ZESZYTY NAUKOWE AKADEMII MARYNARKI WOJENNEJ
ROK LI NR 3 (182) 2010

Krzysztof Ficoń
Akademia Marynarki Wojennej

OPTYMALIZACJA MAKROSYSTEMÓW TRANSPORTOWYCH WEDŁUG KRYTERIÓW LOGISTYCZNYCH

STRESZCZENIE

Artykuł jest kontynuacją zamieszczonego w poprzednim numerze „Zeszytów Naukowych" AMW artykułu *Analiza identyfikacyjna logistycznych makrosystemów transportowych*. Zamyka dwuczęściowy cykl poświęcony matematycznemu modelowaniu wielkich systemów logistycznych, w tym przypadku makrosystemu transportowego. Na początku przedstawiono ogólne założenia i kryteria optymalizacji makrosystemu transportowego. Zgodnie z zaproponowaną metodyką badawczą kolejno omówiono procesy, zasoby oraz ograniczenia i warunki brzegowe nakładane na modelowany system. Dalej zostało sformułowane kryterium optymalizacji minimalizujące czasoprzestrzeń logistyczną. Optymalizacja funkcji kryterium następuje za pomocą generowania odpowiednich harmonogramów dla kolejnych zadań wykonywanych przez system transportowy. Komputerowe wspomaganie modelu umożliwia generowanie wielowariantowych harmonogramów pozwalających na operatywne zarządzanie makrosystemem transportowym w dowolnym środowisku biznesowym. Modelowanie makrosystemów transportowych należy do bardzo złożonych zadań optymalizacji wielokryterialnej i wymaga dalszych badań systemowych.

Słowa kluczowe:
system, model, zasoby, procesy, ograniczenia, warunki brzegowe, funkcja kryterium, harmonogramy, optymalizacja, zmienna decyzyjna.

OGÓLNA KONCEPCJA BUDOWY MODELU OPTYMALIZACYJNEGO

Zgodnie z ogólną metodologią badań systemowych[1] matematyczne modelowanie logistycznego makrosystemu transportowego MM_{ST} zostało zdekomponowane

[1] Metodologiczne podstawy badań systemowych w odniesieniu do wielkich systemów społeczno-ekonomiczno-technicznych zostały przedstawione w pracy: R. Kulikowski, *Analiza systemowa i jej zastosowania*, PWN, Warszawa 1977. Zob. także: J. Konieczny, *Inżynieria systemów działania*, WNT, Warszawa 1983.

na dwa chronologiczne etapy obejmujące kolejno: budowę jakościowego modelu identyfikacyjnego (opisowego) MM_{ST} i ilościowego modelu optymalizacyjnego (decyzyjnego) MDE_{ST}:

$$MM_{ST} = < MID_{ST} \cup MDE_{ST} >, \tag{1}$$

gdzie:

MM_{ST} — matematyczny model systemu transportowego;

MID_{ST} — model identyfikacyjny systemu transportowego;

MDE_{ST} — model decyzyjny systemu transportowego.

Celem analizy identyfikacyjnej było opisowe zdefiniowanie zasadniczych elementów, relacji i procesów zachodzących w badanym makrosystemie transportowym. W efekcie powstał metamodel jakościowy charakteryzujący badany system w pewnej, sformalizowanej konwencji przydatnej do dalszych badań na etapie optymalizacji funkcjonowania całego systemu transportowego. Model identyfikacyjny MID_{ST} posłużył do jakościowego opisu badanego systemu transportowego i pełnej specyfikacji podstawowych problemów będących przedmiotem zarządzania menedżerskiego. Analiza identyfikacyjna stanowiła podstawę rozpoczęcia prac analitycznych nad budową docelowej aplikacji optymalizacyjnej, która może być wykorzystana bezpośrednio do usprawnienia funkcjonowania badanego makrosystemu transportowego.

Model optymalizacyjny makrosystemu transportowego MDE_{ST} służy do wypracowania ilościowych miar i wskaźników, najczęściej analitycznych niezbędnych w procesie racjonalnego (optymalnego) sterowania systemem transportowym podczas realizacji rzeczywistych (logistycznych) działań operacyjnych[2]. Skuteczność oddziaływań sterowniczych za pomocą proponowanych wskaźników analitycznych jest adekwatna do poziomu izomorfizmu zbudowanego modelu. Im bardziej dokładnie odzwierciedla dany model badaną rzeczywistość, tym bardziej skuteczne są jego możliwości sterownicze. W zależności od skali izomorfizmu (podobieństwa) model optymalizacyjny MDE_{ST} może być wykorzystany do bezpośredniego kształtowania strategii biznesowej, w tym przypadku makrosektora usług transportowych[3]. Formalnie

[2] Koncepcja wykorzystania różnych metod matematycznych do optymalizacji szerokiej klasy typowych zadań logistycznych została przedstawiona w pracy: W. Radzikowski, Z. Sarjusz-Wolski, *Metody optymalizacji decyzji logistycznych*, UW, Toruń 1994. Zob. także: S. Krawczyk, *Badania operacyjne dla menedżerów*, AE, Wrocław 1996.

[3] Szczegółowe metody analityczne wraz z projektami algorytmów obliczeniowych optymalizacji modelowych systemów transportowych zawarte są w: S. Piasecki, *Optymalizacja systemów transportowych*, WKiŁ Warszawa 1973.

model optymalizacyjny systemu transportowego MDE_{ST} dostarcza naukowych, w szczególności optymalnych metod i narzędzi do sterowania logistycznym makrosystemem transportowym i najogólniej może być zapisany w postaci wyrażenia (2) i zobrazowany graficznie jak na rysunku 1.

$$MDE_{ST} = < Z_{ST}, P_{ST}(t) \parallel G_{ST}, F_{ST}, H_{ST} > \xrightarrow{max\ STO_{ST}} min\ \$_{ST}, \qquad (2)$$

gdzie:

Z_{ST} — zbiór zasobów operacyjnych (logistycznych) systemu ST;

P_{ST} — zbiór procesów operacyjnych (logistycznych) systemu ST;

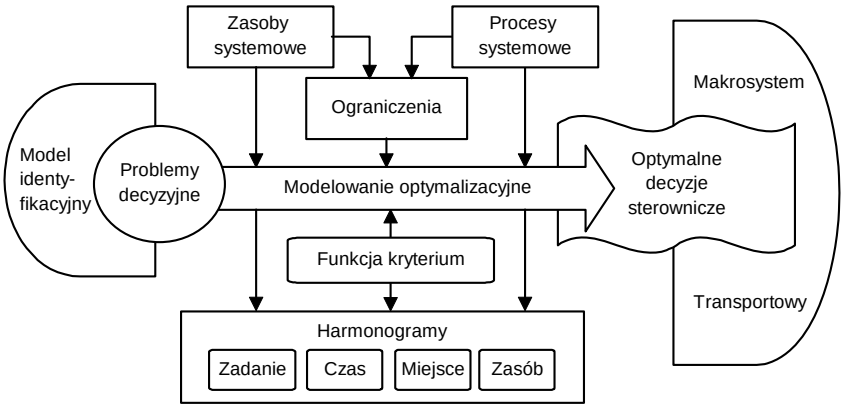
G_{ST} — zbiór ograniczeń i warunków brzegowych systemu ST;

F_{ST} — funkcja kryterium działania systemu ST;

H_{ST} — zbiór dopuszczalnych harmonogramów działania systemu ST;

$\$_{ST}$ — globalne koszty funkcjonowania makrosystemu transportowego ST;

STO — logistyczne standardy obsługi klienta przez sektor transportowy.



Rys. 1. Koncepcja modelowania optymalizacyjnego makrosystemu transportowego

Docelowym, praktycznym celem budowy modelu decyzyjnego MDE_{ST} jest generowanie tzw. harmonogramów transportowych, pozwalających na czasoprzestrzenną transformację statycznych, potencjalnych zasobów logistycznych (transportowych) w dynamiczne procesy transportowe. Procedura transformacji zasobów logistycznych Z_{ST} w procesy transportowe P_{ST} realizowana jest przy jednoczesnym spełnieniu pewnego zbioru ograniczeń systemowych i warunków brzegowych G_{ST}, gwarantujących optymalizację przyjętego wskaźnika jakości — funkcji kryterium F_{ST}.

