

Jarosław FIGWER

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA UKŁADÓW REGULACJI CIĄGŁEJ  
METODAMI CZĘSTOTLIWOŚCIOWYMI

Streszczenie. W pracy przedstawiono opis algorytmów i programów komputerowego wspomaganie projektowania układów regulacji ciągłej przy wykorzystaniu klasycznych metod częstotliwościowych, w trybie pracy off-line, w wersjach realizowanych na mikrokomputerach MERITUM I i MERITUM II. Wykorzystano metody syntezy na podstawie charakterystyk amplitudowo-fazowych, zapasu stabilności, wskaźników regulacji lub nadążania.

W pracy zaproponowano:

- elementy doradztwa komputerowego w postaci propozycji zakresu częstotliwości "istotnego" przy wyznaczaniu charakterystyki amplitudowo-fazowej obiektu regulacji oraz wstępnej propozycji nastaw regulatorów wg Zieglera-Nicholsa,
- elementy automatyzacji procesu projektowania w postaci algorytmu automatycznego wyznaczania charakterystyki amplitudowo-fazowej obiektu,
- segment funkcjonalny wykorzystywany w konwersacyjnym projektowaniu.

Programy mają strukturę, która po niewielkich zmianach pozwala na syntezę opartą na dowolnym częstotliwościowym wskaźniku jakości (klasycznym lub stochastycznym) charakteryzującym jednopętlowy układ regulacji.

Wstęp

Komputerowe wspomaganie projektowania (Computer Aided Design) stanowi szeroko pojęte wykorzystanie sprzętu komputerowego do automatyzacji prac projektowych. Przy projektowaniu układów regulacji maszyna cyfrowa może być wykorzystana w trybie pracy:

- on-line - adaptacyjne algorytmy sterowania,
- off-line - klasyczne metody projektowania i symulacji.

Oprogramowanie CAD układów regulacji ciągłej powstało w wersjach realizowanych na mikrokomputerach serii MERITUM. W celu poprawy możliwości graficznych w programach przewidziano możliwość dołączenia do mikrokomputera przystawki graficznej (komputer graficzny AGAPOL). Po dołączeniu drukarki D-100 istnieje możliwość kopiowania ekranu przystawki.

W programach wykorzystano klasyczne metody syntezy na podstawie charakterystyk amplitudowo-fazowych, zapasu stabilności (modułu i fazy), wskaźników regulacji lub nadążania [1], [2], [3], [4]. Możliwe jest badanie zarówno stabilności układu zamkniętego, jak i układu otwartego na podstawie od-

wrotnej charakterystyki amplitudowo-fazowej mianownika transmitancji układu otwartego.

Powstałe oprogramowanie pozwala na rozwiązywanie dwóch podstawowych zadań syntezy układów regulacji w obecności zakłóceń:

- stabilizacji wielkości wyjściowej,
- nadążania wielkości wyjściowej za zmianami wartości zadanej.

Kształtowanie własności dynamicznych jest uzyskiwane poprzez zastosowanie regulatorów (P, PI, PD, PID) lub korektorów.

Dla regulatorów są proponowane przez program nastawy wg Zieglera-Nicholsa.

Program CAD powinien być szybki w działaniu, łatwy w obsłudze i w miarę uniwersalny. Musi on wykonywać nie tylko czynności obliczeniowe, ale również zestawieniowe i interpretacyjne.

Szczególną uwagę zwrócono na aspekty doradztwa komputerowego, które umożliwiają przyspieszenie procesu projektowego. Jest to istotne zwłaszcza dla mikrokomputerów serii MERITUM, gdyż charakteryzują się one małą pamięcią operacyjną (48 Kb) oraz małą szybkością działania (język oprogramowania BASIC).

W pracy przedstawiono rozwiązanie problemu doboru, na podstawie modelu matematycznego obiektu (transmitancji), zakresu częstotliwości do wyznaczenia charakterystyki amplitudowo-fazowej. Stanowi on podstawę algorytmu jej automatycznego wyznaczania.

