

Analiza cyfrowa wpływu zakłóceń stochastycznych na prędkość kątową w układzie napędowym prądu stałego przy zastosowaniu języka SESL

1. WSTĘP

W wielu układach napędowych stabilizacja prędkości kątowej przy działających zakłóceniach różnego typu stanowi ważny problem, którego rozwiązanie nastęrcza dużo trudności.

Do tej pory nie udało się zbudować układu napędowego, w którym zapewniona jest całkowita niewrażliwość prędkości kątowej na wpływy zakłóceń stochastycznych. Składa się na to wiele przyczyn. Jedną z podstawowych przyczyn jest trudność w identyfikacji zakłóceń stochastycznych w danym układzie napędowym.

Celem niniejszej pracy jest ilościowe zbadanie wpływu zakłóceń stochastycznych na prędkość kątową, w często stosowanym układzie napędowym z silnikiem obcowzbudnym prądu stałego dla wybranych parametrów obiektu oraz stwierdzenie, od jakich parametrów wpływ ten jest uzależniony najbardziej.

Należy podkreślić, że problem wpływu zakłóceń stochastycznych na pracę napędu posiada zasięg znacznie szerszy niż przedstawiony w niniejszym artykule. Wiele cech przenosi się na inne układy napędowe. Podjęcie tego tematu posiada znaczenie praktyczne, bowiem zakłócenia stochastyczne stanowią jeden z trudniejszych problemów technicznych w technice napędowej.

W przemysłowych warunkach pracy napędu podzespoły elektroniczne cyfrowych układów sterujących tyrystorowych zestawów tych napędów narażone są bowiem na szkodliwy wpływ zakłóceń zewnętrznych i wewnętrznych. Sygnały zakłócające wewnętrzne powstają w elementach i podzespołach elektronicznych układu cyfrowego formującego sygnał sterujący.

Są to:

1. Szumy własne rezystorów i elementów półprzewodnikowych. Wśród nich wymienić należy:
 - szumy cieplne (Johnsona), spowodowane bezładnym ruchem wynikającym z cieplnego pobudzenia nośników ładunku w przewodniku;
 - szumy igrutowe (Schottky'ego), spowodowane fluktuacją dyfuzji, przypadkową generacją i rekombinacją nośników ładunku;
 - szumy strukturalne typu $1/f$ (flicker noise Johnsona - Schottky'ego) o nie wyjaśnionej dotąd naturze;
 - szumy lawinowe, spowodowane przejściem nośników przez złącza p-n elementów półprzewodnikowych;
 - szumy wybuchowe, spowodowane zanieczyszczeniami półprzewodników.
2. Przesłuchy, spowodowane przenikaniem sygnałów z kanałów sąsiednich podzespołów elektronicznych w szafie sterującej;
3. Sygnały impulsowe, spowodowane nieciągłym charakterem pracy układów impulsowych.

Poza tym istnieją sygnały zakłócające zewnętrzne, które swoje źródło posiadają na zewnątrz, względnie odosobnionego układu napędowego [4]. Najważniejsze z nich to:

- a) sygnały okresowe o częstotliwości sieci zasilającej spowodowane sprzężeniami galwanicznymi;
- b) sygnały indukowane pod wpływem pól magnetycznych w przewodach sygnałowych kabli, ekranach, ścieżkach łączeniowych;
- c) prądy, spowodowane indukowaniem się ładunków na ekranach kabli, obudów szaf, wynikające z oddziaływania zewnętrznych pól elektrycznych.

Pomimo stosowania różnych metod zwalczania wymienionych sygnałów zakłócających, jak:

- ekranowanie od pól zakłócających,
- separacja galwaniczna układów,
- stosowanie niskoszumowych i odpornych na zakłócenia układów wzmacniających,
- filtracja sygnałów w obwodach sygnałowych i zasilających układów cyfrowych,

całkowita eliminacja zakłóceń pojawiających się w strukturach układów sterujących jest niemożliwa. Odporność urządzeń cyfrowych na zakłócenia wynika z samej konstrukcji zespołów sterujących zamontowanych w "szafach cyfrowych", rodzaju zastosowanych elementów cyfrowych, sposobu zasilania i uziemienia. W obecnie stosowanych napędach elektrycznych podzespoły elektroniczne układów sterujących wykonane są przede wszystkim z elementów TTL wrażliwych na działanie zakłócające pracujących w sąsiedztwie urządzeń elektrycznych.

Przeprowadzone w pracy [3] pomiary zakłóceń w układzie napędowym prądu stałego wykazują istnienie składowych stochastycznych w sygnale sterującym badanego napędu, formowanym przez podzespoły elektroniczne układów formujących ten sygnał w tyrystorowych zestawach napędowych. Skłoniło to autorów do podjęcia próby oceny wpływu zakłóceń sygnału sterującego w wybranym układzie sterowania napędem prądu stałego. Ze względu na trudności dokonania tej oceny drogą analityczną posłużono się metodami cyfrowymi z wykorzystaniem odpowiednich algorytmów. Eksperyment symulacyjny stanowi wygodną a niejednokrotnie jedyną drogę rozwiązania przedstawionego problemu.

Do analizy przyjęto skrajnie niekorzystne warunki występowania zakłóceń sygnału sterującego składową stochastyczną (zgodnie z pomiarami w [3] oraz - dla porównania - składową szumową o ograniczonym paśmie częstotliwości (zabarwioną).

W niniejszej pracy określono wpływ zakłóceń stochastycznych w sygnale zadającym prędkość na procesy dynamiczne na-

pędu prądu stałego dla trzech struktur układów sterujących omówionych w dalszym ciągu. Są to typowe struktury stosowane w technice napędowej w wielu gałęziach przemysłu. Dla przeprowadzenia obliczeń zastosowano nowy, skonstruowany język symulacyjny SESL (Switching Elements Simulation Language).

Uzyskane wyniki stanowią podstawę do:

- a) określenia dokładności badanych struktur napędowych,
- b) weryfikacji rezultatów optymalizacji parametrycznej układów.

2. ZAŁOŻENIA DLA OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Do rozwiązania problemu wpływu zakłóceń stochastycznych na procesy dynamiczne napędu wymagane było utworzenie ciągów próbek $\{x_i\}$, stanowiących realizacje procesów stochastycznych o określonych charakterystykach probabilistycznych. Opracowano w tym celu dwa algorytmy (generatory) generujące:

- a) ciąg nieskorelowanych próbek $\{x_i^{N1}\}$ o wartości średniej zerowej, rozkładzie normalnym, wariancji $R^{x^{N1}}(0)$ i funkcji autokorelacji $R^{x^{N1}}(\tau)$ liniowo malejącej opisanej

$$R^{x^{N1}}(\tau) = \begin{cases} R^{x^{N1}}(0) \left(1 - \frac{|\tau|}{\Delta}\right), & |\tau| \leq \Delta \\ 0, & |\tau| > \Delta \end{cases} \quad (1)$$

gdzie, Δ - krok dyskretyzacji (rys. 5c).

Dla uproszczenia generator tego ciągu nazywać będziemy NORMAL 1. Reprezentuje on składową zakłócającą o charakterze szumu szerokopasmowego;

- b) ciąg skorelowanych próbek $\{x_i^{N2}\}$ o wartości średniej zerowej, rozkładzie normalnym, wariancji $R^{x^{N2}}(0)$ i funkcji

autokorelacji oscylacyjnej tłumionej $R^{N2}(\tau)$, o postaci analitycznej zadanej "a priori" (rys. 5d).

Generator tego ciągu nazywać będziemy NORMAL 2.

Funkcja określona wyrażeniem (1) przez odpowiedni dobór Δ , może z dowolną dokładnością przybliżać pseudofunkcję Diraca. Ciąg b) stanowi szum zabarwiony określony funkcją autokorelacji

$$R^{N2}(\tau) = \sigma_x^2 \exp(-a|\tau|) \cos \beta\tau$$

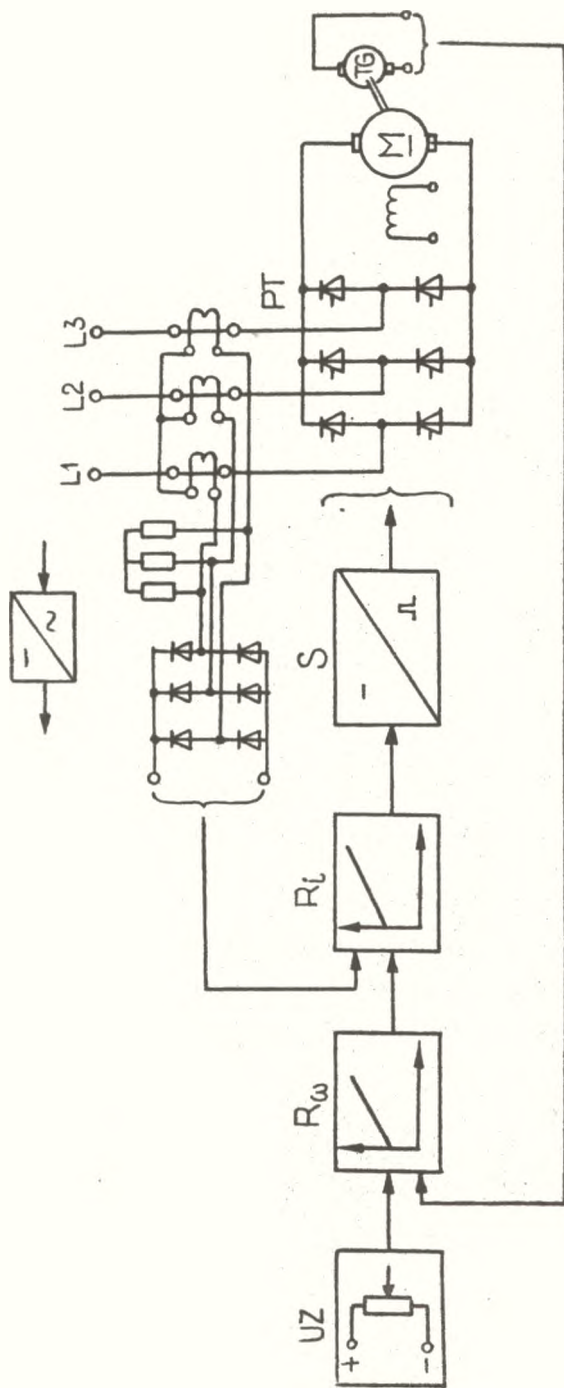
gdzie a, β - stałe, $\sigma_x^2 = R^{N2}(0)$ - wariancja

Do obliczeń cyfrowych wykorzystano język symulacyjny SESL zorientowany na układy elektromechaniczne.

