

KOMPUTEROWO WSPOMAGANE PROJEKTOWANIE WIELOWYMIAROWYCH UKŁADÓW STEROWANIA AUTOMATYCZNEGO

dr hab. inż. Stanisław Bańka, prof. nzw.
Politechnika Szczecińska, Wydział Elektryczny
Instytut Automatyki Przemysłowej
ul. Gen. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin
tel./fax: (091) 34-09-32, e-mail: banka@we.tuniv.szczecin.pl

1. Wprowadzenie i opis wyników badań

Prezentowana praca obejmuje najważniejszą część wyników badań uzyskanych w latach 1993-1994 podczas realizacji zespołowego projektu badawczego KBN Nr 8 S505 022 05. Głównymi celami badań realizowanych w ramach projektu było: zbadanie właściwości i wrażliwości wielozadaniowych układów sterowania nadążnego i regulacji stałowartościowej dla wielowymiarowych (minimalnofazowych) obiektów o jednakowej liczbie wejść i wyjść oraz opracowanie nowych algorytmów umożliwiających syntezę wielozadaniowych układów z obiektami nieminimalnofazowymi przy niejednakowej liczbie wejść i wyjść. Celem użytkowym było dokonanie pełnej implementacji dwóch wersji pakietów programów komputerowych w języku polskim (ASWUD) i angielskim (ASMCS) do analizy, syntezy i symulacji wielowymiarowych układów sterowania na komputerach klasy IBM PC z uzupełnieniem starszych wersji pakietu ASWUD o funkcje dotyczące układów z czasem dyskretnym.

Badania częściowo dotyczyły także klasycznych układów sterowania optymalnego (LQ, LQG) z kwadratowymi wskaźnikami jakości przy nieskończonym horyzoncie czasu oraz układów sterowania modalnego o zadawanych *a priori* lokalizacjach biegunów układu zamkniętego w stabilnych regionach płaszczyzny zespolonej: $\operatorname{Re} s < 0$ dla układów ciągłych i wewnątrz koła jednostkowego $|z| < 1$ dla układów z czasem dyskretnym. Ta część badań dotyczyła przede wszystkim szczególnych przypadków rozwiązań dla obiektów nie będących układami ściśle przyczynowymi t.j. zawierającymi macierze tranzycyjne $D \neq 0$ w równaniach wyjść ich opisów w przestrzeni stanów [8], [14]. Przykłady takich specjalnych rozwiązań, uzyskanych dla układów z czasem ciągłym opublikowano w pracy [8].

Główną część badań poświęcono jednak wielozadaniowym układom sterowania nadążnego i regulacji stałowartościowej. Są one kombinacją układów sterowania modalnego z dynamicznym odsprzęganiem pomiędzy poszczególnymi parami sygnałów wyjściowych obiektu i odpowiadających im sygnałom odniesienia [1-6], [16]. Projektowane układy wielozadaniowe

gwarantują uzyskanie zerowych uchybów regulacji (nadażania) w stanach ustalonych dla zadanych klas sygnałów odniesienia i (nie zanikających) zakłóceń, przy ustalonej *a priori* dynamice układu zamkniętego poprzez odpowiednie lokowanie jego biegunów w stabilnych obszarach płaszczyzny $s \in C$ i $z \in C$. Uzyskuje się to dzięki jednoczesnemu wykorzystaniu: zasady "modelu wewnętrznego" [9, 10, 16], zastosowaniu sprzężenia zwrotnego wprost od wektora stanu obiektu lub jego estymat wraz z dodatkowym kaskadowym członem dynamicznym "input dynamics" podłączonego do wejść obiektu [1, 11, 16, 17].