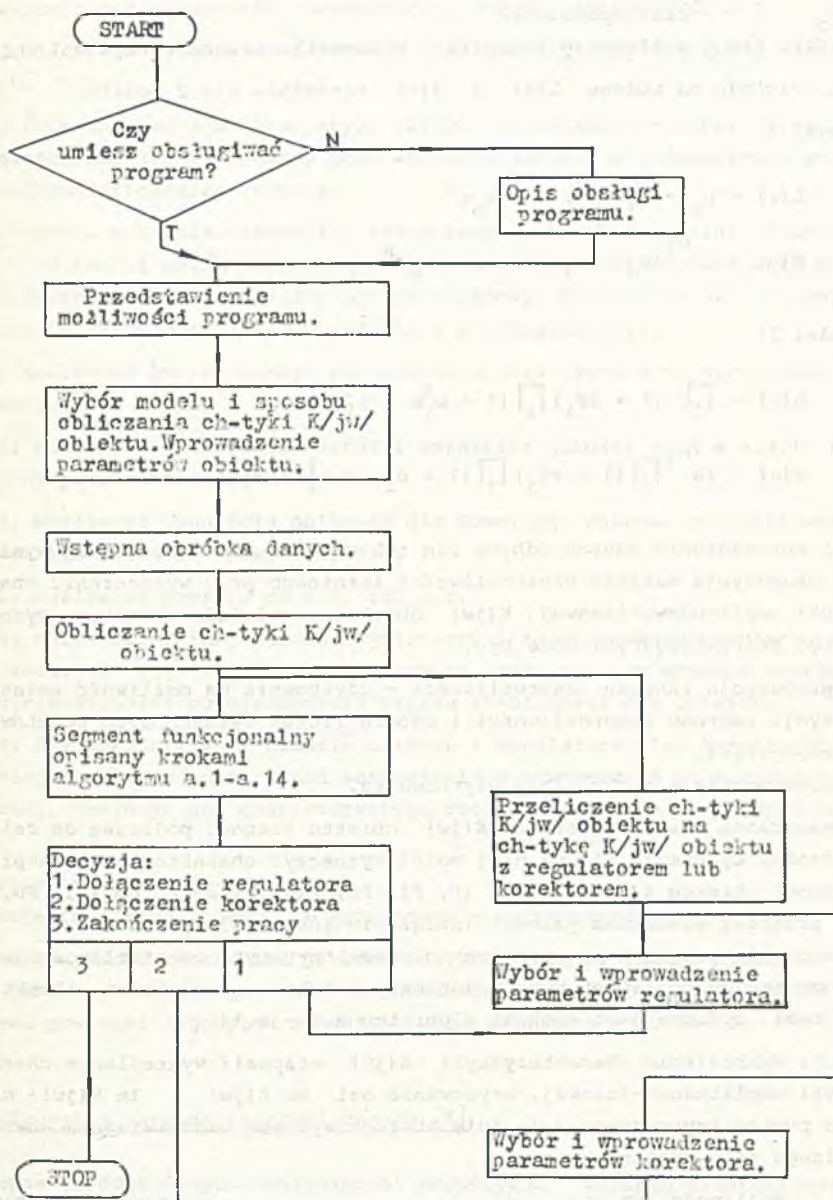
Programy powstały w 2 wersjach różniących się wskaźnikiem projektowym (nadażania lub regulacji). Zajmują w pamięci mikrokomputera po około 35 Kb. Szybkość ich działania może być scharakteryzowana czasem wyznaczania pojedynczej charakterystyki amplitudowo-fazowej. Waha się on w zakresie od kilkudziesięciu sekund do około 3 minut, w zależności od złożoności obiektu i dokładności wyznaczania charakterystyki.

### 1. Opis funkcjonalny programów CAD

Wszystkie programy mają charakter konwersacyjny. Komunikują się z użytkownikiem za pomocą monitora ekranowego. W celu ich poprawnej obsługi konieczna jest znajomość znaków sterujących wykonaniem programu [5]. Można się z nimi zapoznać po uruchomieniu programu (rys. 1) i negatywnej odpowiedzi na pytanie: CZY UMIESZ OBSŁUGIWAĆ PROGRAM?