ZASOBY OPERACYJNE SYSTEMU TRANSPORTOWEGO

Pojęcie zasobów operacyjnych systemu transportowego Z_{ST} będziemy odnosić do zasadniczych kategorii jego potencjału wykonawczego i stanowią one rodzaj mediów, które warunkują sprawne technicznie i efektywne ekonomicznie przepływy dóbr materialnych na danej sieci transportowej, zdeterminowanej na przykład potrzebami podmiotów gospodarczych. Generalnie zasoby operacyjne systemu transportowego Z_{ST} dzielą się na dwie zasadnicze kategorie, obejmujące zasoby niematerialne i materialne:

$$Z_{ST} = \{Z_N^{ST}, Z_M^{ST}\}, \tag{3}$$

gdzie:
Z_N^{ST} — zasoby niematerialne systemu transportowego;
Z_M^{ST} — zasoby materialne systemu transportowego.

Zasoby niematerialne utożsamiane są z potencjałem sterowniczym — kierowania i zarządzania systemem transportowym — i obejmują w szczególności jego organa kierownicze oraz różnorodne systemy ich organizacji — strukturalne, hierarchiczne, macierzowe, liniowe itp. Wielka złożoność modelowanego makrosystemu transportowego sprawia, że struktura i organizacja jego organów kierowania jest równie skomplikowana i musi być rozpatrywana przynajmniej w czterech zasadniczych wymiarach: społecznym, administracyjnym, gałęziowym i branżowym (biznesowym).

$$Z_N^{ST} = \{Z_{Ni}^{ST}; \quad i = \overline{1,4}\}, \tag{4}$$

gdzie:
Z_{N1}^{ST} — zasoby społeczne systemu transportowego ST;
Z_{N1}^{ST} — zasoby administracyjne systemu transportowego ST;
Z_{N1}^{ST} — zasoby gałęziowe systemu transportowego ST;
Z_{N1}^{ST} — zasoby biznesowe systemu transportowego ST.

Zgodnie z etapem modelowania identyfikacyjnego poszczególne kategorie zasobów niematerialnych dzielą się na podkategorie, obejmujące odpowiednio:

$$Z_{N1}^{ST} = \{Z_{N1j}^{ST}; \quad j = \overline{1,J}\}, \tag{5}$$

gdzie:
Z_{N11}^{ST} — zasoby kadrowe i personel specjalistyczny, głównie kierowcy;
Z_{N12}^{ST} — wiedza, umiejętności i doświadczenie zawodowe personelu;

Z_{N13}^{ST} — obowiązujące uregulowania legislacyjne w zakresie transportu;
Z_{N14}^{ST} — organa bezpieczeństwa transportu (policja, inspekcje);
Z_{N15}^{ST} — jednostki kontroli technicznej (stacje diagnostyczne);

$$Z_{N2}^{ST} = \{Z_{N2j}^{ST}; \quad j = \overline{1,J}\}, \tag{6}$$

gdzie:
Z_{N21}^{ST} — organa władzy na szczeblu centralnym, np. Ministerstwo Infrastruktury;
Z_{N22}^{ST} — jednostki administracji transportowej na szczeblu wojewódzkim;
Z_{N23}^{ST} — jednostki administracji transportowej na szczeblu powiatowym;
Z_{N24}^{ST} — jednostki administracji transportowej na szczeblu gminnym;

$$Z_{N3}^{ST} = \{Z_{N3j}^{ST}; \quad j = \overline{1,J}\}, \tag{7}$$

gdzie:
Z_{N31}^{ST} — przepisy prawne, normy techniczne i administracja transportu lotniczego;
Z_{N32}^{ST} — przepisy prawne, normy techniczne i administracja transportu drogowego;
Z_{N33}^{ST} — przepisy prawne, normy techniczne i administracja transportu kolejowego;
Z_{N34}^{ST} — przepisy prawne, normy techniczne i administracja transportu morskiego;
Z_{N35}^{ST} — przepisy prawne, normy techniczne i administracja transportu śródlądowego;

$$Z_{N4}^{ST} = \{Z_{N4j}^{ST}; \quad j = \overline{1,J}\}, \tag{8}$$

gdzie:
Z_{N41}^{ST} — zleceniodawcy (klienci) usług transportowych;
Z_{N42}^{ST} — organizacje biznesowe zewnętrznego otoczenia rynkowego;
Z_{N43}^{ST} — podmioty gospodarcze wewnętrznego otoczenia biznesowego;
Z_{N44}^{ST} — biznesowe struktury organizacyjne systemu transportowego;
Z_{N45}^{ST} — kooperanci i podwykonawcy usług transportowych.

Zasoby materialne makrosystemu transportowego Z_M^{ST} dzielą się na zasoby (elementy) statyczne i dynamiczne:

$$Z_M^{ST} = \{Z_{MS}^{ST}, \quad Z_{MD}^{ST}\}, \tag{9}$$

gdzie:
Z_{MS}^{ST} — zasoby statyczne reprezentowane przez sieć komunikacyjną obejmującą elementy liniowe (szlaki) i elementy nieliniowe (porty);

Z_{MD}^{ST} — zasoby dynamiczne reprezentowane przez systemy i urządzenia techniczne oraz środki transportowe (tabor) systemu transportowego.

Zbiór zasobów statycznych makrosystemu transportowego Z_{MS}^{ST} jest rozpatrywany przede wszystkim według kryterium gałęziowego, które generuje następujący podział:

$$Z_{MS}^{ST} = \{Z_{MKi}^{ST}; \quad i = \overline{1,I}\}, \tag{10}$$

gdzie:
Z_{MD1}^{ST} — sieć komunikacyjna transportu lotniczego (korytarze, porty lotnicze);
Z_{MS2}^{ST} — sieć komunikacyjna transportu drogowego (drogi i centra drogowe);
Z_{MS3}^{ST} — sieć komunikacyjna transportu kolejowego (szlaki i stacje kolejowe);
Z_{MS4}^{ST} — sieć komunikacyjna transportu morskiego (szlaki i porty morskie);
Z_{MS5}^{ST} — sieć komunikacyjna transportu śródlądowego (szlaki i porty śródlądowe);
Z_{MS6}^{ST} — sieć komunikacyjna transportu przesyłowego (rurociągi, gazociągi).

Kategoria zasobów dynamicznych makrosystemu transportowego jest bardzo rozległa i obejmuje różne konwencje klasyfikacyjne, które najogólniej można podzielić na środki transportowe i pomocnicze urządzenia techniczne:

$$Z_{MD}^{ST} = \{Z_{MDS}^{ST}, \; Z_{MDU}^{ST}\}, \tag{11}$$

gdzie:
Z_{MDS}^{ST} — środki transportowe (tabor);
Z_{MDU}^{ST} — pomocnicze techniczne urządzenia transportowe.

Według kardynalnego kryterium podziału gałęziowego transportu środki transportowe Z_{MDS}^{ST} dzielą się w sposób następujący:

$$Z_{MDS}^{ST} = \{Z_{MDSi}^{ST}; \quad i = \overline{1,I}\}, \tag{12}$$

gdzie:
Z_{MDS1}^{ST} — środki transportu lotniczego (samoloty, śmigłowce, sterowce);
Z_{MDS2}^{ST} — środki transportu drogowego (pojazdy samochodowe, przyczepy, naczepy);
Z_{MDS3}^{ST} — środki transportu kolejowego (lokomotywy, wagony, pojazdy szynowe);
Z_{MDS4}^{ST} — środki transportu morskiego (statki towarowe, jednostki specjalne);
Z_{MDS5}^{ST} — środki transportu śródlądowego (barki, pchacze, holowniki, pogłębiarki).

Zbiór technicznych urządzeń pomocniczych, funkcjonujących w systemie transportowym Z_{MDU}^{ST} jest wielce zróżnicowany i wstępnie można go podzielić na następujące podzbiory:

$$Z_{MDU}^{ST} = \{Z_{MDUi}^{ST}; \quad i = \overline{1,I}\}, \tag{13}$$

gdzie:

Z_{MDU1}^{ST} — systemy obsługi i diagnostyki technicznej środków transportowych;

Z_{MDU2}^{ST} — stacje paliw i punkty tankowania pojazdów, samolotów, statków;

Z_{MDU3}^{ST} — techniczne urządzenia i systemy przeładunkowe;

Z_{MDU4}^{ST} — tabor specjalny (ratowniczy, ewakuacyjny, holowniczy, serwisowy);

Z_{MDU5}^{ST} — techniczne urządzenia bezpieczeństwa ruchu na szlakach;

Z_{MDU6}^{ST} — systemy teleinformatyczne i urządzenia telematyki transportowej.

