Raport Badawczy
Research Report

RB/38/2006

Model trajektorii rozwoju transportu

Zygmunt Uhrynowski

Instytut Badań Systemowych
Polska Akademia Nauk

Systems Research Institute
Polish Academy of Sciences

POLSKA AKADEMIA NAUK

Instytut Badań Systemowych

ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

tel.: (+48) (22) 8373578

fax: (+48) (22) 8372772

Kierownik Pracowni zgłaszający pracę:
dr inż. Jan W. Owsiński

Warszawa 2006

Model trajektorii rozwoju transportu

Zygmunt Uhrynowski

Instytut Badań Systemowych PAN

01-447 Warszawa

email: Zygmunt.Uhrynowski@ibspan.waw.pl

Streszczenie

Praca dotyczy metodologicznych aspektów modelowania złożonych systemów transportowych. Podstawowym celem było spojrzenie na system transportowy jako na układ fizyczny współpracujący z otoczeniem poprzez wymianę różnych form energii, który - oprócz strumienia usług transportowych – przekazuje otoczeniu strumień entropii, będący wyrazem tzw. zbiorowego efektu zewnętrznego transportu. Pokazano, że w oparciu o podstawowe przesłanki fizyczne można skonstruować prosty makroskopowy model tego współdziałania mający postać równania różniczkowego typu Bernoulliego. Model został rozwiązany w sposób analityczny. Charakterystyczna jego cechą jest odwzorowanie faktu, że na każdym etapie rozwoju transportu istnieje poziom, który wyznacza kres możliwości dalszego rozwoju systemu, o ile nie zostaną w nim przeprowadzone odpowiednie zmiany strukturalne.

Zwrócono uwagę na potrzebę rozwijania podstaw strukturalnej stabilności systemów transportowych, a w szczególności na rozwijanie metod jakościowej analizy stabilności tego systemu. Jednym z narzędzi wspomagających te badania powinna być współczesna teorii entropii, traktująca entropię jako miarę stopnia złożoności i otwartości systemu. Wyniki takich badań powinny być wykorzystywane nie tylko do badania strukturalnej stabilności systemów istniejących, ale już na etapie prognozowania, programowania, planowania i projektowania inwestycji infrastrukturalnych transportu. Postępowanie to wpływałoby na racjonalizację redundancji technicznej modernizowanych i nowobudowanych systemów transportowych.

1. Wprowadzenie

Modelowanie matematyczne jest jednym ze środków badania złożonych systemów transportowych. Systemy takie mają dużą liczbę wzajemnie powiązanych ze sobą elementów fizycznych oraz cech jakościowych, zarówno prostych jak i złożonych, częściowych i całościowych. Są systemami rozwijającym się, przy czym proces ich rozwoju jest świadomie i celowo prognozowany, programowany, planowany i projektowany. Z tego punktu widzenia podstawowego znaczenia nabiera poznanie ogólnych praw rozwoju transportu. Dotyczą one, przede wszystkim, zachowania się w długich okresach czasu podstawowych całościowych własności transportu (z uwagi na długą żywotność urządzeń infrastruktury transportu dochodzących nawet do kilkudziesięciu lat), którymi są strukturalna stabilność systemu oraz jego nieustanna zdolność do świadczenia usług transportowych. Dotychczasowe koncepcje badania rozwoju transportu opierały się na zastosowaniu zasady hierarchicznej dekompozycji tego systemu. Chociaż podejście to przyniosło wiele korzystnych efektów, to jednak czas pokazał, że miało również poważne skutki negatywne. Jednym z podstawowych jest przeinwestowanie wielu punktowych, liniowych i sieciowych układów transportowych, zwłaszcza w krajach przodujących w rozwoju techniki transportowej i technologii przewozowych. Coraz częściej mówi się o tym i o potrzebie opracowania nowej metodologii kształtowania rozwoju systemów transportowych, ale wciąż nie podejmuje się szerszych prac w tym kierunku.

Celem niniejszej pracy jest zwrócenie uwagi na fakt, że całościowe własności systemów transportowych nie mają cechy addytywności (np., stabilność funkcjonowania każdego elementu sieci transportowej nie gwarantuje stabilności sieci jako systemu, niezawodność każdego elementu sieci nie wystarcza, by sieć jako system była również układem niezawodnym itd.). Na tym tle zostanie przedstawiona koncepcja modelu rozwoju transportu. Koncepcja uwzględnia fakt, że z uwagi na empirycznie stwierdzone występowanie okresów nieciągłości w rozwoju transportu, model tego procesu musi mieć charakter nieliniowy. Jest to zgodne z fizycznymi prawami rozwoju systemów rzeczywistych oraz z zasadami ogólnej teorii rozwoju, wśród których wiodącą rolę grają zasada dyssypacji energii i zasada samoorganizacji.