Dane wejściowe do programu stanowi model obiektu dany transmitancją operatorową w postaci:

$$K(s) = k \frac{L(s)}{M(s)} \cdot e^{-sT_0} \quad (1)$$



Rys. 1. Schemat blokowy programu

Fig. 1. Block scheme of the program

gdzie:

$k$  - wzmocnienie obiektu,

$T_0$  - czas opóźnienia

$L(s)$ ,  $M(s)$  - wielomiany licznika i mianownika transmitancji  $\text{st.}L(s) \leq \text{st.}M(s)$

Ze względu na budowę  $L(s)$  i  $M(s)$  rozróżnia się 2 modele:

- model 1:

$$\begin{aligned} L(s) &= b_0 + b_1 s + \dots + b_m s^m \\ M(s) &= Ts^{n_1} (a_0 + a_1 s + \dots + a_n s^n) \end{aligned} \quad (2)$$

- model 2:

$$\begin{aligned} L(s) &= \prod_1 (1 + sT_{i_1}) \prod_1 (1 + b_1^i s + a_1^i s^2) \\ M(s) &= Ts^{n_1} \prod_j (1 + sT_{j_1}) \prod_j (1 + b_2^j s + a_2^j s^2) \end{aligned} \quad (3)$$

Po wprowadzeniu danych odbywa się ich wstępna obróbka, której wynikiem jest propozycja zakresu częstotliwości istotnego przy wyznaczaniu charakterystyki amplitudowo-fazowej  $K(j\omega)$  obiektu w układzie otwartym. Wyznaczenie tej charakterystyki może być:

- z propozycją zakresu częstotliwości - użytkownik ma możliwość zmiany propozycji zakresu częstotliwości i doboru liczby wyznaczonych punktów charakterystyki,
- automatycznie - bez udziału użytkownika.

Wyznaczona charakterystyka  $K(j\omega)$  obiektu stanowi podstawę do dalszego działania. Opierając się na niej można wyznaczyć charakterystykę amplitudowo-fazową obiektu z regulatorem (P, PI, PD, PID), korektorem (PI, PD, PID) oraz przebieg wskaźnika jakości (nadażania lub regulacji).

Działanie programu po wyznaczeniu charakterystyki częstotliwościowej, dla wszystkich możliwych wersji (obiekt, obiekt z regulatorem, obiekt z korektorem), opisane jest krokami algorytmu a.1 - a.14:

a.1. Wykreślenie charakterystyki  $K(j\omega)$  etapami: wykreślenie charakterystyki amplitudowo-fazowej, wrysowanie osi  $\text{Re } K(j\omega)$  i  $\text{Im } K(j\omega)$ ; migotanie punktu krytycznego  $(-1; j0)$ ; obsługa wykresu umożliwiająca analizę dowolnego jego punktu.

a.2. Możliwość interpretacji wykresu  $K(j\omega)$  na przystawce graficznej.

a.3. Możliwość obliczenia zapasu stabilności.

a.4. Możliwość doliczenia dowolnego fragmentu charakterystyki  $K(j\omega)$  z interpretacją graficzną; dopisaniem do pozostałych danych lub rezygnacją z nich; wykresem charakterystyki  $K(j\omega)$  z doliczonym fragmentem poprzez powrót do a.1.

a.5. Możliwość usunięcia obliczeń dla dowolnego zakresu częstotliwości charakterystyki  $K(j\omega)$  - m.in. w celu poprawy czytelności wykresu dla obiektów zawierających całkowanie. Automatyczny powrót następuje do a.1.

a.6. Możliwość powrotu do a.1., gdy nie zakończyliśmy tworzenia charakterystyki  $K(j\omega)$ .

a.7. Przeliczenie charakterystyki  $K(j\omega)$  na wskaźnik jakości. Przy badaniu samego obiektu wyznaczany jest wskaźnik jakości z jednostkowym proporcjonalnym sprzężeniem zwrotnym.

a.8. Wykres wskaźnika jakości z zaznaczeniem na wykresie linii o wartości 1. i możliwością analizy dowolnego punktu wykresu. Jeżeli badamy wskaźnik nadążania i występuje na nim wyraźny pik rezonansowy, to wówczas otrzymujemy dodatkową informację o czasie regulacji i przeregulowaniu.

a.9. Możliwość interpretacji wykresu wskaźnika jakości na przystawce graficznej.

a.10. Możliwość doliczenia wartości wskaźnika jakości (jak w a.4.). Automatyczny powrót następuje do a.8.

a.11. Możliwość usunięcia obliczeń dla dowolnego zakresu częstotliwości dla wskaźnika jakości - powrót do a.8.

a.12. Możliwość powrotu do a.1. lub a.8.

a.13. Możliwość zmiany nastaw regulatorów i kolektorów lub zamiany ich między sobą. Dla regulatorów proponowane są przez program wstępne nastawy wg Zieglera-Nicholsa po wyznaczeniu zapasu stabilności dla obiektu.

a.14. Gdy zakończyliśmy badanie obiektu z regulatorem lub korektorem, to istnieje możliwość otrzymania zestawienia porównawczego na przystawce graficznej. Obejmuje ono charakterystykę częstotliwościową i wskaźnik jakości:

- dla obiektu - górna część ekranu,
- dla obiektu z regulatorem lub korektorem - dolna część ekranu.

