

INSTYTUT AUTOMATYKI
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

P R A C E
INSTYTUTU AUTOMATYKI PAN

Zeszyt 71

JAKUB GUTENBAUM

ZAGADNIENIA ADAPTACYJNEGO STEROWANIA
WIELOWYMIAROWYMI OBIEKTAMI DYNAMICZNYMI



WARSZAWA

1968

INSTYTUT AUTOMATYKI
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

P R A C E
INSTYTUTU AUTOMATYKI PAN

Zeszyt 71

JAKUB GUTENBAUM

ZAGADNIENIA ADAPTACYJNEGO STEROWANIA
WIELOWYMIAROWYMI OBIEKTAMI DYNAMICZNYMI



WARSZAWA

1968

47471



Część pierwsza

WPROWADZENIE

1. UWAGI OGÓLNE

W procesie rozwoju teorii i praktyki układów sterowania automatycznego można zaobserwować pewne etapy różniące się problematyką, która stanowiła ośrodek zainteresowania specjalistów - teoretyków i praktyków.

Na etapie początkowym badania koncentrowały się wokół zagadnień stabilności układów regulacji. Do czasu rozpowszechnienia stosowania układów ze sprzężeniem zwrotnym zagadnienia stabilności nie miały tak ważnego znaczenia w praktyce.

Etap następny charakteryzuje wzrost wymagań stawianych układom automatyki, co zapoczątkowało gruntowne badania nad jakością procesów sterowania, a w konsekwencji - powstanie teorii układów optymalnych.

Zarówno w pracach dotyczących stabilności, jak i w pracach dotyczących układów optymalnych zakładało się całkowitą znajomość równań opisujących obiekt sterowania. W miarę jednak rozwoju nowoczesnej techniki i technologii oraz wciąż wzrastającego dążenia do zastępowania nie tylko pracy fizycznej, lecz i pracy umysłowej pracą zautomatyzowanych urządzeń, okazywało się, że w wielu przypadkach założenie to jest nie do przyjęcia. Co gorsza, przyczyną tego jest nie tylko nieznajomość pewnych zależności określających obiekty sterowania, lecz fakt, iż zależności te zmieniają się w czasie pracy w sposób nie dający się z góry przewidzieć na skutek zmieniających się w szerokim zakresie warunków pracy.

Tak więc zagadnienia sterowania procesami przebiegającymi w środowisku o nieznanym a priori właściwościach, czyli zagadnienia sterowania obiektami o niepełnej informacji początkowej, stały się problematyką centralną następnego z kolei etapu rozwoju teorii i zastosowań układów sterowania automatycznego.

Aktualność tych zagadnień wynika z jednej strony z wymagań praktyki, gdyż wciąż zwiększa się grupa obiektów sterowania automatycznego, które w sposób z góry nie przewidziany zmieniały w sze-

rokin zakresie swoje charakterystyki, jak np. reaktory chemiczne /2, 15, 41, 63, 86, 91, 101, 103, 108, 109/ i jądrowe /111/, pewne procesy w hutnictwie i metalurgii /13, 14, 16, 19, 57, 77, 78, 123, 124/, samoloty ponaddźwiękowe i rakiety /39, 64, 79, 89, 92, 93, 94, 110, 115/, statki morskie /40, 116, 117, 122/ i tym podobne.

Z drugiej strony, olbrzymi postęp osiągnięty w ostatnich latach w technice cyfrowej umożliwia szybkie wykonywanie wielu złożonych operacji obliczeniowych i logicznych niezbędnych do optymalnego sterowania obiektami o niepełnej informacji początkowej.

Wśród układów przeznaczonych do optymalnego sterowania obiektami o niepełnej informacji początkowej można wyróżnić dwie grupy:

układy ekstremalne, w których utrzymywany jest automatycznie optymalny punkt pracy na charakterystyce statycznej obiektu (optymalizacja statyczna),

układy adaptacyjne, w których utrzymywane są automatycznie na poziomie optymalnym pewne wybrane właściwości dynamiczne układu sterowania (optymalizacja dynamiczna).