Przygotowanie programu w języku SESL wymaga sporządzenia grafu funkcyjnego badanego układu, a następnie utworzenia algorytmu wynikającego z tego grafu. Język ten pozwala łatwo dołączyć utworzone generatory NORMAL 1 i NORMAL 2, posiada stało- i zmiennokrokowe metody całkowania oraz metody uwikłane o dużej stabilności. Do ciągu instrukcji w języku SESL zostały dołączone procedury określające charakterystyki probabilistyczne na wejściu i wyjściu badanego układu napędowego, tj.: wartości przeciętnych, wariancji i funkcji autokorelacji sygnałów wejściowego i wyjściowego. Estymatory tych charakterystyk są określone w pracy [5]. Utworzone zostały również programy określające współczynniki filtracji badanych struktur układów napędowych.

3. OBLICZENIA CYFROWE

Przedmiotem rozważań jest układ napędowy z silnikiem obco-wzbudnym prądu stałego (rys. 1) o następujących strukturach sterujących:



Rys. 1. Schemat układu napędowego z silnikiem prądu stałego

UZ - układ zasilania prądu stałego

R_ω - regulator zadawania prędkości

R_i - regulator prądu

S - sterownik

PT - przekształtnik tyrystorowy

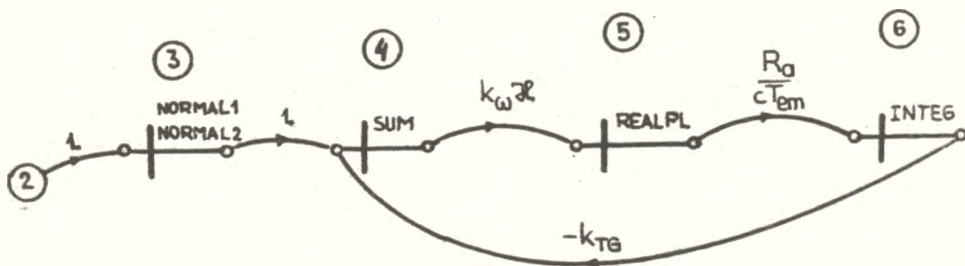
a) z proporcjonalnym regulatorem prędkości i proporcjonalno-całkującym regulatorem prądu,

b) z proporcjonalnym regulatorem prędkości, proporcjonalno-całkującym regulatorem prądu i opóźnieniem τ_0 wprowadzonym przez przekształtnik,

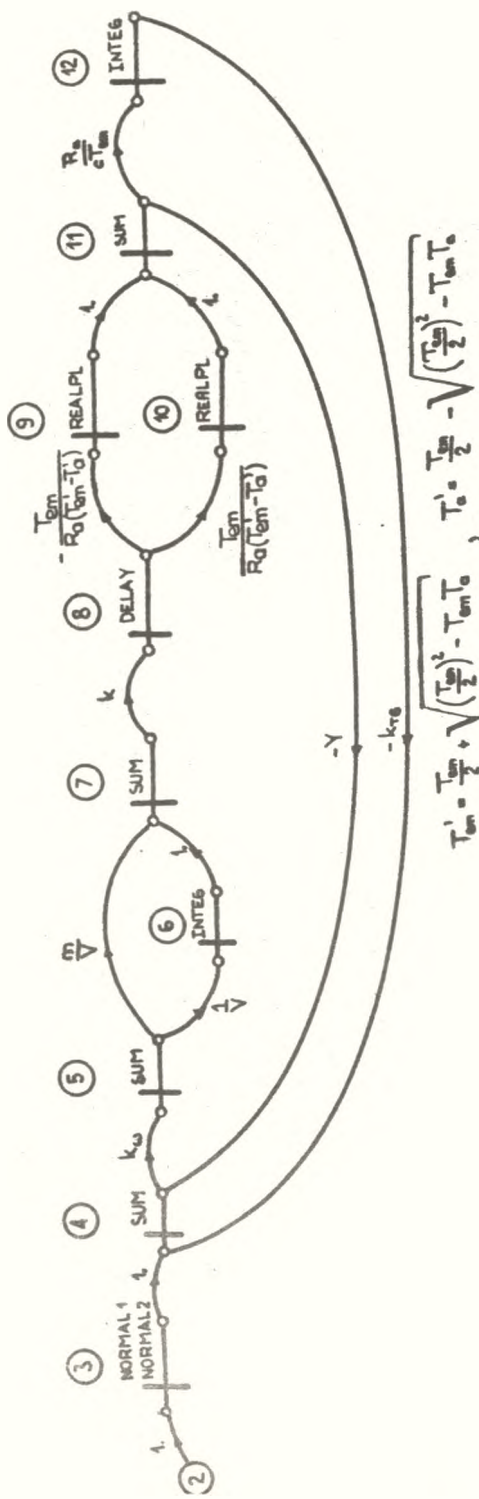
c) proporcjonalno-całkującym regulatorem prędkości, proporcjonalno-całkującym regulatorem prądu.

W układach tych regulatory prądu i prędkości tworzą strukturę kaskadową. Układ regulacji zawiera tor sprzężenia zwrotnego prądowego i prędkościowego. Są to typowe - reprezentatywne struktury układów stosowane w technice napędowej - w przemyśle hutniczym, papierniczym, obrabiarkowym, górniczym i innych. W chwili obecnej podobnie duże możliwości regulacyjne istnieją w napędach systemu TRANSVEKTOR [6], znajdujących się w stadium eksperymentów i wdrożeń.

Zasadne wydaje się zatem zbadanie wymienionych wyżej trzech struktur układów napędowych z silnikiem prądu stałego. Struktury te zostały przedstawione za pomocą grafów funkcyjnych przepływu sygnałów (rys. 2, 3, 4), w których sens fizyczny wprowadzonych symboli oraz znaczenia funkcji są następujące:

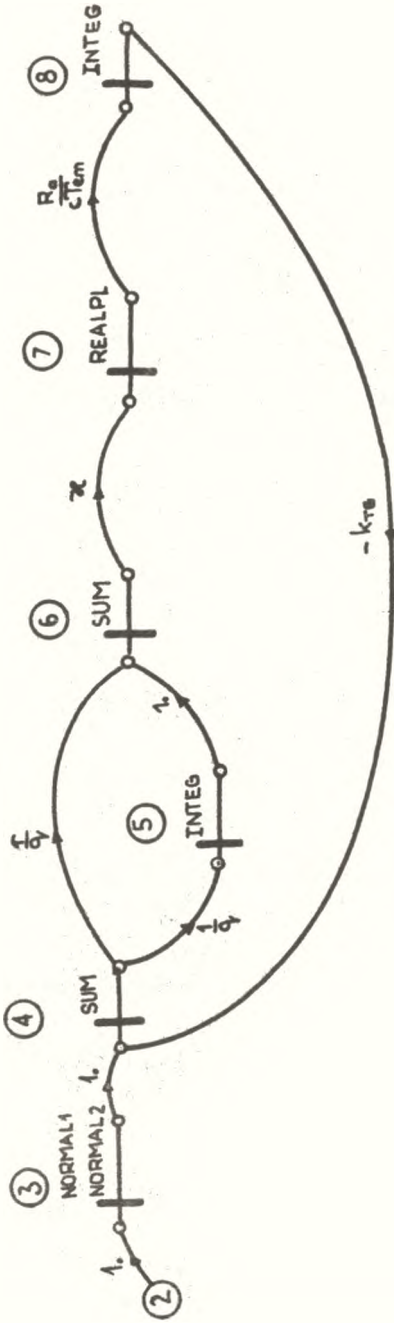


Rys. 2. Graf funkcyjny układu napędowego z regulatorem prędkości typu P i regulatorem prądu typu P-I



$$T_{em} = \frac{T_{em}}{2} + \sqrt{\left(\frac{T_{em}}{2}\right)^2 - T_{em}T_0}, \quad T_0 = \frac{T_{em}}{2} - \sqrt{\left(\frac{T_{em}}{2}\right)^2 - T_{em}T_0}$$

Rys. 3. Graf funkcyjny układu napędowego z regulatorem prędkości. typu P, regulatorem prądu typu P-I i opóźnieniem wprowadzanym przez przekształtnik



Rys. 4. Graf funkcyjny układu napędowego z regulatorem prędkości i prądu typu P-I