OPERACYJNE PROCESY TRANSPORTOWE

Istotą transportowego zabezpieczenia procesów logistycznych, w ogólności rynkowej działalności gospodarczej, jest transformacja statycznych zasobów transportowych Z_{ST} w dynamiczne procesy przepływu surowców, materiałów, wyrobów gotowych P_{ST} między poszczególnymi ogniwami logistycznego łańcucha dostaw[4]. Proces transformacji statycznych zasobów transportowych Z_{ST} w dynamiczne procesy transportowe P_{ST} odbywa się za pomocą pewnej funkcji działań operacyjnych Q_{ST}, którą można zdefiniować w sposób następujący:

$$Q_{ST} : Z_{ST} \longrightarrow P_{ST}(t) \qquad lub \qquad P_{ST} = Q_{ST}(P_{ST}(t)), \tag{14}$$

gdzie:

Q_{ST} — funkcja działań operacyjnych systemu transportowego;

Z_{ST} — statyczne zasoby logistyczne systemu transportowego;

$P_{ST}(t)$ — dynamiczne procesy transportowe, warunkujące pokonanie czasoprzestrzeni logistycznej $X \times T$.

[4] Szczegółową specyfikację operacyjnych procesów transportowych rozpatrywanych według menadżerskich kryteriów logistycznych zawiera praca: J. Tarkowski, B. Irestahl, K. Lumsden, *Transport — Logistyka*, ILiM, Poznań 1995.

Funkcja operacyjna Q_{ST} realizuje główne zadania makrosystemu transportowego rozpatrywane na dowolnym szczeblu zarządzania biznesowego — strategicznym, taktycznym i operacyjnym. Realizacja funkcji Q_{ST} prowadzi do aktywacji fizycznych procesów transportowych, zgodnie z wymaganiami klientów zgłaszanych do systemu za pomocą zleceń na wykonanie określonych usług transportowych. Jak wynika z wyrażenia (14) funkcja operacyjna Q_{ST} jest funkcją parametryczną, której zmienną niezależną są statyczne zasoby logistyczne Z_{ST}, natomiast parametrem jest czynnik czasowy $t \in T$, należący do pewnego horyzontu planistycznego T, stanowiącego czasową podstawę działań biznesowych[5].

Formalnie pojęcie procesów transportowych będziemy odnosić do świadczenia różnorodnych usług transportowych wraz z towarzyszącymi im czynnościami pomocniczymi, takimi jak operacje przeładunkowe, wykorzystanie opakowań transportowych, obsługa celna zlecenia transportowego, ochrona i monitoring przesyłki itp. Szczególnym atrybutem każdego procesu transportowego jest postulat minimalizacji kosztów danej operacji transportowej, będący zasadniczym kryterium działań biznesowych zarówno z punktu widzenia klienta, jak i wykonawcy usługi transportowej. Dodatkowo klienta interesują najwyższe standardy obsługi logistycznej, natomiast wykonawcę najwyższy poziom rynkowej konkurencyjności świadczonych usług czy sprzedawanych świadczeń i produktów transportowych.

Wstępnie ogół procesów (operacji) transportowych można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

$$P_{ST}(t) = \{P_T^{ST}, P_U^{ST}\}, \tag{15}$$

gdzie:
P_T^{ST} — zasadnicze czynności transportowe;
P_U^{ST} — dodatkowe usługi transportowe.

Wykonywane przez modelowany makrosystem zasadnicze procesy (czynności) transportowe P_T^{ST} można klasyfikować na wiele sposobów i według różnych kryteriów. Z punktu widzenia technologii działalności gospodarczej procesy transportowe dzielą się na dwie kategorie:

$$P_T^{ST} = \{P_{TW}^{ST}, P_{TZ}^{ST}\}, \tag{16}$$

[5] Ogólne kierunki optymalizacji rynkowych usług transportowych zostały nakreślone w pracy: A. Całczyński, *Metody optymalizacyjne w obsłudze transportowej rynku*, PWE, Warszawa 1992.

gdzie:
P_{TW}^{ST} — transport wewnętrzny (technologiczny);
P_{TZ}^{ST} — transport zewnętrzny (dystrybucyjny).

Systemy transportu wewnętrznego ściśle wiążą się ze specyfiką i charakterem prowadzonej działalności biznesowej — usługowej, handlowej, produkcyjnej itp., a ich analiza wymaga sprecyzowania konkretnych warunków prowadzonej działalności gospodarczej. Znacznie bardziej ogólne są rynkowe procesy transportowe, nazywane też transportem dystrybucyjnym, który polega na przemieszczaniu surowców, materiałów i wyrobów gotowych zgodnie z potrzebami rynkowymi poszczególnych klientów. Ze względu na kryterium logistycznej funkcjonalności transport rynkowy dzieli się na:

$$P_{TZ}^{ST} = \{P_{TZi}^{STF}; \quad i = \overline{1,I}\} \subseteq P_{T}^{ST}, \tag{17}$$

gdzie:
P_{TZ1}^{STF} — transport zaopatrzeniowy (zakupowy), którego przedmiotem są surowce i materiały zaopatrzeniowe do prowadzenia działalności gospodarczej;
P_{TZ2}^{STF} — transport produkcyjny (wewnętrzny), obsługujący podmioty gospodarcze zgodnie z technologią realizowanych procesów produkcyjnych, usługowych;
P_{TZ3}^{STF} — transport dystrybucyjny (sprzedażowy), którego przedmiotem są przede wszystkim wyroby gotowe, a także półprodukty, detale, części;
P_{TZ4}^{STF} — transport redystrybucyjny (zwrotny), obsługujący całą gamę odpadów, które powstają we wszystkich fazach działalności gospodarczej jako odpady zaopatrzeniowe, produkcyjne czy dystrybucyjne.

Równie popularny jest podział procesów transportowych ze względu na kryterium przestrzennego zasięgu, które wyodrębnia:

$$P_{TZ}^{ST} = \{P_{TZi}^{STZ}; \quad i = \overline{1,I}\} \subseteq P_{T}^{ST}, \tag{18}$$

gdzie:
P_{TZi}^{STZ} — procesy transportowe w sakli lokalnej;
P_{TZi}^{STZ} — procesy transportowe w skali regionalnej;
P_{TZi}^{STZ} — procesy transportowe w skali krajowej;
P_{TZi}^{STZ} — procesy transportowe w skali międzynarodowej.

Jeszcze innym kryterium klasyfikacji procesów transportowych może być kryterium terminowości dostaw, które najogólniej dzieli je na:

$$P_{TZ}^{ST} = \{P_{TZ1}^{STT}, P_{TZ2}^{STT}\} \subseteq P_{T}^{ST}, \tag{19}$$

gdzie:
P_{TZ1}^{STT} — transport zwykły;
P_{TZ2}^{STT} — transport ekspresowy.

Tradycyjnym, fizycznym procesom transportowym towarzyszą z reguły różne usługi i świadczenia transportowe, takie jak na przykład:

$$P_{U}^{ST} = \{P_{Ui}^{ST}, \quad i = \overline{1,I}\}, \tag{20}$$

gdzie:
P_{U1}^{ST} — czynności i operacje przeładunkowe;
P_{U2}^{ST} — formowanie przesyłek transportowych;
P_{U3}^{ST} — ubezpieczenie przesyłek transportowych;
P_{U4}^{ST} — obsługa celna transgranicznego ruchu towarów;
P_{U5}^{ST} — spełnienie szczególnych warunków bezpieczeństwa i ochrony;
P_{U6}^{ST} — wykorzystanie specjalistycznego taboru transportowego;
P_{U7}^{ST} — spełnienie dodatkowych norm ekologicznych.

Szczególną formą usług transportowych są czynności realizowane w sferze kierowania i zarządzania poszczególnymi operacjami transportowymi P_{UK}^{ST}, a dotyczące takich aspektów jak na przykład:

$$P_{UK}^{ST} = \{P_{UKi}^{ST}, \quad i = \overline{1,I}\} \subseteq P_{U}^{ST}, \tag{21}$$

gdzie:
P_{UKi}^{ST} — planowanie usługi transportowej (wybór środka transportu, trasy przewozu, terminu przejazdu, operacji przeładunkowych, podwykonawców);
P_{UKi}^{ST} — organizowanie procesu transportowego (przydział środka transportu, trasy transportowej, ubezpieczenie i monitorowanie przesyłki, obsługa celna);
P_{UKi}^{ST} — stymulowanie procesu transportowego (efektywne wykorzystanie środków transportowych, minimalizowanie kosztów, minimalizowanie czasu);
P_{UKi}^{ST} — kontrolowanie procesu transportowego (monitorowanie przesyłki, analiza statusu realizacji zlecenia, kalkulowanie kosztów, bilansowanie zasobów).