2. Koncepcja modelu

Jak już powiedzieliśmy, model rozwoju transportu, który odwzorowywałby nie tylko ilościowe, ale także jakościowe cechy tego procesu, musi być nieliniowy. Musi też uwzględniać fakt, że jakościowe zmiany całościowego zachowania się systemu są zawsze związane z pojawianiem się tzw. struktur dysypatywnych, które mogą występować tylko w systemach znajdujących się z dala od stanu równowagi termodynamicznej. Dlatego też trajektoria rozwoju systemu transportowego powinna mieć zbiór punktów stacjonarnych, z których niektóre nie będą punktami stabilnej równowagi. W przeciwnym razie zewnętrzne oddziaływania będą tylko modyfikowały równowagową strukturę systemu, ale nie pozwolą na stworzenie nowej. Nowa systemowa struktura transportu, wiążąca czasoprzestrzenne zachowanie się tego systemu z procesami dynamicznymi zachodzącymi wewnątrz systemu, może powstać tylko z dala od stanu jego termodynamicznej równowagi. Jest to bowiem stan najbardziej niepożądany, oznaczający fizyczną destrukcję systemu i zanik więzi organizacyjnych.

Model rozwoju transportu powinien więc opisywać dynamikę zmian strukturalnych w systemie, podążanie systemu od stanu mniej uporządkowanego do bardziej uporządkowanego. Miarą stopnia organizacji systemu jest entropia. Oznaczymy ją symbolem H i będziemy traktować jako funkcję stanu systemu.

W systemie transportowym zachodzi równocześnie wiele procesów. Dwa z nich są szczególnie ważne. Pierwszym jest proces wymiany i wzrostu liczby elementów systemu, drugim jest proces funkcjonowania systemu. Ponieważ miarą systemowej jakości struktury transportu jest stopień spójności jego elementów, więc na poziomie opisu makroskopowego można w charakterze tej miary wykorzystywać entropię rozkładu elementów w systemie.

Dla scharakteryzowania wymienionych wyżej procesów wprowadźmy dwa następujące parametry: $\lambda(t)$ - intensywność wzrostu liczby elementów systemu oraz $\rho(t)$ - intensywności wykorzystania systemu. Przyjmijmy, że entropia systemu, H, za pomocą której charakteryzujemy stan systemu, jest funkcją ciągłą różniczkowalną. Załóżmy, że stan systemu w chwili $t+\Delta t$ jest funkcją stanu systemu w chwili t i że zmiana entropii (czyli parametru charakteryzującego stan systemu), jaka nastąpiła w okresie Δt jest proporcjonalna do wartości tego parametru w chwili t

$$\frac{dH}{dt} = KH \,, \tag{1}$$

gdzie K jest współczynnikiem proporcjonalności. Równanie to charakteryzuje kierunek biegu procesu rozwoju transportu.

Z pojęcia entropii wynika, że im większa jest intensywność wzrostu liczby elementów systemu, tym większa jest jego podatność na zakłócenia naruszające organizację systemu.

Z funkcjonalnego określenia entropii wynika warunek ograniczający od dołu zmianę entropii: entropia jest funkcją dodatnio określoną. Ponadto entropia jest ograniczona z góry, nie może bowiem rosnąć bez końca: ograniczenie to jest związane z faktem, że liczba elementów w systemie jest zawsze funkcją posiadanych zasobów i że proces organizacji systemu jest procesem sterowalnym. Poziom organizacji systemu może być podniesiony zarówno w wyniku procesu samoorganizacji, jak i wskutek zastosowania zewnętrznych oddziaływań sterujących. Jeżeli uwzględnić te fakty, to równanie (1) można zapisać w postaci

$$\frac{dH}{dt} = (\lambda - B)H \ , \qquad (2)$$

gdzie B jest parametrem charakteryzującym sterowanie procesem organizacji struktury systemu.