Dla obu wykresów wskaźnika jakości został zachowany zakres częstotliwości, w jakim wyznaczono go dla samego obiektu. Możliwości przejść między kolejnymi punktami algorytmu zostały przedstawione na rys. 2.

## 2. Algorytmy wstępnej obróbki danych [5]

Wstępna obróbka danych obejmuje: a) propozycję zakresu częstotliwości istotnego dla obiektu przy wyznaczaniu charakterystyki  $K(j\omega)$  oraz b) normalizację modelu.

ad a

Za istotny uznawany jest ten zakres częstotliwości, dla którego następują zmiany fazy na charakterystyce fazowej przy zmianach częstotliwości.

Związany on jest z modułem maksymalnego i minimalnego pierwiastka licznika i mianownika transmitancji.

Jeżeli występuje opóźnienie w modelu obiektu, to odpowiadającą mu transmitancję możemy zastąpić aproksymacją Pade [6]:

$$e^{-sT_0} = \frac{1 - 0,5 sT_0}{1 + 0,5 sT_0} \quad (6)$$

Dla modelu 1 oceniamy bezpośrednio minimalną i maksymalną z wartości modułów pierwiastków. Natomiast dla modelu 1 stosujemy oszacowanie na podstawie twierdzeń 2.1 i 2.2 [6].

#### Twierdzenie 2.1

Niech  $f(z) = \sum_{k=0}^n a_k z^{n-k}$ ;  $a_0 \neq 0$ . Wszystkie zera wielomianu  $f(z)$  spełniają nierówność:

$$|z_k| \leq 1 + \max_{1 \leq k \leq n} \left| \frac{a_k}{a_0} \right|; \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

#### Twierdzenie 2.2

Moduły wszystkich zer wielomianu  $f(z) = \sum_{k=0}^n a_k z^{n-k}$ ;  $a_k > 0$  spełniają nierówność:

$$\min \left( \frac{a_1}{a_0}; \frac{a_2}{a_1}; \dots; \frac{a_n}{a_{n-1}} \right) \leq |z_k| \leq \max \left( \frac{a_1}{a_0}; \frac{a_2}{a_1}; \dots; \frac{a_n}{a_{n-1}} \right) \quad (6)$$