- R_a, L_a - odpowiednio: rezystancja i indukcyjność uogólniona obwodu twornika silnika prądu stałego,
 T_a, T_{em} - odpowiednio: elektromagnetyczna i elektromechaniczna stała czasowa układu napędowego;
 $T_a = L_a/R_a, T_{em} = J R_a/c^2$
 J - zastępczy moment bezwładności układu napędowego (sprowadzony do osi wału silnika),
 c - stała silnika,
 k_{TG} - współczynnik sprzężenia zwrotnego prędkościowego (stała tachogeneratora)
 Y - współczynnik sprzężenia zwrotnego prądowego
 \mathcal{X} - współczynnik wzmocnienia prądowego obwodu regulacji

$$\mathcal{X} = \frac{k T_{em}}{R_a V + Y k T_{em}}$$

- α - stała czasowa prądowego obwodu regulacji

$$\alpha = \frac{V(T_{em}/2 + \sqrt{(T_{em}/2)^2 - T_a T_{em}})}{R_a V + Y k T_{em}}$$

- k - uśredniony współczynnik wzmocnienia przekształtnika
 τ_o - opóźnienie przekształtnika
 m - czas zdwojenia regulatora prądu typu P-I
 m/V - współczynnik wzmocnienia regulatora prądu typu P-I,
 r - czas zdwojenia regulatora prędkości typu P-I,
 r/q - współczynnik wzmocnienia regulatora prędkości typu P-I,
 k_ω - współczynnik wzmocnienia regulatora prędkości typu P
 ω - prędkość kątowa układu napędowego
 R^ω - funkcja autokorelacji prędkości kątowej

- R^{xN1} - funkcja autokorelacji ciągu $\{x_i^{N1}\}$
 R^{xN2} - funkcja autokorelacji ciągu $\{x_i^{N2}\}$
 x - sygnał sterujący układu napędowego.

Grafy funkcyjne przyporządkowane poszczególnym strukturom układów napędowych zawierają krawędzie funkcyjne, które są określone odpowiednimi operacjami:

$$\text{INTEG: } y(t + \Delta t) = y(t_0) + \int_{t_0}^{t + \Delta t} x(u) du, p_1 = y(t_0)$$

$$\text{REALPL: } y(t + \Delta t) = y(t_0) + \int_{t_0}^{t + \Delta t} \frac{x(u) - y(u)}{p_1} du, p_2 = y(t_0)$$

$$\text{SUM: } y(t) = \sum_k \dot{x}_k(t)$$

$$\text{DELAY: } y(t) = x(t - p_1)$$

gdzie: t_0, p_1, p_2 - parametry operacji,
 y, x, u, t - zmienne krawędzi funkcyjnych.

Do obliczeń przyjęto układ napędowy o następujących danych liczbowych:

a) wielkości znamionowe silnika; $P_N = 220 \text{ kW}$, $U_N = 200 \text{ V}$,
 $I_N = 1090 \text{ A}$, $\omega_N = 62,9 \text{ s}^{-1}$, $M_N = 3750 \text{ Nm}$

b) pozostałe parametry układu;

$$R_a = 30,1 \text{ m} \quad , \quad L_a = 0,655 \text{ mH}, \quad T_a = 0,0217 \text{ s},$$

$$T_{em} = 0,242 \text{ s}, \quad c = 3,44 \text{ V} \cdot \text{s/rad}, \quad k = 40 \text{ V/V},$$

$$\tau_o = 1,665 \text{ ms}$$

c) współczynniki sprzężeń zwrotnych odpowiednio prądowego i prędkościowego

$$Y = 0,00368 \text{ V/A}, \quad k_{TG} = 1 \text{ V}\cdot\text{s/rad}$$

d) parametry regulatorów odpowiednio prądu i prędkości

$$m = 0,0241 \text{ s}, \quad V = 0,0628 \text{ V}\cdot\text{s/V}$$

$$r = 0,243 \text{ s}; \quad r = 2,43 \text{ s}, \quad q = 1 \text{ V}\cdot\text{s/V}$$

Dyspersja szumów w każdym przypadku wynosiła 0,8 V.

Obliczenia przeprowadzono na maszynie cyfrowej CYBER-72 w języku SESL, do którego dołączone zostały generatory NORMAL 1 i NORMAL 2 oraz podprogramy określające wartości średnie, wariacje i funkcje autokorelacji sygnałów wejściowego i wyjściowego dla danego układu.

Rezultaty obliczeń przedstawione zostały w formie wykresów ploterowych na rys. 5, 6, 7.

Rys. 5a przedstawia przebiegi sygnałów x^{N1} i odpowiadający mu przebieg prędkości kątowej ω układu napędowego z wariantu a).

Rys. 5b przebiegi x^{N2} i ω dla tego samego układu napędowego.

Rys. 5c i 5d przedstawiają odpowiednie funkcje autokorelacyjne przebiegów x^{N1} , ω oraz x^{N2} , ω , które przedstawione zostały na rys. 5a i 5b.

Rys. 6a przedstawia przebiegi sygnałów x^{N1} i odpowiadającego mu przebiegu prędkości kątowej ω układu napędowego z wariantu b). Rys. 6b obrazuje przebiegi x^{N2} i ω dla tej samej struktury układu napędowego.

Rys. 6c i 6d przedstawiają funkcje autokorelacyjne przebiegów x^{N1} , ω oraz x^{N2} , ω , które przedstawione są na rys. 6a i 6b.

Rys. 7a, b przedstawiają natomiast przebiegi x^{N1} i ω dla układu napędowego z wariantu c), dla dwóch różnych nastaw - parametrów regulatora prędkości (na rys. 7a $r = 0,243$; $q = 1$, na rys. 7b $r = 2,43$; $q = 1$). Nastawy te różnią się czasem zdwojenia regulatora prędkości.

Rys. 7c, d przedstawiają przebiegi x^{N2} i ω dla tego samego układu napędowego. Na rys. 7c nastawy regulatora prędkości wynoszą $r = 0,243$; $q = 1$, natomiast na rys. 7d $r = 2,43$, $q = 1$.

Rys. 7e, f przedstawiają funkcje autokorelacji przebiegów x^{N1} , z rysunków odpowiednio 7a i 7b.

W końcu rys. 7g, h reprezentują funkcje autokorelacji przebiegów x^{N2} , ω z rysunków odpowiednio 7c i 7d. Na wykresach funkcji autokorelacji zaznaczono wartości wariancji poszczególnych sygnałów. Wariancje te określone są bowiem wartościami funkcji $R(\tau)$ dla $\tau = 0$.

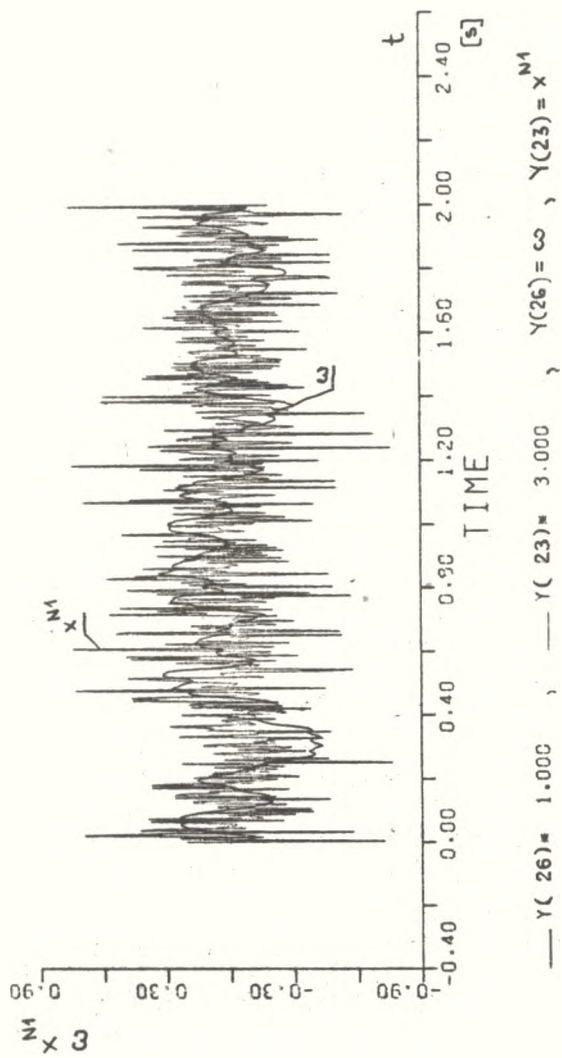
Z wyników obliczeniowych, uzyskanych za pomocą odpowiednich podprogramów w języku FORTRAN, określone zostały współczynniki filtracji rozpatrywanych struktur układów napędowych. Wartości tych współczynników (określonych jako stosunek dyspersji sygnału prędkości kątowej do dyspersji zakłócenia) zestawione zostały w tabeli 1.