OGRANICZENIA I WARUNKI BRZEGOWE

Modelowany makrosystem transportowy funkcjonuje w określonym środowisku biznesowym, technologicznym, finansowym, a przede wszystkim rynkowym. Z jednej strony realizuje on swoją, wewnętrzną misję rynkową, czyli kompleksowe świadczenie usług transportowych, z drugiej musi spełniać wysokie, zewnętrzne wyzwania konkurencji rynkowej, dyktowane przez inne podmioty gospodarcze, zajmujące się podobnym profilem działalności. Dlatego sprawna organizacyjnie i efektywna ekonomicznie realizacja procesów transportowych wymaga spełnienia szeregu uwarunkowań systemowych, które najogólniej dzielą się na ograniczenia standardowe oraz ograniczenia wewnętrzne i warunki (brzegowe) zewnętrzne:

$$G_{ST} = \{G_S^{ST}, G_W^{ST}, G_Z^{ST}\}, \tag{22}$$

gdzie:

G_S^{ST} — ograniczenia standardowe, wynikające głównie z zasady *Just in Time*;

G_W^{ST} — ograniczenia wewnętrzne generowane przez system transportowy;

G_Z^{ST} — ograniczenia zewnętrzne narzucane przez otoczenie rynkowe systemu transportowego.

Ograniczenia standardowe G_S^{ST} będziemy odnosić do spełnienia standardów „żelaznej" zasady logistycznej *Just in Time*, które każdy system logistyczny musi realizować w pierwszej kolejności, a mianowicie:

$$G_S^{ST} = \{G_{Si}^{ST}; \quad i = \overline{1, I}\}, \tag{23}$$

gdzie:

$G_{S1}^{ST} = G_{S1(t)}^{ST}$ — warunek terminowości dostaw w ściśle wyznaczonym czasie;

$G_{S2}^{ST} = G_{S2(x,y)}^{ST}$ — warunek adekwatności przestrzennej miejsca dostaw;

$G_{S3}^{ST} = G_{S3(a)}^{ST}$ — warunek dostawy ściśle ustalonego asortymentu;

$G_{S4}^{ST} = G_{S4(w)}^{ST}$ — warunek dostawy asortymentowej w odpowiedniej ilości;

$G_{S5}^{ST} = G_{S5(STO)}^{ST}$ — warunek rynkowych standardów usługi transportowej;

$G_{S6}^{ST} = G_{S6(\$)}^{ST}$ — warunek przestrzegania wynegocjowanej ceny usługi transportowej.

We współczesnej, wysoce konkurencyjnej gospodarce rynkowej nadrzędnym kryterium sprawności i efektywności funkcjonalnej systemu transportowego

jest spełnienie czasoprzestrzennego kryterium — właściwego czasu $G_{S1}^{ST} = G_{S1(t)}^{ST}$ i właściwego miejsca $G_{S2}^{ST} = G_{S2(x,y)}^{ST}$ świadczonej usługi transportowej. Najbardziej krytycznym czynnikiem jest element czasowy, który determinuje najwyższe standardy obsługi i konkurencyjność danego sektora gospodarczego. Minimalizacja czasu wykonania usługi transportowej jest symbolem najwyższych standardów obsługi i wyróżnikiem danego podmiotu:

$$G_{S1}^{ST} \in G_{S}^{ST} \xrightarrow{min} G_{S1}^{ST}(t_{min}). \tag{24}$$

Kolejne trzy warunki standardowe G_{Si}^{ST} powinny być spełnione zgodnie z ustalonymi wartościami nominalnymi:

$$G_{S2}^{ST} \in G_{S}^{ST} \xrightarrow{nom} G_{S2}^{ST}(x^*, y^*), \tag{25}$$

gdzie
$G_{S2}^{ST}(x^*, y^*)$ — współrzędne przestrzenne docelowego miejsca dostawy;

$$G_{S3}^{ST} \in G_{S}^{ST} \xrightarrow{nom} G_{S3}^{ST}(a^* \in A), \tag{26}$$

gdzie
$G_{S3}^{ST}(a^* \in A)$ — żądany asortyment dostawy w procesach transportowych;

$$G_{S4}^{ST} \in G_{S}^{ST} \xrightarrow{nom} G_{S4}^{ST}(a(w^*) \in R^+), \tag{27}$$

gdzie
$G_{S4}^{ST}(a(w^*) \in R^+)$ — ustalona wielkość dostawy (przesyłki) danego asortymentu.

Logistyczne standardy obsługi transportowej muszą być spełnione w sposób maksymalnie satysfakcjonujący klienta:

$$G_{S5}^{ST} \in G_{S}^{ST} \xrightarrow{max} G_{S5}^{ST}(STO_{max}). \tag{28}$$

Z nadrzędnego punktu widzenia klienta zlecającego przesyłkę cena świadczonej usługi transportowej powinna być możliwie minimalna $\$_{min}^{ST}$, gdyż podnosi to poziom konkurencyjności danego sektora:

$$G_{S6}^{ST} \in G_{S}^{ST} \xrightarrow{min} G_{S6}^{ST}(\$_{min}^{ST}). \tag{29}$$

Zgodnie z naczelną zasadą logistyczną *Just in Time* wszystkie wynegocjowane i akceptowane przez usługodawcę i usługobiorcę warunki muszą być spełnione w trakcie wykonywanej usługi transportowej. Grupa warunków (24)–(29) zobowiązuje wykonawcę usługi transportowej do spełnienia ustalonych rygorów transportowych

W zbiorze ograniczeń wewnętrznych G_W^{ST}, jakie determinują działania operacyjne systemu transportowego, można wyróżnić dwie zasadnicze grupy:

$$G_W^{ST} = \{G_{WO}^{ST}, G_{WT}^{ST}\}, \tag{30}$$

gdzie:

G_{WO}^{ST} — ograniczenia operacyjne systemu transportowego;

G_{WT}^{ST} — ograniczenia czasoprzestrzenne usługi transportowej.

Ograniczenia operacyjne wynikają z pewnych uwarunkowań i możliwości potencjałowych, jakimi dysponuje system transportowy. Możliwości funkcjonalne praktycznie każdego systemu prakseologicznego są zawsze skończone i ograniczone i często niewspółmierne do rzeczywistych (chwilowych) potrzeb generowanych przez potencjalnych klientów. Ograniczoność potencjału operacyjnego systemu transportowego wynika z jego struktury organizacyjno-funkcjonalnej i dostępnych sił fizycznych i środków technicznych. Zbiór ograniczeń operacyjnych zawiera przykładowo następujące kategorie limitów transportowych:

$$G_{WO}^{ST} = \{G_{WOi}^{ST}; \quad i = \overline{1, I}\}, \tag{31}$$

gdzie:

$G_{WO1}^{ST} \leq max G_{WO1}^{ST}$ — ograniczona liczba i rodzaje środków transportowych;

$G_{WO2}^{ST} \leq max G_{WO2}^{ST}$ — możliwości przewozowe środków transportowych;

$G_{WO3}^{ST} \leq max G_{WO3}^{ST}$ — ograniczona podatność transportowa ładunków;

$G_{WO4}^{ST} \leq max G_{WO5}^{ST}$ — możliwości operatywne urządzeń przeładunkowych;

$G_{WO6}^{ST} = max G_{WO6}^{ST}$ — formalno-prawne warunki bezpieczeństwa transportu;

$G_{WO7}^{ST} = max G_{WO7}^{ST}$ — wysokie wymagania ekologiczne usług transportowych;

$G_{WO8}^{ST} \leq max G_{WO8}^{ST}$ — ograniczone możliwości formowania jednostek ładunkowych;

$G_{WO9}^{ST} \leq max G_{WO9}^{ST}$ — konieczność bilansowania potencjalnych potrzeb rynkowych i realnych możliwości transportowych.

Ograniczenia czasoprzestrzenne G_{WT}^{ST} dotyczą na przykład następujących aspektów:

$$G_{WT}^{ST} = \{G_{WTi}^{ST}; \quad i = \overline{1,I}\}, \tag{32}$$

gdzie:

$G_{WT1}^{ST} \leq max\ G_{WO1}^{ST}$ — prędkość eksploatacyjna środków transportowych;

$G_{WT2}^{ST} \leq max\ G_{WO2}^{ST}$ — czas pracy kierujących środkami transportowymi;

$G_{WT3}^{ST} = nom\ G_{WO3}^{ST}$ — ściśle zdeterminowana struktura sieci komunikacyjnej;

$G_{WT4}^{ST} = nom\ G_{WO4}^{ST}$ — ograniczona dostępność sieci komunikacyjnej;

$G_{WT5}^{ST} = nom\ G_{WO5}^{ST}$ — ustalone parametry eksploatacyjne sieci komunikacyjnej;

$G_{WT6}^{ST} \leq max G_{WO6}^{ST}$ — wpływ czynników losowych na termin i trasę dostawy.