Struktura rozwijającego się systemu transportowego jest podtrzymywana dzięki procesowi jego wzajemnego oddziaływania z otoczeniem. W wyniku tego oddziaływania pojawiają się w systemie nowe elementy i nowe cechy, a poszczególne elementy systemu są świadomie i celowo wykorzystywane w procesie eksploatacji i funkcjonowania systemu. Jeżeli więź ta zostanie osłabiona, to struktura systemu ulega stopniowemu rozkładowi. Jest to proces trudno uchwytny, bo znaczna część struktury zachowuje żywotność jeszcze przez długi czas. Nie ma więc wątpliwości, że transport, jako system rozwoju, łączy w sobie cechy i struktury dyssypatywne i niedyssypatywne.

Związek między intensywnością dyssypacji energii w systemie i funkcjonalną organizacją systemu może być wyrażony za pomocą równania

$$B = \rho H\,. \tag{3}$$

Po podstawieniu wyrażenia (3) do równania (2) otrzymamy nieliniowe równanie różniczkowe, które można traktować jako matematyczny model procesu rozwoju

$$\frac{dH}{dt} = \lambda H - \rho H^2\,. \tag{4}$$

Współczynniki λ i ρ mają charakter fenomenologiczny, a ich wartości należy określić na podstawie danych otrzymanych w wyniku bezpośredniej obserwacji systemu.

Równanie (4) opisuje trajektorię czasoprzestrzennego zachowania się systemu transportowego i odpowiada wszystkim sformułowanym wyżej wymogom. Zostało ono wyprowadzone na podstawie przesłanek czysto fizycznych. Można je otrzymać także w inny sposób, stosując znane z teorii systemów dynamicznych podejście do opisywania systemów otwartych.

Każdy system znajduje się pod wpływem różnego rodzaju oddziaływań, zarówno zewnętrznych (kataklizmy przyrodnicze, strumienie nakładów inwestycyjnych, strumienie zaopatrzenia materiałowego i energetycznego, strumienie siły roboczej i energii organizacyjnej itp.), jak i wewnętrznych (rozmaite formy wzajemnego oddziaływania elementów systemu). Trzeba je traktować jako oddziaływania przypadkowe. Nie ma jednak potrzeby wprowadzania do równania (4) dodatkowych parametrów odwzorowujących tę przypadkowość, ponieważ tkwi już ona we współczynnikach λ oraz ρ. W wyniku zmian zachodzących w otoczeniu systemu transportowego zachodzi ciągła zmiana wartości tych współczynników, co – z kolei – wywołuje fluktuacje entropii systemu.

3. Ilościowa analiza modelu

Mówiąc o równaniu (4) jako o sposobie matematycznego opisu podstawowego prawa rozwoju transportu trzeba pamiętać, że jest ono – jak każdy model – świadomym uproszczeniem rzeczywistości. Przydatność tego rodzaju modeli jest jednak duża, bo na podstawie wyników analizy ilościowo-jakościowej ich rozwiązań można bardziej racjonalnie niż bez ich użycia kształtować długofalową ścieżkę rozwoju transportu, która jest wynikiem nieustannej gry między potencjałem rozwojowym systemu, jego struktury geograficznej, technicznej, organizacyjnej i funkcjonalnej oraz potencjału przewozowego, a możliwościami oddziaływania na ten system przez otoczenie oraz strukturą ilościową i asortymentową potrzeb przewozowych.

Przy analizowaniu wszelkich modeli systemów dynamicznych powstają dwa podstawowe pytania: czy możliwe jest znalezienie analitycznej postaci rozwiązania modelu, a jeśli nie, to za pomocą jakich metod można znaleźć rozwiązanie przybliżone (analityczne lub numeryczne). Pytania te dotyczą przede wszystkim ilościowych aspektów badania systemów dynamicznych. Z drugiej strony, są one pytaniami o istnienie i liczbę stanów równowagi systemu, o stabilność bądź niestabilność tych stanów, o istnienie punktów bifurkacji (rozgałęziania rozwiązań) itp. Poszukiwaniem odpowiedzi na te drugie pytania zajmuje się jakościowa teoria systemów dynamicznych. Trzeba pamięta, że nawet najgłębsza analiza jakościowa w żadnej mierze nie zastępuje ilościowego badania modelu systemu. Badanie jakościowe ma swój specyficzny cel, inny niż badanie jakościowe. Często jednak badanie jakościowe okazuje się bardziej użyteczne niż ilościowe, bo pomaga dokonywać przybliżonych ocen trajektorii, interesujących z punktu kształtowania rozwoju transportu.

