

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

66

WARSZAWA—POZNAN 1975

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW
MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1975

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 370+90 egz.	Oddano do składania 7 VIII 1974 r.
Ark. wyd. 14,75. Ark. druk. 11,375+1 wkl.	Podpisano do druku 17 II 1975 r.
Papier druk. sat. kl. V, 70 g	Druk ukończono w lutym 1975 r.
Nr zam. 577/43 F-17/1183.	Cena zł 45,-

DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

ZYGFRYD DOMACHOWSKI, ANDRZEJ MALINOWSKI, KONSTANTY PILECKI

Gdańsk

Badania modelowe układu regulacji mocy turbozespołu przy wymuszeniach stochastycznych

Część II. Optymalizacja parametrów regulatora PI mocy turbozespołu*

Tematem artykułu jest optymalizacja parametrów regulatora PI mocy turbozespołu, przy wymuszeniach stochastycznych, metodą modelowania, oraz porównanie układu regulacji optymalnego statycznie i układu optymalnego przy wymuszeniach zdeterminowanych.

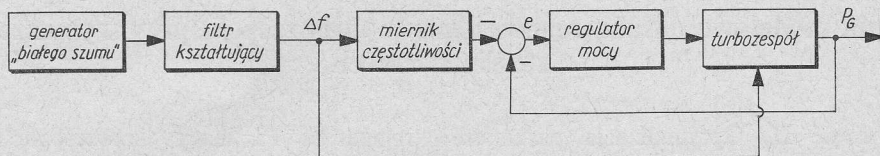
Niniejsza praca dotyczy badań modelowych, na elektronicznej maszynie analogowej, układu regulacji mocy turbozespołu, poddanego oddziaływaniu sygnału zmian częstotliwości w systemie elektroenergetycznym. Oznacza to, że taki turbozespół bierze udział w regulacji pierwotnej systemu elektroenergetycznego; zmiany częstotliwości stanowią sygnał sterujący mocy turbozespołu. Sygnał zmian częstotliwości w systemie, typu stochastycznego, symulowano za pomocą generatora „białego szumu” z filtrem dolnoprzepasowym [1, 4]. Dla kilku wybranych wariantów funkcji korelacji częstotliwości w systemie elektroenergetycznym wykonano optymalizację układu regulacji mocy turbozespołu, według kryterium minimum błędu średniokwadratowego. Dla tak określonego układu optymalnego rejestrowano odpowiedzi skokowe — na sygnał zmiany obciążenia systemu elektroenergetycznego — mocy turbozespołu, uchybu mocy, otwarcia zaworów regulacyjnych turbiny, częstotliwości systemu elektroenergetycznego. Wymienione przebiegi przejściowe porównano z otrzymanymi w pracy [9], dla układu regulacji optymalnego w sensie kryterium minimum całki z wartości bezwzględnej uchybu mocy turbozespołu, przy skokowej zmianie obciążenia systemu elektroenergetycznego; porównano również wartości całek kryterialnych.

Przyjmujemy schemat blokowy współpracy turbozespołu z systemem elektroenergetycznym, w sensie udziału turbozespołu w regulacji pierwotnej częstotliwości w systemie, jak na rysunku 1 w pracy [9]. (Analogiczny do cytowanego rysunku jest rysunek 1 w niniejszej pracy. Różni się tylko tym, że system elektroenergetyczny został zastąpiony przez zestaw symulujący zmiany częstotliwości w systemie.) Odpowiada to pominięciu wpływu zmian mocy turbozespołu wynikających z regulacji pierwotnej na zmiany częstotliwości w syste-

* Praca wykonana w ramach problemu resortowego PAN-19, grupa tematyczna 6.

mie (w szczególności na parametry funkcji korelacji zmian częstotliwości). Pominęto w tym schemacie sygnały zakłóceń oddziałujące na system elektroenergetyczny oraz zakłócenia wewnętrzne turbozespołu*).

Sygnał zmiany częstotliwości w systemie elektroenergetycznym, Δf – patrz rysunek 1 w pracy [9], jest pewnym procesem stochastycznym. W pozycjach [5 - 8] literatury przedstawiono rezultaty badań dotyczących jego charakterystyk statystycznych. W omawianych tu badaniach, stochastyczny sygnał zmian częstotliwości w systemie symulowano, korzystając



Rys. 1. Schemat blokowy zestawu badawczego

z generatora „białego szumu” dolnopasmowego [1, 4], podając sygnał „białego szumu” na filtr kształtujący o odpowiedniej transmitancji, modelowany na maszynie analogowej. Schemat blokowy zestawu badawczego przedstawia rysunek 1; P_G oznacza odniesioną do mocy nominalnej zmianę mocy turbozespołu. Z wyjątkiem generatora „białego szumu” dolnopasmowego, pozostałe elementy przedstawionego na rysunku 1 układu regulacji modelowano na elektronicznej maszynie analogowej.

1. Opis modelu badanego układu regulacji

1.1. Model turbozespołu

Przyjmujemy, że obiektem regulowanym jest turbozespoł o mocy 200 MW z krajowego systemu elektroenergetycznego; jego liniowy model jest szczegółowo przedstawiony w pracy [9]. Badania przeprowadzono przy $k_W=0,3$; ta wartość współczynnika mocy części WP turbiny odpowiada nominalnemu obciążeniu turbozespołu.

1.2. Model regulatora mocy

Na podstawie, między innymi, rezultatów badań przedstawionych w pracy [9], weźmiemy pod uwagę wyłącznie regulator mocy turbozespołu typu PI (proporcjonalno-całkujący). Jego transmitancję oznaczmy $G_R=k_R(1+1/T_i \cdot s)$.

*) Jeden z Recenzentów wyraża wątpliwość do co słuszności przyjętego modelu. Uważa, że przyjęty model nadaje się do studium wstępnego. Według Recenzenta, bardziej adekwatnym modelem byłoby przyjęcie wymuszeń pierwotnych w formie zmian obciążeń w systemie elektroenergetycznym, zamiast wahań częstotliwości (przyp. Red.).

1.3. Model miernika częstotliwości

Założymy, jak w pracy [9], że miernik zmian częstotliwości w systemie elektroenergetycznym jest bezinercyjny (o transmitancji $G_M = 1/\delta$); przyjęto w badaniach $\delta = 0,04$.

1.4. Model stochastycznego sygnału zmian częstotliwości w systemie elektroenergetycznym

W sygnale zmian częstotliwości systemu elektroenergetycznego można wyodrębnić kilka głównych składowych harmonicznym [5 - 8]. Ponadto, sygnał ten jest niestacjonarny; parametry jego funkcji korelacji zmieniają się w czasie [5 - 8]. Przyjmujemy, że funkcję korelacji sygnału zmian częstotliwości w systemie elektroenergetycznym można aproksymować następującym szeregiem skończonym funkcji:

$$F_{\varphi\varphi}(\tau) = \sum_{i=1}^m \sigma_i e^{-\alpha_i |\tau|} \cos \Omega_i \tau + \sum_{j=1}^n \sigma_j e^{-\alpha_j |\tau|}, \quad (1)$$

jak w pracy [2]. Taka funkcja korelacji odpowiada pewnemu sygnałowi φ będącemu sumą statystycznie niezależnych sygnałów φ_i, φ_j

$$\varphi = \sum_{i=1}^m \varphi_i + \sum_{j=1}^n \varphi_j, \quad (2)$$

których funkcje korelacji są postaci

$$F_{\varphi_i\varphi_i}(\tau) = \sigma_i e^{-\alpha_i |\tau|} \cos \Omega_i \tau, \quad (3a)$$

$$F_{\varphi_j\varphi_j}(\tau) = \sigma_j e^{-\alpha_j |\tau|}. \quad (3b)$$

Wobec tego, że rozpatrywany model układu regulacji jest liniowy, wartość średnia kwadratu błędu sygnału regulowanego w tym układzie ma własność addytywności względem sygnałów φ_i, φ_j (patrz również [2], punkt 2.3). W związku z tym, przeprowadzono badania oddzielnie dla kilku wybranych wariantów oscylacyjno-wykładniczej funkcji korelacji sygnału zmian częstotliwości postaci (3a), oraz kilku wariantów wykładniczej funkcji — postaci (3b).

