

5/2004

Raport Badawczy

RB/5/2004

Research Report

Hasła do Encyklopedii PWN:

Modelowanie

Modelowanie matematyczne

System

Systemowe badania

Systemów teoria

J. Gutenbaum

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:

Doc. dr hab. inż. Michał Inkielman

Warszawa 2004

Jakub Gutenbaum
Instytut Badań systemowych PAN

HASŁA do ENCYKLOPEDII PWN

MODELOWANIE

MODELOWANIE MATEMATYCZNE

SYSTEM

SYSTEMOWE BADANIA

SYSTEMÓW TEORIA

Modelowanie doświadczalna lub mat. metoda badania złożonych układów, zjawisk i procesów (techn., fiz., chem., ekon. itp.) na podstawie tworzenia ich --> modeli. Modelowanie doświadczalne opiera się na budowie modeli fiz. w wybranej skali (modele „w skali”) - powiększonej (np. model. jądra atomu) lub zmniejszonej (np. badania wytrzymałościowe w tunelach aerodynamicznych lub w modelach hydrodynamicznych). Zmiana skali może dotyczyć również czasu, co polega na sprowadzeniu (spowolnieniu lub przyspieszeniu) czasu, w ciągu którego zachodzą badane procesy, do skali dogodnej dla eksperymentatora.

M. może być też oparte na podobieństwie praw fiz., kiedy to model ma inną naturę niż modelowany obiekt, ale podlega identycznym zależnościom mat.; w szczeg. opisane być mogą takimi samymi równaniami różniczkowymi. Np. w XIX wieku szeroko stosowane było model. zjawisk elektromagnetycznych za pomocą układów mechanicznych, złożonych z różnego rodzaju przekładni zębatych, pasów transmisyjnych, wahadeł. W latach 50. i 60. XX w. popularne było modelowanie różnych procesów dynamicznych (zarówno elektrycznych, jak i mechanicznych, hydraulicznych, pneumatycznych) przy użyciu elektronicznych maszyn analogowych, dostosowanych do rozwiązywania → równań różniczkowych zwyczajnych i cząstkowych, liniowych i nieliniowych. Aktualnie maszyny analogowe, jak też i hybrydowe (łącznie elementy techniki analogowej i cyfrowej) prawie całkowicie wyparte zostały przez → symulację komputerową.

modelowanie matematyczne, działalność badawcza stanowiąca istotną część → badań systemowych i → badań operacyjnych polegająca na utworzeniu → modelu mat. badanego → systemu. M. m. obejmuje: 1) opracowanie zestawu relacji mat. i formalno-log., opisujących możliwie dokładnie badane funkcje systemu, 2) badania eksperymentalne systemu i wykorzystanie baz danych w celu wyznaczenia, brakujących do pełnego opisu, relacji i wartości parametrów (→ identyfikacja modelu), 3) weryfikację modelu, czyli sprawdzenie zgodności rozwiązań wynikających z modelu, z praktyką. Istotną częścią m.m. jest opracowanie planów badań symulacyjnych i sposobu prezentacji wyników (tablice, wykresy, grafika komputerowa). M.m. jest działaniem celowo-ukierunkowanym, zależnym od przeznaczenia budowanego modelu; można rozróżnić: m.m. służące do opisu i wyjaśnienia praw rządzących systemem, prognostyczne (do przewidywania zachowania się systemu w przyszłości, np. przy różnych warunkach dot. wpływu otoczenia), normatywne (wyznaczanie decyzji, ew. parametrów systemu spełniających określone założenia). M.m. może też służyć do formalizacji badań w dziedzinach, w których dominują opisy werbalne, co daje możliwość stosowania tam formalnych reguł wnioskowania oraz przenoszenia wyników z jednych dziedzin nauki do innych; np. modele → sieci neuronowych służą zarówno do badania → procesów neurofizjologicznych, jak i do tworzenia → uczących się algorytmów sterowania.