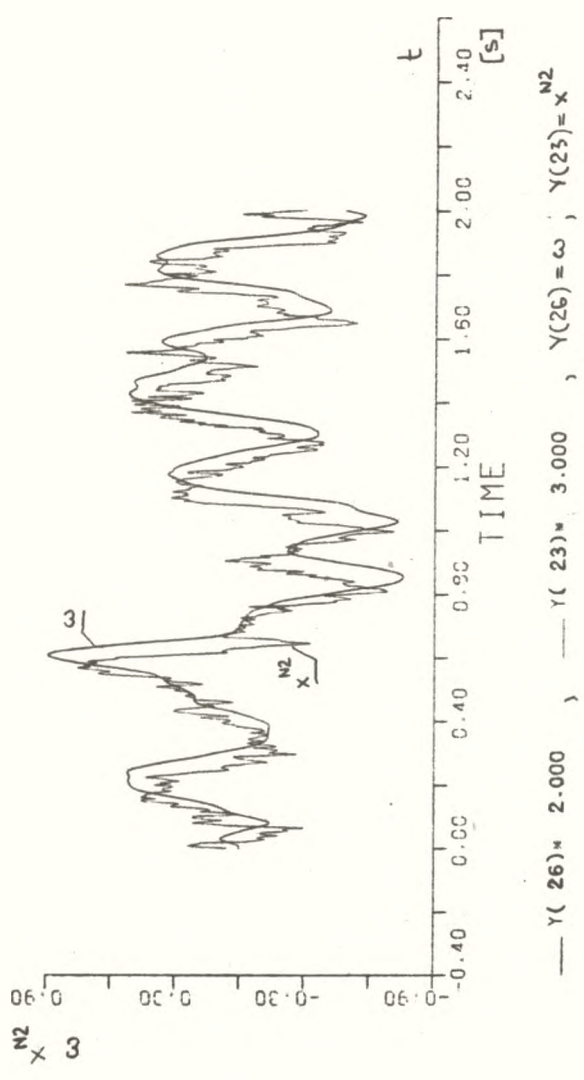
Tabela 1

Wartości współczynników filtracji K_f badanych struktur układów napędowych

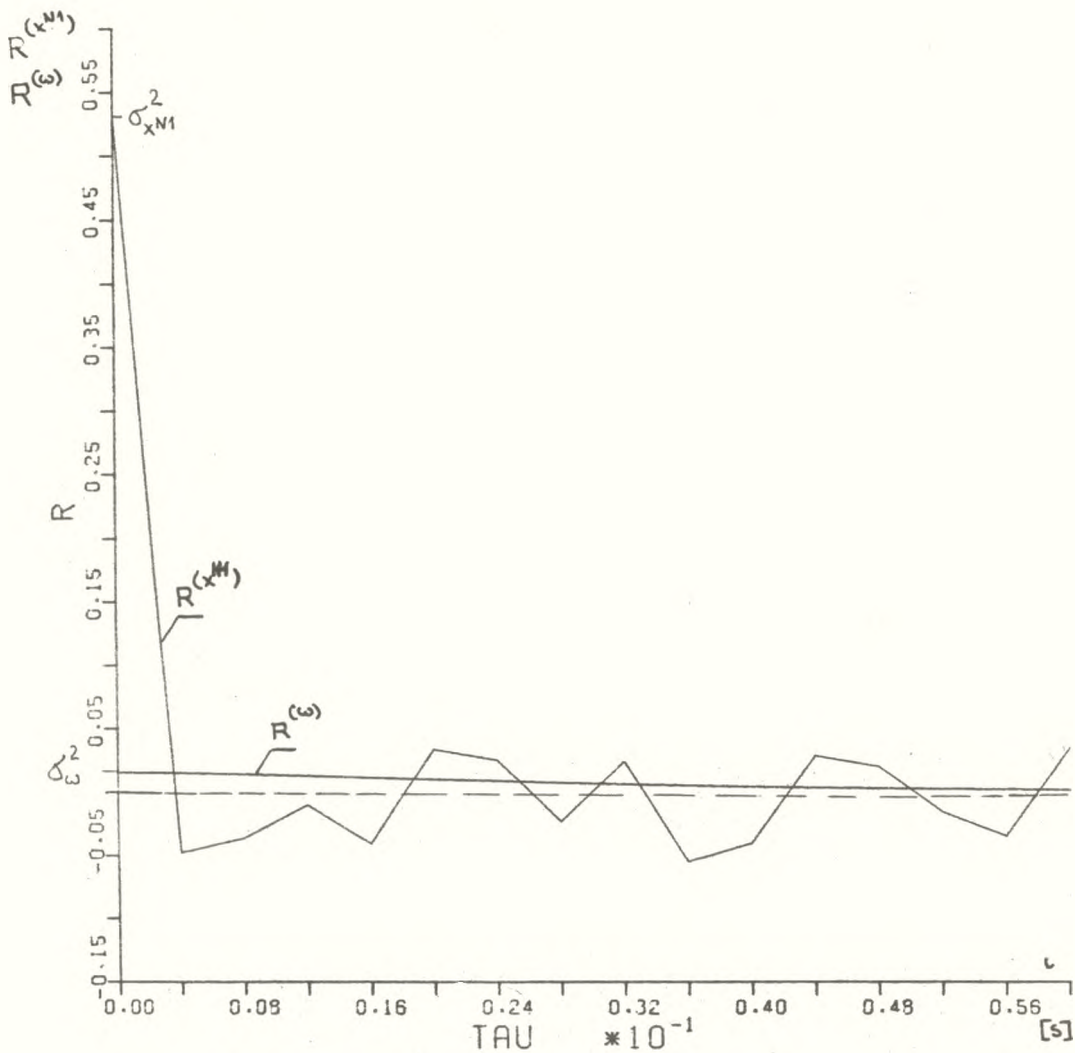
Układ napędowy o strukturze		Rodzaj zakłócenia	
		szum NORMAL 1	szum NORMAL 2
3a		5,75	1,19
3b		5,75	1,19
3c	$r = 0,243$ s	9,45	2,41
	$r = 2,43$ s	5,69	1,17

5a

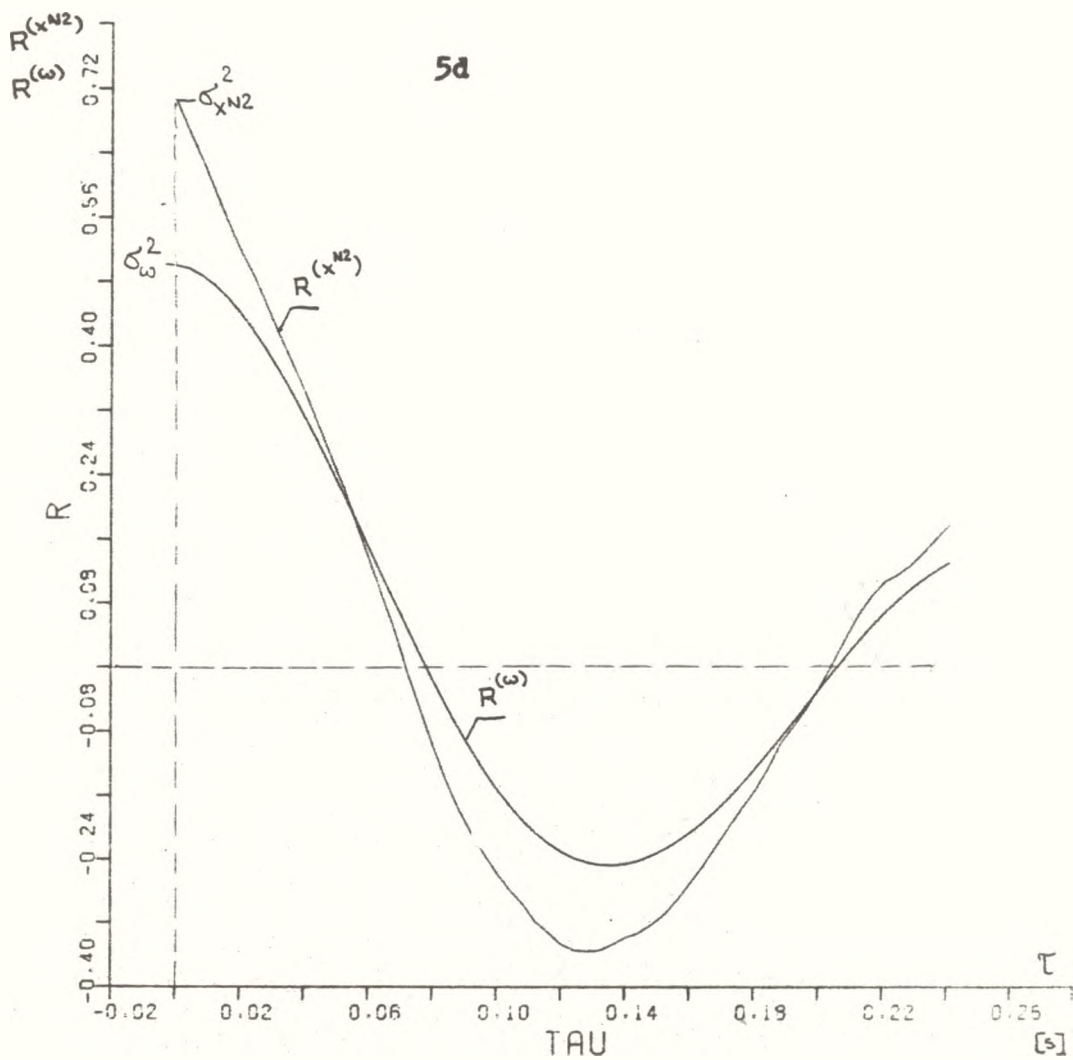




Rys. 5a, b Przebiegi szumów N_1 i X generowanych odpowiednio przez generatory NORMAL 1 i NORMAL 2 oraz odpowiadające im prędkości kątowe w układzie napędowym o strukturze 3a)