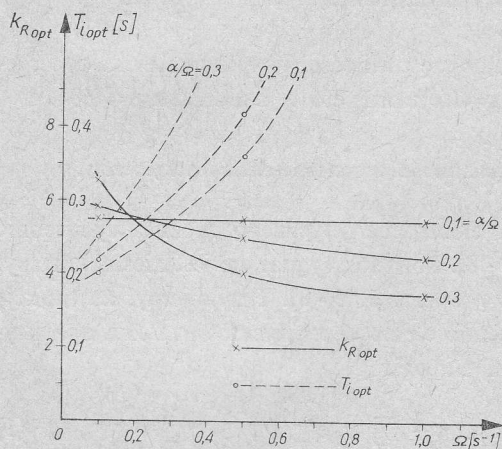
2. Optymalizacja statystyczna regulatora mocy turbosespołu

Określono zależność optymalnych — w sensie kryterium Phillipsa — parametrów regulatora PI mocy turbosespołu i minimalnego błędu średniokwadratowego od parametrów funkcji korelacji zmian częstotliwości w systemie elektroenergetycznym. Wykonano pomiary dla kilku wybranych wariantów obydwu wymienionych typów unormowanej funkcji korelacji.

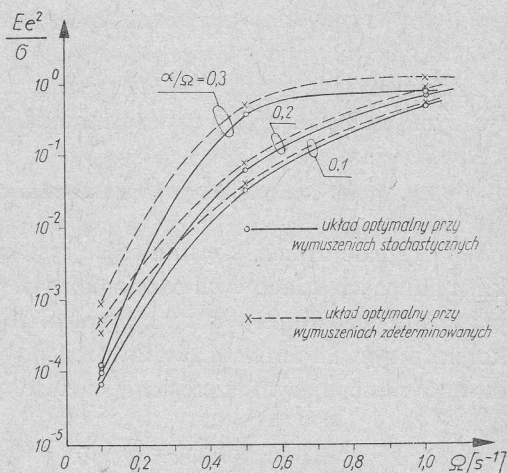
2.1. Optymalne parametry regulatora i minimalny błąd średniokwadratowy

a. Oscylacyjno-wykładnicza funkcja korelacji sygnału sterującego

Przeprowadzono badania dla 9 wariantów funkcji korelacji sygnału sterującego — jej zapis przedstawia wyrażenie (3a) — odpowiednio do parametrów $\Omega, \alpha/\Omega$ zawartych w tabeli 1.



Rys. 2. Statystycznie optymalne parametry regulatora PI mocy turbos zespołu w przypadku oscylacyjno-wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego



Rys. 3. Statystyczny wskaźnik jakości układu regulacji mocy turbos zespołu w przypadku oscylacyjno-wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego

Zakres wartości parametrów obrano na podstawie wyników pomiarów przedstawionych w pracach [5 - 8]. Przy tym, w porównaniu z wartościami występującymi w cytowanych badaniach jest on znacznie poszerzony. Proces stochastyczny o takiej funkcji korelacji modelowano, podając sygnał „białego szumu” dolnopasmowego na filtr kształtujący.

W Dodatku I w pracy [1] podano transmitancję filtru kształtującego; omówiono metodę doboru jego parametrów; przedstawiono przykład zmierzonej funkcji korelacji sygnału za tym filtrem, porównano ją z założonym teoretycznym przebiegiem.

Rysunek 2 przedstawia przebieg optymalnych parametrów regulatora $k_{R opt}$, $T_{i opt}$, w zależności od parametrów funkcji korelacji Ω , α/Ω . Na rysunku 3 pokazano (linie ciągłe) przebieg minimalnej wartości średniej kwadratu uchybu sygnału regulowanego Ee^2 odniesionej do wariancji sygnału sterującego σ . Zarówno ze wzrostem częstotliwości zmian Ω sygnału sterującego, jak ze wzrostem α (wówczas zmniejsza się tzw. czas korelacji sygnału sterującego), zwiększa się wskaźnik jakości Ee^2/σ rozpatrywanego układu regulacji. Przy tym, wyraźna zależność wskaźnika jakości od α występuje głównie wewnątrz badanego pasma częstotliwości, $0,1 \text{ s}^{-1} \leq \Omega \leq 1,0 \text{ s}^{-1}$.

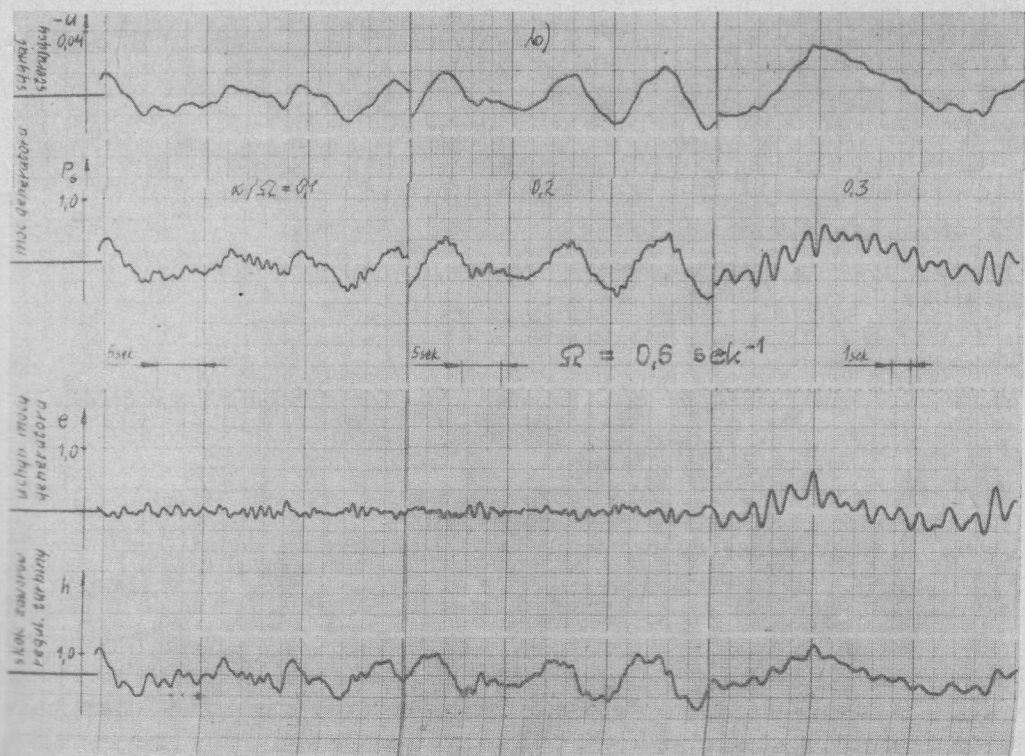
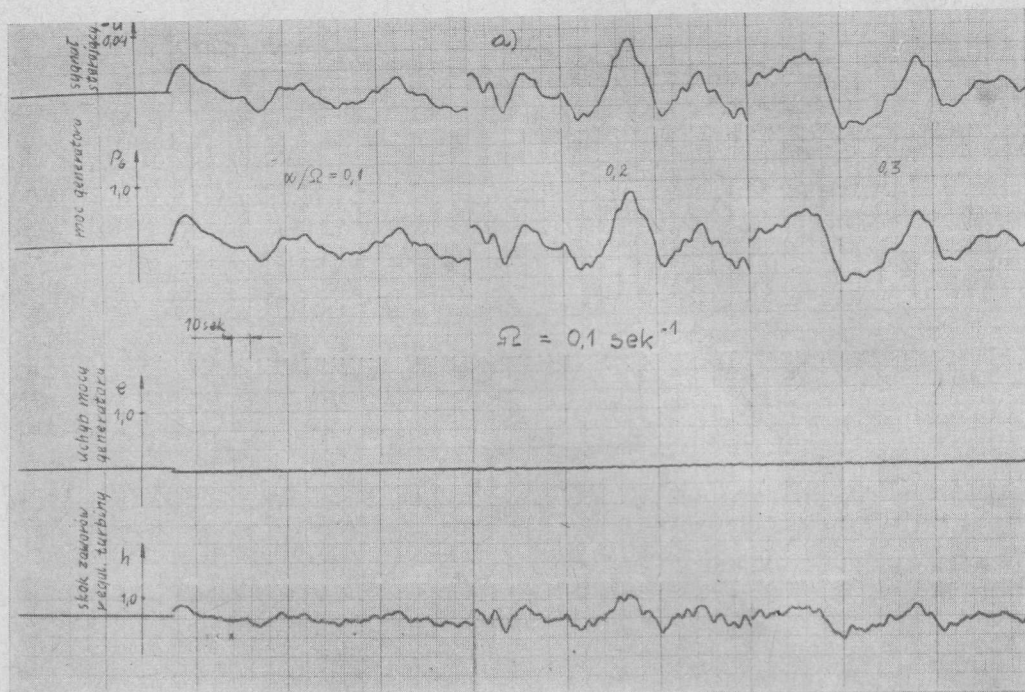
Poniżej wartości $\Omega = 0,1 \text{ s}^{-1}$ sygnał sterujący jest wystarczająco wolny, aby układ regulacji z regulatorem PI mógł nadążać, bez względu na wartość czasu korelacji tego sygnału.