M.m. konkretnych systemów najczęściej polega na zestawieniu równań bilansujących przepływy: mas, energii, pieniędzy — z uwzględnieniem relacji czasowych, np. opóźnień transportowych i bezwładności. Takie bilansowanie, prowadzi do układów równań → algebraicznych, → różniczkowych (zwykłych, o pochodnych cząstkowych, z przesuniętymi argumentami) lub → różnicowych. Ich uzupełnieniem są nierówności, określające obowiązujące ograniczenia (np. technologiczne, ekologiczne, prawne) a także ograniczoność zasobów (produkcyjnych, finansowych, siły roboczej). W zadaniach dot. → badań operacyjnych w skład modelu wchodzi relacje logiczne między zmiennymi, określające warunki eksploatacyjne, jak też kolejność operacji technologicznych (np. przy opracowaniu harmonogramów produkcyjnych), ew. transportowych (np. przy opracowaniu rozkładów jazdy).

Uzyskany w wyniku m. m. model mat. systemu w postaci układu równań i nierówności może służyć do badań analitycznych, np. do wyznaczania w formie mat. sterowania dopuszczalnego (spełniającego zadane warunki) lub, → sterowania optymalnego. Częściej jednak m. m. obejmuje również zestaw algorytmów obliczeniowych (na ogół iteracyjnych) i programów komputerowych, tworząc komputerowy model symulacyjny (→ symulacja komputerowa). Model taki może służyć zarówno do porównywania scenariuszy przy różnorodnych warunkach zewnętrznych i przy różnych założeniach decyzyjnych, jak i do wyznaczania konkretnych decyzji. Procedura wyboru decyzji, w szczególności przy wielokryterialnej ocenie jakości działania systemu, może mieć charakter dialogu z udziałem decydenta, który ocenia uzyskany wynik i generuje wskazówki uwzględniające jego preferencje.

J.GUTENBAUM, *Modelowanie matematyczne systemów*, Warszawa 1992

E.KĄCKI, M. WOŹNIAKOWSKI, *Modelowanie analogowe, hybrydowe oraz cyfrowa symulacja maszyn analogowych*, Warszawa 1979

K.MAŃCZAK, Z. NAHORSKI, *Komputerowa identyfikacja systemów dynamicznych i jej zastosowanie*, Warszawa 1983

system [gr] zespół wzajemnie sprzężonych elementów, spełniających określoną funkcję i traktowany jako wyodrębniony z otoczenia w określonym celu (opisowym, badawczym, zastosowaniowym). Sprzężenia (relacje) między elementami s. tworzą jego strukturę. Właściwości s. zależą zarówno od

właściwości każdego z elementów s., jak i od jego struktury. Pojęcie s. stosowane jest praktycznie we wszystkich dziedzinach nauki i praktyki i odnoszone zarówno do zjawisk, obiektów i procesów występujących w naturze, (s. słoneczny, s. biologiczny), jak i tworzonych przez ludzi do realizacji określonych zadań (s. techniczny, produkcyjny, społeczny, ekonomiczny). W matematyce i logice formalnej występuje pojęcie systemu jako abstrakcji, definiowane przez \rightarrow iloczyn kartezjański zbiorów własności s. S. abstrakcyjnymi są również języki. Pojęcie s. odgrywa szczególną rolę w: \rightarrow teorii systemów, \rightarrow cybernetyce, \rightarrow prakseologii, \rightarrow badaniach systemowych. W cybernetyce i badaniach systemowych przyjmuje się, że otoczenie wpływa na rozpatrywany s. za pośrednictwem sygnałów wejściowych (bodźców - w naukach przyrodniczych, wielkości egzogenicznych - w naukach ekonomicznych), które mogą mieć charakter oddziaływań celowych (sterowania, decyzje) lub też zakłóceń przeszkadzających w realizacji celów działania s. Zwrotnie - s. oddziałuje na otoczenie za pośrednictwem sygnałów wyjściowych, które można mierzyć (obserwować). Oddziaływanie s. na otoczenie może mieć charakter stały lub zmienny w czasie, może być skupione lub rozproszone w przestrzeni, może być ciągle lub dyskretne, deterministyczne lub losowe.

