

**XI OGÓLNOPOLSKA KONFERENCJA TEORII MASZYN  
I MECHANIZMÓW****11th POLISH CONFERENCE ON THE THEORY OF MACHINES  
AND MECHANISMS**

27—30. 04. 1987 ZAKOPANE

Z. BUŚKO, K. KĘDZIOR  
K. NAZARCZUK, A. OLĘDZKIInstytut Techniki Lotniczej  
i Mechaniki Stosowanej  
Politechnika Warszawska**WSPIERANE MIKROKOMPUTEREM NAUCZANIE PODSTAW  
STEROWANIA MASZYN**

**Streszczenie.** Rozwój i rozpowszechnienie tanich mikrokomputerów stworzyły nowe możliwości wykładowcom i studentom. Wykładowcy mogą stosować je w salach wykładowych do ilustracji tych partii materiału, które trudno jest przedstawić na tablicy przy użyciu kredy. Specjalne programy mogą być użyte do nauki i powtarzania przerobionego materiału, a ponadto – nawet do wystawiania ocen. Zastosowanie mikrokomputerów do rozwiązywania zadań domowych przynosi znaczną oszczędność czasu studentom.

W pracy przedstawiono pewne wyniki doświadczeń uzyskanych przez autorów w czasie ostatnich czterech lat w zakresie wspomaganie mikrokomputerem zajęć dydaktycznych. Po uzyskaniu pozytywnych wyników w dziedzinie TMM [4] opracowany został ostatnio preskrypt [1] dotyczący przedmiotu Dynamika i Automatyka Układów zawierający wykład podstaw sterowania maszyn. Zamieszczono tam kilka programów na SPECTRUM 48k. W referacie omówiono wybrane z nich. Dotyczą one zagadnień analizy harmonicznej sygnałów, opisu dynamicznego członów podstawowych, stabilności układów dynamicznych, syntezy i korekcji układów sterowania, operacji na macierzach oraz wspomaganie mikrokomputerem pracy własnej studenta.

**1. Wstęp**

Udoskonalanie procesu dydaktycznego poprzez wspomaganie go mikrokomputerem trwa już w Zakładzie TMM PW blisko cztery lata. Pierwszy etap dotyczył przedmiotu TMM. Jego wyniki zawarte są w podręczniku akademickim [1], uzupełnionym kasetą z 25 programami i instrukcją ich użytkowania. Większość tych programów była demonstrowana na sesji plakatowej poprzedniej konferencji TMM. W ich opracowaniu wzięli udział studenci Mechaniki Stosowanej Wydziału MEiL. Wszystkie programy realizowane są na SPEC-

TRUM 48k. Ten mikrokomputer był jeszcze do niedawna najłatwiej dostępny w kraju i wybrano go świadomie, aby ułatwić użytkowanie programów szerszemu kręgowi odbiorców.

Drugi etap, którego niektóre wyniki przedstawione są w niniejszym opracowaniu, dotyczył nowego przedmiotu o nazwie Dynamika i Automatyka Układów (DAU) realizowanego na Wydziale MEiL PW od 1983 r. Przedmiot ten zastąpił i uzupełnił nowymi treściami wykładane od wielu lat Podstawy Automatyki. Różnorodność specjalności, w jakich są kształceni studenci Wydziału MEiL i profil jego absolwenta stworzyły konieczność uwzględnienia w planie studiów przedmiotu bardziej dostosowanego do potrzeb Wydziału, niż przedmiot o dawnej nazwie. Układy automatycznej regulacji nie są więc w tym przedmiocie tematem głównym, ale potraktowano je jako szczególny przypadek układów dynamicznych.

Jesienią 1986 roku zespół autorski zakończył prace nad preskrytem [1], do którego wzorem [4] włączono pewien zestaw programów. Wiele z nich przeznaczonych jest do ilustracji wykładu w warunkach audytorium wyposażonego w zestaw monitorów. Taki sposób przekazywania informacji, trudnych do zilustrowania kredą na tablicy, ułatwia zadanie wykładowcy, a jednocześnie podnosi atrakcyjność wykładu dla studentów i zwiększa ich zainteresowanie wykładanym przedmiotem.