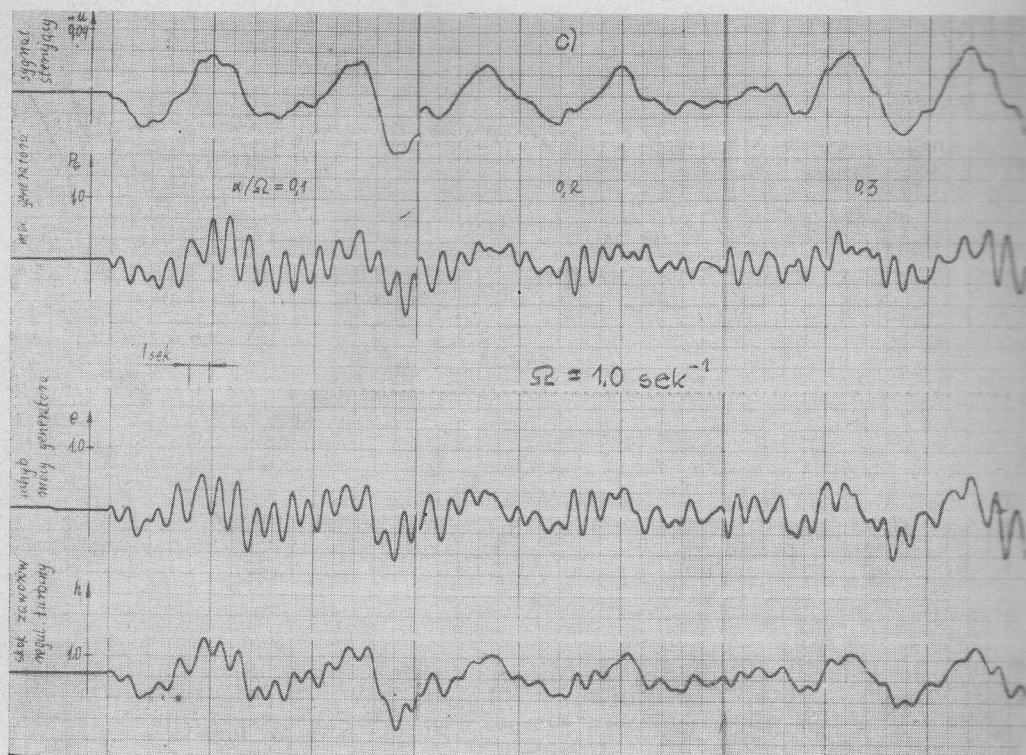
Tabela 1

$\Omega \text{ [s}^{-1}\text{]}$	0,1	0,5	1,0
α/Ω	0,1	0,2	0,3

Tabela 2

$\alpha \text{ [s}^{-1}\text{]}$	0,01	0,03	0,1	0,3	1,0
----------------------------------	------	------	-----	-----	-----



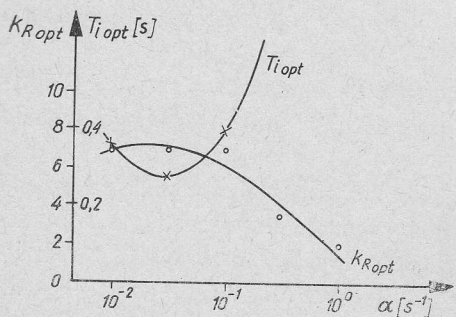


Rys. 4. Przebiegi przejściowe w statystycznie optymalnym układzie regulacji, w przypadku oscylacyjno-wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego

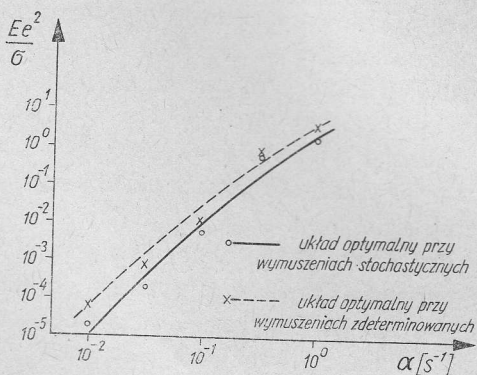
Wówczas uchyb sygnału regulowanego jest bardzo mały, praktycznie niedostrzegalny w porównaniu z sygnałem sterującym — patrz rysunek 4a. (Poniżej $\Omega = 0,1 \text{ s}^{-1}$ występują w badaniach trudności modelowania — ograniczenie skali czasu maszynowego ze względu na najmniejszą stałą czasową w obiekcie. Ponadto, pomiar uchybu średniokwadratowego jest mało dokładny.)

Powyżej $\Omega = 0,5 \text{ s}^{-1}$ regulator PI staje się nieprzydatny w rozpatrywanym układzie regulacji; układ nie nadąża za zmianami sygnału sterującego. Wówczas uchyb sygnału regulowanego ma przebieg zbliżony do przebiegu sygnału sterującego, tym bardziej im większe Ω — porównaj rysunki 4b, 4c. Wariancja uchybu (wartość średnia kwadratu uchybu) Ee^2 może nawet być w pewnym pasmie częstotliwości Ω większa od wariancji sygnału sterującego σ ; gdy $\Omega \rightarrow \infty$, to $Ee^2 \rightarrow \sigma$. Powyżej $\Omega = 0,5 \text{ s}^{-1}$ optymalny regulator jest praktycznie członem typu proporcjonalnego P; optymalna stała całkowania regulatora zmierza do nieskończoności ($T_{i \text{ opt}} \rightarrow \infty$) — patrz rysunek 2.

W rozpatrywanym obszarze parametrów funkcji korelacji, ze zmianą Ω zmienia się głównie stała całkowania regulatora $T_{i \text{ opt}}$, natomiast współczynnik wzmacnienia $k_{R \text{ opt}}$ nieznacznie, patrz rysunek 2. Ze wzrostem α (wówczas maleje czas korelacji) współczynnik wzmacnienia regulatora $k_{R \text{ opt}}$ rośnie przy wolnych przebiegach sygnału sterującego, a maleje przy szybkich; stała całkowania $T_{i \text{ opt}}$ jest tym większa, im większe α .