W toku realizacji projektu badawczego dokonano badań właściwości i wrażliwości układów wielozadaniowych na zmiany parametrów obiektu i niedokładną realizację zaprojektowanych układów sterowania, a w szczególności wrażliwości na nie przewidywane podczas projektowania pasożytnicze opóźnienia występujące w torach sterowania. Wyniki tych badań są obiecujące i wskazują na to, że mimo dużej złożoności są to układy o umiarkowanej niezbyt dużej wrażliwości. Część uzyskanych wyników badań przedstawiono w pracy [2]. Wykazano także niezbicie, że przy zastosowaniu algorytmu zaproponowanego po raz pierwszy przez Wolovicha w pracy [16] dla obiektów o jednakowej liczbie wejść ($m = l$), w projektowanym układzie pojawiają się uproszczenia nieobserwowalnych i/lub niesterowalnych części układu. W przypadku występowania nieminimalnofazowych "skrośnych" zer transmisyjnych obiektu [15] prowadzą one do niestabilności całego układu sterowania. Dlatego dla poszerzenia klasy obiektów o układy nieminimalnofazowe, dla których ten rodzaj układów wielozadaniowych byłby możliwy do realizacji praktycznej, dokonano dodatkowych badań algorytmu przedstawionego po raz pierwszy w pracy [1] dla obiektów o niejednakowej liczbie wejść i wyjść ($m > l$). Wyniki tych badań dla obiektów z czasem ciągłym przedstawione zostały w pracy [4], natomiast dla układów z czasem dyskretnym w referacie [5]. Pełna wersja referatu z opisem wszystkich możliwych do realizacji struktur układów wielozadaniowych z czasem dyskretnym wraz z algorytmem do ich projektowania ukaże się w pracy [6].

Wyniki w/w badań nie będą tutaj przedstawiane ponieważ w większości zostały one opublikowane w cytowanych pracach. Istotne w nich jest przede wszystkim to, że w przypadku obiektów o większej liczbie wejść niż wyjść ($m > l$) istnieje możliwość wyeliminowania niestabilnych uproszczeń części nieobserwowalnych układu kosztem wprowadzenia dodatkowych części niesterowalnych o swobodnie lokalizowanych (stabilnych) biegunach. Co więcej algorytm ten da się również zastosować dla obiektów o jednakowej liczbie wejść i wyjść ($m = l$). Teoretycznie nie stwierdzono bowiem żadnych ograniczeń, które uniemożliwiły by zastosowanie tego algorytmu dla obiektów o $m = l$. Zaproponowany nowy algorytm projektowania jest jednak bardziej złożony i zawiera operacje na macierzach wielomianowych uznawane powszechnie za wrażliwe numerycznie. Dotyczy to m.in. tych miejsc algorytmu w których wyznaczane są postacie Smitha odpowiednich macierzy wielomianowych. Pełna implementacja komputerowa algorytmu wymaga zatem podwyższonej (poczwórnej) precyzji obliczeń w chwili obecnej dostępnej na unixowych stacjach roboczych i/lub zastosowania specjalnych metod obliczeniowych do przekształceń i rozwiązywania

macierzowych równań wielomianowych. Będzie to zrealizowane w kolejnej wersji pakietu ASWUD/ASMCS na stacji komputerowej SUN5 pracującej pod systemem operacyjnym Solaris 2.x.

Niezależnie od powyższych ograniczeń wykazano, że w przypadku układów z czasem dyskretnym wszystkie bieguny układów wielozadaniowych (zarówno dla $m = l$ jak i dla $m > l$) mogą być lokalizowane dokładnie w środku koła jednostkowego. Daje to możliwość projektowania układów wielozadaniowych o właściwościach typu *deadbeat*, przy czym dotyczy to wszystkich rodzajów biegunów które można swobodnie lokalizować, t.j. sterowalnych i obserwowalnych biegunów układu zamkniętego, niesterowalnych biegunów wnoszonych przez *deadbeatowe* obserwatory Luenbergera (pełnego i zredukowanego rzędu) oraz wspomniane wyżej dodatkowe części niesterowalne układu dla $m > l$. Praktyczne wykorzystanie wielozadaniowych układów *deadbeatowych* zwykle nie będzie możliwe ze względu na bardzo duże amplitudy sygnałów sterujących, tym niemniej otrzymano kilka przykładów dla których realizacja tego typu układów *deadbeatowych* wydaje się możliwa do praktycznej realizacji [3].

