

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

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPIYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

69

WARSZAWA-POZNAŃ 1975

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

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,
80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, ul. Gen. Józefa Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1975

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 380 + 90 egz.	Oddano do składania 7 III 1975 r.
Ark. wyd. 14,75 Ark. druk. 11,5	Podpisano do druku 2 XII 1975 r.
Papier druk sat. kl. V, 62 g 70 × 100 cm.	Druk ukończono w grudniu 1975 r.
Nr zam. 259/91.	R - 15/876. Cena zł 45, —

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

ZYGFRYD DOMACHOWSKI, KONSTANTY PILECKI

Gdańsk

Statystyczna optymalizacja regulatora PID mocy turbozespołu*

Artykuł dotyczy analizy statystycznie optymalnych nastaw regulatora PID oraz, dla porównania, regulatora PI mocy turbozespołu uczestniczącego w regulacji pierwotnej systemu elektroenergetycznego. Regulator statystycznie optymalny porównano z regulatorem optymalnym ze względu na skok mocy w systemie elektroenergetycznym; dokonano porównania przy wymuszeniach stochastycznych i skokowych.

Wstęp

Gdy turbozespół bierze udział w regulacji pierwotnej częstotliwości systemu elektroenergetycznego, to znaczne zmiany częstotliwości oddziałują nań dwuwejściowo, w roli sygnału sterującego oraz jako wielkość wywołująca przejściową zmianę poślizgu generatora. Współdziałanie turbozespołu i systemu elektroenergetycznego odbywa się wówczas według schematu blokowego przedstawionego na rysunku 1 w publikacji [1]. Uchyb częstotliwości f_s (względem częstotliwości nominalnej) w systemie elektroenergetycznym jest procesem stochastycznym, niestacjonarnym. Zarówno wartość średnia tego procesu, jak jego funkcja korelacyjna zmieniają się w ciągu roku i doby [7 - 10]. W pracach [1, 2] zbadano wpływ zmienności parametrów funkcji korelacyjnej zmian częstotliwości w systemie elektroenergetycznym na parametry filtru Wienera i wartość błędu średniokwadratowego w układzie sterowania mocy turbozespołu uczestniczącego w regulacji pierwotnej częstotliwości. Przyjęto do rozważań układ sterowania złożony z turbozespołu bez przegrzewu wtórnego i bez przestrzeni szkodliwej za zaworami regulacyjnymi, z regulatora PI mocy turbozespołu oraz ze statystycznie optymalnego filtru. Okazało się, że w rozważanym obszarze zmienności parametrów funkcji korelacyjnej częstotliwości w systemie elektroenergetycznym, wartość błędu średniokwadratowego zależy głównie od parametrów tej funkcji, mniej natomiast od parametrów transmitancji układu sterowania mocy turbozespołu. Sprawia to, że strojenie filtru Wienera, stosownie do zmieniających się parametrów funkcji korelacyjnej częstotliwości w systemie elektroenergetycznym, wydaje się niecelowe. Zwłaszcza, że filtr Wienera ma złożoną strukturę, a rozważanemu

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

obszarowi zmienności parametrów funkcji korelacyjnej sygnału sterującego odpowiada duży zakres zmienności parametrów transmitancji filtra.

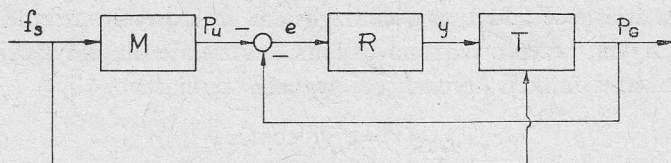
W związku z tym podjęto następnie badania modelowe, przy użyciu elektronicznego komputera analogowego, dotyczące optymalizacji prostego regulatora PI mocy turbozespołu [5, 6], stosowanego w układach regulacji mocy turbozespołów. Na układ sterowania złożony z turbozespołu z przegrzewem wtórnym i przestrzeniami szkodliwymi za zaworami regulacyjnymi oraz z regulatora PI mocy turbozespołu oddziaływano stochastycznym sygnałem zmian częstotliwości w systemie elektroenergetycznym, symulowanym przy użyciu generatora „białego szumu”. Dla kilku wybranych wariantów parametrów funkcji korelacyjnej sygnału sterującego optymalizowano parametry regulatora PI, według kryterium minimum błędu średniokwadratowego. Regulator PI optymalny statystycznie i regulator PI optymalny przy skoku mocy w systemie elektroenergetycznym – według kryterium minimum całki z wartości bezwzględnej uchybu regulowanego (patrz [11, 12]) – porównano pod względem charakterystyk dynamicznych układu sterowania przy wymuszeniach zdeterminowanych i stochastycznych, jego zapasu stabilności oraz wartości całek kryterialnych. Parametry statystycznie optymalnego regulatora PI mocy turbozespołu zależą głównie od szerokości pasma sygnału sterującego. W rozważanym obszarze zmienności parametrów funkcji korelacyjnej sygnału sterującego zmieniają się w małym zakresie. Ponadto okazało się, że wartość błędu średniokwadratowego w układzie sterowania mocy turbozespołu, optymalnym ze względu na skok mocy w systemie elektroenergetycznym, zmienia się (ze zmianą parametrów funkcji korelacyjnej sygnału sterującego) analogicznie, jak w układzie statystycznie optymalnym. Wartości te różnią się mało w rozpatrywanym obszarze parametrów funkcji korelacyjnej sygnału sterującego. Charakterystyki dynamiczne przy wymuszeniach stochastycznych okazały się również podobne. Natomiast otrzymane w omawianych badaniach modelowych wartości optymalne parametrów regulatora PI okazały się być bliskie granicy stabilności – przy wolnych sygnałach sterujących (wąskie pasmo), zaś przy szybkich sygnałach sterujących optymalny czas zdwojenia regulatora dążył do nieskończoności.