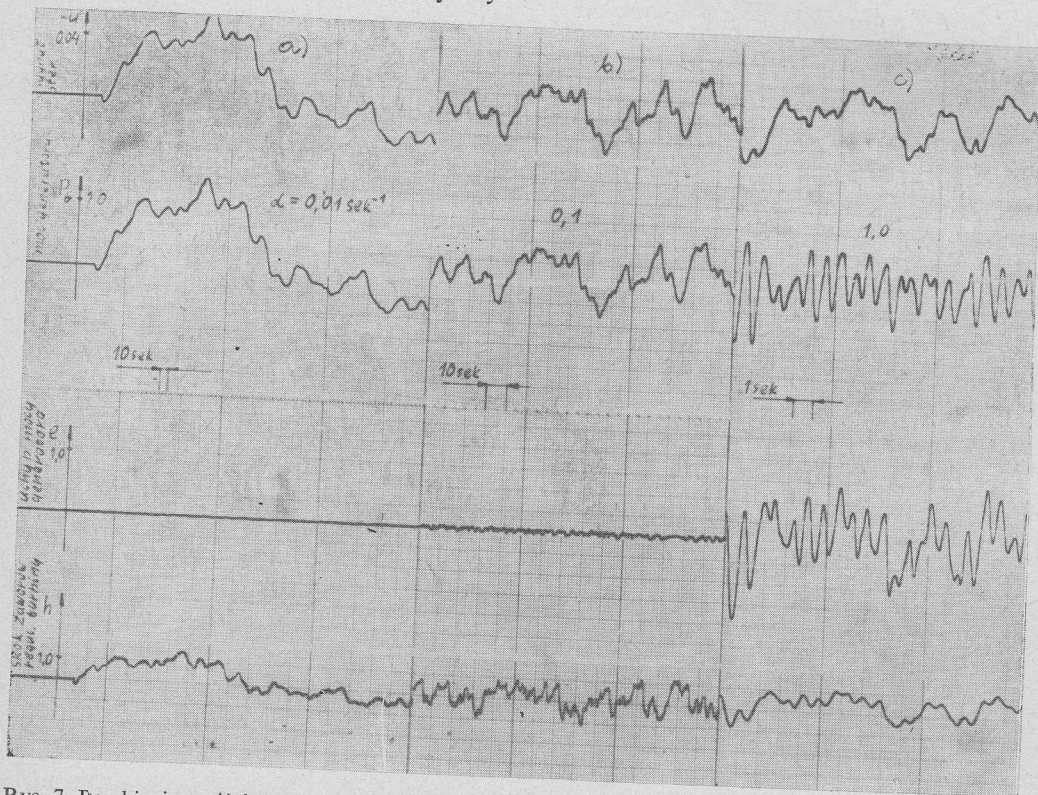
Rys. 5. Statystycznie optymalne parametry regulatora w przypadku wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego



Rys. 6. Statystyczny wskaźnik jakości układu regulacji mocy turbospołu w przypadku wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego

b. Wykładnicza funkcja korelacji sygnału sterującego

W Dodatku II w pracy [1] przedstawiono transmitancję filtra kształtującego; omówiono dobór jego parametrów oraz porównano, na przykładzie, wyniki pomiarów funkcji korelacji z założonym jej przebiegiem teoretycznym.



Rys. 7. Przebiegi przejściowe w statystycznie optymalnym układzie regulacji, w przypadku wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego

Wykonano optymalizację regulatora PI dla 5 wariantów funkcji korelacji rozważanego typu — zapisanej wzorem (3b) — stosownie do wartości parametru α przedstawionych w tabeli 2. Zakres tych wartości obrano na podstawie wyników pomiarów przedstawionych w pracach [5 - 8].

Rysunek 5 pokazuje zależność optymalnych parametrów regulatora, a rysunek 6 optymalnego wskaźnika jakości układu regulacji od parametru α funkcji korelacji sygnału sterującego.

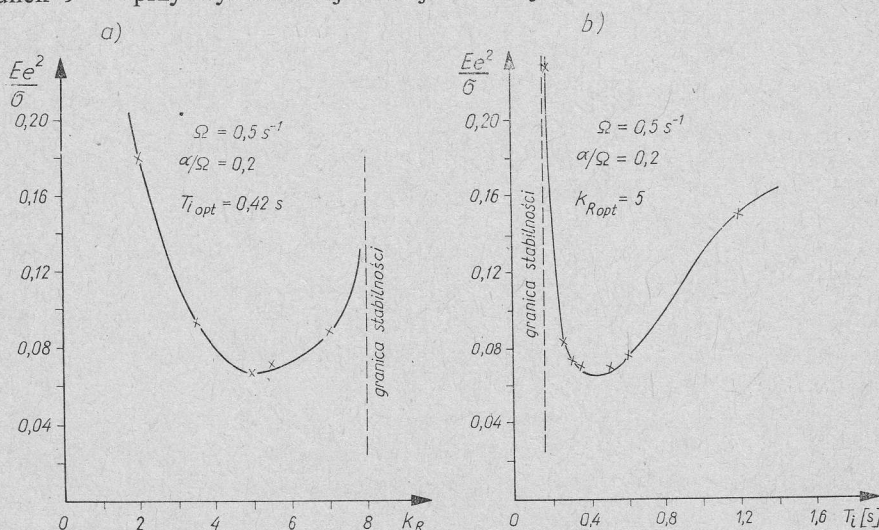
Przy $\alpha > 0,1 \text{ s}^{-1}$ regulator PI nie spełnia wymagań w rozpatrywanym układzie regulacji — wariancja uchybu regulowanego jest bliska wariancji sygnału sterującego (rys. 6), przebiegi dynamiczne wykazują dużą amplitudę drgań (patrz rys. 7c). Przy $\alpha \geq 0,3 \text{ s}^{-1}$ optymalna stała całkowania regulatora PI dąży do nieskończoności ($T_{i \text{ opt}} \rightarrow \infty$) — patrz rysunek 5; optymalny regulator jest więc wówczas typu proporcjonalnego.

Przy małych α ($< 0,1 \text{ s}^{-1}$), układ regulacji ma wystarczające własności nadążne, zarówno pod względem wariancji uchybu regulowanego (rys. 6), jak przebiegów dynamicznych — rysunki 7a i 7b.

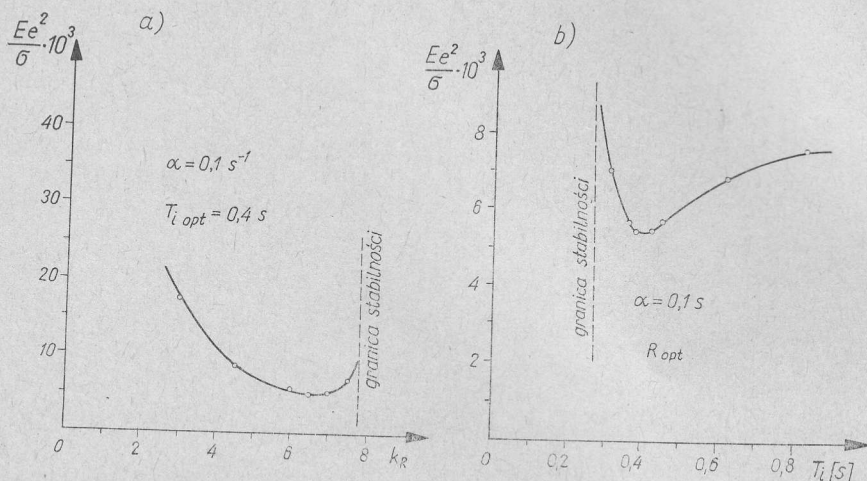
Optymalny współczynnik wzmocnienia regulatora $k_{R \text{ opt}}$ maleje ze wzrostem α ; optymalna stała całkowania $T_{i \text{ opt}}$ maleje przy $\alpha \leq 0,03 \text{ s}^{-1}$, a następnie rośnie.