Istotną cechą systemów rzeczywistych są ich własności \rightarrow dynamiczne. Powodują one, że s. może znajdować się w równowadze (stan ustalony), lub w stanie nieustalonym (niestacjonarnym), który dąży do równowagi, lub nie. W tym drugim przypadku mogą to być zmiany pożądane (np. wzrost ekonomiczny, biologiczny) lub też zmiany uniemożliwiające działanie s., a nawet prowadzące do jego destrukcji. Jeśli własności dynamiczne s. rzeczywistego są nieistotne, określamy go jako statyczny, w przeciwnym przypadku, jako dynamiczny. Dynamiką s. zajmuje się, w szczególności, teoria sterowania.

S. nazywa się też zespół sposobów (metod) działania i wykonywania złożonych czynności, np. \rightarrow dedukcyjny s., jak również całokształt zasad organizacyjnych, ogół norm i reguł obowiązujący w danej dziedzinie (np. s. podatkowy, s. moralny) S. nazywany jest też całościowy i uporządkowany zespół zadań powiązanych ze sobą określonymi stosunkami, w szczególności stosunkiem

logicznym →wynikania; s. w tym znaczeniu jest każda →teoria metodologicznie poprawna.

systemowe badania, systemowa analiza, interdyscyplinarna dziedzina nauki i działalności praktycznej, związana z podejmowaniem decyzji dotyczących m.in. tworzenia i działania złożonych systemów techn., produkcyjnych, ekon.-społ., z uwzględnieniem różnorodnych, na ogół sprzecznych, aspektów ich działalności; w szczególności w warunkach niepewności, ewentualnie przy istnieniu wielu ośrodków decyzyjnych. Dla b.s. charakterystyczne jest szerokie stosowanie □ modelowania matematycznego i obliczeń komputerowych. Metodologia b.s. rozwijała się na gruncie □ cybernetyki oraz teorii □ sterowania i ich zastosowań, gł. w procesach techn. i produkcyjnych oraz w ekonomii. Zakres zastosowań b.s. jest obecnie bardzo szeroki i obejmuje wiele dziedzin również w: biologii (np. genetyka, ekologia), medycynie (np. immunologia, diagnostyka), naukach społ. (np. demografia), humanistycznych (np. lingwistyka, archeologia), psychologii (np. teorie przyswajania wiedzy). Za pomocą b.s. są realizowane **cele poznawcze, analityczne i normatywne**, polegające na wyborze najlepszych możliwych rozwiązań w zakresie zarówno budowy systemów, zarządzania i sterowania nimi. Metod badawczych dla **b.s.** dostarczają: □ systemów teoria, teoria sterowania i optymalizacji, informatyka, □ probabilistyka, □ teoria gier. W b.s. systemy rzeczywiste poznajemy przez ich modele mat., stanowiące zbiór relacji mat-log. zawierający: opis zbiorów sygnałów wejściowych i wyjściowych, opis przekształcania przez system sygnałów wejściowych w wyjściowe oraz, w zadaniach związanych z podejmowaniem decyzji (sterowaniem, zarządzeniem), sformułowanie celu (lub celów) działania systemu. Model mat. tworzony na podstawie wiedzy o systemie jest uzupełniany wynikami □ identyfikacji, polegającej na obróbce danych statyst., na podstawie których są wyznaczane oceny wartości liczbowych określonych parametrów lub postać relacji wchodzących w skład modelu. Szczególna uwaga jest poświęcana modelowaniu systemów dynamicznych opisywanych układami równań różniczkowych zwyczajnych i o pochodnych cząstkowych, ze względu na uniwersalny charakter takiego opisu rzeczywistości, a także tzw. systemów rozwoju (społ.-gosp., biol., demogr.), które zmieniają swoją strukturę i parametry w wyniku procesów wzrostu lub