2. Opis obiektów sterowania.

Obiektami sterowania wielozadaniowego (jak również klasycznych układów sterowania optymalnego LQ/LQG i modalnego) są wielowymiarowe, w pełni sterowalne i obserwowalne, liniowe układy dynamiczne opisane równaniami stanu i wyjść: odpowiednio różniczkowymi

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Er(t) + Gw(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + v(t)\end{aligned}\tag{1a}$$

i różnicowymi

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + Er(k) + Gw(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) + v(k)\end{aligned}\tag{1b}$$

w których: $x(\cdot) \in R^n$, $y(\cdot) \in R^l$ i $u(\cdot) \in R^m$ są odpowiednio wektorami stanu, wyjść i wejść obiektu.

W przypadkach stochastycznych sygnały $w(\cdot) \in R^p$ i $v(\cdot) \in R^l$ są "białymi" szumami gaussowskimi (odpowiednio, dyskretnymi "białymi" szumami) o zerowych wartościach średnich i intensywnościach zdefiniowanych nieujemnie określoną macierzą kowariancji

$$\begin{bmatrix} W & S \\ S^T & V \end{bmatrix} \geq 0 \text{ przy } V > 0.\tag{2}$$

W powyższej macierzy blokowej W i V są macierzami kowariancji własnych $w(\cdot)$ i $v(\cdot)$, a S macierzą ich kowariancji wzajemnych.

W przypadku projektowania układów wielozadaniowych $r(\cdot) \in R^p$ jest wektorem dodatkowych zakłóceń deterministycznych o ustalonym przez projektanta charakterze zmian. Dla $E = G$

wektor ten może być interpretowany jako niezerowe wartości średnie zakłóceń stochastycznych $w(\cdot)$. Przy projektowaniu klasycznych układów sterowania optymalnego i modalnego macierz $E \equiv 0$.

O efektywności zastosowanych rozwiązań decyduje przede wszystkim macierzowo-wielomianowy sposób przedstawienia opisu wielowymiarowych układów dynamicznych. Są nimi lewostronnie (l.w.p.) i prawostronnie (p.w.p.) względnie pierwsze postacie frakcyjne macierzy transmitancji obiektu i projektowanych części układów, odpowiednio względem operatorów $s \in C$ i $z \in C$.

W przypadku obiektów opisanych równaniami (1a) i (1b) są nimi odpowiednio:

- p.w.p. i l.w.p. postaci frakcyjne (właściwych) macierzy wymiernych transmitancji obiektu w torze sterowań $u(\cdot)$

$$\begin{aligned} C(sI_n - A)^{-1}B + D &= B_1(s)A_1^{-1}(s) = \\ &= A_2^{-1}(s)B_2(s) \end{aligned} \quad (3a)$$

lub

$$\begin{aligned} C(zI_n - A)^{-1}B + D &= B_1(z)A_1^{-1}(z) = \\ &= A_2^{-1}(z)B_2(z) \end{aligned} \quad (3b)$$

gdzie: $B_1(\cdot) \in R[\cdot]^{l \times m}$ i $A_1(\cdot) \in R[\cdot]^{m \times m}$ są p.w.p. macierzami wielomianowymi z macierzą "mianownikową" $A_1(\cdot)$ kolumnowo-zredukowaną, natomiast $A_2(\cdot) \in R[\cdot]^{l \times l}$ i $B_2(\cdot) \in R[\cdot]^{l \times m}$ są l.w.p. z macierzą "mianownikową" $A_2(\cdot)$ wierszowo-zredukowaną,

