

O MODELOWANIU W BUDOWIE MASZYN

MAREK DIETRICH

Politechnika Warszawska

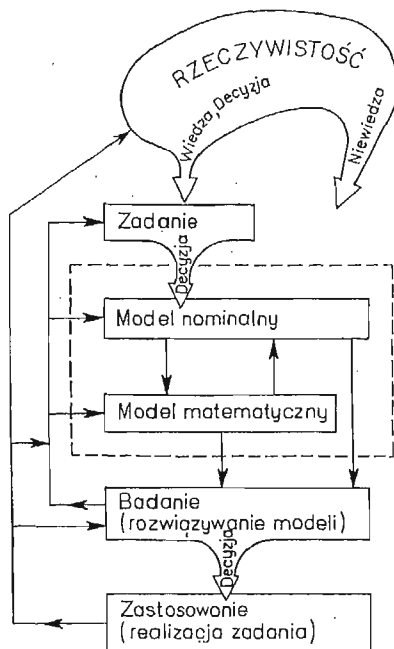
Długo zastanawiałem się jak ustosunkować się do propozycji publikacji w tym specjalnym numerze *Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej*. Redaktor pozostawiając mi do uznania zarówno treść jak i formę wypowiedzi stworzył duże możliwości, ale jednocześnie poważny kłopot. Zanim zdecydowałem się na zamieszczenie publikacji musiałem odpowiedzieć sobie na pytanie jakiego rodzaju wypowiedź byłaby tu właściwa i jakiej wypowiedzi czytelnik spodziewałby się ode mnie.

Rozpatrując tę kwestię doszedłem do wniosku, że spośród różnych możliwości: artykuł naukowy, problemowy, przeglądowy, programowy czy wspomnienie lub ocena, chyba najwłaściwsze będzie podzielenie się z czytelnikami pewnymi przemyśleniami związanymi z zastosowaniem mechaniki w dziedzinie, którą się zajmuję, a więc w budowie maszyn. Wybór ten uzasadniam też tym, że działając w Polskim Towarzystwie *Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej* z racji zajmowania się mechaniką stosowaną bądź nawet zastosowaniami mechaniki, na ten temat powinienem się wypowiedzieć w tym specjalnym numerze naszego pisma. Tym bardziej, że problematyka inżynierskich zastosowań mechaniki rzadko znajduje miejsce na jego łamach.

Swoje rozważania skoncentruję więc na problematyce modelowania w budowie maszyn. Przedstawię uwagi na ten temat powstałe w wyniku analizy działalności inżynierskiej, piśmiennictwa naukowego i technicznego, dyskusji w środowisku naukowym oraz prowadzenia różnego rodzaju wykładów i seminariów. Będę się starał pokazać problemy modelowania inżynierskiego, szczególnie te, które odróżniają je od modelowania w nauce oraz zwrócić uwagę na sprawy podstawowe, wydawać by się mogło że oczywiste, o których jednak często się zapomina, a co w konsekwencji może prowadzić do poważnych błędów rozumowania, błędnych wyników i błędnych decyzji.

Po to, żeby przedstawić problematykę modelowania trzeba jasno określić cel twórczych działań inżynierskich, nie bez racji często zwanych sztuką inżynierską, cel którego realizacji ma służyć modelowanie. Ogólnie rzecz biorąc celem tym jest świadome przekształcanie przyrody (tworzenie nowych wytworów materialnych, ustalanie sposobu ich działania, przewidywanie efektów). Jest on różny od celu nauki, która zajmuje się głównie poznawaniem prawdy. Chcąc celowo przekształcić rzeczywistość — wykonać maszynę realizującą założone zadania, opracować proces przebiegający w sposób zamierzony czy też sprawną organizację — trzeba uświadomić sobie cel, któremu działanie inżynierskie ma służyć, czyli sformułować zadanie. Dopiero wtedy można przystąpić do formułowania

modelu danej maszyny, jej elementu, procesu w niej zachodzącego czy też innego zadania inżynierskiego. Przebieg realizacji danego celu ilustruje w bardzo uproszczony sposób rys. 1.



Rys. 1

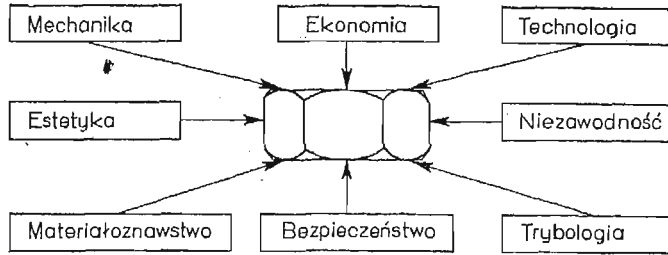
Każdy obiekt materialny zawiera w sobie ilość informacji przekraczającą możliwość równoczesnego ogarnięcia ich umysłem, a tym bardziej opisaną. Jeśli jednak znany jest cel działania to można wybrać informacje, które są ważne w realizacji tego celu.