Nieliniowe równanie różniczkowe

$$\frac{dH}{dt} = \lambda(t)H - \rho(t)H^2, \tag{5}$$

które otrzymaliśmy jako matematyczny model rozwoju systemu, należy do klasy równań różniczkowych Bernoulliego. Daje się ono rozwiązać w sposób analityczny. Aby znaleźć rozwiązanie trzeba je najpierw sprowadzić do równania liniowego jednorodnego. W tym celu oznaczmy pochodną entropii przez

$$\dot{H} = \lambda H - \rho H^2 \tag{6}$$

i dokonajmy zamiany zmiennych podstawiając

$$X = \frac{1}{H}. \tag{7}$$

Ponieważ

$$H = \frac{1}{X}. \tag{8}$$

więc po zróżniczkowaniu i wykonaniu odpowiednich przekształceń otrzymujemy następujące wyrażenie

$$\dot{X} = -\frac{\dot{H}}{X^2}. \tag{9}$$

Po podstawieniu wyrażeń (7) i (9) do równania (6) otrzymamy

$$-\frac{\dot{X}}{X^2} = \lambda\frac{1}{X} - \rho\frac{1}{X^2}. \tag{10}$$

Stąd wynika

$$-\dot{X} = -\lambda X + \rho. \tag{11}$$

Szukamy rozwiązania równania jednorodnego:

$$\dot{X} = -\lambda X. \tag{12}$$

Zapiszmy je w postaci

$$\frac{dX}{X} = -\lambda dt. \tag{13}$$

Po obustronnym scałkowaniu otrzymamy

$$\ln X_t - \ln X_\tau = -\int_\tau^t \lambda(s)ds, \tag{14}$$

czyli

$$\ln \frac{X_t}{X_\tau} = -\int_\tau^t \lambda(s)ds. \tag{15}$$

Stąd

$$X_t = X_\tau e^{-\int_\tau^t \lambda(s)ds}. \tag{16}$$

Rozwiązaniem równania jednorodnego jest funkcja

$$F(t,\tau) = e^{-\int_\tau^t \lambda(s)ds}, \tag{17}$$

i wobec tego rozwiązaniem ogólnym równania (11) jest

$$X_t = \Phi(t,\tau)X_\tau - \int_\tau^t \Phi(t,s)\rho(s)ds\,, \tag{18}$$

lub, po uwzględnieniu (17),

$$X_t = X_\tau e^{-\int_\tau^t \lambda(s)ds} - \int_\tau^t e^{-\int_s^t \lambda(y)dy} \rho(s)ds\,. \tag{19}$$

Przechodząc do równania wyjściowego (5) otrzymujemy

$$H = \left(X_\tau e^{-\int_\tau^t \lambda(s)ds} - \int_\tau^t e^{-\int_s^t \lambda(y)dy} \rho(s)ds \right)^{-1}, \tag{20}$$

gdzie $X_\tau = \dfrac{1}{H_\tau}$, zaś H_τ jest warunkiem początkowym.

W przypadku gdy $\lambda = \mathrm{const.}$ otrzymujemy

$$H = \left(e\frac{-\lambda(t-\tau)}{H_\tau} - \int_\tau^t e^{-\int_s^t \lambda(y)dy} \rho(s)ds \right), \tag{21}$$

natomiast gdy $\lambda = \mathrm{const.}$ $\rho = \mathrm{const.}$, rozwiązanie ma postać:

$$H = \frac{\lambda}{\rho}\frac{1}{1 - Ce^{-\lambda t}}, \tag{22}$$

gdzie $C = \left(1 + \frac{\lambda}{H_\tau \rho}\right)e^{\lambda t}$. Parametr C zależy więc od warunków początkowych.

Podstawiając wartość C do wyrażenia (22) otrzymamy:

$$H = \frac{\lambda}{\rho}\frac{1}{1 - \left(1 - \frac{\lambda}{H_\tau \rho}\right)e^{\lambda(t-\tau)}}, \qquad (t > \tau). \tag{23}$$

Ponieważ $\lim_{t\to\infty} H(t) = \frac{\lambda}{\rho}$, więc entropia rozkładu elementów w systemie nie rośnie nieskończenie, ale jest ograniczona z góry przez wielkość $\frac{\lambda}{\rho}$.