- oraz l.w.p. postać frakcyjna (ściśle właściwej) macierzy wymiernych transmitancji w torze zakłóceń losowych $w(\cdot)$

$$C(sI_n - A)^{-1}G = A_2^{-1}(s)\bar{B}_2(s) \quad (4a)$$

lub

$$C(zI_n - A)^{-1}G = A_2^{-1}(z)\bar{B}_2(z) \quad (4b)$$

- a także w przypadku projektowania układów wielozadaniowych, l.w.p. postać frakcyjna (ściśle właściwej) macierzy wymiernych transmitancji obiektu w torze zakłóceń deterministycznych $r(\cdot)$

$$C(sI_n - A)^{-1}Er(s) = A_3^{-1}(s)B_3(s) \quad (5a)$$

lub

$$C(zI_n - A)^{-1}Er(z) = A_3^{-1}(z)B_3(z), \quad (5b)$$

gdzie $r(\cdot)$ jest wektorem transformat włączonych do powyższych transmitancji (odpowiednio $s \in C$ lub $z \in C$), dla zakłóceń typu: skok jednostkowy, skok prędkości, eksponenta i nie gasnący sygnał sinusoidalny.

Przy wykonywaniu powyższych faktoryzacji macierzy transmitancji korzysta się z analitycznych zależności określonych twierdzeniem strukturalnym Wołowicha [17], poprzez doprowadzenie oryginalnych postaci równań stanu (1a) i (1b) do II postaci kanonicznych odpowiednio, sterowalnych i obserwowalnych. Podczas obliczeń wyznaczane są stosowne macierze przekształceń podobieństwa $\hat{T}(\tilde{T})$ i określane są kolumnowe (odpowiednio, wierszowe) struk-

tury macierzy mianownikowych $A_1(\cdot)$ oraz $A_2(\cdot)$ i $A_3(\cdot)$. Opisują je: kolumnowe (wierszowe) stopnie równe wskaźnikom sterowalności (obserwowalności) obiektu, specjalne macierze wielomianowe $\hat{S}(\cdot)$ i $\tilde{S}(\cdot)$ oraz nieosobliwe macierze $\Gamma_c(A_1(\cdot))$ i $\Gamma_r(A_2(\cdot))$ współczynników stojących przy najwyższych potęgach, odpowiednio kolumnowych i wierszowych. Uzyskane w ten sposób informacje w istotny sposób ułatwiają proces obliczeniowy, pozwalając m.in. uniknąć konieczności rozwiązywania niektórych macierzowych równań wielomianowych [7].

3. Opis ważniejszych funkcji pakietu ASWUD/ASMCS

Pakiety programów ASWUD w wersji polsko-języcznej i ASMCS w wersji angielsko-języcznej przeznaczone są do analizy, syntezy (projektowania) i symulacji wielowymiarowych układów automatycznego sterowania. W szczególności umożliwiają one realizacje następujących zadań:

- (1) analizę wielowymiarowych liniowych układów dynamicznych, t.j. wyznaczania frakcyjnych postaci macierzy transmitancji (3a) i (3b) oraz wyznaczania ich zer i biegunów
- (2) syntezę układów sterowania optymalnego (LQ , LQG), minimalizujących kwadratowe wskaźniki jakości sterowania w nieskończonym horyzoncie czasu ciągłego i dyskretnego, z dostępnym i niedostępnym pomiarowo wektorem stanu obiektu
- (3) syntezę układów sterowania modalnego (*Pole Placement*) z dostępnym i niedostępnym wektorem stanu obiektu w warunkach losowych i deterministycznych,
- (4) oraz projektowanie (syntezę) układów wielozadaniowych (*Multipurpose control*) - tylko dla obiektów o $m = l$,

dla wielowymiarowych, liniowych obiektów dynamicznych, n -tego rzędu, o m wejściach i l wyjściach opisanych równaniami stanu (1a) i (1b).

Maksymalne rozmiary zadań realizowanych przez pakiet ASWUD/ASMCS na komputerach klasy IBM PC pod systemem operacyjnym DOS ograniczone są wymiarami i rzędem obiektu, które wynoszą odpowiednio: $m_{\max} = 6$, $l_{\max} = 6$ i $n_{\max} = 9$.

W pakiecie zastosowano hierarchiczny system menu wykorzystywany do: wyboru odpowiednich opcji i parametrów do obliczeń; wprowadzania, zapisu i czytania danych; wykonania obliczeń; interaktywnego przeprowadzenia eksperymentów symulacyjnych oraz do edycji numerycznych i graficznych wyników obliczeń i symulacji. Edycję graficznych wyników symulacji umożliwiają dwa specjalne moduły zawarte w pakiecie, umożliwiające prezentację wykresów (w funkcji czasu lub portretów fazowych) do 10 przebiegów na jednym rysunku.