upadku. Zbudowanie modelu mat. oraz wyniki symulacji komputerowych umożliwiają wyznaczanie decyzji optymalnych z punktu widzenia określonego celu, z uwzględnieniem ograniczeń — np. opracowanie planów produkcyjnych zapewniających maks. zysk przedsiębiorstwa, z uwzględnieniem ograniczonych zasobów siły roboczej, mocy wytwórczej, kapitału na zakup surowców itp.; służą do tego różne metody i algorytmy □ optymalizacji. Jeśli model zawiera jedynie zależności algebraiczne, a decyzje należą do zbiorów liczbowych, algorytmy należą do dziedziny programowania mat. liniowego (wszystkie równania i nierówności są liniowe) lub nieliniowego. Jeśli model zawiera również inne zależności (np. równania różniczkowe), a decyzje należą do przestrzeni funkcji (np. są funkcjami czasu) — mamy do czynienia z algorytmami z dziedziny sterowania optymalnego. Podstawy teoret. do budowy takich algorytmów dostarczają □ maksimum zasada i □ programowanie dynamiczne. Tworzenie, doskonalenie i testowanie algorytmów optymalizacji jest ważnym zadaniem b.s. W systemach złożonych, w których na ogół trudno o pełne określenie i rozwiązanie zadania optymalizacji, b.s. służą do wspomagania procesu podejmowania decyzji przez porównanie przewidywanych skutków dopuszczalnych wariantów decyzyjnych w różnych zmiennych warunkach zewn.; są wtedy używane komputerowe modele symulacyjne, których badanie zastępuje eksperymentowanie na systemach rzeczywistych (co na ogół jest niemożliwe albo bardzo kosztowne). Ponieważ cele działania systemów mogą być wzajemnie sprzeczne (np. cel ekon. — koszt budowy i eksploatacji systemu produkcyjnego — może być sprzeczny z celem ekol. dotyczącym ochrony środowiska) ważną funkcją b.s. jest wyznaczanie rozwiązań kompromisowych zarówno drogą negocjacji, jak i metodami optymalizacji wektorowej, czy teorii gier.

W ramach b.s. są prowadzone prace nad tworzeniem właściwych dla danych systemów struktur decyzyjnych, w tym struktur wielopoziomowych, hierarchicznych i zdecentralizowanych; służą do tego odpowiednie metody agregacji i dekompozycji. Zarządzanie złożonym systemem za pośrednictwem centr. jednostki decyzyjnej może nie być racjonalne, ze względu na konieczność przetwarzania ogromnych ilości informacji o stanach systemu. Alternatywną jest struktura zdecentralizowana z wieloma jednostkami decyzyjnymi, z których każda dysponuje informacją dotyczącą podległego jej podsystemu i ma

przydzielone określone kompetencje. W przypadku istnienia ogólnego celu działania systemu jednostka nadrzędna koordynuje działania jednostek podległych, które akceptują reguły decyzyjne służące do realizacji tego celu. Gdy występują cele indywidualne decyzje podejmowane przez każdą z jednostek mogą mieć wpływ na rezultaty osiągane przez inne jednostki, co powoduje, że mogą one być wzajemnie konkurencyjne; rola jednostki nadrzędnej sprowadza się do nadzoru nad przestrzeganiem reguł gry oraz „neutralizowaniu” ewentualnych konfliktów. Jednym z zadań b.s. jest opracowywanie zasad negocjacji, umożliwiających osiągnięcie kompromisu. Struktura decyzyjna wielopoziomowa może składać się z kilku warstw (np. operacyjna, planistyczna, strategiczna). Kolejne warstwy operują coraz bardziej zagregowanymi modelami systemu oraz podejmują decyzje o coraz dłuższym horyzoncie czasowym. W rozwiązywaniu zadań z zakresu b.s. uzupełnieniem modeli mat. i numerycznych. mogą być □ systemy eksperckie z odpowiednimi algorytmami wyznaczania ocen grupowych oraz elementy □ sztucznej inteligencji, w których tworzy się i wykorzystuje □ bazy wiedzy oraz modele procesów uczenia się, zachodzących w mózгах ludzi, np. modele sieci □ neuronowych. S.b. wymagająxx znajomości matematyki, teorii sterowania, programowania komputerowego oraz specjalności, której dotyczy rozpatrywany system; korzystają z osiągnięć tych dziedzin, a jednocześnie wpływają inspirująco na ich rozwój. W Polsce b.s. zajmuje się Inst. Badań Systemowych PAN oraz wiele ośrodków akademickich. Działła Międzynar. Inst. Stosowanej Analizy Systemowej (w Laxenburgu k. Wiednia), którego członkiem jest również Polska.