Jak wiadomo, system znajduje się w stanie stacjonarnym, jeżeli zmienne charakteryzujące jego stan nie zmieniają się w czasie. Matematyczna analiza stanów stacjonarnych jest znacznie prostsza od analizy stanów niestacjonarnych. Punkty stacjonarne określa się z warunku

$$\frac{dH}{dt} = 0. \tag{24}$$

Jeden z tych punktów odpowiada zerowej entropii, a pozostałe są pierwiastkami równania

$$\lambda(t) - \rho(t)H = 0\,. \tag{25}$$

Rozpatrzmy funkcję $f(H) = \frac{\dot{H}}{H} = \lambda - \rho H$. Jeżeli jest ona monotoniczna, to istnieje jeden niezerowy punkt stacjonarny $H = \frac{\lambda}{\rho}$. W przypadku, gdy nie jest monotoniczna, może istnieć kilka punktów stacjonarnych. Współczynniki λ i ρ mogą przyjmować wartości dodatnie, ujemne lub równe zeru. Obszarem wartości funkcji $H(t)$ jest odcinek $\left[0, \frac{\lambda}{\rho}\right]$.

Z funkcjonalnego określenia entropii jako miary stopnia nieporządku (miary porządku) wynika, że funkcja $H(t)$ jest zawsze dodatnia. Jest oczywiste, że nie da się osiągnąć stanu stacjonarnego, spełniającego fizycznie sensowne wymagania, jeżeli $\frac{\lambda}{\rho} < 0$. Fizycznie sensowne są tylko stany stacjonarne $H = \frac{\lambda}{\rho} > 0$.

Rozwiązanie równania (5) pozwala więc określić trajektorie rozwoju systemu i wybrać z nich tę, która odpowiada ewolucyjnej fazie rozwoju systemu. W fazie tej w systemie transportowym dominują systematycznie wprowadzane zmiany ilościowe. Ważne jest więc, aby proces inwestowania w rozwój systemu miał charakter ciągły. Dla znalezienia trajektorii rozwoju systemu, tzn. dla określenia krzywej $\dot{H} = f(H)$, trzeba skorzystać z odpowiednich metod numerycznych.

4. Postulaty do jakościowej analizy systemu

Istotne zmiany jakościowe w systemie transportowym mogą zachodzić tylko w wyniku ilościowego zwiększania się w nim lub zmniejszania zasobów energetycznych systemu (materio-energii oraz energii organizacyjnej dostarczanych do systemu w różnych formach). Zmiany te mają charakter strukturalny. Gdy zachodzą mówi się, że system wykonuje skok rozwojowy, tzn. przechodzi na wyższy poziom organizacji. Charakter skoku rozwojowego jest określony przez specyficzne uwarunkowania wewnętrzne danego systemu transportowego i jego interakcje z otoczeniem. Skokowa zmiana struktury systemu może przyjmować różne formy, ale zawsze jest związana z utratą stabilności systemu i jego dążeniem do osiągnięcia nowego stanu stabilnego. Aby móc istnieć i funkcjonować system transportowy musi stale wykazywać określoną dozę stabilności. Jest to zasada fizyczna. Aby móc z niej korzystać w praktyce kształtowania rozwoju transportu trzeba ją sformułować w języku matematyki i określić granice, w ramach których będą rozpatrywane kwestie stabilności systemu i trajektorii jego rozwoju. Matematycznego aparatu do badań w tym zakresie dostarcza matematyczna teoria stabilności strukturalnej, zwanej też teorią katastrof. R. Thom, twórca tej teorii, ustawicznie podkreślał, że jakościowa analiza procesów rozwoju nie tylko nie jest drugorzędna w stosunku do analiz ilościowych, ale ma podstawowe znaczenie dla kształtowania ścieżek rozwoju systemu. Zwracał przy tym uwagę na to, że skok rozwojowy systemu jest nierozerwalnie związany ze stopniem stabilności systemu, bowiem granice stabilności systemu określają krytyczne obciążenia systemu, których przekroczenie prowadzi do wzrostu entropii systemu i jego degradacji.

Badaniu stabilności systemów transportowych poświęcano dotychczas bardzo mało uwagi. W krajach, które obecnie przodują w rozwoju transportu, problem ten rozwiązywano przede wszystkim w sposób praktyczny – konsekwentne przestrzeganie odpowiednio wysokich norm gwarantowało wysoką odporność systemu na typowe dla transportu zakłócenia rytmiki jego funkcjonowania i rozwoju. Doprowadziło to jednak do powstania systemów transportowych o dużej redundancji technicznej, ale tak kosztownych, że kontynuowanie tego trendu jest niemożliwe. Z tego powodu obserwuje się coraz większy wzrost zainteresowania możliwościami zastosowania matematycznej teorii stabilności strukturalnej już w fazie prognozowania, programowania, planowania i projektowania inwestycji infrastrukturalnych w transporcie.