Niniejsza praca jest poświęcona wybranym zagadnieniom z zakresu układów adaptacyjnych.

W konwencjonalnych układach sterowania automatycznego całkowita synteza urządzenia sterującego jest wykonywana w fazie projektowania układu sterowania. Określony na tym etapie algorytm sterowania, realizowany przez urządzenie sterujące, może być ewentualnie korygowany sporadycznie przez obsługę w toku eksploatacji. Natomiast w układach adaptacyjnych odbywa się ciągłe automatyczne dopasowywanie się urządzenia sterującego do aktualnych warunków pracy, aby spełnione było zadane kryterium jakości, charakteryzujące dynamikę procesu sterowania.

2. DWA UJĘCIA TEORII UKŁADÓW ADAPTACYJNYCH

W pracach poświęconych teorii układów adaptacyjnych można wyróżnić dwa różne podejścia do tych zagadnień: probabilistyczne i deterministyczne.

Przy podejściu probabilistycznym, którego podstawą jest przede wszystkim bayesowska zależność prawdopodobieństwa a posteriori od prawdopodobieństwa a priori /24, 37, 38, 56,

62, 71, 112, 113, 127/, zagadnienie jest sformułowane następująco: urządzenie sterujące ma wytworzyć sygnał sterujący zgodnie z optymalną regułą decyzyjną (algorytm sterowania) ekstremalizującą wartość średnią (najczęściej w sensie średniokwadratowym) wskaźnika jakości. Jednakże optymalna reguła decyzyjna zależy od charakterystyk probabilistycznych zakłóceń działających na obiekt. Aprioryczna informacja o tych charakterystykach jest niewystarczająca do wytworzenia sygnału optymalnego. W związku z tym obok problemu wyznaczenia optymalnego sygnału sterującego powstaje problem identyfikacji właściwości statystycznych zakłóceń.

Tak postawione zagadnienie zostało w sposób najbardziej ogólny rozwiązane przez A.A. Feldbauma w pracach dotyczących t e o r i i s t e r o w a n i a d u a l n e g o /27, 28, 29, 32/. Przy syntezie algorytmu realizującego optymalne sterowanie obiektami o niepełnej informacji początkowej uwzględnił on fakt, iż sygnał sterujący ma zadanie dwójakie (dualne): sterowanie obiektem i jego identyfikację. Poprzednio, wychodząc z przesłanek intuicyjnych uważano, że zadania te mogą być traktowane niezależnie. Feldbaum wykazał, że w obszernej klasie zamkniętych układów sterowania, które nazywa on niesprowadzalnymi do układów otwartych, takie rozbieżności nie prowadzi do sterowania optymalnego. Mimo niezmiernej wartości poznawczej teorii sterowania dualnego, jej zastosowanie prowadzi do algorytmów wymagających zbyt dużej liczby obliczeń. Nawet w przypadku bardzo prostych obiektów dynamicznych i zastosowania najbardziej nowoczesnych maszyn cyfrowych nie ma możliwości dokonania tych obliczeń w rozsądnym czasie. Wyjście z tego impasu niektórzy autorzy widzą w uwzględnieniu we wskaźniku jakości kosztów operacji obliczeniowych /100/. Niestety, przy takim, niewątpliwie bardzo realistycznym podejściu, nie udało się wyjść na razie poza sformułowanie problemu. Należy jednak podkreślić, że w zagadnieniach, w których liczba decyzji, które należy podejmować, jest ograniczona, np. w zagadnieniach rozpoznawania i klasyfikacji sytuacji, podejście bayesowskie wykazuje dużą przydatność /6, 65, 66, 112/.

Przy d e t e r m i n i s t y c z n y m ujęciu teorii układów adaptacyjnych /17, 67, 72, 73, 90, 105, 106/ ^{x)} zagadnienie jest

^{x)} Cytuje się tu wyłącznie pozycje książkowe. Liczba artykułów poświęconych temu tematowi jest rzędu kilkuset (patrz opracowania bibliograficzne /9, 10/).

formułowane następująco: optymalny względem zadanego wskaźnika jakości algorytm sterowania jest funkcją pewnych parametrów charakteryzujących obiekt sterowania. Brak pełnej apriorycznej informacji o obiekcie polega na nieznanym aktualnych wartości tych parametrów, które zmieniają się zależnie od warunków pracy obiektu.