Edytorem numerycznych wyników obliczeń może być dowolny prosty edytor tekstowy np. *Norton Editor*, *Brief* lub standardowy *viewer* o nazwie *README.COM*, które powinny być umieszczone w katalogu głównym pakietu. Zwykle są to katalogi o nazwie ASWUD lub ASMCS. Pakiet może dodatkowo eksportować pliki z wynikami obliczeń do wskazanego katalogu z pakietem programów PC-MATLAB firmy The Mathworks, Inc.

Po zainstalowaniu i uruchomieniu programu (odpowiednio poleceniem ASWUD.BAT lub ASMCS.BAT) pojawia się menu główne jak na rys.1, w którym poprzez wybór odpowiedniego numeru (1÷4) uruchomiony zostaje odpowiedni program sterujący procesem obliczeń i symulacji

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF MULTIVARIABLE CONTROL SYSTEMS IN POLYNOMIAL APPROACH v. 3.0 - 1994.12.31	
(C) Technical University of Szczecin, (R) Institute of Control Engineering	
1	- Analysis of linear systems
2	- Optimal control system design (LQ), (LQG)
3	- Modal control system design (PP)
4	- Multipurpose control system design (MP)
5	- Exit to MATLAB
6	- Continuation of simulations
7	- Edition of simulation results
8	- Information about programs
9	- Text editor
0	- Exit to DOS

SELECT THE NUMBER _

Rys. 1. Menu główne pakietu ASMCS

jednego z wymienionych wyżej zadań analizy lub syntezy. Natomiast przykład menu głównego po wywołaniu programu sterującego projektowaniem układu wielozadaniowego (4) pokazany jest na rys. 2.

MULTIVARIABLE CONTROL SYSTEM DESIGN v. 3.0 - 1994.12.31	
Multipurpose Control System (MP)	
	Installation
	Environment
	Data
	Options for calculations
	Parameters of simulation
	Calculations
	Simulations
	Results
(C) Technical University of Szczecin	
(R) Institute of Control Engineering	

F1 = help

ESC = escape

ENTER = start

PgDn, PgUp - review of poles

Rys. 2. Menu główne programu sterującego projektowaniem układu wielozadaniowego (MP)

Każdy z wywołanych programów sterujących umożliwia przygotowanie, zapis i odczytanie danych do obliczeń w postaci plików z automatycznie nadawanymi rozszerzeniami nazw, stosownymi do aktualnie wykonywanego zadania (analizy lub syntezy) oraz wybór i ustawianie odpowiednich opcji do obliczeń. Wyszukiwanie opcji odbywa się z klawiatury za pomocą strzałek (kursorów) lub poprzez wybór podświetlanych liter. Wybór odpowiedniej opcji (najczęściej dwustanowej) realizowany jest poprzez naciśnięcie klawisza ENTER (lub podświetlanej litery) - co zwykle powoduje zmianę wybranego tekstu (lub ustawienie znacznika). Aktualnie wyświetlany tekst jest wybraną opcją. Część wybieranych opcji, powiązanych ze sobą logicznie, zmienia się samoczynnie.

W przypadku wyboru opcji wymagającej wprowadzenia danych liczbowych, należy wprowadzić nową wartość liczbową lub zaakceptować wartość "podpowiadaną" klawiszem ENTER. Każdy element macierzy danych może być edytowany oddzielnie a ich wyboru dokonuje się za pomocą strzałek (kursorów). Wyjście z bieżącego poziomu menu do poprzednich zapewnia klawisz ESCAPE. Dodatkowe informacje o wybieranych opcjach lub nazwach zbiorów danych możliwych do edycji umożliwia klawisz funkcyjny F1.