2.2. Wrażliwość wskaźnika jakości na zmiany parametrów regulatora

W otoczeniu punktu optymalnego, wskaźnik jakości układu regulacji jest wrażliwy przede wszystkim na zmiany stałej całkowania regulatora T_i , zwłaszcza przy jej zmniejszaniu, ze względu na mały zapas stabilności optymalnego układu regulacji. Z tego samego powodu, wskaźnik jakości wzrasta szybko gdy współczynnik wzmocnienia regulatora k_R rośnie. Rysunek 8 ilustruje przykładowo zmiany wskaźnika jakości regulacji, ze względu na parametry regulatora, przy oscylacyjno-wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego, a rysunek 9 — przy wykładniczej funkcji korelacji.



Rys. 8. Wrażliwość statystycznego wskaźnika jakości układu regulacji, ze względu na parametry regulatora, przy oscylacyjno-wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego



Rys. 9. Wrażliwość statystycznego wskaźnika jakości układu regulacji przy wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego

3. Porównanie optymalizacji przy wymuszeniach stochastycznych i optymalizacji przy wymuszeniach zdeterminowanych

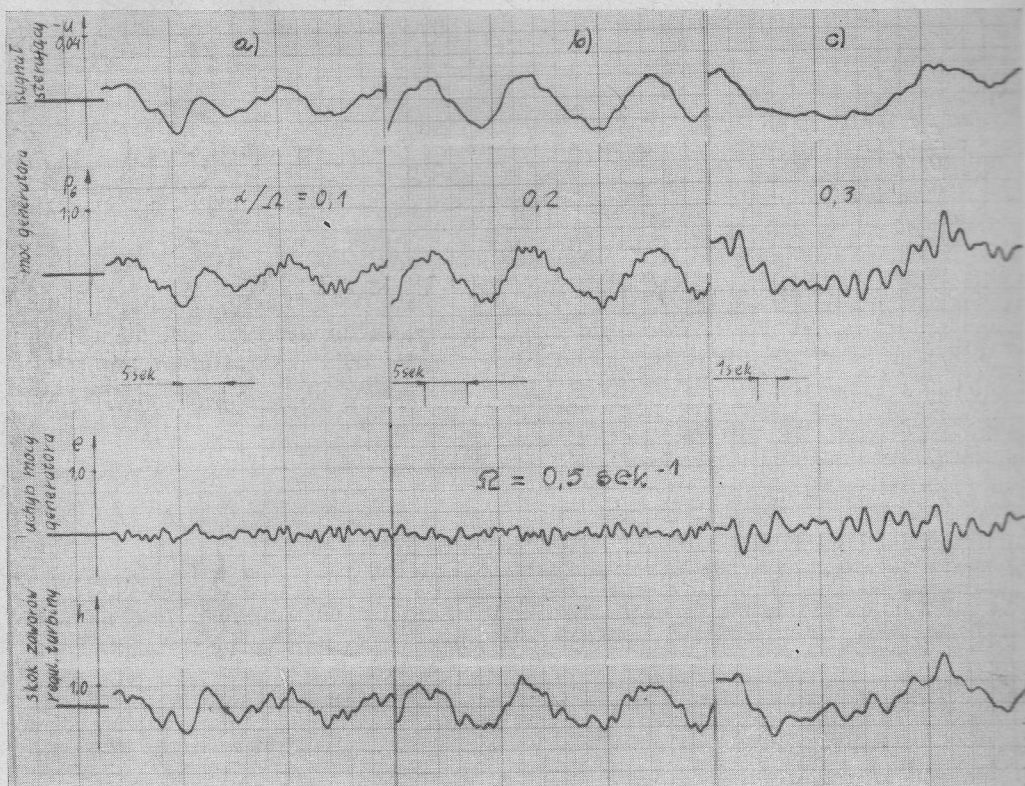
W pracy [9] określono optymalne parametry regulatora PI mocy turbospołu przy skoku mocy P_s w systemie elektroenergetycznym (patrz rysunek 1 w pracy [9]), przyjmując jako kryterium całkę z wartości bezwzględnej uchybu mocy turbospołu. Przy $\delta=0,04$ i $k_w=0,3$, optymalna transmitancja regulatora PI, ze względu na wymienione wymuszenie, ma postać

$$G_R = 4,5(1 + 1/0,37 \text{ s}). \quad (4)$$

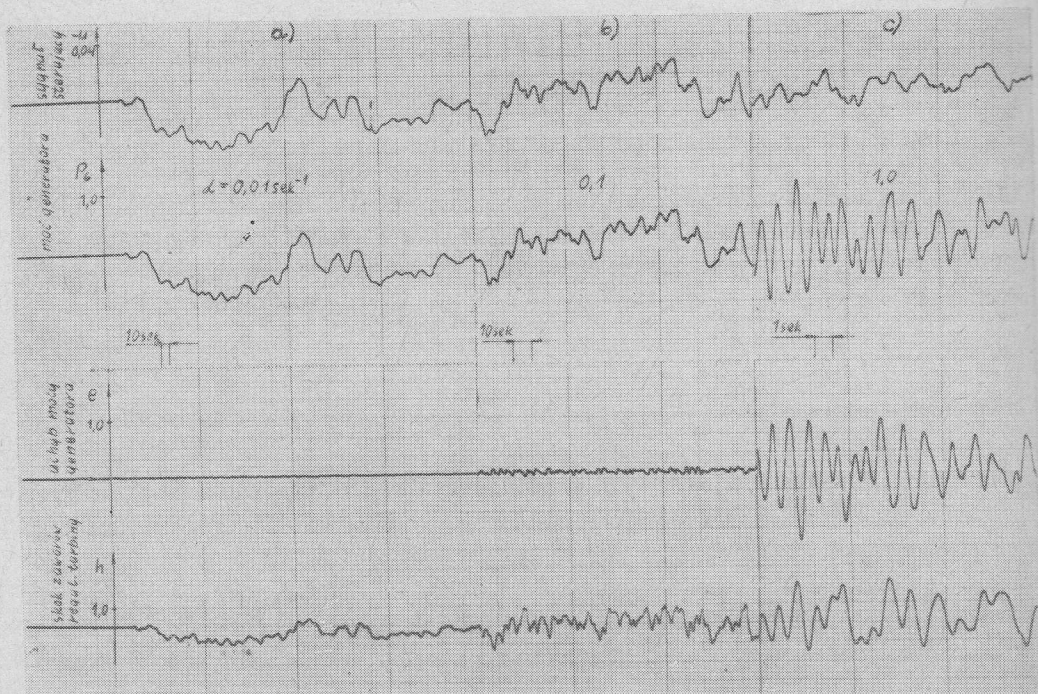
Dla porównania parametrów regulatora z optymalnymi, określono wskaźniki dla układu regulacji mocy z regulatorem (4) w warunkach wymuszeń stochastycznych. W dalszym ciągu układy regulacji optymalne przy wymuszeniach stochastycznych oceniono z punktu widzenia wymuszeń skokowych. Porównano też przebiegi dynamiczne.