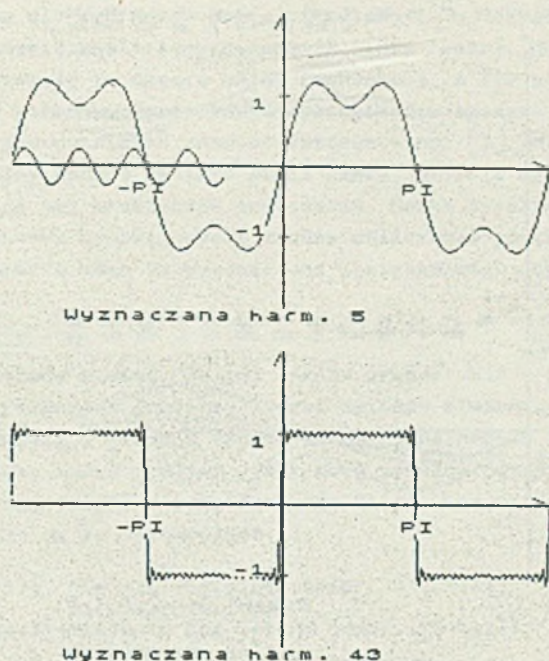
## 2. Składowe harmoniczne sygnałów

Sygnał okresowy w postaci ciągu impulsów prostokątnych o amplitudzie  $A$ , okresie  $T$  i szerokości sygnału  $T/2$  można w znany sposób przedstawić w postaci szeregu Fouriera:

$$x(t) = 0,5A(1 + \frac{4}{\pi}(\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \dots))$$

Każdy wykładowca, który próbował przedstawić na tablicy wyniki sumowania poszczególnych harmonicznych, wie, jak jest to uciążliwe. Na rys. 1a pokazano wynik sumowania 3 harmonicznych, a na rys. 1b - 43 harmonicznych uzyskany przy użyciu programu SKLADHARMC. Program ten pozwala na wizualizację procesu sumowania poszczególnych składowych na ekranie monitora, a w przypadku użycia drukarki daje możliwość przekazania studentom gotowych wykresów, jako załącznika do notatek. Poza sygnałami prostokątnymi można w ten sposób pokazać sumowanie harmonicznych ciągu impulsów piłokształtnych, trójkątnych oraz wyprostowanych sinusoid.





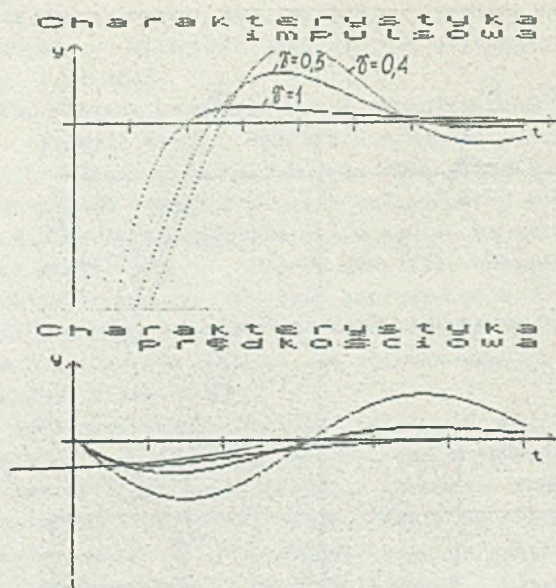
Rys. 1

### 3. Człony podstawowe

W warunkach tradycyjnego wykładu i zrozumiałych ograniczeń czasowych możliwe jest omówienie tylko elementarnych właściwości wybranych członów podstawowych. Wykładowca szkicuje na tablicy najważniejsze przebiegi, podając jedynie ich jakościowy charakter. Zwykle nie jest możliwe przedyskutowanie wpływu zmian poszczególnych parametrów na charakter tych wykresów. Zupełnie nową możliwość stwarza w tych warunkach użycie odpowiedniego programu komputerowego. Na rys. 2 przedstawiony jest przykład analizy wpływu wartości współczynnika tłumienia na przebieg charakterystyk impulsowej i prędkościowej rzeczywistego członu różniczkującego o transmitancji  $G(s) = kss / (T\tau s + 2\gamma a T s + 1)$ .

Uzyskano go przy użyciu programu CZŁONY PODSTAWOWE, działającego w sposób dialogowy i pozwalającego wykładowcy na zademonstrowanie w dowolnym momencie wykładu charakterystyk:

- statycznych,
- czasowych (impulsowych, skokowych, prędkościowych),
- częstotliwościowych (na płaszczyźnie zmiennej zespolonej lub logarytmicznych)



Rys. 2

Jednego z dziesięciu członów podstawowych układów dynamicznych, dla dowolnie wybranych parametrów (wzmocnienie, stałe czasowe), łatwo sprawdzić, że w żadnym drukowanym źródle nie występuje tak bogaty zbiór.