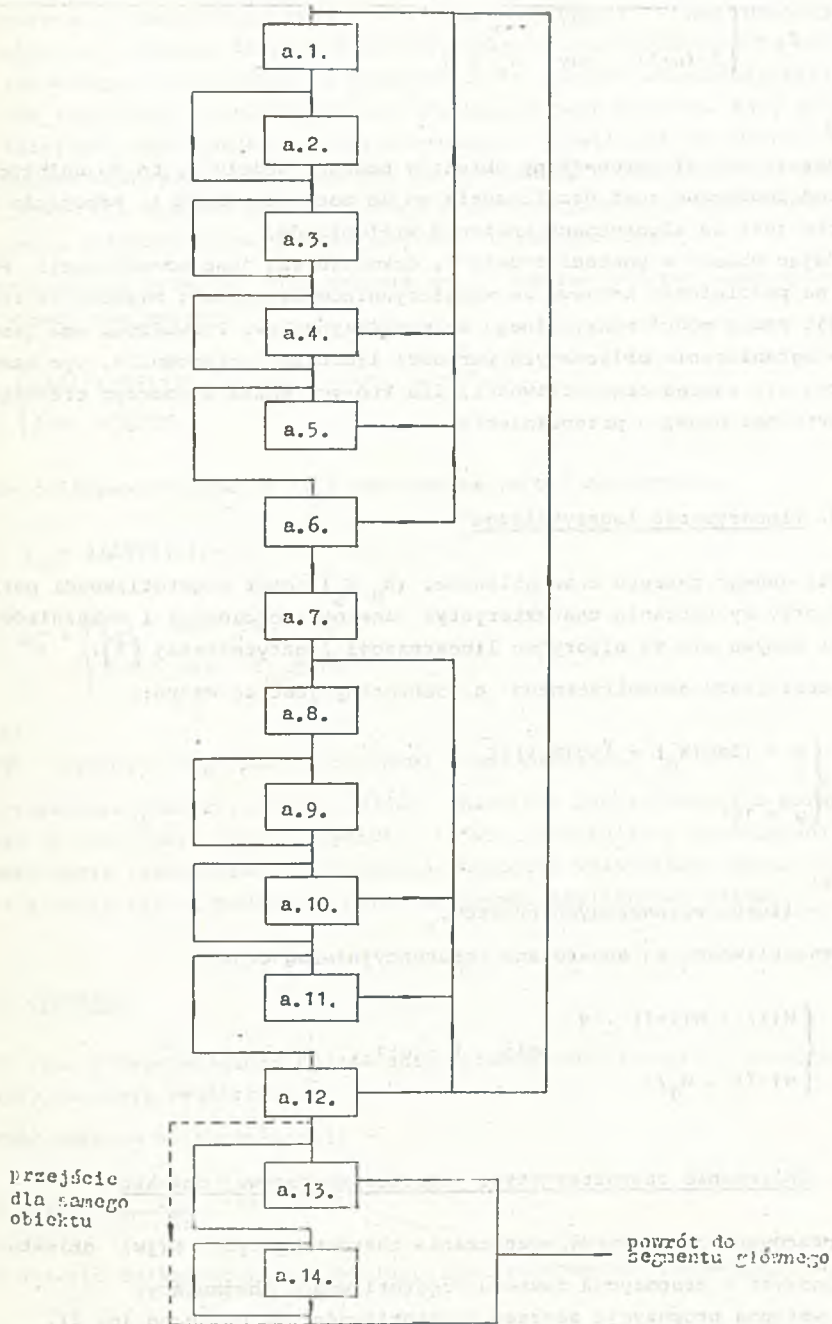
Niech:

- $m_d$  - minimalna wartość modułu pierwiastka,
- $m_g$  - maksymalna wartość modułu pierwiastka,
- $n$  - stopień mianownika transmitancji.

Proponowany do obliczenia charakterystyki  $K(j\omega)$  obiektu jest zakres częstotliwości  $(W_d; W_g)$ :

$$\begin{cases} W_d = 0,2 m_d / I_k \\ W_g = 4,82 m_g I_k \end{cases} \quad (7)$$

Gdzie  $I_k$  jest wartością korekcyjną mającą za zadanie zmniejszenie błędów oceny istotnego zakresu częstotliwości. W programie jest ona wyznaczana wg algorytmu:



Rys. 2. Możliwości przejść między punktami a.1. - a.14. segmentu funkcjonalnego

Fig. 2. Possibilities of ways between a.1. - a.14. points of the functional segment

$$I_k = \begin{cases} 2n & \text{gdy } T_o = 0 \\ 2(n+1) & \text{gdy } T_o \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

ad b

Jeżeli został wprowadzony obiekt w postaci modelu 2, to do dalszych obliczeń konieczne jest przeliczenie go do postaci modelu 1. Przejście to oparte jest na algorytmach mnożenia wielomianów.

Mając obiekt w postaci modelu 1, dokonuje się jego normalizacji. Polega ona na podzieleniu każdego ze współczynników licznika i mianownika transmitancji przez moduł maksymalnego ze współczynników. Prowadzona ona jest w celu ograniczenia obliczanych wartości licznika i mianownika, tym samym poszerza się zakres częstotliwości, dla których można wyznaczyć transmitancję obiektu bez obawy o przepełnienie.

### 3. Linearyzacja logarytmiczna

Dla danego zakresu częstotliwości ( $W_d$  -  $W_g$ ) dobór częstotliwości pośrednich przy wyznaczaniu charakterystyk częstotliwościowych i wskaźników jakości odbywa się wg algorytmu linearyzacji logarytmicznej [7]:

- iloraz ciągu geometrycznego  $g$  dobierany jest ze wzoru:

$$\begin{cases} y = (\log(W_g) - \log(W_d)) / I \\ g = 10^y \end{cases} \quad (9)$$

gdzie:

$I$  - liczba wyznaczonych punktów,

- częstotliwości są generowane rekurencyjnie wg wzoru:

$$\begin{cases} W(i) = W(i-1) \cdot g \\ W(-1) = W_d / g \end{cases} \quad \text{dla } i = 0, 1, \dots, I \quad (10)$$