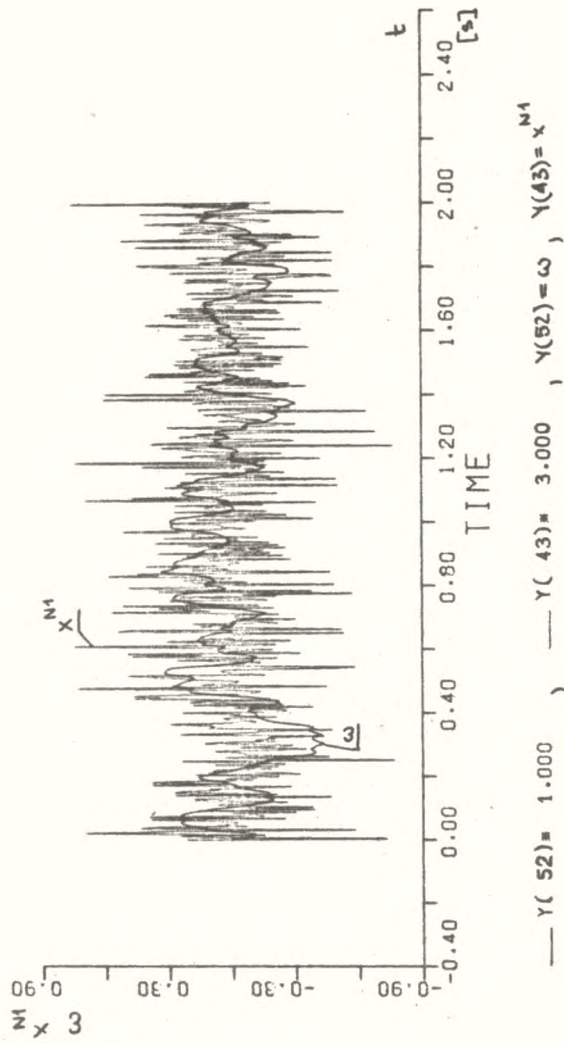


Rys. 5c. Funkcje autokorelacji przebiegów x^{N1} i ξ z rys. 5a

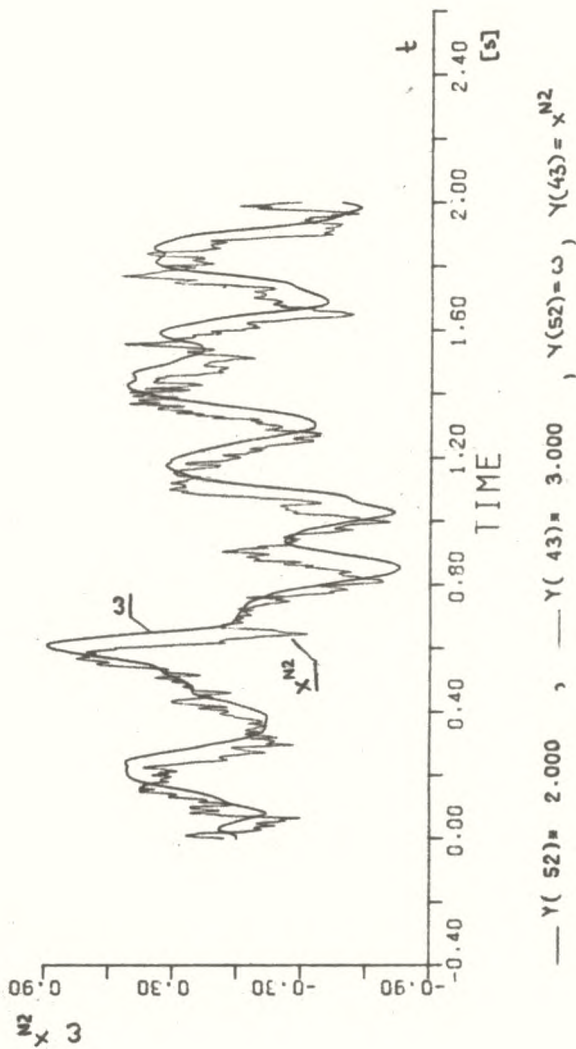


Ryc. 5d. Funkcje autokorelacji przebiegów x^{N2} i ω z rys. 5b

6a)

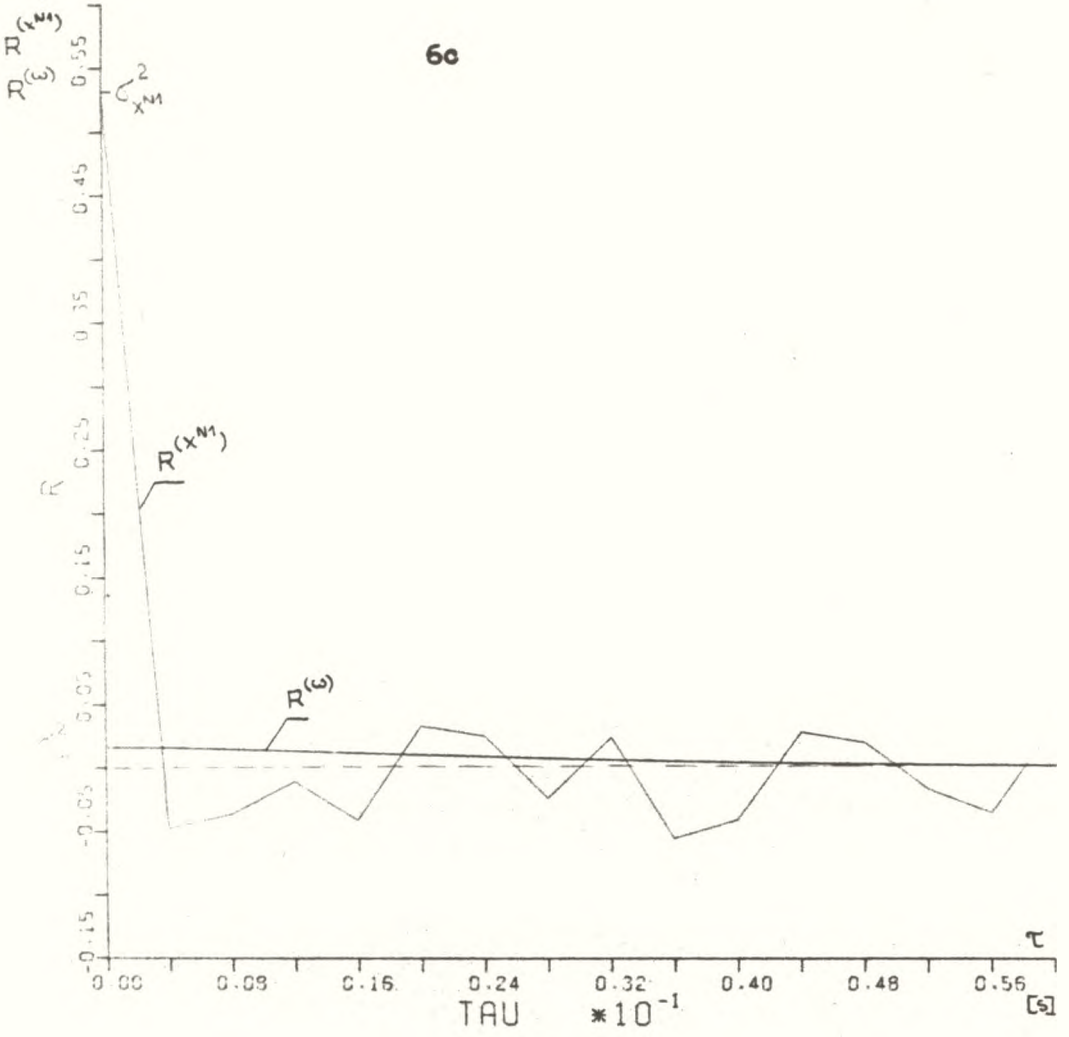


6b)

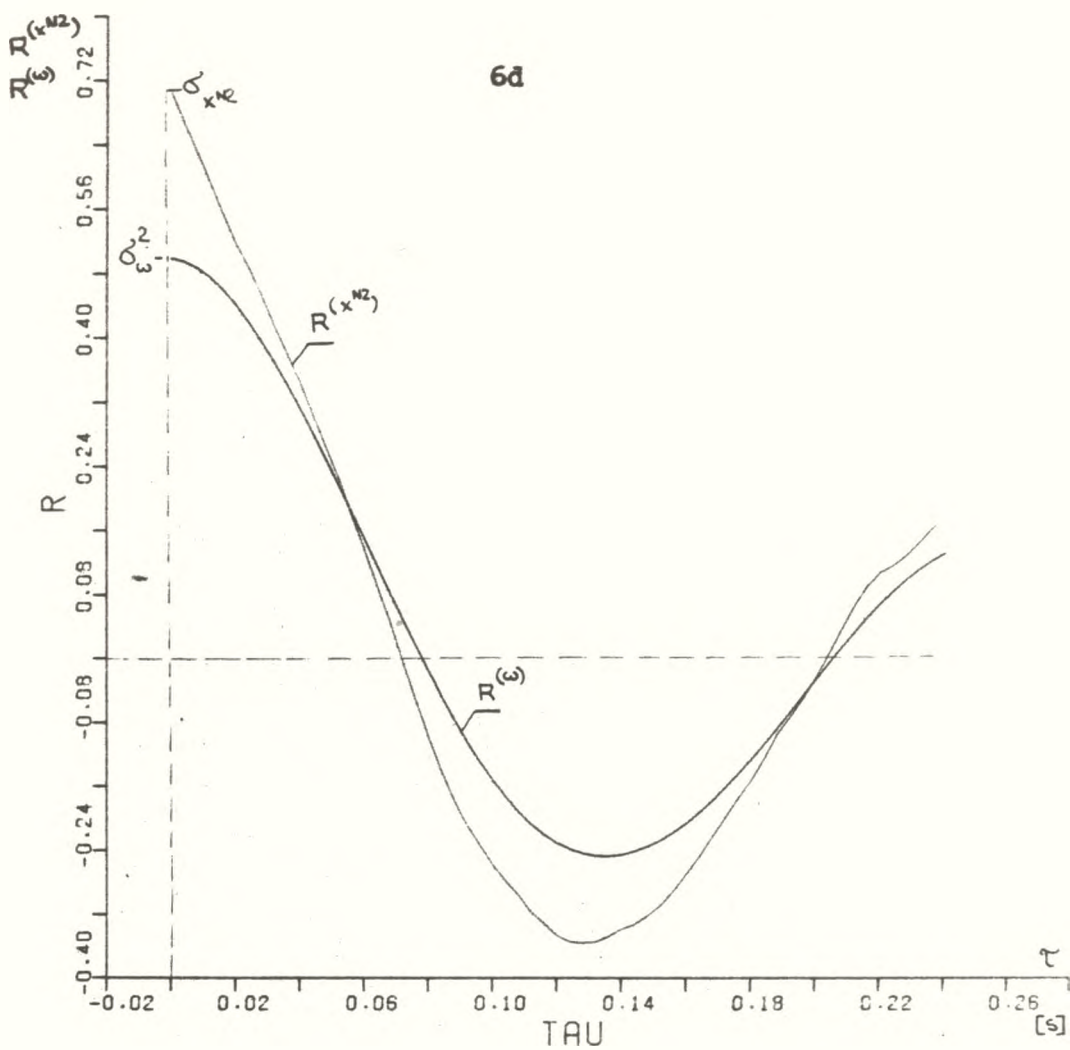


Rys. 6a, b. Przebiegi odpowiednio x^{N1} , ω oraz x^{N2} , ω dla układu napędowego o strukturze 3b)