Wyobraźmy sobie zwykłą kulę materialną; z grubsza rzecz biorąc jej ogólny opis może dotyczyć problemów geometrycznych, fizycznych, chemicznych, technologicznych, estetycznych i innych. Ogólny opis tej kuli byłby więc trudny, długi a przede wszystkim praktycznie zbędny. Jeśli jednak wiadomo, że opis kuli ma służyć do analizy jej ruchu pod działaniem sił (dynamika) to wystarczy podać tylko bardzo niewiele informacji — jej średnicę i gęstość materiału, z którego jest wykonana lub nawet tylko jej masę. Tworzy się wtedy myślowy opis kuli materialnej właściwy do analizy dynamicznej. Gdyby postawić inny cel to model kuli byłby inny.

Poza modelami abstrakcyjnymi, których przykład podany został powyżej tworzy się również modele materialne imitujące pod wybranym kątem widzenia rzeczywiste obiekty zainteresowań, służące wybranemu celowi analizy lub syntezy.

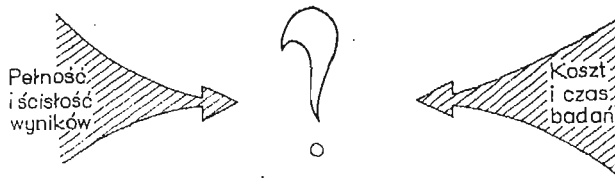
Ogólna definicja modelu jest trudna, w związku z czym w literaturze można znaleźć co najmniej kilka mniej lub bardziej różniących się między sobą definicji. Można znaleźć na przykład takie sformułowanie pojęcia modelu: modelem danego rzeczywistego obiektu jest układ dający się wyobrazić lub materialnie zrealizować, który odzwierciedlając lub odtwarzając obiekt zdolny jest zastępować go tak, że badanie tego układu dostarcza no-

wych, nadających się do dalszego sprawdzenia informacji o obiekcie. Budując model zjawiska, procesu czy obiektu, wykorzystuje się posiadaną na ten temat wiedzę; im więcej wiemy, tym lepszy możemy zbudować model. Wraz z podnoszeniem się stanu wiedzy ulepsza się modele. Zawsze jednak będzie pozostawał pewien stopień niewiedzy, który też powinien być uwzględniony w modelowaniu. W każdym razie trzeba pamiętać, że model nie jest i nie może być bezpośrednim odzwierciedleniem rzeczywistości, jest natomiast odzwierciedleniem naszej wiedzy o tej rzeczywistości.



Rys. 2

Modele, którymi operuje się w odrębnych dziedzinach nauki mają jednorodny charakter. Projektując maszynę mamy do czynienia ze znacznie bardziej złożoną problematyką, wchodzącą w zakres różnych dyscyplin nauki, wielu działów techniki a również dotyczącą ekonomii, estetyki itd. (rys. 2). Modele, którymi trzeba operować w projektowaniu maszyn są więc (lub powinny być) bardziej rozbudowane i niejednorodne, a co za tym idzie trudniejsze w badaniu. Stąd też często trzeba je bardzo upraszczać w celu uzyskania odpowiedniej efektywności ich badania.



Rys. 3

Jak sformułować kryterium poprawności modelowania? Najprościej można sformułować je następująco: model powinien dostatecznie wiernie odtwarzać badany obiekt rzeczywisty pod wybranym kątem widzenia, a jednocześnie być możliwie prosty i łatwy w badaniu (rys. 3). Właściwy model powinien więc być kompromisem pomiędzy tymi przeciwstawnymi tendencjami. Pod pojęciem dostatecznej wierności należy rozumieć dostateczną zgodność rezultatów badań modelu i obiektu rzeczywistego; wynika z tego oczywiście zależność modelu od wymogów stawianych dokładności rezultatów jego badania. Zbytnie uproszczenie modelu może doprowadzić do niedopuszczalnych nieścisłości, bądź nawet do pominięcia istotnych własności modelowego obiektu. Zbytnie rozbudowanie modelu może narazić na niepotrzebne straty związane z jego tworzeniem i badaniem.

Czynnik łatwości i szybkości operowania modelem, badania modelu, w wielu zastosowaniach jest decydujący. Dla przykładu modele stosowane w sterowaniu automatycznym, na przykład raket, muszą umożliwiać ich badanie w czasie rzeczywistym. Ta konieczność kompromisu stanowi istotną cechę odróżniającą modele stosowane w technice od modeli stosowanych w nauce, gdzie przede wszystkim chodzi o ogólność i ścisłość wyników.

Modelowanie obejmuje zwykle dwa zasadnicze etapy — zbudowanie tak zwanego modelu nominalnego i modelu matematycznego. (Ten ostatni nie zawsze pojawia się w sposób wyraźny).

Model nominalny powinien przedstawiać w wyidealizowany, uproszczony sposób badaną rzeczywistość, operując właściwymi tej rzeczywistości pojęciami. Na przykład mechanika, termodynamika czy optyka operują pojęciami fizycznymi — występujące tam modele nominalne to modele fizyczne.