Znaczące, a często bardzo dynamiczne ograniczenia standardów funkcjonowania systemu transportowego generuje szeroko pojęte otoczenie zewnętrzne oraz różne zewnętrzne czynniki rynkowe i losowe. Silny wpływ czynników zewnętrznych na funkcjonowanie systemu transportowego wynika z faktu, że działa on w otwartej, ogólnodostępnej czasoprzestrzeni logistycznej. Na ogół korzysta on z publicznej sieci komunikacyjnej, w której funkcjonuje wielu innych operatorów transportowych, generujących różne zdarzenia krytyczne i losowe, co ogranicza przepustowość danej sieci. Oddziaływanie otoczenia zewnętrznego należy widzieć także przez wpływ losowych czynników klimatycznych i pogodowych, które mogą poważnie zakłócać realizację planów transportowych. Innym czynnikiem destruktywnie wpływającym na pracę systemu transportowego są zdarzania losowe (awarie, wypadki, katastrofy komunikacyjne), a także oddziaływanie czynników społecznych, administracyjnych i niekiedy biznesowych (blokady szlaków, remonty planowane i nieplanowane, zakłócenia i protesty społeczne). Ograniczenia zewnętrzne mają charakter zmiennych losowych, których przykładami są następujące czynniki:

$$G_{Z}^{ST} = \{G_{Zi}^{ST}; \quad i = \overline{1,I}\}, \tag{33}$$

gdzie:

$G_{Z1}^{ST} \neq G_{Z1nom}^{ST}$ — konieczność sprostania zewnętrznej konkurencji rynkowej;

$G_{Z2}^{ST} \neq G_{Z2nom}^{ST}$ — zmienność opłat transportowych i stawek komunikacyjnych;

$G_{Z3}^{ST} \neq G_{Z3nom}^{ST}$ — zmienne ceny paliw i usług serwisowych;

$G_{Z4}^{ST} \neq G_{Z4nom}^{ST}$ — zmienne opłaty tranzytowe, autostradowe, mostowe, przeprawowe;

$G_{Z5}^{ST} \neq G_{Z5nom}^{ST}$ — zmienne warunki klimatyczne i pogodowe transportu;
$G_{Z6}^{ST} \neq G_{Z6nom}^{ST}$ — zmienne warunki terenowe na sieci komunikacyjnej;
$G_{Z7}^{ST} \neq G_{Z7nom}^{ST}$ — wystąpienie zdarzeń losowych zakłócających realizację kontraktu;
$G_{Z8}^{ST} \neq G_{Z8nom}^{ST}$ — konieczność ponoszenia dodatkowych kosztów losowych;
$G_{Z9}^{ST} \neq G_{Z9nom}^{ST}$ — niedobór informacji do operatywnego zarządzania transportem.

Z uwagi na rozległy i rozproszony charakter infrastruktury komunikacyjnej jest ona szczególnie narażona na oddziaływanie różnych form destrukcji, zgodnych i niezgodnych z prawem, co zasadniczo komplikuje wywiązywanie się przewoźników i spedytorów ze swoich zobowiązań w stosunku do potencjalnych kontrahentów. Im dłuższa i bardziej rozproszona jest trasa określonej usługi transportowej, tym potencjalne spektrum zagrożeń i niekorzystnych oddziaływań losowych i celowych jest większe i generuje nowe dynamiczne ograniczenia, negatywnie wpływające na rynkowe standardy obsługi klienta, a tym samym na konkurencyjność świadczonych usług transportowych.

FUNKCJA KRYTERIUM

Realizacja omówionych tu procesów logistycznych P_{ST} pociąga za sobą zużycie określonych zasobów logistycznych Z_{ST} i przebiega w określonej przestrzeni operacyjnej (X) oraz w czasie rzeczywistym (T), co implikuje konieczność pokonania tzw. czasoprzestrzeni logistycznej $(X \times T)$. Postulat minimalizacji czasoprzestrzeni logistycznej $((X \times T) \longrightarrow min)$ jest aksjomatycznym kryterium działania każdego systemu logistycznego, w szczególności makrosystemu transportowego:

$$F_{ST} \rightarrow \min_{t \in T,\ x \in X} F(t, x), \tag{34}$$

gdzie:
F_{ST} — funkcja kryterium systemu transportowego;
$F(t, x)$ — funkcja czasoprzestrzeni logistycznej;
$t \in T$ — zmienna decyzyjna, niezależna obrazująca pokonanie czasu;
$x \in X$ — zmienna decyzyjna, niezależna obrazująca pokonanie przestrzeni;
T — zbiór dopuszczalnych czasów realizacji zadania transportowego;
X — zbiór dopuszczalnych wektorów tras transportowych.

Uniwersalnym kryterium oceny każdego makrosystemu transportowego *ST* jest minimalizacja czasoprzestrzeni logistycznej ($min(F(t,x))$) przy jednoczesnym spełnieniu obszernego zbioru ograniczeń i uwarunkowań brzegowych (G_{ST}). System transportowy *ST*, jako prakseologiczny system sprawnego działania, musi spełniać dodatkowo szereg ograniczeń i uwarunkowań natury organizacyjnej, technicznej, rynkowej oraz prawno-międzynarodowej[6]. Szczególną kategorią ograniczeń są te dotyczące standardów transportowych obowiązujących na szlakach komunikacyjnych Unii Europejskiej[7].

Formalnie kryterium minimalizacji czasoprzestrzeni logistycznej w najprostszym, dwuwymiarowym wariancie ($T \times X$) możemy zapisać w następujący sposób:

$$F(t^*, x^*) = \big(F(t,x)\big) \parallel K_{ST} \longrightarrow min; \qquad t^* \in T,\ x^* \in X\ , \tag{35}$$

gdzie:

$F(t^*, x^*)$ — optymalna wartość funkcji kryterium;

$t^* \in T$ — optymalna wartość zmiennej czasowej T;

$x^* \in X$ — optymalna wartość zmiennej przestrzennej X.

Pojęcie czasoprzestrzeni logistycznej i jej minimalizacja ($(X \times T) \rightarrow \min)$) jest centralnym problemem współczesnej logistyki rynkowej. Spełnienie warunku (35) oznacza jednocześnie minimalizację długości logistycznego łańcucha dostaw, co w dalszej konsekwencji pociąga za sobą minimalizację kosztów procesów transportowych, a w pełnej perspektywie minimalizację kosztów funkcjonowania całego systemu transportowego *ST*:

$$F_{ST} \rightarrow \min_{t \in T,\ x \in X} F(t,x) \rightarrow \min_{t \in T,\ x \in X} K_{ST}(t,x), \tag{36}$$

gdzie:

F_{ST} — funkcja kryterium systemu transportowego;

$K_{ST}(t,x)$ — funkcja globalnych kosztów systemu transportowego.

---

[6] Różne aspekty analitycznej oceny efektywności systemów logistycznych zob. M. Nowicka-Skowron, *Efektywność systemów logistycznych*, PWE, Warszawa 2000.

[7] Aplikacyjne projekty optymalizacji holenderskiej sieci transportowej wraz z pewnym studium realizacyjnym tych projektów, zawierającym rzeczywiste ograniczenia i uwarunkowania techniczno-organizacyjne, zawiera pionierska praca: P. A. Steenbrink, *Optymalizacja sieci transportowych*, WKiŁ, Warszawa 1978.

Problematyka wyznaczania kosztów transportu K_{ST} należy do najtrudniejszych zadań i problemów decyzyjnych logistyki rynkowej, co wynika z jednej strony z ogromnej złożoności ich struktury rodzajowej, z drugiej z dominującej ich wartości w strukturze ogólnych kosztów procesów logistycznych[8]. Dla potrzeb budowanego makromodelu globalne koszty systemu transportowego K_{ST} zostaną zdekomponowane na trzy zasadnicze kategorie[9]:

$$K^{ST} = \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} \sum_{k=1}^{K} K_{ijk}^{ST}, \tag{37}$$

gdzie:

$K_{i(.)(.)}^{ST}$ — koszty operacyjne pokonania czasoprzestrzeni transportowej;

$K_{(.)j(.)}^{ST}$ — koszty zmienne sprawności technicznej systemu transportowego;

$K_{(.)(.)k}^{ST}$ — koszty stałe gotowości operacyjnej systemu transportowego.