Uruchomienie obliczeń odbywa się przez naciśnięcie klawisza ENTER po wyborze odpowiedniej opcji w menu Obliczenia (*Calculations*). W przypadku analizy, obliczenia składają się z jednego przebiegu, natomiast w przypadku zadań syntezy, są to dwa - a przy projektowaniu układów wielozadaniowych - trzy, kolejno po sobie następujące kroki obliczeń.

Po bezbłędnym zakończeniu obliczeń analizy możliwe są symulacje analizowanego układu dynamicznego (o ile jest on stabilny), natomiast w przypadku zadań syntezy układów (LQ/LQG) i (PP) możliwe są symulacje nie tylko zamkniętego układu sterowania (z dostępnym i niedostępnym wektorem stanu obiektu) ale także oddzielne symulacje poszczególnych części układu t.j. samego obiektu i samego regulatora (jeśli są one stabilne) oraz filtru lub zaprojektowanego obserwatora. W przypadku syntezy układów sterowania wielozadaniowego (MP) po zakończeniu drugiego kroku obliczeń możliwe są symulacje testowych (teoretycznych) odpowiedzi skokowych projektowanego (odsprzęgniętego) układu wielozadaniowego dla przyjętych wartości biegunów układu zamkniętego. Symulacji wielozadaniowego układu zamkniętego w pełnej strukturze z obiektem, regulatorem, filtrem Kalmana lub obserwatorem i kaskadowym członem odsprzęgającym, w różnych możliwych wariantach, można dokonywać po zakończeniu wszystkich wymaganych obliczeń, t.j. po kroku trzecim. Symulacji w tym przypadku dokonuje się dla wybranych pięciu klas sygnałów odniesienia $y_0(\cdot)$ i zakłóceń deterministycznych $r(\cdot)$ przy dowolnych warunkach początkowych każdego z elementów dynamicznych układu. Ustawienie warunków początkowych oraz innych parametrów takich jak: początkowy i końcowy czas symulacji, krok dyskretyzacji, numer procedury numerycznego całkowania i.t.p. umożliwia opcja Parametry symulacji (*Parameters of simulation*). Przy wyborze opcji do obliczeń Przypadek stochastyczny (*Stochastic case*) podczas symulacji generowane są pseudolosowe przebiegi szumów o intensywnościach odpowiadających przyjętym wartościom elementów macierzy kowariancji zakłóceń $w(\cdot)$ i $v(\cdot)$.

Symulacje mają interaktywny charakter. Można je w dowolnym momencie przerwać a następnie kontynuować (bez konieczności powtarzania otrzymanych już wcześniej części przebiegów) z ustawionym przez użytkownika (zwiększonym) czasem końcowym. Można tego dokonać na dwa sposoby, poprzez wybór opcji Kontynuacja symulacji (*Continuation of simulation*) w opcji Symulacje (*Simulations*), lub na zakończenie po wyborze odpowiedniego numeru w menu głównym (rys. 1). Użytkownik ma do wyboru siedem procedur numerycznego całkowania do symulacji układów z czasem ciągłym:

- 1 - procedura 5 rzędu predykcyjno-korekcyjna,
- 2 - procedura 4 rzędu Runge-Kutty z automatyczną kontrolą przedziałów całkowania,
- 3 - procedura 4 rzędu Runge-Kutty ze stałym i zmiennym krokiem,
- 4 - procedura 2 rzędu Runge-Kutty,
- 5 - metoda trapezów, wykorzystująca jako startową metodę predykcyjno-korekcyjną,
- 6 - procedura ekstrapolacyjna Bulirsch-Stoera,
- 7 - procedura kolokacji dla układów typu "stiff"

oraz

- 8 - procedurę do symulacji układów z czasem dyskretnym

Podczas symulacji naciskając odpowiedni klawisz można dokonać następujących zmian:

- Q - zatrzymać proces symulacji,
- S - skopiować ekran w trybie graficznym,
- C - zmienić wartości wprowadzonych skoków (które standardowo mają wartości równe 1),
- P - wyświetlić aktualne wartości parametrów $PAR()$,
- D - zmienić numery wyświetlanych na bieżąco sygnałów, którymi mogą być:
współrzędne stanu $X[1] \dots X[N]$, oraz wyjścia symulowanego układu,
ponumerowane odpowiednio jako zmienne $X[N+1] \dots X[N+L]$,
- V - włączyć/wyłączyć wskaźniki wartości zmiennych wyświetlanych,
- E - zakończyć obliczenia,
- A - przerwać obliczenia.