Program może być wykorzystany ponadto do wykonywania przez studentów różnych prac domowych.

#### 4. Badanie stabilności układów dynamicznych

Jednym z podstawowych kryteriów badania stabilności układów dynamicznych jest kryterium Nyquista. W pracy [1] podano program do badania stabilności układu zamkniętego na podstawie wykreślonej przez komputer charakterystyki amplitudowo-fazowej (na płaszczyźnie zmiennej zespolonej) układu otwartego. W punkcie tym omówiony będzie szerzej logarytmiczny wariant tego kryterium. Wariant ten jest bardziej skutecznym narzędziem i znajduje szersze zastosowanie w praktyce. Dla transmitancji widmowej  $G_o(j\omega)$  układu otwartego wykreśla się tu logarytmiczną charakterystykę amplitudową  $M(\omega)=20\log(\text{mod}.G(j\omega))$  oraz charakterystykę fazową  $\phi(\omega)=\text{arg}.G(j\omega)$  - obydwie w funkcji dekad pulsacji  $\omega$ . Przez wiele lat stosowane były do tego celu metody wykresłne. Charakterystyki połączonych szeregowo członów elementarnych aproksymowano odcinkami linii prostych, uzyskując dość dobre przybliżenie wypadkowej charakterystyki amplitudowej. Wypadkową charakterystykę fazową otrzymywano po oszacowaniu faz poszcze-



gólnych członów dla wybranych wartości pulsacji  $w$ , określeniu faz wypadkowych i połączeniu znalezionych punktów linią łamaną. Dość żmudnym obliczeniom towarzyszyły tu często błędy rachunkowe, a tym samym łatwo było o błędny wynik końcowy. Taki sposób postępowania spotyka się nadal nawet w najnowszych podręcznikach znanych autorów - np. [3]. Wyłożenie tej metody w tradycyjny sposób zabiera wiele czasu. Jeszcze więcej czasu potrzebują studenci na jej praktyczne opanowanie. Można tu uzyskać znacznie szybciej oczekiwane wyniki, jeżeli żmudne obliczenia powierzy się komputerowi, który ponadto może je wykonać bez jakichkolwiek uproszczeń.

### Podstawy teoretyczne

Dowolnie złożoną postać  $Go(jw)$  można przedstawić w postaci iloczynu transmitancji widmowych dowolnej liczby członów elementarnych o wzmacnieniu równym jedności i jednego członu proporcjonalnego o łącznym wzmacnieniu  $k$ . Wypadkowy moduł  $Mo(jw)$  jest sumą modułów poszczególnych członów, a faza -  $\arg Go(jw)$  - sumą faz  $\arg Gi(jw)$  wszystkich członów.

Podstawowe wzory są tu następujące:

$$\begin{aligned}
 G(jw) &= (Tjw+1); & M(w) &= 20 \log(\text{pierw.kwadr.}(TTww+1)) \\
 & & f_1(w) &= \arctg(Tw); \\
 G(jw) &= 1/(Tjw+1); & M(w) &= -20 \log(\text{pierw.kwadr.}(TTww+1)) \\
 & & f_1(w) &= \arctg(-Tw); \\
 G(jw) &= 1/jw; & M(w) &= -20 \log w \\
 & & f_1(w) &= -\pi/2; \\
 G(jw) &= jw; & M(w) &= 20 \log w \\
 & & f_1(w) &= \pi/2; \\
 G(jw) &= 1/(-TTww+2gaTjw+1); & M(w) &= -20 \log(\text{pierw.kwadr.}((1+Tw(Tw(1+4ga^2)-2))) \\
 & & f_1(w) &= \arctg(2gaTw/(1-TTww)); \\
 G(jw) &= \exp(-jwT); & M(w) &= 0 \\
 & & f_1(w) &= -Tw; \\
 G(jw) &= k; & M(w) &= 20 \log k; \quad f_1(w) = 0.
 \end{aligned}$$

Wzory te wykorzystano w programie LOG4 przyjmując, że transmitancja układu otwartego ma ogólną postać:

$$Go(s) = L(s)/M(s)$$

dla

$$L(s) = k \exp(-T_1s)(T_6s+1)(T_7s+1)$$

oraz

$$M(s) = (T_2s+1)(T_3s+1)(T_4s+1)(T_5T_5s+2gaT_5s+1)s \dots \quad (b \text{ razy})$$

gdzie:  $k$ ,  $ga$  (bezwymiarowe tłumienie) oraz  $T_1-T_7$  oznaczają liczby rzeczywiste, a  $b$  jest liczbą całkowitą. Taka postać wzoru na  $Go(s)$  obejmuje większość przypadków praktycznych. Program LOG4 można również w łatwy sposób rozszerzyć na jeszcze bardziej skomplikowane układy.