W strukturze kosztów pokonania czasoprzestrzeni transportowej K_{XT}^{ST} można wyróżnić przykładowo następujące rodzaje:

$$K_{i(.)(.)}^{ST} = K_{XT}^{ST} = \sum_{i=1}^{I} K_{XT(i)}^{ST}, \tag{38}$$

gdzie:

$K_{XT(1)}^{ST}$ — koszty zużytego paliwa;

$K_{XT(2)}^{ST}$ — koszty bieżące opłat drogowych;

$K_{XT(3)}^{ST}$ — koszty zatrudnionego personelu;

$K_{XT(4)}^{ST}$ — koszty operacji przeładunkowych;

$K_{XT(5)}^{ST}$ — koszty zdarzeń losowych.

W strukturze kosztów utrzymania sprawności technicznej (eksploatacyjnej) systemu transportowego, głównie środków transportowych K_E^{ST}, można wyróżnić między innymi:

---

[8] Złożone problemy wielokryterialnego kosztorysowania zewnętrznych procesów transportowych zostały przeanalizowane w: A. Wielądek, *Koszty zewnętrzne transportu*, [w:] L. Mindur, *Technologie transportowe XXI wieku*, ITeE PIB, Warszawa — Radom 2008.

[9] Obszerna, wieloaspektowa specyfikacja kosztów i różne systemy kalkulacji cen usług transportowych zostały przedstawione m.in. w: J. Tarkowski, B. Irestahl, K. Lumsden, *Transport — Logistyka*, ILiM, Poznań 1995.

$$K^{ST}_{(.)j(.)} = K^{ST}_{E} = \sum_{j=1}^{J} K^{ST}_{E(i)}, \tag{39}$$

gdzie:

$K^{ST}_{E(1)}$ — koszty przeglądów technicznych;

$K^{ST}_{E(2)}$ — koszty remontów i napraw awaryjnych;

$K^{ST}_{E(3)}$ — koszty dodatkowego wyposażenia;

$K^{ST}_{E(4)}$ — koszty zakupu i leasingu środków transportowych.

W strukturze kosztów stałych gotowości operacyjnej systemu transportowego K^{ST}_{G} można wyróżnić na przykład:

$$K^{ST}_{(.)(.)k} = K^{ST}_{G} = \sum_{k=1}^{K} K^{ST}_{G(i)}, \tag{40}$$

gdzie:

$K^{ST}_{G(1)}$ — koszty ubezpieczenia środków transportowych;

$K^{ST}_{G(2)}$ — koszty podatków i opłaty stałe;

$K^{ST}_{G(3)}$ — koszty szkoleń personelu;

$K^{ST}_{G(4)}$ — koszty realizacji zleceń specjalnych;

$K^{ST}_{G(5)}$ — koszty utrzymania administracji.

Ponieważ funkcja globalnych kosztów systemu transportowego K_{ST} jest funkcją addytywną poszczególnych kosztów składowych, wobec tego pożądane jest, aby minimalizować każdą kategorię szczegółową, co będzie prowadziło do minimalizacji funkcji globalnej (36).

Zgodnie z zaproponowaną strukturą kosztów globalnych (37) kryterium optymalnego kierowania systemem transportowym można zdefiniować w kategorii realizacji optymalnej strategii zarządzania (Ω^{ST}), która składa się z trzech zasadniczych strategii cząstkowych:

$$\Omega^{ST} = \{\Omega^{ST}_{XT}, \Omega^{ST}_{E}, \Omega^{ST}_{G}\}, \tag{41}$$

gdzie:

Ω^{ST}_{XT} — strategia realizacji zleceń transportowych (obsługi klienta);

Ω^{ST}_{E} — strategia eksploatacji technicznej systemu transportowego;

Ω^{ST}_{G} — strategia utrzymania gotowości operacyjnej systemu transportowego.

W świetle powyższych uwag zadanie optymalizacji systemu transportowego możemy sformułować następująco — wyznaczyć taką strategię zarządzania systemem transportowym, która optymalizuje poniższą funkcję kryterium:

$$F_{ST} \xrightarrow{opty} F(\Omega_{XT*}^{ST}, \Omega_{E*}^{ST}, \Omega_{G*}^{ST}), \tag{42}$$

gdzie:

$\Omega_{XT*}^{ST} \in \Omega_{XT}^{ST}$ — optymalna strategia obsługi klienta (zleceń transportowych);

$\Omega_{E*}^{ST} \in \Omega_{E}^{ST}$ — optymalna strategia eksploatacji technicznej systemu transportowego;

$\Omega_{G*}^{ST} \in \Omega_{G}^{ST}$ — optymalna strategia utrzymania gotowości operacyjnej systemu.

Warunki optymalności poszczególnych strategii $(\Omega_{XT}^{ST}, \Omega_{E}^{ST}, \Omega_{G}^{ST} \in \Omega^{ST})$ zapiszemy jak poniżej:

$$\Omega_{XT}^{ST} \equiv \Omega_{XT*}^{ST} \quad \Leftrightarrow \quad K_{XT*}^{ST} = min\,\{K_{XT}^{ST}\}\ ; \tag{43}$$

$$\Omega_{E}^{ST} \equiv \Omega_{E*}^{ST} \quad \Leftrightarrow \quad K_{E*}^{ST} = min\,\{K_{E}^{ST}\}\ ; \tag{44}$$

$$\Omega_{G}^{ST} \equiv \Omega_{G*}^{ST} \quad \Leftrightarrow \quad K_{G*}^{ST} = min\,\{K_{G}^{ST}\}\ . \tag{45}$$

Bez względu na sposób prezentacji i użytą formułę funkcja kryterium modelowanego systemu transportowego (35) jest w ogólności złożoną, wielowymiarową funkcją o uwikłanej postaci, której optymalizacja, sprowadzona w tym przypadku do minimalizacji addytywnego wskaźnika kosztów, jest naczelnym zadaniem organów zarządzających systemem transportowym. Wypracowanie optymalnych strategii cząstkowych typu (42) stanowi spełnienie ekonomicznego kryterium funkcjonowania każdego podmiotu gospodarczego, utożsamianego aktualnie z makrosystemem transportowym.

HARMONOGRAMY ZADAŃ TRANSPORTOWYCH

Głównym celem modelowania makrosystemu transportowego (2) jest budowa takich strategii działania, które pozwolą optymalnie kierować (zarządzać) tym systemem w sensie przyjętego kryterium jakości typu (34). Zgodnie z wyrażeniem (35) tym kryterium jest albo optymalizacja czasoprzestrzeni logistycznej (36), albo optymalizacja metakryterium funkcjonalnego (42), będącego superpozycją strategii cząstkowych definiujących sposób działania systemu transportowego. W obu przypadkach efektem modelowania powinny być optymalne decyzje i będące ich pochodną wzorcowe procedury zarządzania systemem transportowym w różnych warunkach działania.

W praktyce gospodarczej optymalne decyzje sterownicze polegają na wyznaczeniu szczegółowych procedur i planów realizacji usług transportowych w określonych warunkach działania, przy systemowych ograniczeniach i uwarunkowaniach. Fizycznym obrazem tych decyzji są na przykład szczegółowe plany realizacji zleceń transportowych, a ich nośnikiem informacyjnym tak zwane harmonogramy przedsięwzięć czasoprzestrzennych[10] (H_{ST}).

W dwuwymiarowej czasoprzestrzeni $(X \times T)$ harmonogram zadań transportowych $(H_{ST}(x,t))$ można zdefiniować jako funkcję, która przekształca zmienną niezależną (t) w dwuwymiarowy punkt czasoprzestrzenny $(P(X \times T))$:

$$P(X \times T)) = \left(H_{ST}(x,t)\right) \quad lub \; H_{ST}(x,t) \rightarrow P(X \times T), \qquad (46)$$

gdzie:

$P(X \times T)$ — docelowy punkt czasoprzestrzenny w procesie realizacji zlecenia transportowego.

Dla potrzeb modelowania makrosystemu transportowego (2) harmonogram przedsięwzięć czasoprzestrzennych $(H_{ST}(x,t))$ zdefiniujemy za pomocą następującej piątki uporządkowanej:

$$H_{ST}(x,t) = \{< \alpha_k, P_x(\alpha_k), P_t(\alpha_k), \beta_k >; \quad k = \overline{1,K}\} \longrightarrow opty\,, \qquad (47)$$

gdzie:

$H_{ST}(x,t)$ — harmonogram przedsięwzięć czasoprzestrzennych;

α_k — nazwa (identyfikator) przedsięwzięcia (zadania, zlecenia);

$P_x(\alpha_k)$ — parametry przestrzenne k-tego przedsięwzięcia;

$P_t(\alpha_k)$ — parametry czasowe k-tego przedsięwzięcia;

β_k — dodatkowe zasoby i wymagania dla k-tego przedsięwzięcia;

K — liczba przedsięwzięć z zakresu zleceń transportowych.