Systemy transportowe mają strukturę hierarchiczną. U podstaw koncepcji kształtowania ich rozwoju leży fakt, że lokalizacja urządzeń infrastrukturalnych transportu nie jest przypadkowa, lecz stanowi wynik przemyślanego i celowo prowadzonego procesu. Jednym z przejawów stabilności rozwoju systemów transportowych jest więc względna stałość w czasie raz utworzonych struktur, zwłaszcza technicznych, przy jednoczesnej dużej zdolności wchłaniania innowacji technologicznych.

Ważnym przejawem stabilności rozwoju transportu jest względna stałość wchodzących w jego skład podsystemów, a zwłaszcza podsystemów reprezentujących różne gałęzie transportu i różne technologie wykorzystywania infrastruktury oraz organizacyjno-ekonomicznej suprastruktury transportu. Uważa się, że transport jest strukturalnie stabilny, jeżeli liczba tworzących go podsystemów nie wykazuje ostrych wahań. Określenie to jest bliższe fizycznemu (termodynamicznemu) pojęciu stabilności systemu niż matematycznemu. W termodynamice system uważa się za stabilny, jeżeli prawdopodobieństwo wystąpienia dużych fluktuacji w jego zachowaniu jest znikomo małe.

Ważnym czynnikiem stabilności strukturalnej transportu jest olbrzymia różnorodność elementów tego systemu. Doświadczenie uczy, że im bardziej różnorodna jest zbiorowość elementów systemu, tym większe jest zróżnicowanie ich charakterystyce technicznych i eksploatacyjnych i tym większa jest odporność systemu na zmiany zachodzące w jego otoczeniu. Wydaje się, że stopień tej różnorodności można by charakteryzować za pomocą miary entropii stosowanej w teorii informacji. Każdy element systemu może być, bowiem traktowany jako źródło informacji o systemie.,

Normalny tryb pracy systemu transportowego może mieć miejsce tylko w ewolucyjnej fazie jego rozwoju. To właśnie przede wszystkim w tej fazie następuje wzrost różnorodności i złożoności systemu. Wydaje się więc, że ważnym postulatem dla badań nad strukturalną stabilnością transportu jest podjęcie badań nad identyfikacją mechanizmów przystosowawczych tego systemu do zmian zachodzących w otoczeniu, zwłaszcza mechanizmów organizacyjnych.

Ważnym czynnikiem rzutującym na stabilność strukturalną transportu jest również otwartość tego systemu. Wydaje się, że stabilność i otwartość są w dużej mierze decydującymi o tempie i jakości rozwoju transportu. Dzięki otwartości systemu transportowego zachodzi w nim stopniowe kumulowanie się cech odpowiedzialnych za powstawanie mechanizmów dostosowawczych. Trzeba jednak pamiętać, że każdy etap ewolucyjnego rozwoju charakteryzuje transportu ma swoją własną miarę wyrażającą stopień jedności stabilności i otwartości: im większa stabilność systemu (uniwersalizm organizacyjny), tym większa jest jego otwartość (zakres możliwości usługowych, potencjał rozwojowy itp.). W tej wzajemnej zależności stabilności i otwartości wiodąca rola przypada otwartości, ponieważ potęguje ona wzrost możliwości rozwoju systemu. Trzeba też pamiętać, że ewolucyjny rozwój systemu zakłada nie tylko jedność, ale i wzajemną sprzeczność czynników otwartości i stabilności. Podobnie ma się rzecz ze wzajemną relacją systemu i jego otoczenia. Duża liczność i różnorodność elementów systemu oraz rozmaitość ich cech dają systemowi możność lepszego adaptowania się do różnych warunków otoczenia.

Prosty system transportowy, mający niewielką liczbę elementów i niewielką różnorodność cech, jest bardzo podatny na wpływ fluktuacji zachodzących w otoczeniu. Jest to zrozumiałe, bowiem żaden system transportowy nie może istnieć i funkcjonować w niejednorodnym i dynamicznym otoczeniu jako układ jednorodny. Różne elementy systemu działają w różny sposób i w procesie swojego rozwoju rozwiązują własne, lokalne problemy. Jest to nie tylko nieuniknione, ale wręcz konieczne dla istnienia systemu, bowiem (1) zwiększa jego odporność na niepożądane wpływy zewnętrzne, (2) podnosi efektywność jego współdziałania z otoczeniem, (3) sprzyja poszukiwaniu nowych form gospodarowania w systemie i zarządzania systemem, a przez to wszystko zwiększa potencjał użyteczności systemu.