Zadania, które rozwiązuje ten program są następujące:

1. Badanie stabilności układu na podstawie kryterium Nyquista.
2. Wykreślenie logarytmicznej charakterystyki układu zamkniętego  $Mz(w)$ .

3. Wykreślanie zależności  $Q(\omega)$  pozwalającej na określenie jakości regulacji.

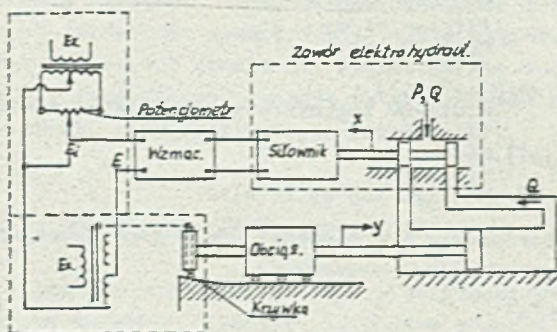
4. Wyznaczanie 3dB pasma przeniesienia, pasma tłumienia zakłóceń (w którym  $Q$  jest mniejsze od 0) oraz pulsacji rezonansowej  $\omega r$  i szczytu rezonansowego  $\delta \Delta M_r$ .

Zadania 3 i 4 dotyczą syntezy i korekcji układów sterowania i będą omówione w p. 5.

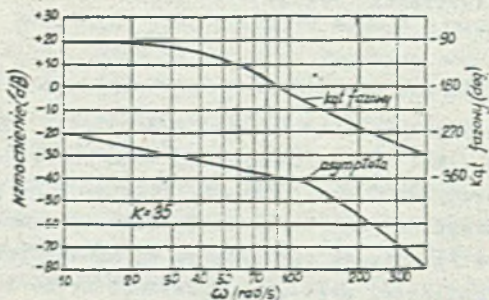
#### Przykład

Na rys. 3 pokazano schemat elektrohydraulicznego układu nadążnego stosowanego do frezowania powierzchni krzywoliniowych, a na rys. 4 - wyniki analizy stabilności uzyskany metodą wykreślną. Autorzy [2] otrzymali ten wykres dla układu otwartego o  $L(s)=1$  oraz  $M(s)=s(0.005s+1)(0.0000689ss^2+0.0133s+1)$ . Te same dane wprowadzono do programu LOG4 i uzyskano wykresy przedstawione na rys. 5. Charakterystykę amplitudową układu zamkniętego otrzymaną również przy użyciu LOG4 pokazano na rys. 6.

Badanie stabilności układów nieliniowych wygodnie jest przeprowadzać przy użyciu odpowiedniego programu symulacyjnego (np. CSSP autorstwa mgr. inż. I. Siwickiego, opisanego w [1] i [4]). Program ten pozwala na uzyskiwanie przebiegów czasowych oraz wykresów na płaszczyźnie fazowej. Jest on również bardzo przydatny do ilustracji w czasie wykładu zagadnień modelowania i symulacji komputerowej układów dynamicznych.



Rys. 3



Rys. 4





## 5. Synteza i korekcja układów regulacji automatycznej

Synteza układu regulacji automatycznej ogranicza się zwykle do wyboru regulatora i wyznaczenia jego nastaw zapewniających wymaganą jakość regulacji. W przypadku układów o jednym wejściu i jednym wyjściu najwygodniej jest określić jakość regulacji na podstawie logarytmicznych charakterystyk układu otwartego, które otrzymuje się po zaumowaniu charakterystyk obiektu i regulatora. Nastawy regulatora powinny zapewnić pożądany przebieg łącznej charakterystyki, którą można ocenić na podstawie wartości:  $M(0)$  - zależy od niej uchyb ustalony; pulsacji przecięcia  $w_m$ , będącej oszacowaniem pulsacji granicznej - zależy od niej czas regulacji; zapasu modułu i zapasu fazy - zależą od nich przeregulowanie i szczyt rezonansowy  $\delta Mr$ .