Identyfikacja (metryka) k-tego przedsięwzięcia czasoprzestrzennego zadania transportowego $ZT(\alpha_k)$ może obejmować przykładowo:

[10] Teoretyczne podstawy czasoprzestrzennego harmonogramowania zadań i dysponowania określonymi zasobami, w tym przypadku komputerowymi, szeroko prezentowane są w: J. Błażewicz i inni, *Badania operacyjne dla informatyków*, WNT, Warszawa 1983. Zob. także: Z. Bubnicki, O. Hryniewicz, J. Węglarz, *Badania operacyjne i systemowe. Zastosowania*, EXIT, Warszawa 2004.

$$ZT(\alpha_k) = \{N(\alpha_k), W1(\alpha_k), W2(\alpha_k), W3(\alpha_k)\}, \tag{48}$$

gdzie:
$ZT(\alpha_k)$ — zlecone zadanie transportowe;
$N(\alpha_k)$ — identyfikator k-tego przedsięwzięcia (zlecenia transportowego);
$W1(\alpha_k)$ — pilność usługi (zwykła, ekspresowa, terminowa);
$W2(\alpha_k)$ — rodzaj ładunku (drobnica, masowe, niebezpieczne, żywność);
$W3(\alpha_k)$ — dodatkowe wymagania (naczepa, chłodnia, lora, pilot).

Zbiór podstawowych parametrów przestrzennych $P_x(\alpha_k)$ obejmuje następujące rodzaje danych:

$$P_x(\alpha_k) = < P_x^0(\alpha_k),\ P_x^1(\alpha_k),\ X_1^0(\alpha_k) >; \qquad k = \overline{1, K}, \tag{49}$$

gdzie:
$P_x^0(\alpha_k)$ — współrzędne i-tego punktu początkowego (nadawczego);
$P_x^1(\alpha_k)$ — współrzędne j-tego punktu docelowego (odbiorczego);
$X_1^0(\alpha_k)$ — k-ta marszruta łącząca punkt $P_x^0(\alpha_k)$ z punktem $P_x^1(\alpha_k)$.

W przypadku zdeterminowanych czasów trwania T_k danego przedsięwzięcia zbiór parametrów czasowych $P_t(\alpha_k)$ można zdefiniować za pomocą następującego wyrażenia:

$$P_t(\alpha_k) = \{< t_k^0, T_k > \wedge < t_k^1, T_k >; \quad k = \overline{1, K}\}, \tag{50}$$

gdzie:
t_k^0 — termin (moment) rozpoczęcia k-tego przedsięwzięcia;
T_k — czas trwania k-tego zlecenia transportowego;
t_k^1 — planowany termin (moment) zakończenia k-tego przedsięwzięcia.

Podstawowym zadaniem makrosystemu transportowego (2) jest pokonanie czasoprzestrzeni w sensie realizacji określonego harmonogramu $H_{ST}(x, t)$. Każde zadanie transportowe (48) można sprowadzić do dwóch czynności (zadań), których realizacja wymaga zawsze pokonania czasu i przestrzeni geograficznej, czyli czasoprzestrzeni logistycznej. Biorąc pod uwagę powyższe wyrażenia, zadanie optymalizacji procesu transportowego na gruncie teorii harmonogramów można zdefiniować w sposób następujący[11]:

[11] Operacyjne problemy harmonogramowania logistycznych łańcuchów dostaw zostały omówione w: K. Ficoń, *Logistyka ekonomiczna. Procesy logistyczne*, BEL Studio, Warszawa 2008.

dla każdego przedsięwzięcia $\alpha_k \in ZT(\alpha_k)$

$$\alpha_k \in ZT(\alpha_k) = \{N(\alpha_k), W1(\alpha_k), W2(\alpha_k), W3(\alpha_k)\} \tag{51}$$

należy wyznaczyć parametry czasoprzestrzeni logistycznej

$$\{< P_x^0(\alpha_k),\ P_x^1(\alpha_k),\ X_1^0(\alpha_k) >;\ < t_k^0, T_k > \wedge < t_k^1, T_k >\};\quad k = \overline{1, K}\ , \tag{52}$$

gdzie:

$P_x^0(\alpha_k)$ — współrzędne przestrzenne punktu startowego (nadawcy);

$P_x^1(\alpha_k)$ — współrzędne przestrzenne punktu docelowego (odbiorcy);

$X_1^0(\alpha_k)$ — marszruta z punktu startowego $P_x^0(\alpha_k)$ do punktu docelowego $P_x^1(\alpha_k)$;

t_k^0 — planowany moment rozpoczęcia k-tej usługi transportowej;

T_k — normatywny czas trwania k-tej usługi transportowej;

t_k^1 — planowany czas zakończenia k-tej usługi transportowej.

Zgodnie z wyrażeniem (47) optymalne zarządzanie systemem transportowym polega na wyznaczeniu dla każdego zadania (zlecenia) transportowego $\alpha_k \in ZT(\alpha_k)$ dopuszczalnego harmonogramu zabezpieczenia logistycznego $H_{ST}(x, t)$:

$$H_{ST}(x, t) = \{< P_x^0(\alpha_k),\ P_x^1(\alpha_k),\ X_1^0(\alpha_k),\ \beta_k >\} \begin{cases} < t_k^0, T_k > \\ < t_k^1, T_k > \end{cases};\ k = \overline{1, K}\ . \tag{53}$$

Uporządkowane trójki zmiennych $< P_x^0(\alpha_k),\ P_x^1(\alpha_k),\ X_1^0(\alpha_k) >$ determinują jednoznacznie przestrzenne parametry harmonogramu dostaw transportowych $H_{ST}(x, t)$, natomiast trójki $< t_k^0, t_k^1, T_k >$ parametry czasowe realizacji tych dostaw dla każdego zlecenia transportowego $\alpha_k \in ZT(\alpha_k)$, wyczerpujących zbiór wszystkich zleceń rynkowych $k = \overline{1, K}$ spływających do systemu transportowego.

W ogólności konstruowanie optymalnych harmonogramów transportowych typu (53) jest przedsięwzięciem niezwykle złożonym, wymagającym dużej wiedzy oraz znaczących nakładów pracy koncepcyjnej i analitycznej[12]. Szczegółowe harmonogramy transportowe są z reguły pochodną operacyjnych planów funkcjonowania systemu transportowego, dlatego często wykonywane są wariantowo, aby maksymalnie wykorzystać potencjał transportowy tego systemu $(\Pi_{ST} \nearrow max)$ oraz zminimalizować koszty realizacji poszczególnych zleceń transportowych $(K_{ST} \searrow min)$.

[12] Złożoność obliczeniowa problematyki szeregowania zadań na gruncie NP-zupełności rozpatrywana w aspekcie optymalizacji harmonogramów została szeroko przedstawiona w: *Teoria szeregowania zadań*, red. E. G. Hoffman, WNT, Warszawa 1980.

$$H_{ST}(x,t) \xrightarrow{opty} H^*_{ST}(x,t) \;\parallel\; (\Pi_{ST} \nearrow max) \wedge (K_{ST} \searrow min) \wedge \{JiT\}, \qquad (54)$$

gdzie:

$H^*_{ST}(x,t)$ — optymalny harmonogram transportowy;

$\Pi_{ST} \nearrow max$ — postulat efektywnego wykorzystania potencjału transportowego;

$K_{ST} \searrow min$ — postulat minimalizacji kosztów transportu;

$\{JiT\}$ — logistyczne standardy *Just in Time*.

Warunek efektywnego wykorzystania potencjału operacyjnego systemu transportowego $(\Pi_{ST} \nearrow max)$ dotyczy przykładowo takich aspektów jak:

$$\Pi_{ST} \nearrow \max \parallel \{\, \Pi^i_{ST};\;\; i = \overline{1,I} \,\}, \qquad (55)$$

gdzie:

Π^1_{ST} — efektywne wykorzystanie przestrzeni ładunkowej środków transportowych;

Π^2_{ST} — wykorzystanie platform do przewozu nietypowych ładunków;

Π^3_{ST} — ograniczenie operacji przeładunkowych i manipulacyjnych;

Π^4_{ST} — korzystanie z technologii transportu modalnego i multimodalnego;

Π^5_{ST} — optymalne projektowanie tras i marszrut transportowych;

Π^6_{ST} — ograniczenie pustych przebiegów środków transportowych;

Π^7_{ST} — wykorzystanie podwykonawców w ramach outsourcingu usług transportowych.