Ważną cechą, którą musi wyrobić sobie każdy system transportowy jest zdolność do przetrwania w różnych warunkach otoczenia. Zdolność przetrwania mają jednak tylko systemy złożone. Badanie złożoności systemów transportowych i świadome kształtowanie systemu transportowego – to kolejny postulat pod adresem metodologii kształtowania rozwoju transportu. Wszystkie warunki, mające istotne znaczenie dla trwania systemu i zrównoważonego jego rozwoju przeżycia, można rozpatrywać jako sumę sygnałów wysyłanych mu przez otoczenie. System transportowy może odbierać większą lub mniejszą liczbę sygnałów w zależności od swojej pojemności informacyjnej. Z tego powodu szczególnego znaczenia nabiera wyposażenie systemów transportowych we współczesne środki techniki i technologii informacyjnej. Ten etap rozwoju systemów transportowych nabiera coraz żywszego tempa, a wyrazem tego jest pojawiania się tzw. inteligentnych systemów transportowych.

Doświadczenie uczy, że system transportowy osiąga największa stabilność w stanie równowagi i że stanom tym odpowiada największa różnorodność elementów i cech systemu. Mogłoby więc wydawać się, że w tym przypadku, w systemie nie powinno być elementów dominujących, a rozkład cech w systemie powinien być bliski zrównoważonemu. Tymczasem tak nie jest. Realnie istniejące stabilne systemy transportowe zawierają elementy dominujące, które wykonują podstawową część usług transportowych. Na przykład, w przeszłości rola ta przypadała kolejnictwu, obecnie zdecydowanie dominuje transport samochodowy. Oznacza to, że oparcie miary stabilności systemu tylko na charakterystykach jego różnorodności (np. na entropii) nie byłoby w pełni prawidłowe. Wydaje się więc, że wykorzystanie entropii informacyjnej jako miary stabilności systemu jest celowe tylko na wczesnych etapach rozwoju systemu, kiedy wzajemne oddziaływania elementów są jeszcze niezbyt wyrobione i stosunkowo słabe.

Zupełnie inaczej przedstawia się sprawa, gdy entropia jest rozpatrywana nie w wąskim, informacyjnym sensie, lecz w sensie szerokim, tj. jako miara stopnia zorganizowania systemu. O organizacji systemu można mówić tylko wtedy, gdy między jego elementami zachodzą liczne i różnorodne oddziaływania. Pojęcie zorganizowania odnosi się przede wszystkim do systemów transportowych o silnych funkcjonalnych powiązaniach między elementami. Skoro więc powszechnie uważa się entropię za miarę zorganizowania i uporządkowania struktury systemów, to uzasadnione jest wykorzystanie jej jako jednej z charakterystyk stabilności systemów transportowych na wszystkich stadiach rozwoju.

Pojęcie stabilności odnosi się zazwyczaj do stanu systemu lub trybu funkcjonowania. W ramach matematycznej teorii stabilności zakłada się, że system jest stabilny, jeżeli trajektoria jego stanów w przestrzeni fazowej nie wychodzi pod wpływem wymuszeń zewnętrznych poza pewne z góry określone granice. W teorii tej zakłada się, że skoki rozwojowe są związane z pojawieniem się nieciągłości funkcji, z możliwością rozgałęziania się (multifurkacji) trajektorii systemu. Jest to ważne z punktu widzenia kształtowania rozwoju transportu, ponieważ małe oddziaływanie na ten system w otoczeniu punktu rozgałęzienia może doprowadzić do otrzymania istotnie różnych trajektorii rozwoju. Identyfikacja tych punktów ma więc wielkie znaczenie metodyczne dla badań na rozwojem transportu.