3.1. Porównanie wskaźnika jakości (wariancji uchybu regulowanego) przy wymuszeniach stochastycznych

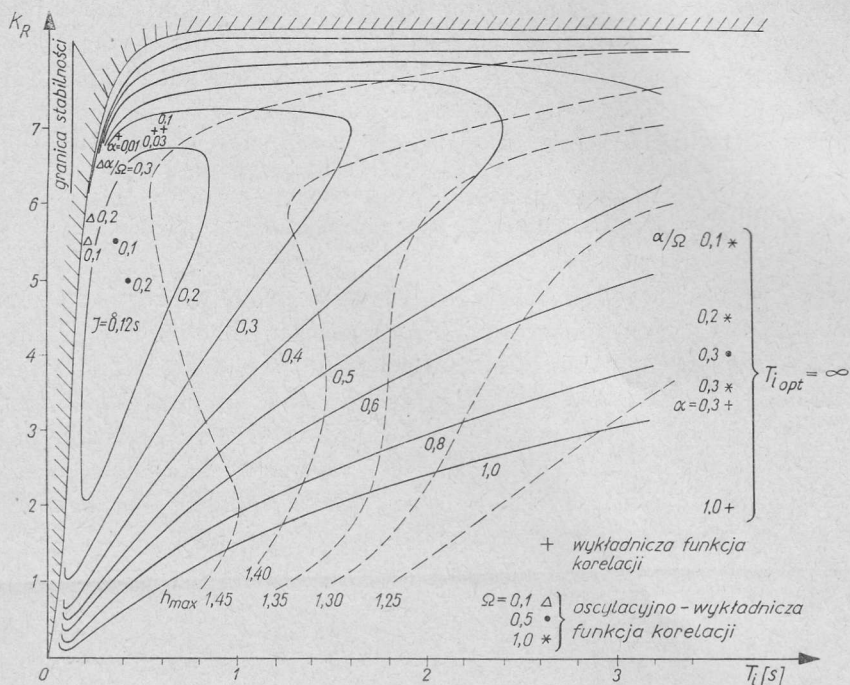
Na rysunkach 3 i 6 naniesiono wykresy wskaźnika jakości układu regulacji optymalnego przy wymuszeniach zdeterminowanych, poddanego oddziaływaniu sygnału sterującego stochastycznego. Wskaźnik jakości układu regulacji z regulatorem o transmitancji (4) zmienia się podobnie, ze względu na parametry funkcji korelacji sygnału sterującego, jak wskaźnik jakości układu optymalnego. Jakkolwiek kilkakrotnie większy od optymalnej wartości, to jest jednak również mały, gdy optymalna wartość jest mała. Przebiegi dynamiczne w obydwu układach są podobne — porównaj rysunki 10 i 4b, 11 i 7.



Rys. 10. Przebiegi przejściowe w optymalnym przy wymuszeniach zdeterminowanych układzie regulacji, w przypadku oscylacyjno-wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego



Rys. 11. Przebiegi przejściowe w optymalnym przy wymuszeniach zdeterminowanych układzie regulacji, w przypadku wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego



Rys. 12. Wskaźnik jakości J oraz przesterowanie zaworów regulacyjnych turbiny $h_{\max}$ przy skokowej zmianie mocy w systemie elektroenergetycznym

3.2. Porównanie wskaźnika jakości (całki z wartości bezwzględnej uchybu regulowanego) przy wymuszeniach skokowych

Rysunek 12 przedstawia, we współrzędnych K_R , T_i , pole krzywych stałego wskaźnika jakości układu regulacji (całki z wartości bezwzględnej uchybu regulowanego), przy skokowej zmianie bilansu mocy w systemie elektroenergetycznym, dla aperiodycznego modelu systemu [9]. Naniesiono na tym rysunku również granicę stabilności rozważanego układu regulacji oraz krzywe stałych przesterowań zaworów regulacyjnych turbiny — $h_{\max}$. Zaznaczono punkty odpowiadające optymalnym regulatorom przy wymuszeniach stochastycznych, dla wymienionych wyżej wariantów funkcji korelacji sygnału sterującego.

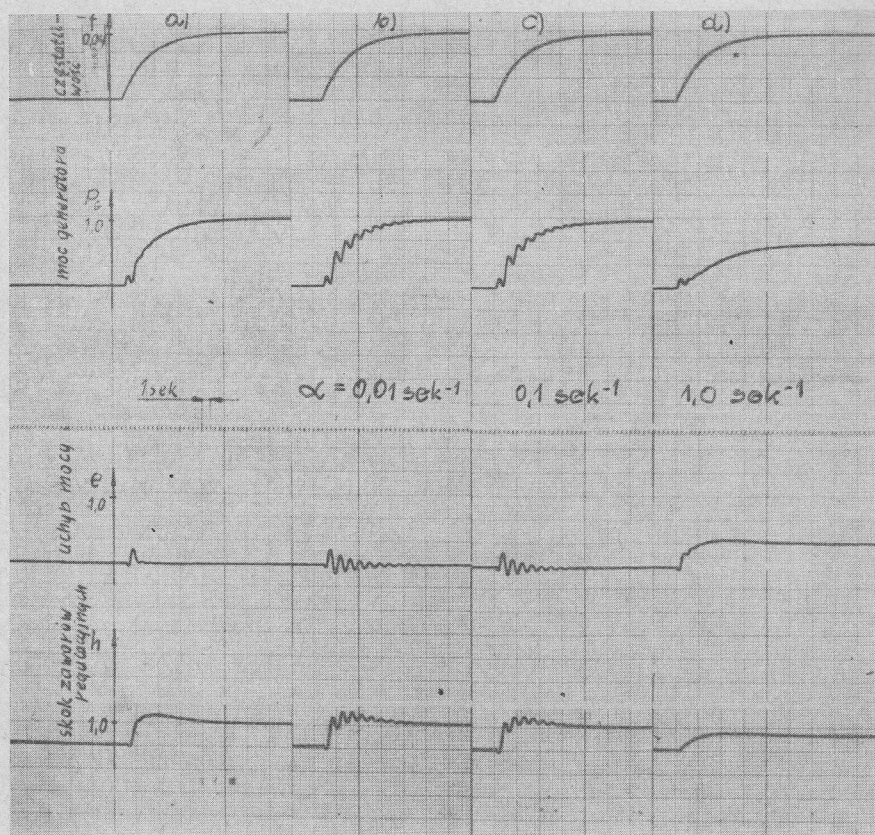
W obszarze małych częstotliwości oscylacyjno-wykładniczej funkcji korelacji ($\Omega \leq 0,1 \text{ s}^{-1}$), małych współczynników tłumienia ($\alpha \leq 0,01 \text{ s}^{-1}$) wykładniczej funkcji korelacji, rozważany tu statystycznie optymalny układ regulacji ma bardzo mały zapas stabilności, ze względu na obydwa parametry regulatora PI. Regulator optymalny statystycznie dla stochastycznego sygnału sterującego o dużym czasie korelacji jest więc praktycznie nieprzydatny z deterministycznego punktu widzenia, ze względu na znikomy zapas stabilności układu regulacji.

Przy $\Omega = 0,5 \text{ s}^{-1}$ i małych α/Ω (0,1; 0,2), parametry regulatora (i wskaźnik jakości) są zbliżone do optymalnych według określonego wyżej deterministycznego kryterium.

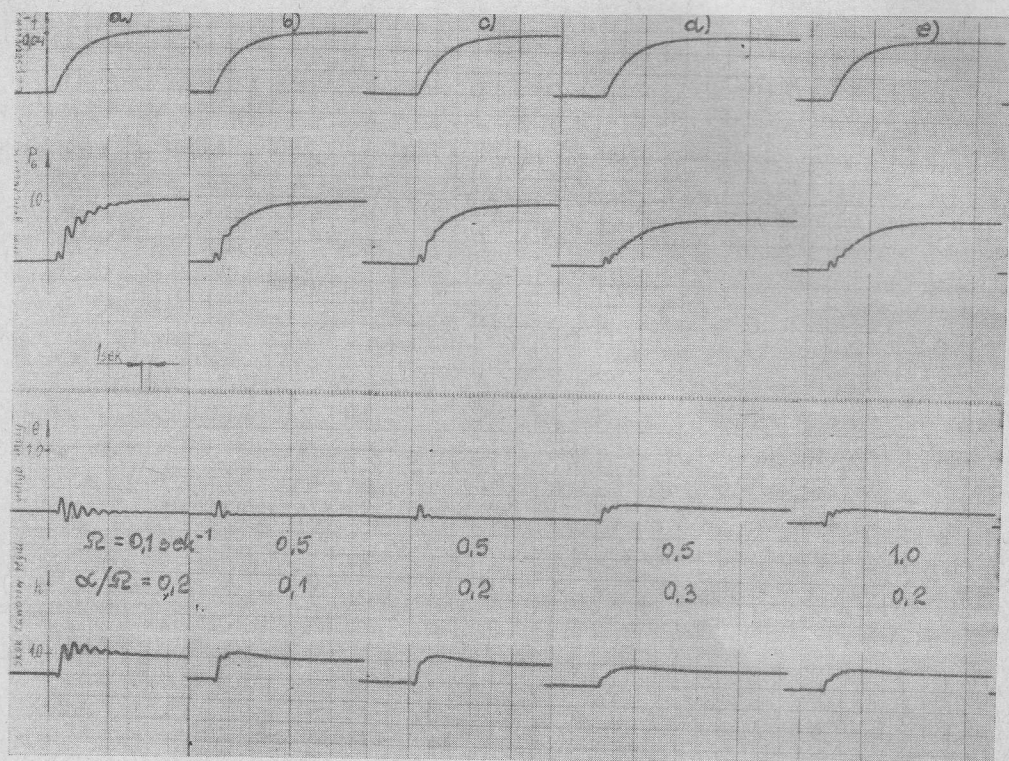
Ze wzrostem α (0,03; 0,1 na rys. 12), zapas stabilności układu regulacji nieco zwiększa się, chociaż nadal jest zbyt mały. (Przy Ω powyżej $0,5 \text{ s}^{-1}$ w przypadku oscylacyjno-wykładniczej funkcji korelacji, przy α powyżej $0,3 \text{ s}^{-1}$ w przypadku wykładniczej funkcji korelacji, regulator PI jest nieprzydatny w rozważanym układzie regulacji; ponadto, optymalny w sensie przyjętego kryterium jest wówczas regulator typu P).