W. Findeisen, J. Szymanowski, A. Wierzbicki *Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji*, Warszawa 1977;

Analiza systemowa; podstawy i metodologia, red. W. Findeisen, Warszawa 1985;

W. Findeisen *Struktury sterowania dla złożonych systemów*, Warszawa 1997;

R. Kulikowski *Analiza systemowa i jej zastosowania*, Warszawa 1997.

Systemów teoria, problematyka badawcza, której podstawy metodologiczne wynikają z istnienia wspólnych cech różnorodnych w swej naturze □ systemów, zjawisk i procesów: fiz., techn., ekon., biol., społ., co umożliwia jednolite ich traktowanie. S. t. jest budowana na podstawie pojęcia systemu jako wyodrębnionej z otoczenia, w celach badawczych, całości **spełniającej określoną funkcję** i składającej się z wzajemnie sprzężonych elementów, przy czym struktura sprzężeń nadaje systemowi pewne cechy jakościowe, które nie wynikają jednoznacznie z cech i charakterystyk jego elementów składowych. Istotnym motywem rozwoju s. t. jest potrzeba całościowego spojrzenia na odrębne dyscypliny naukowe, co jest związane z powstaniem i rozwojem dziedzin na pograniczu dyscyplin tradycyjnych, jak np. biofizyka, inżynieria genetyczna, sztuczna inteligencja oraz rozwojem komputeryzacji, która stwarza możliwości dokonywania skomplikowanych obliczeń numerycznych i przetwarzania ogromnych ilości danych. Innym ważnym czynnikiem stymulującym rozwój s. t. jest świadomość globalnych zagrożeń jakie niesie z sobą rozwój cywilizacji, m.in. niszczenie ekosfery, tzw. dziura ozonowa, AIDS, eksplozja demograficzna. Matematyka i logika formalna dostarczają najbardziej uniwersalnych narzędzi opisu rzeczywistości, dlatego s. t. operuje głównie, ale nie wyłącznie, □ modelami matematycznymi i ich relacją do opisywanej rzeczywistości. Dają one możliwość stosowania formalnych metod poprawnego wnioskowania w naukach, które tradycyjnie stosowały opis werbalny i rozumowanie intuicyjne. Jednocześnie dokonuje się ujednoczenie języka, którym posługują się specjaliści różnych dziedzin, co ogromnie ułatwia współpracę interdyscyplinarną. S. t. korzysta szeroko z różnych dziedzin mat., teorii □ sterowania i □ optymalizacji, □ cybernetyki, □ informatyki, teorii □ grafów.

Można wyróżnić kilka nurtów rozwojowych s. t.:

Tworzenie bazy teoretycznej dla □ systemowych badań. Należą tu: podstawy teoret. budowy poprawnych modeli matematycznych, dowody na istnienie i jednoznaczność rozwiązań układów równań tworzących model, metody identyfikacji (biernej i czynnej) **struktury** i parametrów modeli, budowa i analiza modeli o dużej wrażliwości (np. modele do prognozowania pogody), modeli procesów rozwoju o zmiennych parametrach i strukturze, opracowanie i weryfikacja prognoz z uwzględnieniem ich wpływu na prognozowane procesy