Spełnienie tych kryteriów efektywnej organizacji i technologii dostaw transportowych przyczynia się bezpośrednio do ograniczenia kosztów transportu, a tym samym do wzrostu konkurencyjności rynkowej całego systemu transportowego. Realizacja minimaksowego kryterium (36) przy budowaniu optymalnych wielowariantowych harmonogramów transportowych jest zadaniem bardzo trudnym, dlatego do ich sporządzenia wykorzystuje się najbardziej efektywne narzędzia, które oferuje między innymi współczesna technologia komputerowa. Do realizacji tego zadania doskonale nadaje się specjalistyczny pakiet programowy „MS-Project", który został stworzony głównie dla potrzeb komputerowego wspomagania zaawansowanych prac planistyczno-projektowych z zakresu złożonych przedsięwzięć czasoprzestrzennych[13].

[13] Metodologiczne podstawy budowania i wdrażania złożonych aplikacji informatycznych wspomagających działalność gospodarczą w sposób niezwykle pragmatyczny omówione zostało w: J. Philips, *Zarządzanie projektami IT*, One Press Helion, Gliwice 2005.

Zgodnie z wyrażeniem (1) procedura wyznaczania optymalnych harmonogramów realizacji rynkowych zleceń transportowych zamyka proces modelowania optymalizacyjnego makrosystemu transportowego i jednocześnie kończy proces matematycznego modelowania makrosystemu transportowego za pomocą sformalizowanych metod i narzędzi analizy systemowej.

ZAKOŃCZENIE

Matematyczne modelowanie wielkich systemów społeczno-techniczno-ekonomicznych, do których należy zaliczyć logistyczny makrosystem transportowy, jest przedsięwzięciem trudnym i złożonym i dlatego może być efektywnie rozwiązane jedynie na poziomie pewnej abstrakcji modelowej. Do tego celu najlepiej nadają się analityczne metody i narzędzia analizy systemowej, które z jednej strony pozwalają rozpatrywać nawet najbardziej złożone układy w ich systemowym, holistycznym ujęciu jako pewną całość organizacyjno-funkcjonalną, z drugiej umożliwiają dowolną dekompozycję złożonego systemu na pożądane podsystemy (części, modele), dające się znacznie łatwiej badać i analizować niż całościowe obiekty systemowe. Takie systemowe podejście, ale realizowane etapami, zostało zastosowane do identyfikacji i optymalizacji logistycznego makrosystemu transportowego.

W pierwszej kolejności, w wyniku analizy identyfikacyjnej, został zbudowany jakościowy model opisowy, ujmujący wszystkie elementy i procesy w jednolitej konwencji analitycznej. Aplikacja ta została wykorzystana do próby analitycznego odwzorowania zasadniczych procesów informacyjno-decyzyjnych w konwencji pewnego modelu optymalizacyjnego, w którym zasadniczym elementem były założenia i ograniczenia modelowe determinujące postać funkcji kryterium, stanowiącej rodzaj ilościowego wskaźnika jakości funkcjonowania całego makrosystemu transportowego. Wykorzystanie formalnego aparatu analizy systemowej do budowy obu rekurencyjnych modeli gwarantuje im dużą elastyczność i wysoką funkcjonalność. W miarę postępu prac nad bardziej zaawansowanymi aplikacjami biznesowymi oba modele mogą być sukcesywnie rozbudowywane, stosownie do bieżących potrzeb i wymagań projektowych docelowych aplikacji informatycznych. Zasadność wykorzystania sformalizowanego aparatu analizy systemowej jest w pełni adekwatna do potrzeb budowanych aplikacji modelowych i umożliwia elastyczne włączanie kolejnych problemów w obszar modelowania analitycznego i projektowania technologicznego rzeczywistych makrosystemów transportowych.

Efektywne zastosowanie zaproponowanych koncepcji modelowych do optymalizacji logistycznych makrosystemów transportowych jest uwarunkowane budową nowoczesnej, interaktywnej i sieciowej aplikacji komputerowej, gdyż tylko za jej pomocą można elastycznie i symulacyjnie optymalizować najtrudniejsze decyzje i wszelkie strategie biznesowe. W tym sensie zestaw obu rekurencyjnie rozwijanych modeli — identyfikacyjny i optymalizacyjny — może być podstawą podjęcia dalszych prac projektowo-programowych nad docelową komputerową aplikacją, obsługującą mikro- i makrosystemy transportowe na różnych poziomach zarządzania logistycznego, na przykład na szczeblu przedsiębiorstwa jako systemu transportu wewnętrznego lub na szczeblu makroekonomicznym jako systemu transportu regionalnego czy krajowego.

BIBLIOGRAFIA

[1] Błażewicz J. i inni, *Badania operacyjne dla informatyków*, WNT, Warszawa 1983.

[2] Bubnicki Z., Hryniewicz O., Węglarz J., *Badania operacyjne i systemowe. Zastosowania*, EXIT, Warszawa 2004.

[3] Całczyński A., *Metody optymalizacyjne w obsłudze transportowej rynku*, PWE, Warszawa 1992.

[4] Ficoń K., *Badania operacyjne stosowane. Modele i aplikacje*, BEL Studio, Warszawa 2005.

[5] Ficoń K., *Logistyka ekonomiczna. Procesy logistyczne*, BEL Studio, Warszawa 2008.

[6] Ficoń K., *Logistyka techniczna. Infrastruktura logistyczna*, BEL Studio, Warszawa 2009.

[7] Gutenban J., *Matematyczne modelowanie systemów*, EXIT, Warszawa 2003.

[8] Jacyna M., *Uwarunkowania technologiczne rozwoju systemu transportowego*, [w:] Mindur L., *Technologie transportowe XXI wieku*, ITeE PIB, Warszawa — Radom 2008.

[9] Krawczyk S., *Badania operacyjne dla menedżerów*, AE, Wrocław 1996.

[10] Kubicki J., Kuriata A., *Problemy logistyczne w modelowaniu systemów transportowych*, WKiŁ, Warszawa 2000.

[11] Leszczyński J., *Modelowanie systemów i procesów transportowych*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1994.

[12] Nowicka-Skowron M., *Efektywność systemów logistycznych*, PWE, Warszawa 2000.

[13] Paprocki W., *Koncepcja logistyczna w transporcie*, SGPiS, Warszawa 1989.

[14] Phillips J., *Zarządzanie projektami IT*, One Press Helion, Gliwice 2005.

[15] Piasecki S., *Optymalizacja systemów przewozowych*, WKiŁ, Warszawa 1973.

[16] Radzikowski W., Sarjusz-Wolski Z., *Metody optymalizacji decyzji logistycznych*, UW, Toruń 1994.

[17] Steenbrink P. A., *Optymalizacja sieci transportowych*, WKiŁ, Warszawa 1978.

[18] Tarkowski J., Irestahl B., Lumsden K., *Transport — Logistyka*, ILiM, Poznań 1995.

[19] *Teoria szeregowania zadań*, red. E. G. Coffman, WNT, Warszawa 1980.

[20] Wielądek A., *Koszty zewnętrzne transportu*, [w:] Mindur L., *Technologie transportowe XXI wieku*, ITeE PIB, Warszawa — Radom 2008.

OPTIMIZATION OF TRANSPORT MACROSYSTEMS ACCORDING TO LOGISTICS CRITERIA

ABSTRACT

The paper closes a two-piece cycle, which was devoted to mathematical modeling of large logistic systems. In this case, it was a transport macro-system. The introduction presents general assumptions and criteria of optimization of transport macro-system. In accordance with the research methodology proposed it discusses resources as well as limitations and edge conditions imposed on the modeled system. Further it formulates an optimization criterion which minimizes the logistic time space. The optimization of function is achieved by means of generating appropriate time schedules for successive tasks carried out by the transport system. Computer aided model makes it possible to generation of multi-variant time schedules which can be used to effective managing a transport macro-system in any business environment. Modeling of transport macro-systems is a very complex task of multi criterion optimization and needs further system investigations.

Keywords:

system, model, resources, processes, limitations, edge conditions, function of a criteria, time schedules, optimization, decision variable.

Recenzent dr hab. inż. Zdzisław Kurasiński, prof. WAT