3.3. Porównanie odpowiedzi skokowych

Rysunek 13a przedstawia przebiegi przejściowe: częstotliwości f , mocy turbozespołu P_G , uchybu regulowanego e , położenia zaworów regulacyjnych turbiny h w układzie regulacji optymalnym ze względu na skokową zmianę mocy P_s w systemie elektroenergetycznym. Na rysunkach 13b, c, d oraz 14a, b, c, d, e przedstawiono te przebiegi (odpowiedzi na skok mocy P_s w systemie elektroenergetycznym) w układach regulacji optymalnych przy wymuszeniach stochastycznych. Na rysunkach 15 i 16 umieszczono przebiegi przejściowe, w kolejno tych samych układach regulacji co na rysunkach 13 i 14, przy skokowej zmianie częstotliwości f w systemie elektroenergetycznym.



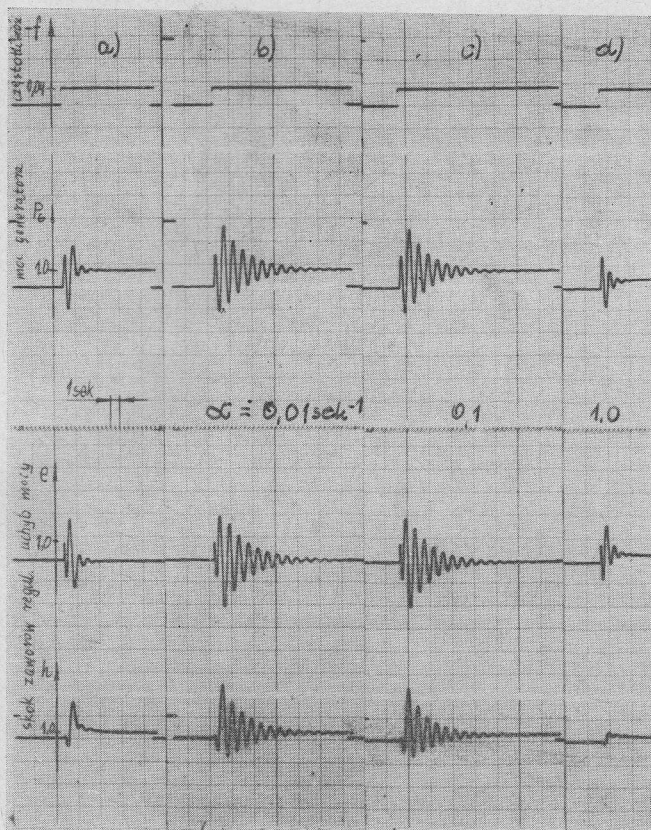
Rys. 13. Przebiegi przejściowe przy skokowej zmianie mocy w systemie elektroenergetycznym; a) w układzie regulacji optymalnym ze względu na skok mocy w systemie, b), c), d) w układzie statystycznie optymalnym w przypadku wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego



Rys. 14. Przebiegi przejściowe przy skokowej zmianie mocy w systemie elektroenergetycznym, w układzie regulacji statystycznie optymalnym w przypadku oscylacyjno-wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego

Zarówno przy wymuszeniu skokiem mocy P_s w systemie elektroenergetycznym, jak przy wymuszeniu skokiem częstotliwości f , w układach regulacji optymalnych przy wymuszeniach stochastycznych przebiegi przejściowe wykazują znacznie większe – w porównaniu z układem optymalnym ze względu na skok mocy P_s – drgania. Różnice na niekorzyść są tym większe, im mniejsze α w przypadku wykładniczej funkcji korelacji (rys. 13b, c, d oraz 15b, c, d), im mniejsze Ω , α/Ω w przypadku oscylacyjno-wykładniczej funkcji korelacji (rys. 14, 16) – układy regulacji, statystycznie optymalne w tych warunkach, są bliskie granicy stabilności (porównaj rys. 12). Zbliżone do optymalnych przy wymuszeniu skokiem mocy P_s przebiegi przejściowe występują w układzie regulacji optymalnym statystycznie dla funkcji korelacji o $\Omega=0,5 \text{ s}^{-1}$, $\alpha/\Omega=0,2$, a także przy $\Omega=0,5 \text{ s}^{-1}$, $\alpha/\Omega=0,1$ (porównaj rys. 12 – parametry regulatora są bliskie optymalnym przy wymuszeniu skokiem mocy P_s).

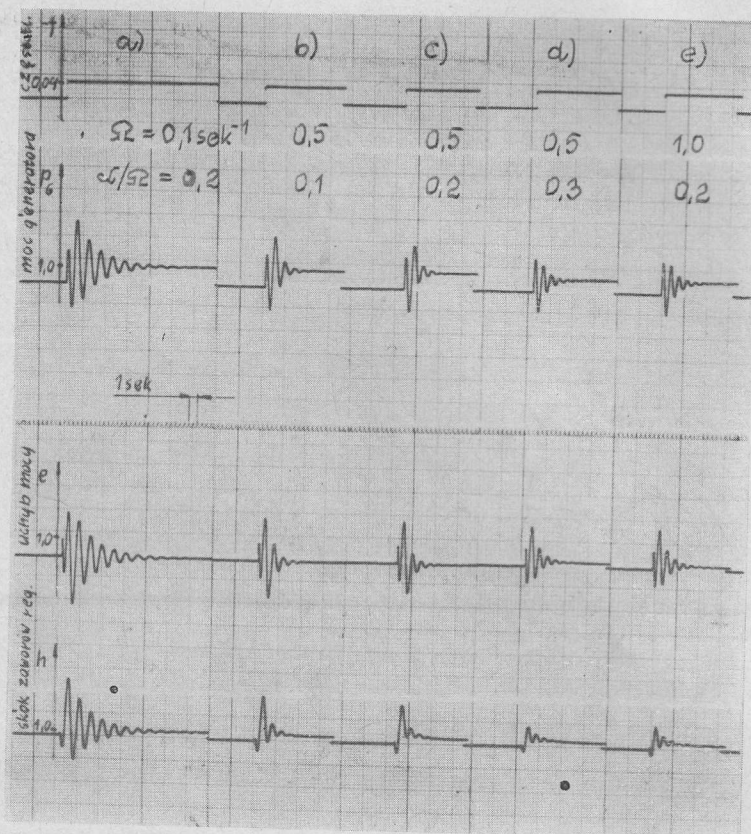
Dla wykładniczej funkcji korelacji przy $\alpha=0,3 \text{ s}^{-1}$, dla oscylacyjno-wykładniczej przy $\Omega=0,5 \text{ s}^{-1}$, $\alpha/\Omega=0,3$ oraz przy $\Omega=1,0 \text{ s}^{-1}$, optymalny w sensie rozpatrywanego kryterium jest regulator typu P; w układzie regulacji występuje wówczas uchyb ustalony – patrz rysunki 13d, 14d, 15d, e, 16d, e.