Jak już wspomniałem, przy konstruowaniu mamy do czynienia z problemami nie tylko fizycznymi ale również ekonomicznymi, społecznymi itd., odpowiednie modele nominalne wyrażają się więc w różnorodnych kategoriach.

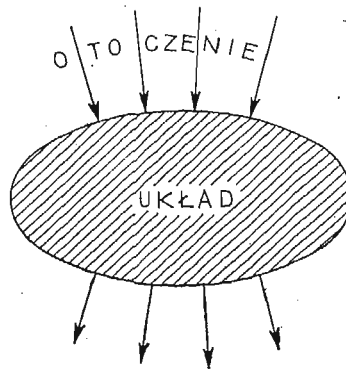
Model matematyczny to formalizacja modelu nominalnego prowadząca do podania zależności matematycznych pomiędzy jego parametrami.

Czytając piśmiennictwo dotyczące nauk technicznych, czy też zastosowań nauki w technice, można stwierdzić, że ogromna większość prac dotyczy problematyki badania modeli, czasami, choć rzadko, poruszając też sprawy budowania modeli matematycznych. Natomiast na problematykę budowania modeli nominalnych przeważnie nie zwraca się uwagi. Tymczasem w budowie maszyn najtrudniejsze i najistotniejsze jest moim zdaniem zbudowanie właściwego modelu nominalnego. Nie można przecież tutaj posłużyć się żadną procedurą czy algorytmem. Nie można znaleźć jednoznacznego przejścia pomiędzy rzeczywistością a jej modelem, nie można mieć nawet pełnej informacji o rzeczywistości. Modelowanie jest więc trudnym i odpowiedzialnym procesem decyzyjnym. Błędy popełniane przy badaniu (rozwiązywaniu) modelu często można wychwycić już w samym procesie jego badania. Błędy popełniane w procesie modelowania są bardzo trudne do zauważenia i niejednokrotnie ujawniają się dopiero po zastosowaniu jego wyników.

Dlatego też procesowi modelowania trzeba przypisywać szczególne znaczenie w rozwiązywaniu zadań inżynierskich a przyjęte modele weryfikować możliwie jak najczęściej i jak najdokładniej. Jedną z powszechnie stosowanych tu metod jest opisywanie rzeczywistości różnymi modelami, najlepiej różnymi jakościowo, i porównywanie wyników ich badania. Jednym z takich modeli może być model abstrakcyjny badany teoretycznie, drugim model materialny badany eksperymentalnie. Powstaje wtedy pytanie, który z tych modeli jest lepszy lub wiarygodniejszy? Często można spotkać się ze stanowiskiem, że wynik eksperymentalny jest bardziej wiarygodny. Tymczasem odpowiedzi na tak sformułowane pytanie nie ma, oba sposoby modelowania są równoprawne i równoważne, a ich badanie dostarcza wyników odnoszących się bezpośrednio tylko do tych modeli. Lepszy natomiast jest ten model (z punktu widzenia ścisłości), który daje wyniki lepiej odnoszące się do rzeczywistości. Wspomniany sposób myślenia u dużej liczby osób zajmujących się techniką wynika z częstego utożsamiania modelu materialnego z rzeczywistością i odnoszenia wyników badań eksperymentalnych bezpośrednio do rzeczywistości. Do modeli abstrakcyjnych takie rozumowanie rzadziej stosuje się, choć można i tu pokazać przy-

padki mieszania modeli i rzeczywistości. Znane są również przypadki prawidłowości wyników modelowania abstrakcyjnego mimo ich niezgodności (pozornej) z wynikami badań eksperymentalnych. Ostatnio niektórzy badacze zajmujący się metodami eksperymentalnymi w naukach technicznych stwierdzają, że metody pomiarowe poszły tak daleko, że brak jest odpowiednich teorii, dzięki którym można by badać różne nowe zjawiska eksperymentalnie tymi znanymi już zaawansowanymi metodami pomiarowymi.

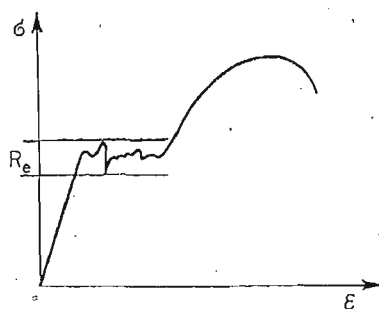
Początek modelowania to zbieranie informacji o modelowanym obiekcie i ustalenie zakresu wiedzy oraz stopnia niewiedzy o nim. Skąd można uzyskać wiedzę o przedmiocie, procesie, systemie, którego jeszcze nie ma, a który należy zaprojektować? Informacje te można uzyskać na podstawie piśmienictwa, specjalnie przeprowadzanych eksperymentów, badania problemów podobnych, wreszcie na podstawie tradycji i doświadczenia inżynierskiego. Szczególnie dwa ostatnie źródła informacji wymagają tutaj podkreślenia. Po zebraniu odpowiednich informacji, trzeba dokonać podziału tych informacji na bardziej i mniej istotne z punktu widzenia badanego problemu i operując tymi pierwszymi przystąpić do budowania modelu nominalnego. Podstawową decyzją jaką należy podjąć przy modelowaniu jest określenie układu i wydzielenie go z otoczenia (środowiska) (rys. 4). Jako kryterium takiego podziału przyjmuje się zwykle jednostronność oddziaływania (przepływu informacji): przyjmuje się, że otoczenie oddziałuje na układ a układ nie oddziałuje na otoczenie, stan obiektu zależy więc od stanu otoczenia, a stan otoczenia nie zależy od stanu obiektu.