(np. w przypadku prognoz makroekon. czy demogr.), budowa i eksploracja baz wiedzy oraz algorytmów komputerowego uczenia się, rozwój teorii optymalizacji (programowanie mat. ciągłe i dyskretne, sterowanie optymalne), opracowanie efektywnych i zbieżnych numerycznych algorytmów optymalizacji, w szczególności dla modeli o bardzo dużej wymiarowości i modeli niekonwencjonalnych (nieróżniczkowalnych, o skokowo zmiennych charakterystykach, rozmytych), opracowanie dialogowych systemów wspomagania procesów podejmowania decyzji przy optymalizacji wektorowej lub/i przy istnieniu wielu ośrodków decyzyjnych. Istotne dla badań systemowych są teoret. podstawy tworzenia struktur decyzyjnych, w tym hierarchicznych struktur wielopoziomowych. Ten nurt rozwoju s. t. jest ściśle związany z konkretnymi zastosowaniami i znajduje się w ciągłym rozwoju, w którym wyniki teoret. idą w parze ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów, np. dzięki prowadzeniu obliczeń równoległych. Potrzeby w zakresie badań systemowych przyczyniły się do rozwoju wielu dziedzin teoret., wchodzących w skład s. t.; np. podejmowanie decyzji przy wielu wzajemnie sprzecznych celach działania przyczyniło się do rozwoju metod □ optymalizacji wektorowej, a konieczność rozwiązywania problemów przy istnieniu ośrodków decyzyjnych o sprzecznych interesach — do rozwoju metod negocjacji, modelowanie systemów złożonych o rozbudowanej strukturze zarządzania — do rozwoju teorii układów hierarchicznych. Potrzeba modelowania niejednoznacznych pojęć języka potocznego była bodźcem do stworzenia teorii zbiorów rozmytych, teoria □ chaosu — wynikała ze spostrzeżenia, że w stosunkowo prostych nieliniowych modelach dynamiki populacji biol., czy też modelach przepływu turbulentnego, pojawiają się trajektorie chaotyczne, przypominające procesy probabilistyczne.

Nurt filozoficzno-metodologiczny określany jako ogólna s. t.; za jego inicjatora uważa się pracującego w USA austr. biologa L. Von Bertalanffy'ego. Przedstawiciele tego nurtu, którym zajmują się **głównie** □ prakseologia i cybernetyka, **podkreślająca** szczególnie powszechność i znaczenie **informatycznych** sprzężeń zwrotnych, traktują s. t. jako metanaukę, według której otaczający nas świat jest światem systemów, a celem s. t. jest stworzenie podwalin pod budowę "jednolitej nauki". Jej istnienie umożliwiłoby odkrywanie praw ogólnych rządzących systemami, przenoszenie wyników

badan nauk. z jednych dziedzin do innych, sprzyjaloby tworzeniu modeli teoret., w tych dziedzinach, w ktorzych modele takie jeszcze nie istnieja; ulatwialoby tez porozumiewanie sie specjalistow roznych dziedzin oraz procesy edukacyjne. Wazna zaslugą ogolnej s. t. jest rozpowszechnienie sie systemowego sposobu postrzegania rzeczywistosci, a takze rozpowszechnienia i jednolitego rozumienia pewnych pojec ogolnych.

Nurt aksjomatyczno-formalny polega na tworzeniu aksjomatycznej t.s, w ktorej z mozliwie malej liczby pojec i twierdzen podstawowych, dotyczacych w szczegolnosci definicji systemu oraz regul wnioskowania, wynikaja twierdzenia pochodne. W tym ujeciu system definiuje sie jako zbior relacji miedyzy cechami systemu, istotnymi dla prowadzonych badan. W ogolnym ujeciu cechy systemu nie musza byc pojeciami sformalizowanymi mat., natomiast przy dalszym usciślaniu pojec dochodzi sie do modeli systemu w postaci relacji mat. okreslonych typow, np. rownan rózniczkowych i nierownosci algebraicznych. Zasięg tego nurtu jest ograniczony do zagadnień definicyjno-klasyfikacyjnych.

Nurt aksjomatyczno-formalny polega na tworzeniu aksjomatycznej t.s., w ktorej z mozliwie malej liczby pojec i twierdzen podstawowych, dotyczacych w szczegolnosci definicji systemu oraz regul wnioskowania, wynikaja twierdzenia pochodne. W takim ujeciu t.s. jest utozsamiana z metodologią badan naukowych, przy czym system definiuje sie jako zbior relacji miedyzy cechami systemu, istotnymi dla prowadzonych badan. Jesli cechy systemu nie sa pojeciami sformalizowanymi mat., to osiagniecia badawcze tego nurtu ograniczaja sie do zagadnień definicyjno-klasyfikacyjnych (klasy systemow i algorytmow, sprzenienia i struktury). Natomiast przy ew. usciślaniu i konkretyzacji dochodzi sie do modeli matematycznych systemow.

L. Bertalanffy von *Ogólna teoria systemów*, Warszawa 1984,

R. Kulikowski *Sterowanie w wielkich systemach*, Warszawa 1974,

E. Laszlo *Systemowy obraz swiata*, Warszawa 1978.