Celem teorii układów adaptacyjnych w ujęciu deterministycznym jest opracowanie algorytmów, na podstawie których, drogą operacji wykonywanych na wejściowych i wyjściowych sygnałach obiektu, uzupełnia się w toku pracy układu sterowania brakującą informację o wartościach nieznanymi parametrów.

Z punktu widzenia równań opisujących obiekt sterowania zmiany parametrów, o których mowa, najczęściej można traktować jako zakłócenia multiplikatywne.

Jeżeli na pracę układu sterowania oprócz zakłóceń multiplikatywnych mają wpływ również szybkozmienne zakłócenia addytywne, to model deterministyczny można, oczywiście, uzupełnić przez uwzględnienie statystycznych właściwości tych zakłóceń.

Przy podejściu deterministycznym ułatwiamy sobie zadanie, gdyż z góry zakładamy uproszczenie polegające na dekompozycji funkcji urządzenia sterującego, które niezależnie realizuje algorytmy identyfikacji oraz adaptacji. Dzięki temu można jednak uzyskać realistyczne algorytmy działania urządzenia sterującego.

W dalszym ciągu niniejszej pracy, mówiąc o układach adaptacyjnych, będziemy mieli na myśli podejście z punktu widzenia deterministycznego, nie wspominając o tym w każdym przypadku.

3. ALGORYTMY ADAPTACJI

Zagadnienia związane z definicją i klasyfikacją układów adaptacyjnych są wciąż jeszcze przedmiotem kontrowersji. W literaturze na ten temat można znaleźć wiele różnych poglądów /3, 25, 30, 31, 99, 119, 126/. Pewne ich zestawienie zawarto w pracy /43/. Nie wdając się tu w bardziej szczegółowe omówienie tego zagadnienia, stwierdzimy tylko, że jedną z podstawowych cech układu adaptacyjnego jest sposób realizacji algorytmu adaptacji. Zgodnie z tym, wśród układów adaptacyjnych można wyróżnić zdecydowanie dwie grupy:

- układy z analitycznym algorytmem adaptacji,

- układy z szukaniem automatycznym.

W układach z analitycznym algorytmem adaptacji istnieje i jest wykorzystywana do celów adaptacji jednoznaczna zależność pożądanego kierunku zmian parametrów określających sygnał sterujący od wartości wielkości charakteryzujących właściwości dynamiczne procesu sterowania. W układach tych identyfikuje się do celów adaptacji parametry lub charakterystyki procesu sterowania, jak na przykład:

- współczynniki równań różniczkowych,
- współczynniki transmitancji,
- odpowiedzi impulsowe,
- wybrane parametry dynamiczne (współczynniki wzmocnienia, stałe czasowe, współczynnik tłumienia itp.).

Z kolei wyniki procesu identyfikacji można wykorzystać do nastajania urządzenia sterującego dwojako:

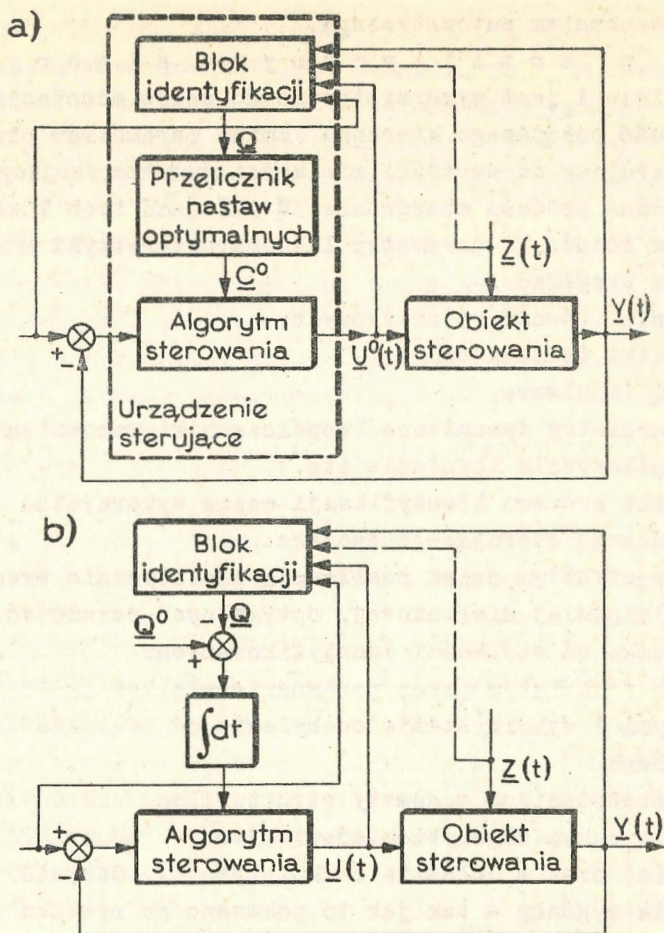
- w układzie otwartym przez realizację analitycznie wyznaczonej zależności, najczęściej nieliniowej, optymalnych parametrów urządzenia sterującego od wielkości identyfikowanych.
- w układzie zamkniętym przez porównanie wielkości identyfikowanych z zadanymi i wykorzystanie odchylenia od nastajania urządzenia sterującego.

Na rys. 1 przedstawiono schematy strukturalne układów adaptacyjnych z analitycznym algorytmem adaptacji: z adaptacją w układzie otwartym (a) oraz w układzie zamkniętym (b). Oczywiście, nie zawsze wszystkie sygnały - tak jak to pokazano na rysunku - są doprowadzane do bloku identyfikacji. Nie zawsze np. można mierzyć zakłócenia lub też nie we wszystkich przypadkach istnieje potrzeba mierzenia zewnętrznych sygnałów sterujących.

W układach z szukaniem automatycznym optymalny algorytm sterowania jest wyznaczany metodą prób i błędów, za pomocą kolejnych zmian parametrów urządzenia sterującego i badania wpływu tych zmian na wartość wskaźnika jakości. W układach tych zadanie polega najczęściej na utrzymywaniu wskaźnika jakości na poziomie ekstremalnym (maksymalnym lub minimalnym).

Wskaźniki jakości mają na ogół postać funkcjonałów

$$I(t_0) = \int_{t_0}^{t_0+T} L(t) dt \quad (1)$$



Rys. 1. Schematy strukturalne układów adaptacyjnych z analitycznymi algorytmami adaptacji:

a) realizacja algorytmu adaptacji w układzie otwartym
 \underline{Q} - identyfikowane parametry procesu sterowania,
 \underline{Q}^0 - optymalne parametry sygnału sterującego,

b) realizacja algorytmu adaptacji w układzie zamkniętym
 \underline{Q} - identyfikowane parametry procesu sterowania,
 \underline{Q}^0 - zadane parametry procesu sterowania

gdzie funkcja podcałkowa $L(t)$, zwana funkcją kosztów albo funk-

o ją strat, może być funkcją: współrzędnych stanu obiektu, sygnałów wejściowych i sygnałów wyjściowych, zakłóceń, czasu.

Za pomocą analitycznych algorytmów adaptacji można rozwiązywać zadania stosunkowo proste, przede wszystkim takie, w których istnieje możliwość nastrajania tylko jednego parametru urządzenia sterującego. Najczęściej jest to współczynnik wzmocnienia regulatora.

W przypadkach bardziej złożonych - wielowymiarowych, np. tam, gdzie zagadnienie dotyczy kompleksowej optymalizacji sterowania obiektami wielowymiarowymi, konieczne staje się zastosowanie szukania automatycznego.