Rys. 4

Czy mogą jednak istnieć obiekty wyizolowane nie oddziałujące na środowisko? Po co je budować; przecież celem działań technicznych, celem budowy maszyn nie jest samo ich tworzenie a dopiero ich użytkowanie, a więc oddziaływanie na środowisko. Właściwym kryterium jest więc brak sprzężenia zwrotnego między oddziaływaniem układu na otoczenie a oddziaływaniem otoczenia na układ. Istnienie lub nie istnienie sprzężenia zwrotnego stosunkowo łatwo rozpoznać w przypadku modeli jednorodnych, dotyczących jednej dziedziny nauki, choć i tu popełnia się błędy. Natomiast w przypadku modeli niejednorodnych, takich jakimi operować powinna budowa maszyn, sprawa jest znacznie trudniejsza; sprzężenia takie mogą powstawać w różny sposób, choćby w wyniku działania człowieka operującego maszyną. Dla ilustracji błędów, o których wspomniałem, przedsta-

wię dwa przykłady. Pierwszy to tak zwana krzywa rozciągania (rys. 5). Jeszcze do lat pięćdziesiątych wyniki tak przeprowadzanych badań wytrzymałościowych uważano za wielkości charakteryzujące próbkę rozciąganą, stanowiące pewne znormalizowane własności materiałowe. Działo się tak, ponieważ do układu zaliczano tylko próbkę, a maszynę wytrzymałościową traktowano jako otoczenie. Teraz już dobrze wiadomo, że analizując wyniki pomiaru trzeba brać pod uwagę zarówno próbkę jak i maszynę wytrzymałościową (próbka i maszyna stanowią układ) i że zarejestrowane wyniki zależą zarówno od własności materiału (próbki) jak i od własności maszyny. Na przykład przebieg w okolicy R_e opisuje drgania maszyny wytrzymałościowej wywołane procesami dyslokacyjnymi zachodzącymi w próbce. Chcąc określić własności samej próbki trzeba opisać drgania maszyny z próbką, tworząc odpowiedni model dynamiczny i dopiero wtedy, na podstawie zarejestrowanego wyniku odtworzyć przyczynę drgań, a więc to co się działo w próbce.



Rys. 5

Inny przykład to jedna z dotychczasowych norm dotycząca połączeń śrubowych. W wyniku nie uwzględnienia w modelu (jako układ) smaru na powierzchniach styku elementów złącza wskazania normy prowadzą w wielu przypadkach do zniszczenia połączeń i to szczególnie połączeń odpowiedzialnych, wykonywanych bardzo starannie.

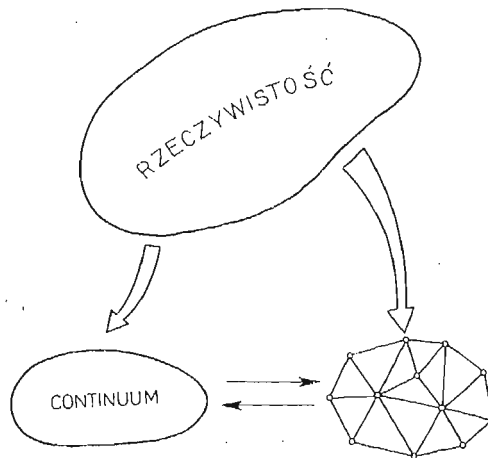
Proces rozdzielania układu i otoczenia jest zwykle trudny i niejednoznaczny, a musi być przeprowadzony bardzo starannie, gdyż decydując się na pominięcie pewnych oddziaływań można w sposób istotny zniekształcić własności stanu rzeczywistego i doprowadzić do zbudowania niewłaściwego modelu, prowadzącego do błędnych wyników. Jest jednak rzeczą oczywistą, że im „mniejszy” wybierze się układ, to znaczy im więcej zaliczy się do otoczenia, tym analiza układu może być łatwiejsza i szybsza. Ale czy dostatecznie wierna?

Tu znów chciałbym zwrócić uwagę na często występującą w literaturze technicznej niefrasobliwość w procesie ustalania układu, określenia oddziaływań i warunków brzegowych. A przecież ile procesów technicznych zależy przede wszystkim od brzegu układu! To rozdzielanie układu i otoczenia jest trudne w dziedzinie fizyki ale znacznie trudniejsze w ekonomii (choćby dla określenia kosztów ciągnionych), a co dopiero powiedzieć o innych dziedzinach mających wpływ na technikę.