Wygodnym kryterium oceny jakości dynamicznej układu jest wskaźnik regulacji  $q(j\omega) = Y(j\omega)/Y_1(j\omega)$  definiowany jako stosunek transformat Fouriera odpowiedzi na to samo wymuszenie układu zamkniętego  $y(t)$  i układu otwartego  $y_1(t)$ . Logarytmiczny wskaźnik jakości określa wzór -  $Q(\omega) = 20 \log(\text{moduł } q(j\omega))$ .

Kolejne etapy syntezy układu regulacji automatycznej można sprawnie przedstawić studentom w czasie wykładu, jeżeli zastosuje się program LOG4. W pracy [1] podano obszerny przykład (7.4.1) takiej syntezy. Z braku miejsca podaje się tu tylko opis zadania oraz uzyskane wyniki końcowe.

Obiekt regulacji ma transmitancję:

$$G_o(s) = 100 / (0.05s + 1)(0.125s + 1)(0.2s + 1)$$

a regulator PID - transmitancję:

$$G_r(s) = k_1(T_6s + 1)(T_7s + 1) / s$$

należy dobrać nastawy regulatora ( $k_1, T_6$  oraz  $T_7$ ) tak, aby były spełnione pewne wymagania (por. [1]).

Wstępne nastawy określa się w czasie wykładu ze znanej reguły Zieglera-Nicholasa i wykazuje po użyciu programu LOG4, że daje ona niezupełnie zadowalające wyniki. Po kilku próbach wskazujących wpływ poszczególnych nastaw regulatora na przebieg charakterystyk znajduje się, że dla:  $k=11$ ,  $T_6=1$  oraz  $T_7=0.1$  przebiegi te spełniają wymagania postawione na początku zadania.

Przykładowe wyniki - odpowiednie charakterystyki logarytmiczne otrzymane przy użyciu LOG4 i zastosowaniu nastaw regulatora wg Zieglera-Nicholasa pokazano na rys. 7.

W tej samej pracy [1] podano przykład (7.4.2), który ilustruje zastosowanie programu LOG4 do rozwiązywania zadań korekcji układów dynamicznych. W przykładzie opisano korekcję układu składającego się z członem oscylacyjnego połączonego szeregowo z członem całkującym przy użyciu członu korekcyjnego o transmitancji:  $G(s) = (T_6s + 1)(T_7s + 1) / (T_2s + 1)(T_3s + 1)$ .



## 6. Operacje na macierzach

Do analizy układów ciągłych stacjonarnych, opisanych współzrędnymi stanu opracowano program MATRIX (Basic SPECTRUM). Pomaga on wykładowcom i studentom w rozwiązywaniu typowych zadań z wymienionego zakresu, które wymagają żmudnych operacji rachunku macierzowego. Podczas zajęć salowych program umożliwia ilustrację graficzną przebiegów czasowych zmiennych stanu i sygnałów wyjściowych dla układu opisanego standardowo:

$$dx/dt = Ax + Bu; \quad y = Cx + Du$$

przy podaniu wartości macierzy A, B, C i D, warunków początkowych  $x(0)$  oraz sterowań  $u(t)$ .

Działający w trybie konwersacyjnym program pozwala na wykonanie większości niezbędnych operacji na macierzach (w tym znajdowanie wartości własnych macierzy). Program całkuje równania stanu. Informacje o wykonywanych operacjach wyświetlane są na ekranie monitora. Sygnalizowane są również operacje niedozwolone (np. mnożenie macierzy o niewłaściwych wymiarach). Program operuje na macierzach co najwyżej 6 na 6. Wystarcza to całkowicie do większości zadań dydaktycznych, pozwalając przy tym na czytelną wizualizację macierzy na ekranie monitora.

## 7. Wspomaganie mikrokomputerem pracy własnej studenta

Program DAU przewiduje wykonanie większego zadania domowego. Zadanie takie opracowane sposobem tradycyjnym zajmuje kilkanaście godzin. Zastosowanie mikrokomputera pozwala tu na znaczne zaoszczędzenie czasu przy jednoczesnym wzbogaceniu treści i zakresu wykonywanych zadań.