6c

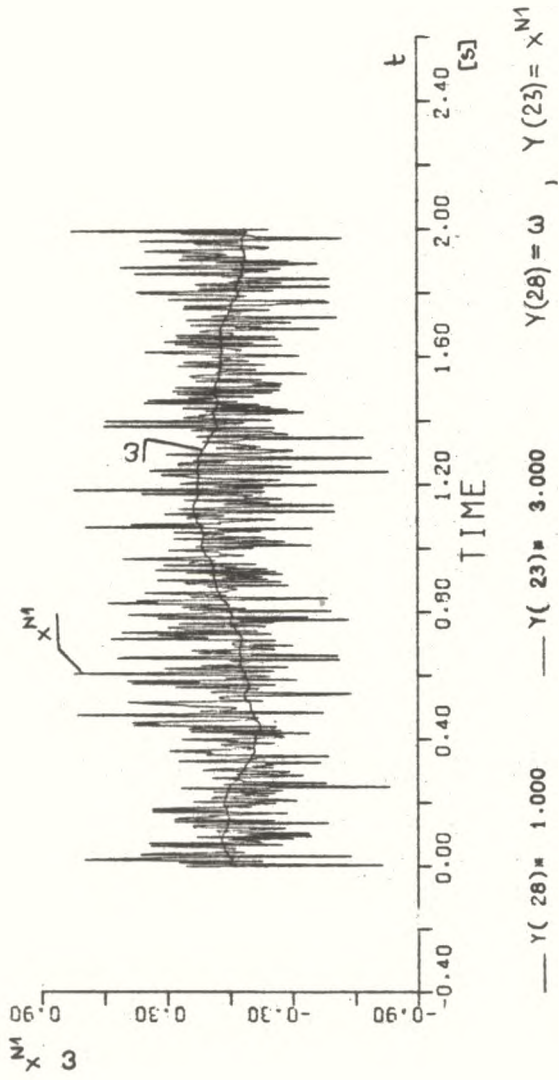


Rys. 6c. Funkcje autokorelacji przebiegów x^{N1} i ω z rys. 6a

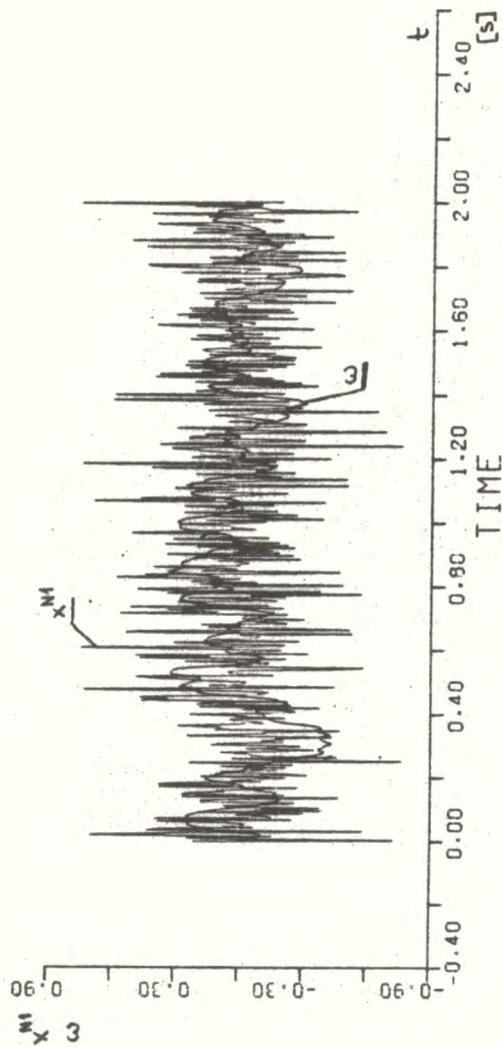


Rys. 6d. Funkcje autokorelacji przebiegów x^{N2} i ω z rys. 6t

70)



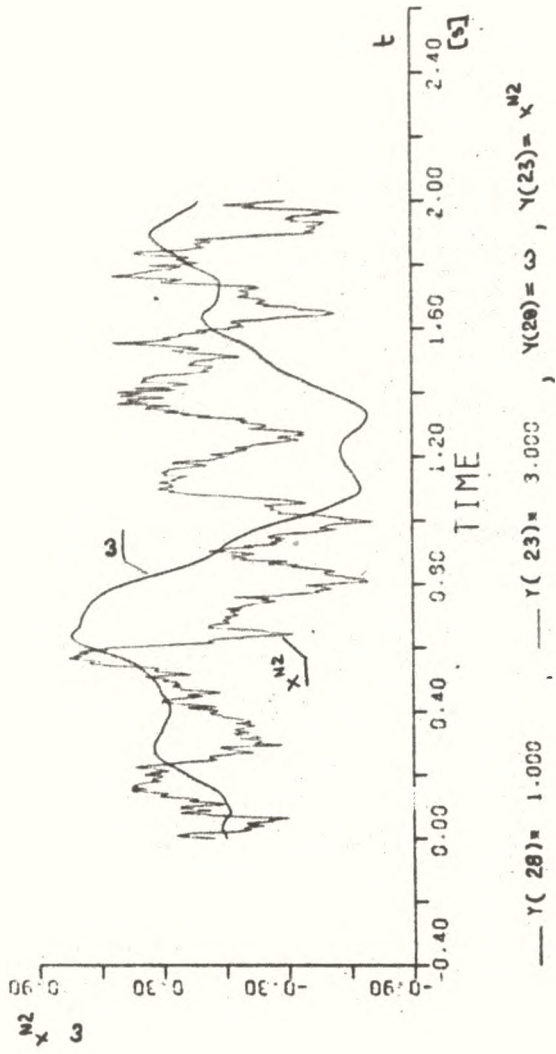
7b)



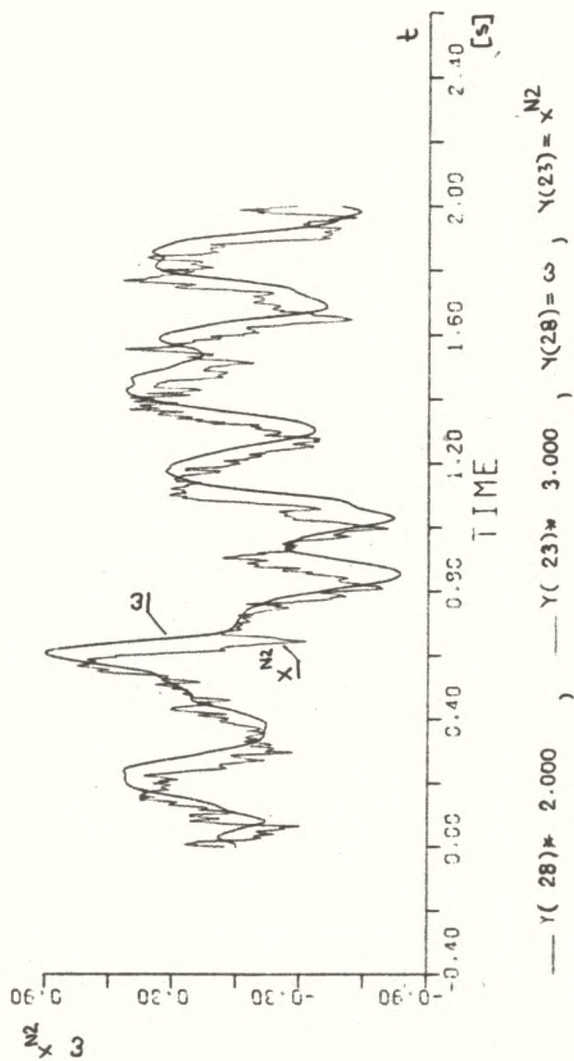
— $y(23) = 1.000$, — $y(23) = \omega$, $y(23) = x^{M1}$

Rys. 7a, b. Przebiegi x^{M1} , ω dla układu napędowego o strukturze 3c), dla dwóch różnych nastaw parametrów regulatora prędkości; na rys. 7a: $r = 0,243$; $q = 1$, na rys. 7b) $r = 2,43$; $q = 1$