Następnym etapem modelowania jest analiza przepływu oddziaływań (sprzężeń) wewnątrz układu i ustalenie jego struktury. I tu, podobnie jak poprzednio, im struktura układu jest prostsza, tym łatwiej jest go badać. Trzeba więc starać się rozróżnić oddziały-

wania istotne i nieistotne i te ostatnie pominąć przy ustalaniu struktury układu. W układach mechanicznych najważniejsza jest decyzja dotycząca liczby stopni swobody układu, w tym decyzja najbardziej ogólna czy traktować układ jako dyskretny czy jako ciągły.

Oba podejścia mają swoje zalety i wady. Modele dyskretny są często prostsze od ciągłych i dlatego są chętnie stosowane; na tych modelach trudno jednak analizować pewne zjawiska, na przykład zjawiska falowe, jak również wyniki ich badania są trudniejsze w analizie i interpretacji. W każdym konkretnym przypadku należy więc zastanowić się nad wyborem właściwego modelu. Trzeba tu podkreślić pełną równowagę modeli ciągłych i dyskretnych w zagadnieniach technicznych. Wśród mechaników panuje bowiem przekonanie o nadrzędności modeli ciągłych i traktowanie modeli dyskretnych jako pewnego uproszczenia modeli ciągłych. Modelowanie rzeczywistości za pomocą modeli dyskretnych trzeba się jednak starać robić wprost (rys. 6), a nie tak, jak to dotychczas



Rys. 6

zwykle się robi, najpierw konstruując model ciągły a potem dyskretyzując go. Oba rodzaje modeli podlegają pewnym ograniczeniom. Jeśli buduje się model dyskretny wprost, trzeba uwzględnić tylko właściwe mu ograniczenia; jeśli dyskretyzuje się model ciągły to trzeba uwzględnić zarówno ograniczenia modelu ciągłego jak i dyskretnego. W wielu przypadkach bardzo wygodny jest model dyskretny oparty na pojęciu elementu skończonego, obecnie bardzo często stosowany przy analizie nawet bardzo złożonych zjawisk. Po ustaleniu struktury układu należy w odpowiedni sposób określić oddziaływanie otoczenia na obiekt i obiektu na otoczenie.

Trzeba jeszcze wyraźnie podkreślić, że modelowanie nominalne nie jest operacją jednoznaczna. Jednemu rzeczywistemu zagadnieniu mogą odpowiadać różne modele, w różny sposób je opisujące. Po określeniu modelu nominalnego można przystąpić do formalizowania jego cech i procesów w nim zachodzących. Formalizacja ta prowadzi do podania pewnego zbioru zależności matematycznych noszącego nazwę modelu matematycznego. Model matematyczny powinien w sposób jednoznaczny odpowiadać modelowi nominalnemu, choć może on mieć różną postać, przystosowaną do przewidywanego sposobu jego rozwiązywania.

Badając (rozwiązując) model matematyczny poszukuje się informacji o pewnych jego właściwościach. Im model jest bardziej skomplikowany, tym trudniej go badać. Czasem uzyskanie odpowiedzi na interesujące pytania co do skomplikowanego modelu jest wręcz niemożliwe. Budując więc model matematyczny niejednokrotnie weryfikuje się model nominalny, często go upraszczając. Tu znów należy zwrócić uwagę na często pojawiające się w praktyce błędne postępowanie polegające na upraszczaniu samego tylko modelu matematycznego, bez odpowiedniej weryfikacji modelu nominalnego np. fizycznego. Takie postępowanie prowadzić może, i niekiedy w praktyce prowadzi, do istotnych błędów, bowiem niewielka wydawałoby się zmiana modelu matematycznego może prowadzić do tak poważnej zmiany modelu fizycznego, że przestaje on odpowiadać rzeczywistości.

Podjęcie decyzji dotyczącej wymaganej dokładności rezultatów badania modelu matematycznego jest sprawą konstruktora maszyny; błąd w jedną stronę stwarza stan niebezpieczeństwa, błąd w drugą stronę prowadzi do niepotrzebnych strat.

Budując model matematyczny przede wszystkim ustala się zbiór zmiennych opisujących stan badanego obiektu czyli tzw. zbiór zmiennych stanu. Następnie na podstawie praw fizyki (w miarę potrzeby innych nauk) takich jak zasady dynamiki, równania ciągłości, bilanse energii buduje się zależności matematyczne między tymi zmiennymi stanu mające postać równań lub nierówności. W zależnościach tych występują wielkości charakteryzujące model, czyli tak zwany zbiór parametrów. Poważne trudności pojawiają się tu wtedy, gdy w modelu matematycznym występują wielkości trudno do zdefiniowania, precyzyjnego opisu i do kwantyfikacji. Tak jest wtedy, gdy w modelowaniu inżynierskim uwzględnić estetykę, wygodę a nawet technologię. Można wtedy posłużyć się teorią liczb rozmytych i zbiorów rozmytych, metodą ekspertów itp.