W roku akademickim 1984/85 po raz pierwszy zastosowaliśmy do tego celu ZX SPECTURUM 48k. Tematem zadania był układ dynamiczny składający się z podatnego mechanizmu krzywkowego i akcelerometru do pomiaru rzeczywistego przyspieszenia popychacza. Jego celem był wybór akcelerometru, który możliwie wiernie rejestruje przyspieszenia popychacza dla jednego z wariantów jego teoretycznego prawa ruchu.

Do rozwiązania tego zadania opracowano program TEST. Pozwala on na uzyskanie wyników w trybie dialogowym, po przejściu przez studenta kolejnych etapów. Są one poprzedzane sprawdzaniem jego wiadomości (komputer zadaje pytania, wybierając je losowo z przygotowanego zestawu). W przypadku niedostatecznego przygotowania studenta realizacja zadania jest przerywana. Wykonanie zadania kończy się oceną.

Studenci pracują na 5 stanowiskach. Realizacja zadania w opisywanym okresie zajęła 2 tygodnie, przy liczbie 120 studentów. Nakład pracy studenta zredukowano z ok. 15 godzin do 2 godzin pracy własnej i 0,5 godz.



pracy z mikrokomputerem. Ten tryb wykonywania pracy domowej przyjęty był początkowo przez studentów nieufnie. Ocenili go jednak później pozytywnie.

### 8. Uwagi końcowe

Kontynuowane są prace nad dalszymi programami, które mają wspomagać wykłady, a ponadto ułatwiać rozwiązywanie zadań domowych studentom. Niektóre z opracowanych ostatnio programów były demonstrowane na sesji plakatowej tej konferencji. Kopie programów można uzyskać u autorów niniejszego opracowania.

### LITERATURA

- [1] BUŚKO Z., JAWOREK K., KĘDZIÓR K., NAZARCZUK K., OŁĘDZKI A.: Wstęp do Dynamiki Układów Dynamicznych. Preskrypt Zakładu TMM PW, 1986.
- [2] HARRISON H.L., BOLLINGER J.G.: Introduction to Automatic Controls. New York: Harper-Row. Publishers, 1969.
- [3] KUO B.C.: Automatic Control Systems. Prentice-Hall, 1982.
- [4] OŁĘDZKI A.A.: Podstawy Teorii Maszyn i Mechanizmów. WNT, Warszawa 1986

### ОБУЧЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ МИКРОКОМПЬЮТЕРОВ ОСНОВ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНАМИ

### Резюме

Развитие и широкое употребление недорогих микрокомпьютеров открывает новые возможности перед учителями и учащимися. Учителя могут применять микрокомпьютеры для пояснения сложных проблем, которые трудно поддается объяснению традиционно, с помощью мела и доски. Микрокомпьютеры можно применять для непосредственного обучения студентов, а даже для их оценки. Учащиеся могут решать домашние задачи более эффективно с помощью микрокомпьютера, пользуясь программами из учебника или составленными самостоятельно.

В статье авторы представляют опыт накопленный в течение четырёхлетнего применения микрокомпьютеров для обучения ТММ и смежных проблем. После опубликования учебника по ТММ, в который включено 25 программ [3] был издан учебник [4] по Динамике и Управлению Физическими Системами. Некоторые программы включенные в этот учебник описаны подробно в статье. Программы, написанные для SPECTRUM 48k, касаются проблем гармонического анализа сигналов, исследования устойчивости систем управления, синтеза и корректировки систем и решения домашних работ.



MICROCOMPUTER AIDED TEACHING OF THE FUNDAMENTALS  
OF MACHINE STEERING

## S u m m a r y

The recent development of unexpensive microcomputers has created out the new possibilities for teachers and students. Teachers can use them in classes to make clear the complex problems which are difficult to explain in a traditional way on a blackboard. Special microcomputer programs may be used for tutoring students and even for grading them. Students can solve their homework problems more efficiently and thoroughly while using microcomputer programs included into text books and/or written by themselves.

The paper presents an outlook of experience gained by the authors during four year recent application of microcomputers for teaching both TMM and relative subjects. A TMM text book with 25 programs included was published first [4] and a text book for the subject Dynamics and Control of Physical Systems with several SPECTRUM 48k programs [1] - quite recently. Some of them are described in this paper. They concern harmonic analysis of signals, stability problems, synthesis and/or compensation of control systems, matrix calculations and microcomputer aided homeworks of students.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Józef Wojnerowski

Wpłynęło do redakcji: 5.XI.1986 r.