Wciśnięcie innych klawiszy (za wyjątkiem R Z i W - które również mają swoje funkcje), spowoduje wyświetlenie aktualnej wartości czasu symulacji i "MENU" powyższych zmian.

W trakcie symulacji wykresy ulegają samoczynnemu przeskalowywaniu (o ile zostaną przekroczone, przyjęte początkowo zakresy), przy czym na ekranie można wyświetlić maksymalnie do trzech przebiegów sygnałów jednocześnie. Głównym wynikiem symulacji są pliki binarne tworzone podczas symulacji na dysku z wartościami czasu i sygnałów, które można zestawiać na wspólnych rysunkach w postaci funkcji czasu (do 10 przebiegów) lub w postaci portretów fazowych. Umożliwia to opcja Wykresy (*Diagrams*) w opcji Wyniki (*Results*).

Zgodnie z rys. 1 przedstawiającym menu główne pakietu po zakończeniu obliczeń możliwe są:

- wywołanie programów PC-MATLAB,
- kontynuacja symulacji (ze zwiększonym czasem końcowym),

- edycja wyników symulacji na wspólnym wykresie,
- informacja o pakiecie ASWUD (ASMCS), oraz
- wywołanie zainstalowanego w katalogu Roboczym (*Working directory*) edytora tekstowego np. w celu konkatenacji plików tekstowych zawierających wyniki obliczeń numerycznych.

Po wywołaniu programów MATLAB należy skorzystać z utworzonych plików, odpowiednio o nazwach:

- AWUD.MAT - w przypadku analizy układów dynamicznych,
- LQ.MAT - w przypadku syntezy układów sterowania optymalnego,
- PP.MAT - w przypadku syntezy układów sterowania modalnego,
- MP.MAT - w przypadku projektowania układów wielozadaniowych.

Powyższe pliki tworzone są tylko przy wyborze opcji Współpraca z MATLAB-em (*MATLAB cooperation*) w ustawionej przez użytkownika ścieżce w opcji Instalacja (*Installation*). Struktura i nazwy danych zapisanych w plikach: AWUD.MAT, LQ.MAT, PP.MAT i MP.MAT są opisane w instrukcji użytkownika [18]. Wywołanie programów MATLAB (i powrót) odbywa się pod kontrolą zestawu poleceń DOS zapisanych w pliku wsadowym ASWUD.BAT (ASMCS.BAT), które użytkownik powinien odpowiednio zmodyfikować podczas instalowania pakietu ASWUD (ASMCS).

4. Uwagi i wnioski końcowe

W ramach realizacji projektu badawczego KBN Nr 8 S505 022:

- ♦ zbadano wrażliwość i właściwości wielozadaniowych układów sterowania dla obiektów o jednakowej liczbie wejść i wyjść $m = l$ i wykazano, że istnieje możliwość syntezy *dead-beatowych* układów wielozadaniowych dla obiektów z czasem dyskretnym,
- ♦ wykazano ostatecznie, że projektowanie układów wielozadaniowych według dotychczasowego algorytmu syntezy przy $m = l$ ma sens praktyczny tylko dla obiektów minimalnofazowych,
- ♦ opracowano nowy algorytm i udowodniono teoretycznie, że nowy algorytm syntezy układów wielozadaniowych przy $m > l$ można stosować dla obiektów nieminimalnofazowych (także dla $m = l$),
- ♦ komputerowa implementacja nowego algorytmu syntezy dla $m > l$ wymaga zastosowania większych precyzji obliczeń i nowych numerycznych metod faktoryzacji i rozwiązywania macierzowych równań wielomianowych. Za szczególnie obiecującą uważa się metodę wielomianowej interpolacji Antsaklisa.
- ♦ opracowano nowe wersje pakietów ASWUD i ASMCS posiadające komplet funkcji umożliwiających syntezę i symulację wielowymiarowych układów z czasem dyskretnym i ciągłym oraz dające możliwość symulacji wielowymiarowych układów dynamicznych zawierających algebraiczne pętle zwrotne. Ta ostatnia cecha jest dość istotna ponieważ istniejące dotychczas pakiety nie dają takich możliwości. Przykładowo, w ostatniej wersji pakietu PC-MATLAB nie ma jeszcze możliwości symulacji układów z pętlami algebraicznymi.