Celem badania modelu może być określenie wartości zmiennych stanu, na przykład w funkcji czasu, przy zadanych wartościach parametrów (analiza) lub dobór odpowiednich parametrów do realizacji zadanego przebiegu zmiennych stanu (synteza). Z tym ostatnim zagadnieniem spotykamy się zwykle przy konstruowaniu maszyn. Ważną cechą modelu matematycznego jest jego wrażliwość na zmianę wartości parametrów. Parametry modelu matematycznego są zwykle określone w pewnym przybliżeniu. Jeśli model matematyczny opisuje jakąś istniejącą konstrukcję poddaną analizie, to wartości jego parametrów uzyskuje się poprzez identyfikację na drodze badań eksperymentalnych, wykonywanych oczywiście z pewną dokładnością. Jeśli badanie modelu matematycznego ma być podstawą do syntezy konstrukcji, to również w wyniku jej materialnej realizacji wartości parametrów mogą ulegać zmianie w granicach tolerancji. Licząc się z tym, trzeba budować takie modele matematyczne, które są odpowiednio mało wrażliwe na niewielkie zmiany parametrów. Mało wrażliwe to znaczy takie, w których niewielka zmiana wartości parametrów prowadzi do niewielkiej zmiany przebiegu badanych procesów (w żadnym przypadku nie prowadzi do zmiany jakościowej zachodzących procesów). Z drugiej strony jeśli budowany model ma służyć zbadaniu wpływu pewnego parametru na przebieg procesu, to model ten musi być dostatecznie wrażliwy na zmianę tego parametru. W przeciwnym przypadku rezultaty badania mogą być mało dokładne, a nawet błędne.

Pojęciem blisko związanym z wrażliwością jest stateczność. Badanie stateczności

pozwała na uzyskiwanie istotnych informacji jakościowych o zachowaniu się modelu, a poprzez to o zachowaniu się procesów zachodzących w rzeczywistości.

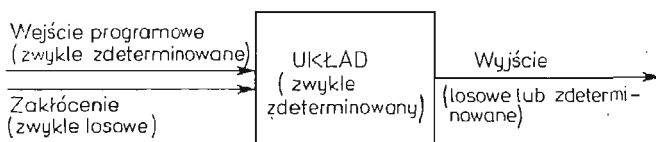
Relacje stanowiące model matematyczny zawierają parametry liczbowe lub funkcyjne, których wartości dopiero trzeba ustalić. Wartości te można albo wprost zmierzyć na obiekcie rzeczywistym, jeśli obiekt taki istnieje, albo założyć na podstawie wiedzy ogólnej, pomagając sobie, gdy trzeba, pomiarami na obiektach podobnych, gdy obiekt jeszcze nie istnieje. W tym ostatnim przypadku wartości parametrów powinny być oczywiście weryfikowane na obiekcie rzeczywistym po jego wykonaniu. Niektóre parametry modeli matematycznych można wyznaczyć bezpośrednio drogą analizy teoretycznej lub pomiarów. Oczywiście jest na przykład, że parametry modelu matematycznego konstrukcji kratowej, takie jak wartości współrzędnych węzłów, pola przekroju prętów, moduł sprężystości materiału, można zmierzyć wprost na istniejącej konstrukcji poddanej analizie, bądź wyznaczyć na podstawie posiadanej wiedzy ogólnej. Są jednak przypadki inne, gdy parametrów układu nie można zmierzyć bezpośrednio a trzeba je oszacować na podstawie globalnego badania analizowanego obiektu, bądź obiektu podobnego. Takie sytuacje występują często w zagadnieniach dynamiki i sterowania maszyn. W zagadnieniach dynamiki, przy określeniu wartości parametrów dyskretnego modelu dynamicznego trzeba wyznaczyć wartości elementów macierzy mas, sztywności, tłumień. Elementów tych macierzy zwykle nie można wyznaczyć teoretycznie ani zmierzyć wprost na żadnym realnym obiekcie mechanicznym. Można natomiast wprowadzić obiekt w drgania i wyznaczyć amplitudy drgań (lub amplitudy prędkości czy przyspieszeń) wybranych punktów układu rzeczywistego, wyznaczyć częstotliwości i postacie drgań i na podstawie tych wyników wyznaczyć poszukiwane wartości elementów macierzy mas, sztywności i tłumień. Postępowanie takie nosi nazwę identyfikacji parametrów modelu.

Trzeba jeszcze raz podkreślić, że w zagadnieniach, z jakimi mamy do czynienia w procesie projektowania maszyn nie można przeprowadzać eksperymentów na gotowych obiektach, bo ich jeszcze nie ma. Trzeba wtedy posługiwać się obiektami podobnymi (urządzeniami o podobnych parametrach technicznych, w podobny sposób rozwiązanych konstrukcyjnie), bądź budować specjalne modele materialne, zgodnie z zasadami podobieństwa i na nich prowadzić eksperymenty. Ostateczna weryfikacja modelu może być jednak dokonana dopiero po wykonaniu modelowanego obiektu rzeczywistego.