4. SZUKANIE AUTOMATYCZNE W UKŁADACH ADAPTACYJNYCH

Zagadnieniom szukania automatycznego w układach regulacji ekstremalnej (przy optymalizacji statycznej) jest poświęcona obszerna literatura /30, 87, 130, 131/. W porównaniu z poruszonymi tam zagadnieniami zastosowanie metod szukania automatycznego w układach adaptacyjnych wymaga pokonania co najmniej dwóch dodatkowych trudności, które wynikają z różnicy w rodzaju wskaźników jakości w obu tych typach układów.

W przypadku układów adaptacyjnych, których zadanie polega na optymalizacji stanów nieustalonych, wywołanych np. skokowymi zmianami wielkości zadanej, wskaźnik jakości jest funkcjonalem (1) rozpostartym na przedział czasu T . Wartość tego funkcjonału zależy od stanu układu w chwili początkowej t_0 .

Aby mieć pogląd na jakość stanu nieustalonego, czas T musi być wielokrotnością największych stałych czasowych układu. Wobec tego bezpośredni pomiar wskaźnika jakości, np. w celu wyznaczenia jego gradientu lub przyrostów, wymaga stosunkowo długiego czasu. Przy wielu parametrach urządzenia sterującego przedłuża to w sposób bardzo istotny czas szukania optymalnych warunków pracy. Tak więc pierwsza ze wspomnianych trudności polega na znacznie dłuższym niż w przypadku układów ekstremalnych czasie szukania optimum przy bezpośrednim pomiarze wskaźnika jakości. Powoduje to konieczność opracowania metod oceny jakości przebiegów w stanach nieustalonych drogą pośrednią, nie zaś przez pomiar funkcjonału (1).

Oprócz tego, porównywanie wartości wskaźnika jakości przy róż-

nych parametrach urządzenia sterującego ma sens jedynie wtedy, kiedy pomiary są wykonywane przy takich samych warunkach początkowych. Jednakże wymaganie stwarzania w układzie zadanych warunków początkowych w określonych chwilach może być trudne lub wręcz niemożliwe do wykonania.

Istnieją dwa sposoby ominięcia wspomnianych trudności.

Jeden sposób polega na stworzeniu modelu obiektu przestrajanego automatycznie na podstawie pomiarów identyfikacyjnych dokonywanych na obiekcie rzeczywistym. Mając model "podstrojony pod obiekt" można na nim stosować całą procedurę optymalizacyjną w odpowiednio dobranej skróconej skali czasowej. Metoda ta jest powszechnie stosowana przy optymalizacji statycznej w obiektach sterowanych maszynami cyfrowymi /4, 11, 22, 33, 52, 100/. Przedstawiona w części 2 niniejszej pracy metoda służy właśnie do identyfikacji współczynników równań różniczkowych stanowiących model matematyczny dynamicznego obiektu sterowania.

Drugi sposób polega na tworzeniu układów o algorytmach kombinowanych - łączących metody analityczne z procesami szukania automatycznego. W układach tego typu /83/, zamiast wyznaczać wskaźnik jakości na podstawie bezpośredniego pomiaru funkcjonau (1), wykorzystuje się do wyznaczania go pewne zależności analityczne. Przedstawiony w części 3 pracy algorytm adaptacji reprezentuje ten sposób rozwiązania zagadnienia.

Tematem odrębnym jest problem organizacji szukania w złożonych wielowymiarowych układach adaptacyjnych.

Wobec tego, że w układach tego typu bardzo istotnym czynnikiem jest czas dojścia do ekstremum, na szczególną uwagę zasługują metody zapewniające zwiększoną zbieżność procesu szukania automatycznego. Ostatnio opracowano wiele metod /5, 7, 34, 35, 36, 97, 98, 104, 130/, które za cenę pewnej komplikacji algorytmu szukania umożliwiają uzyskanie znacznie zszybszej zbieżności niż metody klasyczne, takie jak np. metoda Gaussa-Seidla, metoda gradientu lub największego spadku. Realizacja algorytmów adaptacji w układach nieco bardziej złożonych i tak wymaga zastosowania maszyn cyfrowych, które jednocześnie można wykorzystać do realizacji nawet stosunkowo złożonych algorytmów szukania, bez specjalnych dodatkowych nakładów.

IBS PAN

47471