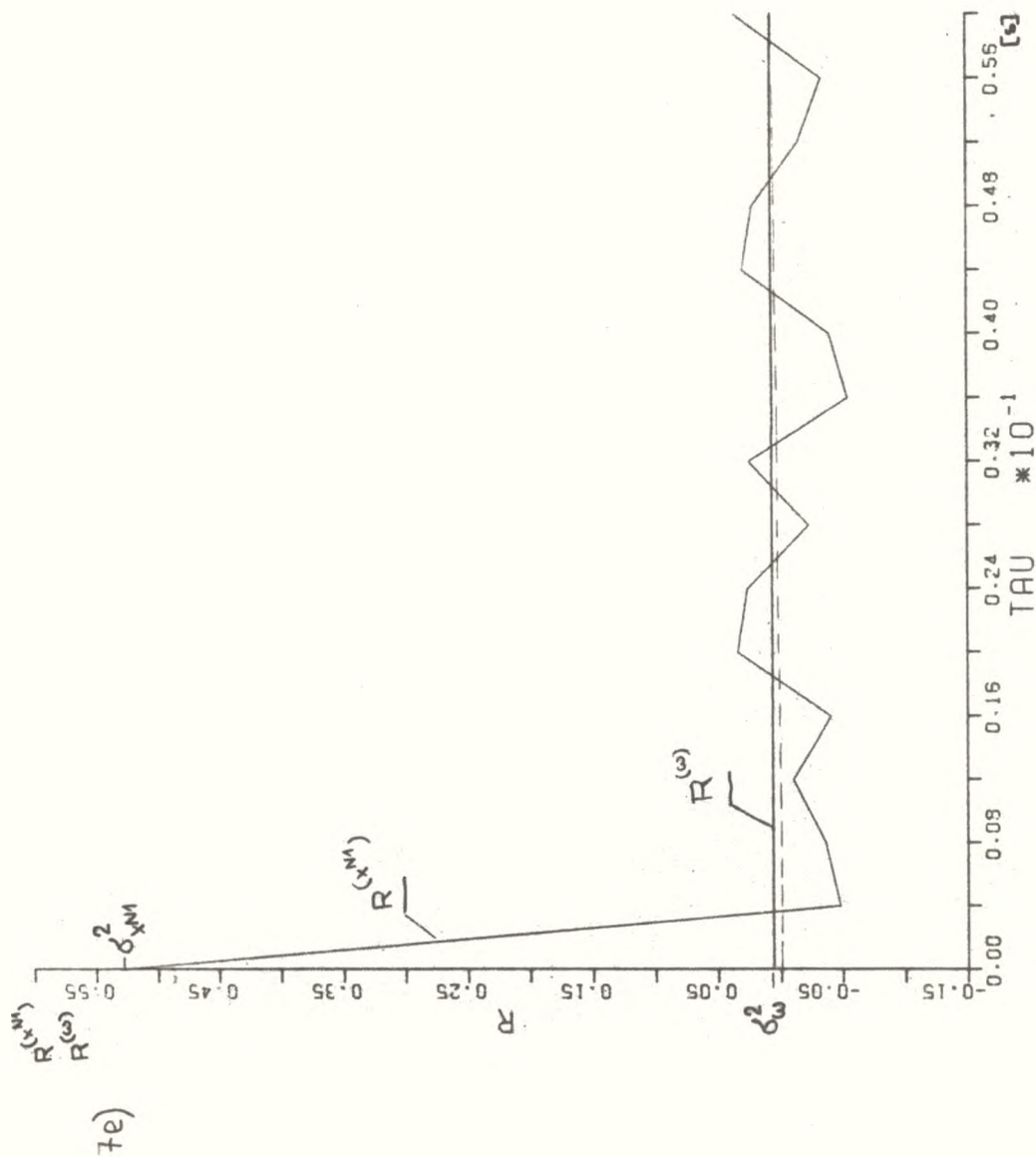
7c)

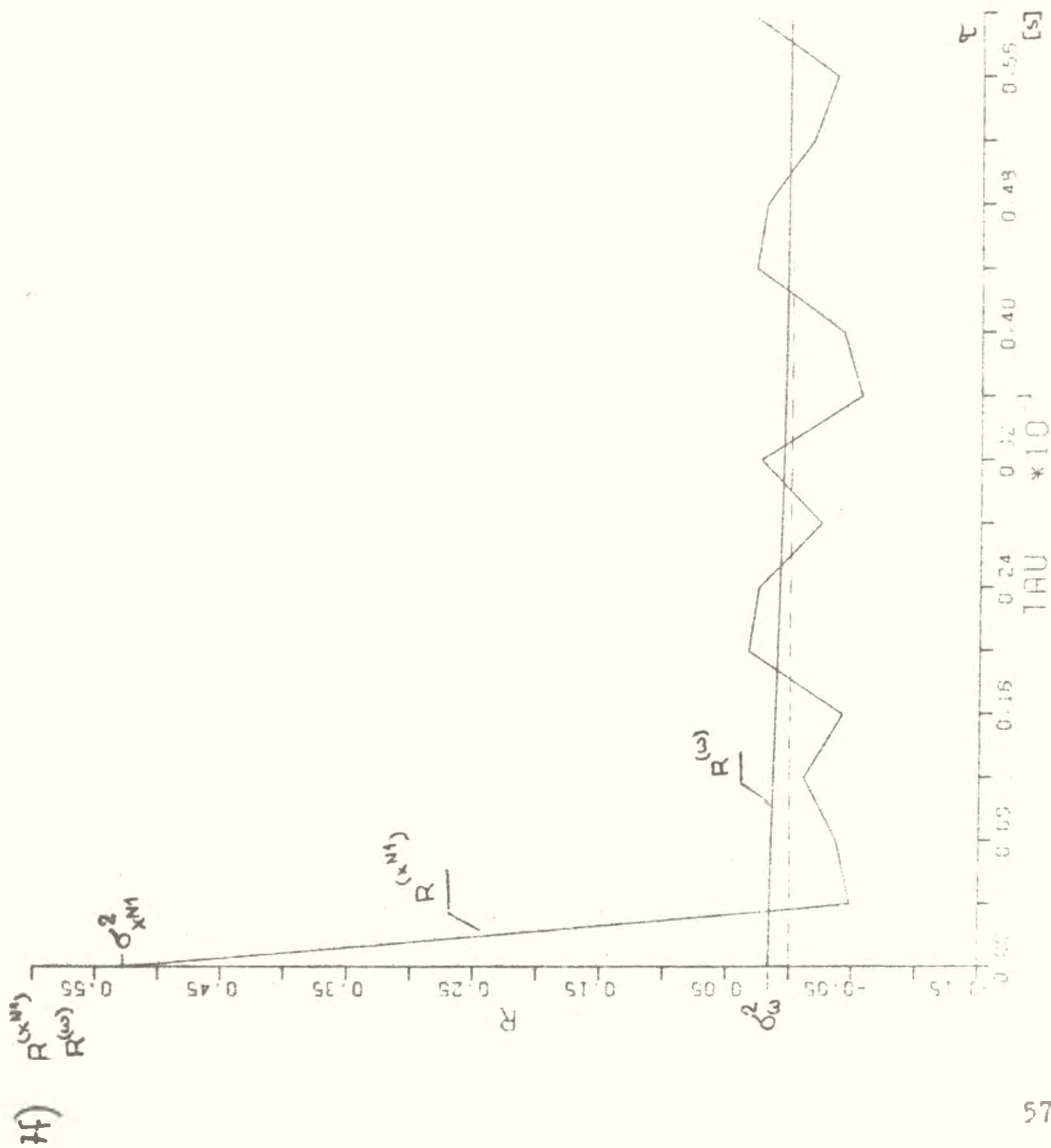


7d)