W procesie projektowania, dokonując syntezy maszyny, jej elementów lub procesów w niej zachodzących, dokonuje się często zmian w odpowiednich modelach matematycznych po to, żeby w efekcie otrzymać takie modele, których właściwości odpowiadają stawianym wymaganiom. Postępowanie takie nosi nazwę modyfikacji modelu. Budując model trzeba więc zadbać o możliwość takiej modyfikacji.

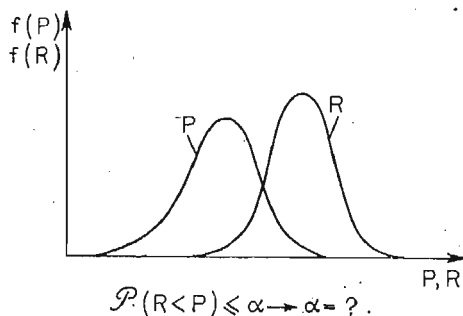
Gdy rozporządzamy dostatecznie pełną informacją, pełną tak jakościowo jak i ilościowo, o istotnych własnościach modelowanej rzeczywistości, to parametry modelu układu i oddziaływania środowiska możemy traktować jako zdeterminowane. Są jednak sytuacje inne, gdy posiadamy odpowiednie informacje jakościowe a nie mamy odpowiednich informacji ilościowych. Możemy nie znać konkretnych wartości parametrów układu lub nie mieć jednoznacznie określonego oddziaływania środowiska. Wtedy wielkości te można traktować jako zmienne losowe lub, gdy są funkcjami zmiennych zdeterminowanych, na przykład czasu, jako procesy stochastyczne. Badanie takiego modelu prowadzi do in-

formacji również w sensie stochastycznym. Modele te mają jeszcze jedną wielką zaletę — pozwalają ująć zarówno posiadaną wiedzę o maszynie jak i zorientować się w zakresie niewiedzy o niej. Odpowiednio operując własnościami probabilistycznymi takich modeli można uzyskać informacje o stopniu niepewności podejmowanych decyzji konstrukcyjnych. Stąd też modele stochastyczne są coraz częściej stosowane w budowie maszyn, powszechne są w teorii niezawodności, coraz częściej pojawiają się w badaniu bezpieczeństwa maszyn, dynamice maszyn, trybologii, zmęczeniu materiałów itp.



Rys. 7

W modelach stochastycznych najczęściej za pomocą zmiennych losowych lub procesów stochastycznych opisuje się tylko oddziaływanie otoczenia na układ oraz w konsekwencji tego oddziaływania układu na otoczenie (rys. 7). A przecież w technice typowe są zagadnienia o niepełnej informacji (w sensie deterministycznym) również na temat samego układu. Trzeba wtedy również sam układ opisywać za pomocą parametrów losowych lub funkcji losowych. Jako takie losowe parametry można wymienić wielkości wynikające z procesu eksploatacyjnego maszyny jak np. masy przenoszonych ładunków, zmienne sztywności elementów, zmienne momenty bezwładności, własności zastosowanych materiałów, zmęczenie i zużycie poszczególnych elementów, luzy w granicach tolerancji itp. Badanie modeli z losowymi parametrami układu jest znacznie trudniejsze, a odpowiednie teorie matematyczne znacznie mniej rozwinięte. Trzeba też jeszcze wspomnieć, że w piśmiennictwie światowym najczęstsze są publikacje na temat badania modeli stochastycznych dotyczące tylko pewnych uśrednień wchodzących w zakres teorii korelacji, badania bardzo przydatne w różnych dziedzinach nauki i techniki. W budowie maszyn mamy jednak często do czynienia z zagadnieniami nie nadającymi się do uśrednienia (np. problemy zniszczenia), a tu odpowiednie metody matematyczne są znacznie mniej rozwinięte. Wymienić tu można na przykład ważną metodę przewyższeń.



Rys. 8

Metody stochastyczne pozwalają na uzyskanie bardziej racjonalnych informacji o maszynie. Np. klasyczny warunek wytrzymałościowy wymaga użycia współczynnika

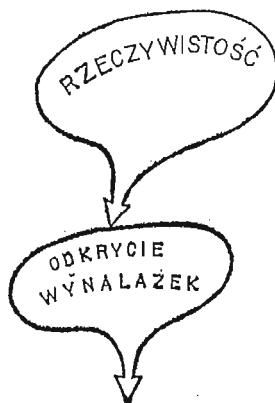
bezpieczeństwa, wielkości niezbyt określonej, liczby niewiele mówiącej. Tymczasem potraktowanie zagadnienia na gruncie probabilistycznym (rys. 8) i porównanie rozkładu uogólnionego obciążenia P oraz uogólnionej nośności (obciążenia niszczącego) R pozwala na określenie prawdopodobieństwa awarii α . Oczywiście dalej pozostaje problem jakie α uznać za dopuszczalne. Jest to problem decyzyjny o wielu aspektach, w którym jednak powinna dochodzić do głosu etyka i to w sposób jawny. Ujęcie probabilistyczne pozwala, a nawet zmusza do takiego potraktowania bezpieczeństwa, eksponując też omawianą już złożoność problematyki inżynierskiej.