Literatura

- [1] S. Bańka: *Komputerowa synteza złożonych wielowymiarowych układów sterowania w ujęciu wielomianowym*. Prace Naukowe IAP PS, Nr 14/454, Szczecin, 1991.
- [2] S. Bańka, C. Moskwa: *Investigation of multipurpose control systems using the ASMCS package for analysis and synthesis of multivariable control systems*. Annales Scientiarum Stetinensium, Ossolineum, Szczecin-Wrocław, vol. IX, Fasc. 1, 1994, str. 7-29.
- [3] S. Bańka: *Multipurpose controller design in multivariable discrete-time control systems*. Proc. 13th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control, February 21-23, Grindelwald, 1994, str. 105-107.
- [4] S. Bańka: *Multipurpose control system synthesis for non-square multivariable proper plants*. Systems Science, vol. 20, Nr 1, 1994, str. 85-103.
- [5] S. Bańka: *On multipurpose control system synthesis for non-square discrete-time multivariable plants*. Proc. 1st International Symposium on Mathematical Models in Automation and Robotics, September 1-3, Międzyzdroje, 1994, str. 148-153.
- [6] S. Bańka: *On multipurpose control system synthesis for non-square discrete-time multivariable plants*. Applied Mathematics and Computer Science, Zielona Góra, 1995 (w druku)
- [7] S. Bańka, B. Witkowska, C. Moskwa: *Pakiet ASWUD - możliwości i zastosowania w syntezie wielowymiarowych układów sterowania*. Prace XII KKA, wrzesień 6-9, Gdynia, 1994, str. 185-192.
- [8] S. Bańka: *A simple method for solving the LQG stochastic control problem using polynomial approach*. Circuits, Systems and Signal Processing (USA), Vol. 14, No. 1, 1995, pp. 57 - 67.
- [9] G. Bengtsson: *Output regulation and internal models - a frequency domain approach*. Automatica (IFAC), 13, 4, 1977, 333-345.
- [10] F. M. Callier, C. A. Desoer: *Multivariable feedback systems*. Springer Verlag, New York, 1982.
- [11] H. Hikita: *Block decoupling and arbitrary pole assignment for a linear right-invertible system by dynamic compensation*, Int. Journal Contr., vol. 45, No. 5, 1987, pp. 1641-1653.
- [12] T. Kaczorek: *Teoria sterowania i systemów*. PWN, Warszawa, 1993.
- [13] V. Kučera: *Analysis and design of discrete linear control systems*. Prentice Hall, New York, 1991.
- [14] J. L. Speyer: *The linear-quadratic control problem*. Control and dynamic systems, vol. 23, 1986, str. 241-293.
- [15] T. C. Williams and P. J. Antsaklis: *An unifying approach to the decoupling of linear multivariable systems*. Int. Journal Contr., vol. 44, 1986, pp. 181-201.
- [16] W. A. Wolovich: *Multipurpose controllers for multivariable systems*. IEEE Trans. Autom. Contr., AC-26, 1, 1981, str. 162-170.
- [17] W. A. Wolovich: *Linear multivariable systems*. Springer Verlag, New York, 1974.
- [18] S. Bańka: *Pakiet ASWUD do analizy, syntezy i symulacji wielowymiarowych układów dynamicznych w ujęciu wielomianowym*. ASWUD v. 3.0 - 1994.12.31, Instrukcja użytkowania, Szczecin grudzień 1994.