesnych technologiach*, Oficyna a Wolters Kluwer Business, Warszawa 2012.
14. Schmid F., Evans R., *Railway Systems Engineering: Science, Art or just a Set of Tools?*, UEEIV Seminar: Railway Systems Engineering and the Complex Modern Railway, The University of Birmingham, 2017.
15. Systems Engineering for Intelligent Transportation Systems: an Introduction for Transportation Professionals, US. Department of Transportation – Federal Highway Administration – Federal Transit Administration, 2007
16. Systems Engineering – Guide for ISO/IEC (System Life Cycle Processes), <http://evmworld.org/wp-content/uploads/2017/05/Guide-to-Isoiec15288.pdf>, odsłona 17.05.2020.
17. Karoń G., Janecki R., Krawiec S., Kłos M.J., *Wariantowanie koncepcji kolei metropolitalnej na obszarze Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii w warunkach jej konstruowania przy wykorzystaniu metod inżynierii systemów*, „Problemy Transportu i Logistyki”, 2019, nr 45.
18. Karoń G., Janecki R., Żochowska R., Sobota A., Kłos M. J., Soczówka P., *Kształtowanie systemu transportu zbiorowego opartego na Kolei Metropolitalnej na obszarze Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii*, „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport”, 2019.
19. Sobota A., Janecki R., Karoń G., Soczówka P., *Rola interesariuszy w procesie projektowania koncepcji Kolei Metropolitalnej na przykładzie Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii*, „Problemy Transportu i Logistyki”, 2019, nr 46.
20. Soczówka P., Żochowska R., Sobota A., Kłos M.J., *Identification of good practices for railway systems in urban areas*, „Problemy Transportu i Logistyki”, 2019, nr 45.