Oczywiście modelowanie stochastyczne nie jest jedynym możliwym do zastosowania, gdy chce się uwzględnić w modelu niepełną informację o rzeczywistości. Inną drogą jest na przykład budowanie modeli zgodnie z zasadami teorii gier. Takie ujęcie często jest stosowane w problematyce wojskowej, a ogólnie w zagadnieniach dotyczących strategii postępowania (nas interesuje strategia działania i eksploatacji maszyn). Wydaje się, że ta dziedzina może odgrywać istotną rolę w projektowaniu inżynierskim. Powinna ona na przykład stanowić podstawę racjonalnego systemu norm i przepisów, odgrywających tak istotną rolę w budowie maszyn. Jeszcze inną drogą ujmowania niepewności w modelach matematycznych jest stosowanie teorii liczb rozmytych i zbiorów rozmytych, o czym już wspomniałem. Wiele wielkości można określić tylko jakościowo — duży, średni, mały, bardzo mały lub co najwyżej oszacować ilościowo, nie mając przekonania co do precyzji tej oceny, ani w sensie deterministycznym ani probabilistycznym. Wtedy użyteczne staje się pojęcie liczby rozmytej oraz stosowanie aparatu teorii liczb rozmytych. Podejście to ma wiele korzyści w porównaniu na przykład z operowaniem oszacowaniami punktowymi. Działania na liczbach rozmytych prowadzą zwykle do wielkości coraz bardziej rozmytych, coraz bardziej nieprecyzyjnych, co odpowiada rzeczywistemu procesowi operowania wielkościami nieprecyzyjnymi. Podejście to umożliwia uzyskanie dobrego materiału do właściwego podejmowania decyzji inżynierskich oraz stwarzają przesłanki do oceny stopnia zaufania co do trafności tych decyzji.

Na podstawie wyników badania modeli matematycznych podejmuje się decyzje. Zwykle poszukujemy decyzji najwłaściwszej, dającej w efekcie najlepszy rezultat pod wybranym względem. Jeśli jakość rezultatu ocenia się według jakiegoś kryterium dającego się sformułować matematycznie, to model można rozbudować o to kryterium otrzymując model optymalizacyjny. Z modelu takiego, stosując odpowiednie procedury, można uzyskać rozwiązanie optymalne, czyli najlepsze pod względem wybranego kryterium. I tu jasno uwypukla się wspomniana już potrzeba możliwie szerokiego, kompleksowego, wielodyscyplinarnego podejścia do modelowania w budowie maszyn. Pominięcie jakiegś dziedziny powoduje zubożenie modelu optymalizacyjnego i może skłaniać do wyciągania na podstawie jego badania niewłaściwych wniosków. Z kolei modele ogólne wymagają również ogólnych funkcji kryteriów uwzględniających różne czynniki, a więc prowadzą do polioptymalizacji. Trzeba tu jednak wyraźnie podkreślić, że nawet najgłębszy i najbardziej rozbudowany model optymalizacyjny nie zlikwiduje sytuacji decyzyjnej i nie zwolni konstruktora od decyzji co do wyboru takiego czy innego rozwiązania konstrukcyjnego. Wynika to choćby z niejednoznaczności procesu odzwierciedlenia rzeczywistości i tworzenia modelu, o czym już wspomniałem.

Przedstawiłem w wielkim skrócie podstawową problematykę modelowania w budowie

maszyn i swoje uwagi na ten temat. Oczywiście można w inny sposób podchodzić do modelowania i z różnymi też podejściami spotykamy się w piśmiennictwie technicznym. Różne mogą być interpretacje rzeczywistości, co wiąże się, w sposób uświadomiony lub nie, z akceptacją takiej lub innej koncepcji filozoficznej. Z tego dalej wynikają różne podejścia do procesu formułowania modelu. Potrzeby modelowania, w takim lub innym ujęciu, obecnie jednak nie neguje się.



Rys. 9

Zastanówmy się na koniec czy zawsze w twórczej działalności inżynierskiej problematyka modelowania występuje *explicitie*. Chyba nie. Przecież dawno temu, na długo przed pojawieniem się odpowiednich dziedzin nauki, przed stworzeniem podstaw modelowania, pojawiły się konstrukcje tak złożone, że do tej pory są one trudne do zrozumienia dla przeciętnego inżyniera. Wielkie odkrycia powstają w podświadomości, w wyniku genialnego skojarzenia faktów i obserwacji, w wyniku działania intuicji i fantazji, bez całej formalnej procedury, do której należy również modelowanie (rys. 9). Czy wtedy to wszystko, o czym pisałem jest niepotrzebne? Przeciwnie, jest niezbędne w procesie weryfikacji, adaptacji i realizacji takiej genialnej idei.

Praca została złożona w Redakcji dnia 20 lutego 1983 roku.