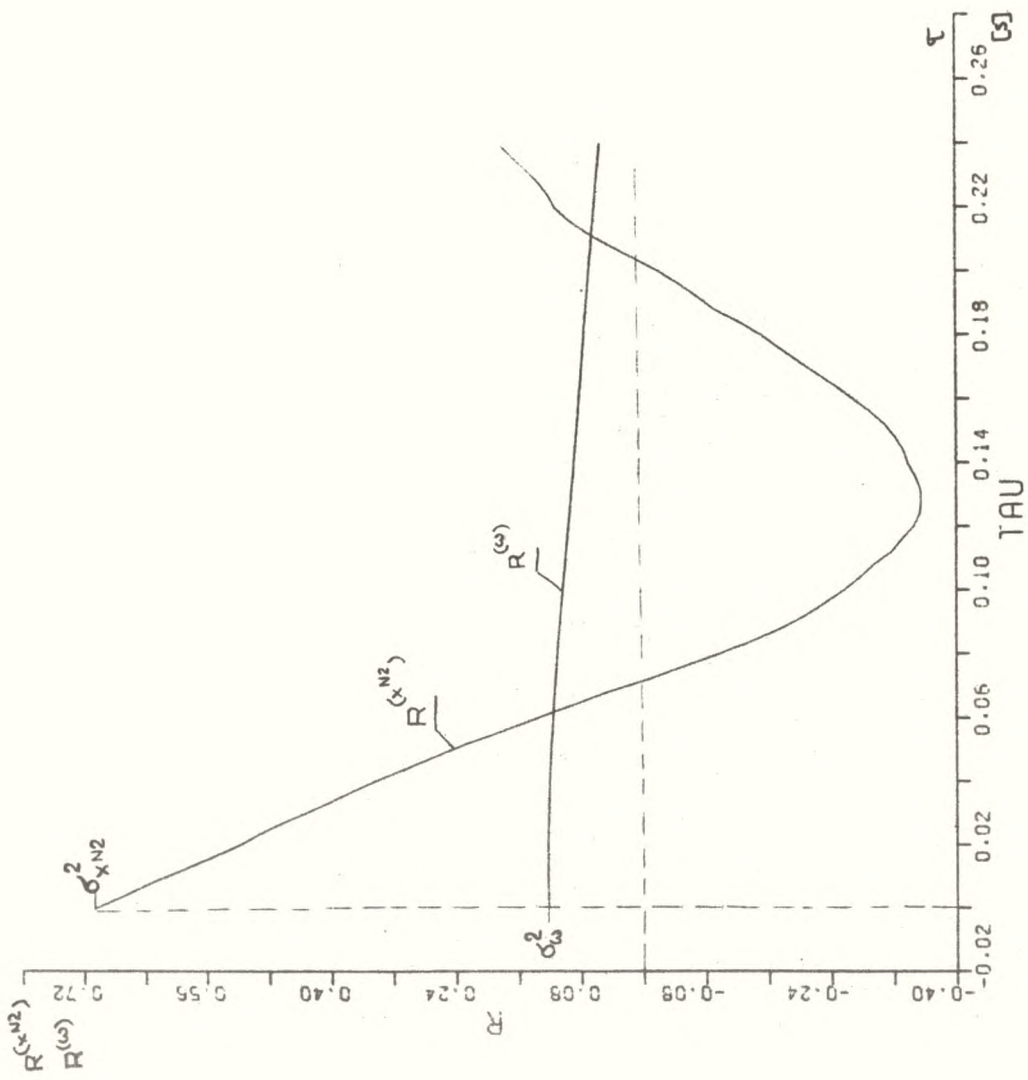


Rys. 7c, d. Przebiegi X i ω dla układu napędowego o strukturze 3c) dla dwóch różnych nastaw parametrów regulatora prędkości; na rys. 7c: $r = 0,243$; $q = 1$, na rys. 7b: $r = 2,43$; $q = 1$

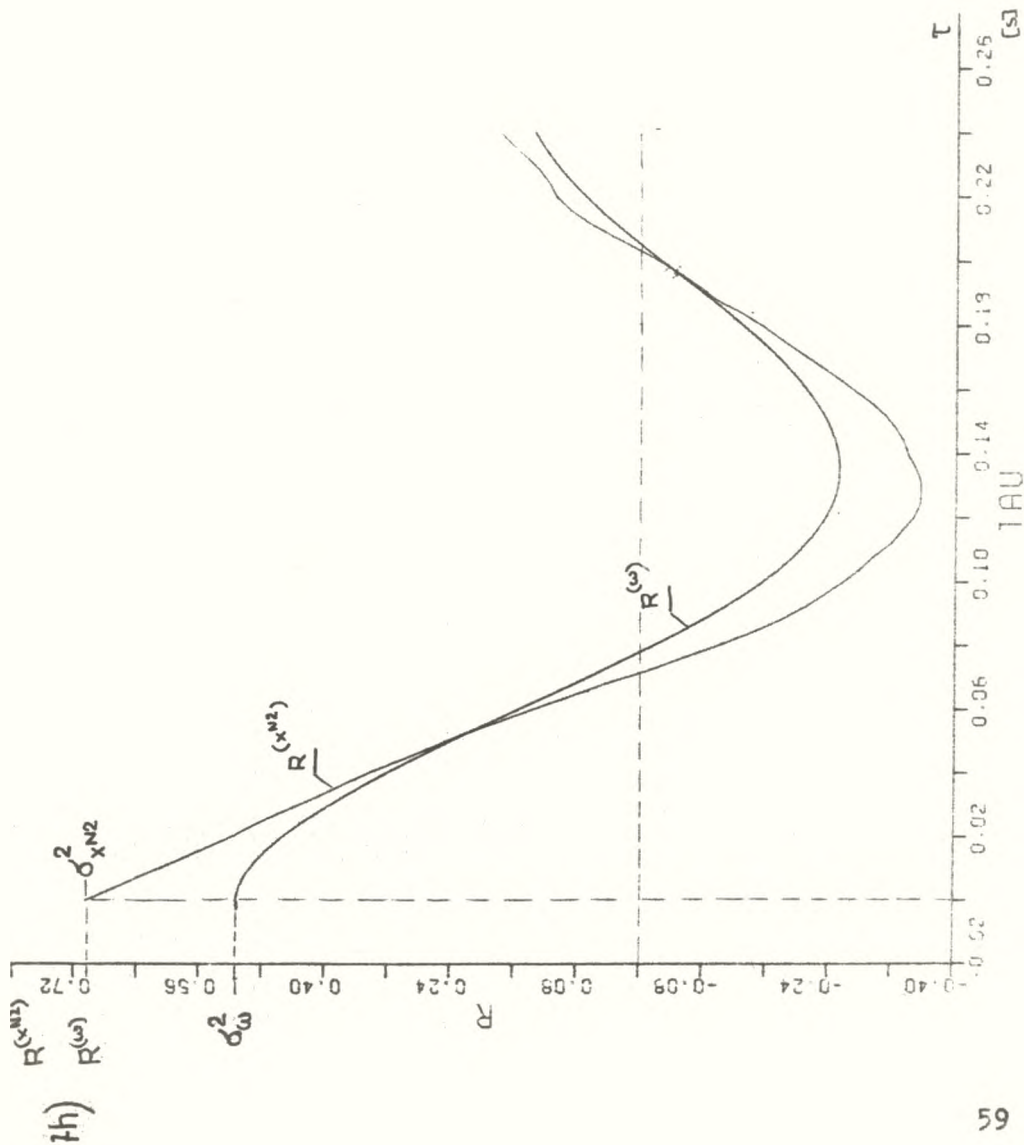




Rys. 7e, f. Funkcje autokorelacji przebiegów $x^{(1)}$, ω z rysunków odpowiednio 7a, b



3 79)



Rys. 7g,h. Funkcje autokorelacji przebiegów x^2 , ω z rytmików odpowiednio 7c,d

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono rezultaty symulacji cyfrowej (przy wykorzystaniu języka symulacyjnego SESL) - badania wpływu zakłóceń sygnału sterującego na sygnał wyjściowy trzech struktur układów napędowych sterujących wybranym silnikiem prądu stałego.

Pokazano - na podstawie obliczeń - funkcje autokorelacji zakłócenia i sygnału wyjściowego, które świadczą o tym, jak badane układy filtrują szkodliwe szумы pojawiające się w sygnale sterującym danego napędu (rys. 5 + 7).

Dla przebadanych struktur współczynniki filtracji K_f posiadają wartości relatywnie niewielkie ($1,17 \geq K_f \geq 9,45$). Są rozrzucone w niewielkim przedziale. Z punktu widzenia filtracji zakłóceń świadczy to niekorzystnie o własnościach tych układów. Własność tę można poprawić przez zastosowanie w układzie regulacji regulatora prędkości typu P-I (tab. 1, rys. 7a-h). Uwzględnienie w modelu przekształtnika czasu opóźnienia (struktura 3b) daje w praktyce obliczeniowej niezauważalną poprawę dokładności analizy.

Przeprowadzone badania symulacyjne nie posiadają cech ogólności, tym niemniej stanowią ilustrację problemu zakłóceń w układach sterowania napędem prądu stałego. Przebadane zostały bowiem modele idealnie zidentyfikowane, które nie uwzględniają wielu uwarunkowań występujących w napędzie rzeczywistym (zmiany parametrów napędu, występowanie innych zakłóceń od wyżej rozpatrywanych). Rozwinięcie tych problemów przyniosą dalsze badania zarówno symulacyjne, jak i przeprowadzone w układzie rzeczywistym. Uzyskane właściwości napędu prądu stałego w warunkach zakłóceń stochastycznych przeniosą się na inne typy układów napędowych z obwodami regulacji prądu i prędkości.

LITERATURA

- [1] Hasse L., Spiralski L.: Szумы elementów i układów elektronicznych. WNT, Warszawa 1981.
- [2] Huk J.: Generowanie realizacji gaussowskich funkcji losowych na maszynach cyfrowych. Rocznik PTM, Ser. III: Matematyka stosowana IX, 1977.
- [3] Jaracz K., Truszyński J.: Statystyczne pomiary zakłóceń stochastycznych w układzie napędowym. Sprawozd. z Prac Rady Naukowo-Konsultacyjnej Kombinatu Metalurg. Huta Katowice, grudzień 1979.
- [4] Truszyński J.: Odporność sygnałów cyfrowych na zakłócenia sieci elektroenergetycznej na przykładzie zakładu produkcyjnego (praca doktorska). AGH, Kraków 1980.
- [5] Otnes R.K., Enechson L.: Digital Time Analysis. John Wiley and Sons, Inc., New York 1972.
- [6] Leonhard W.: Control of Electrical Drives. Springer-Verlag-Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo 1985.

Zygfryd GŁOWACZ, Kazimierz JARACZ

Digital Analysis of the Influence of Stochastic Disturbances on the Angular Velocity in the D.C. Drive, Basing on the SESL Language

S u m m a r y

The paper presents the results of the simulation analysis of the stochastic disturbances on the angular velocity of a d.c. drive. The three main problems concerning the control systems were discussed.

- a) P - type speed controller and PI current controller,
- b) P - type speed controller and PI current controller and time delay of the thyristor rectifier,

c) with the PI speed controller and PI current controller.

The analysis was carried out basing on the SESL simulation language, with FORTRAN proceders generating the stochastic processes and proceders determining the probabilistic characteristics of control signal and angular velocity in these structures of driving systems. The coefficients of filtering systems of some control systems of drives was evaluated as well.