### 4. Obliczanie charakterystyki amplitudowo-fazowej obiektu

Opracowano 2 algorytmy wyznaczania charakterystyki  $K(j\omega)$  obiektu:

a) algorytm z propozycją zakresu częstotliwości obejmujący:

- wstępną propozycję zakresu częstotliwości do obliczeń (p. 2),
- wprowadzenie zakresu częstotliwości i liczby obliczanych punktów z kładki wiatury,
- wyznaczenie wartości transmitancji  $K(j\omega)$  dla częstotliwości pośrednich (p. 3),



- b) algorytm automatycznego wyznaczania charakterystyki  $K(j\omega)$  obejmujący:
- algorytm z punktu 4a przy przyjęciu zakresu częstotliwości do obliczeń jak wstępnie proponowany i wyznaczeniu 20 punktów charakterystyki,
  - dla wszystkich wyznaczonych punktów badany jest przyrost fazy między kolejnymi dwoma punktami charakterystyki; jeżeli jest on większy od dopuszczalnego, to przechodzimy do doliczania punktów charakterystyki  $K(j\omega)$  dla zakresu częstotliwości scharakteryzowanego tymi dwoma punktami, doliczane punkty są dopisywane do poprzednich.

Dopuszczalny przyrost fazy zmienia się z numerem kolejno badanego punktu i wyraża się wzorem:

$$\begin{cases} d(i) = d(i-1) \cdot 1,03 & \text{dla } i = 1, 2, \dots, 20 \\ d(0) = \pi/20 \end{cases} \quad (11)$$

Liczba doliczanych punktów ( $n_d$ ) wyznaczana jest z zależności:

$$i_d = 4(\Delta\varphi/d(i) + 1)$$

$$n_d = \begin{cases} i_d; & \text{gd } i_d < 15 \\ 15; & \text{gd } i_d \geq 15 \end{cases} \quad (12)$$

gdzie:

$\Delta\varphi$  - przyrost fazy między kolejnymi dwoma punktami.

Wyznaczanie charakterystyki  $K(j\omega)$  obiektu z regulatorem lub korektorem polega na wymnożeniu charakterystyki  $K(j\omega)$  obiektu (już wyznaczonej) przez transmitancję regulatora lub korektora. Wartości wskaźników jakości obliczane są z definicji na podstawie charakterystyki amplitudowo-fazowej.

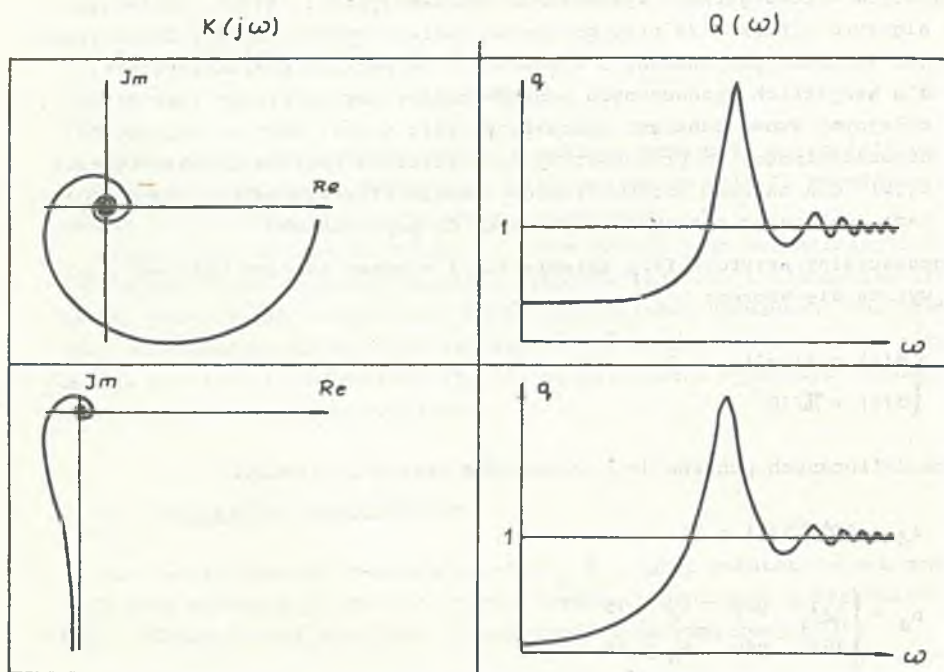
#### 4. Przykład

Na rys. 3 przedstawiono zestawienie porównawcze dla wersji programu obejmującej wskaźnik regulacji:

- model obiektu o transmitancji

$$K(s) = \frac{2}{1 + 8s} e^{-4s} \quad (13)$$

- do obiektu dołączono regulator PI o nastawach wg Zieglera-Nicholsa.