O stabilności systemów transportowych i ich rozwoju wnioskuje się na podstawie modeli. Można przyjąć, że system transportowy lub proces jego rozwoju są strukturalnie stabilne, jeśli dostatecznie małe zmiany w strukturze systemu wywołują takie jego zachowanie, które w pewnym sensie jest jakościowo analogiczne do zachowania się modelu wyjściowego. W każdym konkretnym przypadku trzeba jednak dokładnie określić, co rozumie się pod wyrażeniami „dostatecznie małe" i „jakościowo analogiczne". Idealnym rozwiązaniem problemu byłoby sformułowanie jawnego systemu kryteriów ogólnie charakteryzujących stabilność (względnie niestabilność) strukturalną każdego konstruowanego matematycznego modelu tych obiektów, a także określenie co najmniej podstawowych sposobów utraty przez model stabilności. Jest to jednak cel nierealny. O stabilności można bowiem mówić tylko wtedy, gdy jest znana matematyczna postać modelu.

4. Uwagi końcowe

Podstawowym celem pracy było spojrzenie na systemu transportowy jako na układ fizyczny zanurzony w otoczeniu, z którym współpracuje drogą pobierania z otoczenia rozmaitych form energii koniecznej dla istnienia, funkcjonowania i rozwoju systemu oraz drogą przekazywania otoczeniu – oprócz, rzecz jasna, strumienia usług transportowych – strumienia entropii. Ten strumień entropii jest wyrazem tzw. zbiorowego efektu zewnętrznego transportu. Pokazano, że w oparciu o podstawowe przesłanki fizyczne można skonstruować prosty makroskopowy model tego współdziałania. Model ma postać równania różniczkowego typu Bernoulliego. Model został rozwiązany w sposób analityczny. Charakterystyczna jego cechą jest odwzorowanie faktu, że na każdym etapie rozwoju transportu istnieje poziom, który wyznacza kres możliwości dalszego rozwoju systemu, o ile nie zostaną w nim przeprowadzone odpowiednie zmiany strukturalne.

Wynika z tego niezmiernie ważny wniosek dla praktyki transportowej. Działanie poszczególnych rodzajów transportu musi zostać skoordynowane, a na mechanizm konkurencji na rynkach transportowych muszą zostać nałożone określone ograniczenia. Systemów transportowych nie można bowiem rozwijać tylko metodą przebudowy i rozbudowy – konieczne jest modernizowanie i dostosowywanie istniejących już systemów do potrzeb społeczeństw i gospodarek poprzez wdrażanie postępu technicznego i innowacyjnych technologii transportowych.

Zwrócono uwagę na potrzebę rozwijania podstaw badania strukturalnej stabilności systemów transportowych i sformułowano kilka postulatów, które, zdaniem autora, powinny być uwzględnione w tych badaniach. W szczególności stwierdzono, że nie zaniedbując tradycyjnego nurtu badań nad matematycznym modelowaniem rozwoju transportu trzeba zwrócić baczną uwagę na rozwijanie metod jakościowej analizy stabilności tego systemu. Jednym z narzędzi wspomagających te badania powinna być współczesna teorii entropii, traktująca entropię jako miarę stopnia złożoności i otwartości systemu. Zwrócono też uwagę na to, że wyniki tych badań powinny być wykorzystywane nie tylko do badania strukturalnej stabilności systemów już istniejących, ale powinny być wykorzystywane już na etapie prognozowania, programowania, planowania i projektowania inwestycji infrastrukturalnych transportu. Postępowanie to wpływałoby na racjonalizację redundancji technicznej modernizowanych i nowobudowanych systemów transportowych.

Literatura

1. Beenhaker H.L. (1973), Approaches to dynamic transport planning, *Transportation, 12, 245 – 280*
2. Bereziński M. (2001), Optimization models in traffic network planning and improvement, *Raport Badawczy RB/46/2001, Instytut Badań Systemowych PAN,* Warszawa
3. Bereziński M. (2002), Kapitał intelektualny : termodynamiczny model wiedzy. *Raport Badawczy RB/82/2002, Instytut Badań Systemowych PAN,* Warszawa
4. Bereziński M. (2002), A possibility of applying quantum mechanics methodology to the theory of knowledge creating. *Raport Badawczy RB/45/2002, Instytut Badań Systemowych PAN,* Warszawa
5. Frey S.C.. Nemhauser G.L. (1972). Temporal expansion of a transportation network – I. *Transportation Science, 6, 306 – 323. II – 6, 395 – 406.*
6. Khan A.M. (1971), Transport Policy analysis: A decision – theoretic framework, *Socio-Economic Planning Sciences, 159 - 171*
7. Kulikowski R. (2001), Decision support in safety oriented transportation systems, *Raport Badawczy RB/34/2001, Instytut Badań Systemowych PAN,* Warszawa