Rys. 15. Przebiegi przejściowe przy skokowej zmianie częstotliwości w systemie elektroenergetycznym; a) w układzie regulacji optymalnym ze względu na skok mocy w systemie, b), c), d) w układzie statystycznie optymalnym w przypadku wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego

4. Wnioski

Regulator PI optymalny statystycznie, według kryterium Phillipsa, spełnia swoją rolę — w sensie przyjętego kryterium — przy niedużych szybkościach zmian sygnału sterującego (małe Ω w przypadku oscylacyjno-wykładniczej, małe α w przypadku wykładniczej funkcji korelacji). Wówczas wariancja uchybu sygnału regulowanego jest mała w porównaniu z wariancją sygnału sterującego. Rezultaty pomiarów [5 - 8] wskazują, że częstość Ω i współczynnik α rzeczywistej funkcji korelacji częstotliwości w systemie elektroenergetycznym są co do wartości bliskie dolnych granic przyjętych w niniejszej pracy zakresów. W związku z tym można, wydaje się, stwierdzić, że układ regulacji ze statystycznie optymalnym regulatorem PI mocy turboszespołu ma wystarczające własności nadążne, ze względu na sygnał sterujący pochodzący od zmian częstotliwości w systemie elektroenergetycznym.



Rys. 16. Przebiegi przejściowe przy skokowej zmianie częstotliwości w systemie elektroenergetycznym, w układzie regulacji statystycznie optymalnym w przypadku oscylacyjno-wykładniczej funkcji korelacji sygnału sterującego

Jednakże, taki regulator nie zapewnia wystarczającego zapasu stabilności układu regulacji. Przebiegi przejściowe odpowiedzi skokowych w takim układzie regulacji wykazują drgania słabo tłumione, o dużej częstotliwości. Pod tym względem, przewagę ma regulator PI optymalizowany według całki z wartości bezwzględnej uchybu odpowiedzi na skok mocy w systemie elektroenergetycznym [9]. Statystyczny (w sensie kryterium Phillipsa) wskaźnik jakości układu regulacji z wymienionym regulatorem, chociaż znacznie gorszy niż układu statystycznie optymalnego, wydaje się być wystarczająco dobry z punktu widzenia technicznych wymagań dotyczących układu regulacji mocy turbozespołu. Statystyczny wskaźnik jakości układu regulacji zależy przede wszystkim od rozpatrywanego obszaru parametrów funkcji korelacji częstotliwości w systemie elektroenergetycznym, w mniejszym stopniu od parametrów regulatora PI mocy turbozespołu.

Literatura

- [1] Z. Domachowski, A. Malinowski, *Badania modelowe układu regulacji mocy turbozespołu przy wymuszeniach stochastycznych. Część I. Wytwarzanie stochastycznego sygnału zmian częstotliwości do badania układów regulacji turbin*. Prace IMP, z. 65, 1974.
- [2] Z. Domachowski, *Sterowanie mocy turbozespołu w warunkach stochastycznych. Część 1. Dobór filtru Wienera w układzie sterowania mocy turbozespołu biorącego udział w regulacji pierwotnej systemu elektroenergetycznego*. Prace IMP, z. 58, 1972.
- [3] Z. Domachowski, *Sterowanie mocy turbozespołu w warunkach stochastycznych. Część II. Badanie wpływu postaci funkcji korelacyjnej częstotliwości w systemie elektroenergetycznym na wartość błędu średniokwadratowego w układzie sterowania mocy turbozespołu*. Prace IMP, z. 59, 1972.
- [4] Z. Domachowski, A. Malinowski, *Generowanie „białego szumu” dolnopasmowego do badań modelowych układu sterowania turbozespołu*. Prace V Krajowej Konferencji Automatyki, zeszyt 6, Gdańsk, czerwiec 1971.
- [5] V. Hertel, Chr. Walter, *Netzfrequenzanalyse und Blockregelung*. Energietechnik 1965, Nr 11, 12.
- [6] M. Koszelnik, J. Malkiewicz, St. Trybuła, *A method to determine the transfer functions of power systems*. Proc. Fourth IFAC Congress, Technical Session 33, Warszawa 1969.
- [7] J. Malkiewicz, St. Trybuła, *Determination of the frequency bias of interconnected power systems*. Prace Instytutu Automatyki Systemów Energetycznych, nr 10, 1968.
- [8] G. Mumdzijan, M. Chadzijski, A. Kirij, *Statisticheskie charakteristiki izmienienija czastoty w eniergosistiemie NRB*. Tiepłoeniergetika 1970, nr 11.
- [9] St. Perycz, Z. Domachowski, *Optymalizacja układu sterowania mocy turbozespołu przy wymuszeniach zdeterminowanych*. Biuletyn IMP, nr 38/711/1972.

Модельные исследования системы регулирования мощности турбоагрегата при стохастических воздействиях

Часть II. Оптимизация параметров регулятора PI мощности турбоагрегата

Резюме

Работа касается модельных исследований системы регулирования мощности турбоагрегата при стохастических вынуждениях, происходящих от изменений частоты в электроэнергетической системе (в рамках первичного регулирования электроэнергетической системы). Стохастический сигнал изменений частоты симулировался с помощью нижнеполосного генератора „белого шума” [1]. Для нескольких избранных вариантов функции корреляции частоты в электроэнергетической системе произведена оптимизация параметров регулятора PI мощности турбоагрегата согласно критерию Филиппса. Сравнена статистически оптимальная система регулирования с оптимальной системой при детерминированных вынуждениях (в связи с этим см. [9]) с точки зрения критерных показателей, запаса устойчивости и скачкообразных ответов.

Оказывается, что хотя статистически оптимальный регулятор PI исполняет свою роль в смысле принятого критерия при встречаемых в электроэнергетической системе скоростях изменений управляющего сигнала, однако не обеспечивает достаточного запаса устойчивости системы регулирования. В этом отношении преимущество имеет регулятор PI, оптимизированный по интегралу абсолютного значения ошибки ответа на скачок мощности в электроэнергетической системе. При этом статистический показатель качества такой системы регулирования кажется быть достаточно хорошим с точки зрения технических требований, касающихся системы регулирования мощности турбоагрегата. В рассматриванной области параметров функции корреляции частоты в электроэнергетической системе, статистический показатель качества системы регулирования зависит прежде всего от этих параметров и в меньшей степени от параметров регулятора PI мощности турбоагрегата.

Model Investigations of a Turbine Set Power Control System Subjected to Stochastic Input Signals

Part II. Optimization of Parameters of a Turbine Set PI Type Power Controller

Summary

Model investigations of a turbine set power control system subjected to stochastic inputs resulting from the frequency changes in the power network (primary control of the power network) are the subject of the discussion. A stochastic signal of frequency changes was simulated by means of a LF „white noise” generator [1]. The optimization of parameters of a PI type power controller for the turbine set power control was carried out according to the Phillips criterion, for several selected variants of the frequency correlation function in the power network. A comparison of the statistically optimum control system with the optimum one for determined inputs (to this end see [9]), was made with regard to the critical factors, stability margin and step function responses.

The investigations showed that the statistically optimum PI type controller, although adequate — in the meaning of the criterion adopted — for the rates of changes in the control signal encountered in practice, does not ensure a sufficient stability margin of the control system. Here a PI type controller optimized on the basis of the integral from the absolute value of the error of response to a step power change in the power network is more advantageous. Moreover, the statistical quality factor of such a control system seems to be satisfactory from the viewpoint of the technical requirements set out for the turbine set power control system. The statistical quality factor of the control system depends — within the considered range of parameters of the power network frequency correlation function — mainly on these parameters, and to a lesser degree on the parameters of the PI type controller for the turbine set power control.