Rys. 3. Zestawienie porównawcze - wersja programu wskaźnik regulacji  
 Fig. 3. Comparison consistence - regulation index version of the program

### Zakończenie

Elementy automatyzacji procesu projektowania i doradztwa komputerowego oraz rozbudowane możliwości graficzne i interpretacyjne odróżniają powstałe programy CAD od programów prezentowanych w pracach [7], [8].

Programy mogą być wykorzystane zarówno w dydaktyce podczas poznawania metod analizy i syntezy układów regulacji, jak i przy projektowaniu ich dla celów przemysłowych. Mają one strukturę programową, która przy zmianie tylko definicji pozwala na obliczanie dowolnego innego częstotliwościowego wskaźnika jakości (klasycznego lub stochastycznego) charakteryzującego jednopętlowy układ regulacji.

### LITERATURA

- [1] Górecki H.: Analiza i synteza układów regulacji z opóźnieniem. WNT, Warszawa 1971.
- [2] Gill J.C.: Serwomechanizmy. WNT, Warszawa 1961, t. 1.
- [3] Kaczorek T.: Teoria sterowania. WNT, Warszawa 1977, t. 1.
- [4] Cruz B.J.: Układy ze sprzężeniem zwrotnym. PWN, Warszawa 1977.

- [5] Figwer J.: Opracowanie programów dla komputerowego wspomagania projektowania układów regulacji ciągłej metodami częstotliwościowymi w wersjach realizowanych na komputerach MERITUM I i MERITUM II. Praca dyplomowa wykonana w Instytucie Automatyki. Pol. Śl., Gliwice 1986.
- [6] Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J.: Metody numeryczne. WNT, Warszawa 1980.
- [7] Górecki H.: Algorytmy i programy sterowania. WNT, Warszawa 1980.
- [8] Górniak J.: System wspomagania komputerowego projektowania liniowych układów regulacji jednowymiarowej. Praca dyplomowa wykonana w Instytucie Automatyki. Pol. Śl. Gliwice 1985.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Roman Świniarski

Wpłynęło do Redakcji 14.07.1986 r.

#### КОМПЬЮТЕРНОЕ ВСПОМАГАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТНЫМИ МЕТОДАМИ

#### Р е з ю м е

В статье дано описание алгоритмов и программ компьютерного вспомогания проектирования систем непрерывного регулирования с использованием классических частотных методов при посредственном режиме, реализованных на микрокомпьютерах МЕРИТУМ I и МЕРИТУМ II. Используются методы синтеза на базе амплитудно-фазовых характеристик, запаса стабильности и показателей регулирования или слежения.

В работе предложены:

- элементы компьютерного советования в виде предложений диапазона "существенного" при определении амплитудно-фазовой характеристики объекта регулирования, а также начального предложения установки регуляторов по Циглеру-Никольсу,
- элементы автоматизации процесса проектирования в виде алгоритма автоматического определения амплитудно-фазовой характеристики объекта,
- функциональный элемент, использованный в конверсационном проектировании.

Предложенные программы имеют структуру, которая после немногих изменений, даёт возможность синтеза на основе любого частотного показателя качества (классического или стохастического), характеризующего одноконтурную систему регулирования.

## COMPUTER AIDED DESIGN OF CONTROL SYSTEMS BY FREQUENCY METHODS

## S u m m a r y

The algorithm and program for computer aided design of continuous time control systems using classical frequency domain methods is presented. The system works off-line and may be implemented on MERITUM I and MERITUM II microcomputers. Frequency characteristic, stability margins and regulation tracking indices are used in the system. The system contains:

- expert elements in the form of the proposition for frequency range "important" for frequency characteristic of the plant and introductory Ziegler-Nichols tuning parameters
- automation in design elements in the form of automatic assignment frequency characteristics
- user-friendly functional segment used in the design procedure

The program enables to introduce (after small changes) any frequency performance index as a basis to design procedure for single loop control systems