Ze względu na złożoność zestawu badawczego oraz możliwość odbiegania charakterystyk poszczególnych jego elementów od charakterystyk założonych (dotyczy to np. filtrów), można spodziewać się pewnych błędów systematycznych, zwłaszcza w modelu procesu stochastycznego. Dlatego wymagało to sprawdzenia rezultatów liczbowych omawianych badań dokładniejszymi metodami.

Niniejsza praca dotyczy kontynuacji tych badań, zmierzających do określenia możliwie prostej (ze względów technicznych) struktury regulatora mocy turbozespołu, spełniającego wymagania co do jakości w sensie statystycznym układu sterowania, co do stabilności tego układu oraz co do jego charakterystyk statycznych i dynamicznych. Przy użyciu elektronicznego komputera cyfrowego wykonano obliczenia optymalizacyjne dla regulatora PID mocy turbozespołu oraz dla porównania, dla regulatora PI, według kryterium minimum błędu średniokwadratowego. Rozpatrzono kilka wybranych wariantów funkcji korelacyjnej sygnału sterującego – uchybu częstotliwości w systemie elektroenergetycznym. Statystycznie optymalny regulator PID oraz analogiczny regulator PI porównano z punktu widzenia wymagań stawianych układom sterowania mocy turbozespołu.

1. Opis przyjętego do rozważań modelu układu sterowania

Schemat blokowy badanego modelu układu sterowania mocy turbozespołu przedstawia rysunek 1, na którym M oznacza przetwornik zmian częstotliwości w systemie elektroenergetycznym, R – regulator mocy turbozespołu, T – turbozespół, f_s – częstotliwość w systemie elektroenergetycznym, e – uchyb mocy, P_u – sygnał sterujący mocy turbozespołu, P_G – moc elektryczną generatora.



Rys. 1. Schemat blokowy układu sterowania mocy turbozespołu

1.1. Model turbozespołu

Jako obiekt regulacji przyjęto turbozespół z przegrzewem wtórnym, z przestrzeniami szkodliwymi za zaworami regulacyjnymi, o mocy 200 MW. Jego liniowy model jest przedstawiony w pracach [11, 12]. Badania prowadzono przy założonym udziale mocy części WP turbiny $k_w=0,3$; odpowiada to nominalnemu obciążeniu turbozespołu.

1.2. Model regulatora mocy

Do rozważań przyjęto regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący, o transmitancji

$$G_R = k_R \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right). \quad (1)$$

Składową różniczkującą regulatora, $T_d \cdot s$, traktuje się jako aproksymację członu fizycznie realizowanego $T_d \cdot s / (1 + \tau \cdot s)$, przy $\tau > 0$ dążącym do zera. Optymalizowano parametry k_R , T_i , T_d . Dla porównania optymalizowano również parametry regulatora proporcjonalno-całkującego, to znaczy przy założonym $T_d=0$.

1.3. Model przetwornika zmian częstotliwości

Przyjęto, że przetwornik zmian częstotliwości jest bezinercyjny, o transmitancji

$$G_M = \frac{1}{\delta}, \quad (2)$$

gdzie δ oznacza statyzm turbozespołu (określający udział turbozespołu w regulacji pierwotnej częstotliwości systemu elektroenergetycznego). Badania prowadzono przy $\delta = 0,04$. Własności dynamiczne przetwornika zmian mocy generatora pominięto w przyjętym do rozważań modelu układu sterowania.

1.4. Model procesu stochastycznego zmian częstotliwości w systemie elektroenergetycznym

Przyjęto, jak w pracach [1, 2, 6], że funkcję korelacyjną sygnału zmian częstotliwości systemu elektroenergetycznego można aproksymować następującym szeregiem skończonym funkcji:

$$F_{f_s f_s}(\tau) = \sigma \left(\sum_{i=1}^M g_i e^{-\alpha_i |\tau|} \cos \Omega_i \tau + \sum_{j=1}^N g_j e^{-\alpha_j |\tau|} \right). \quad (3)$$

Wobec tego, że badany model układu sterowania jest liniowy, wariancja uchybu regulowanego Ee^2 ma własność addytywności względem składowych szeregu (3).

W związku z tym, przeprowadzono badania oddzielnie dla oscylacyjno-wykładniczej postaci unormowanej funkcji korelacyjnej sygnału sterującego,

$$F_{f_s f_s}(\tau) = e^{-\alpha |\tau|} \cos \Omega \tau, \quad (4)$$

oraz wykładniczej postaci

$$F_{f_s f_s}(\tau) = e^{-\alpha |\tau|}. \quad (5)$$

Parametry określające wybrane do rozważań warianty funkcji korelacyjnej sygnału sterującego zawiera tabela 1.

Tabela 1

Wykładnicza funkcja	α [s ⁻¹]	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3	1,0
Oscylacyjno-wykładnicza funkcja	Ω [s ⁻¹]	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	
	α/Ω	0,1	0,2	0,3			

2. Analiza wstępna roli działania różniczkującego w regulatorze mocy turbozespołu

Zgodnie z wzorem (9) w pracy [2] wariancja uchybu regulowanego będzie tym mniejsza im bliższa jedności będzie transmitancja układu sterowania $K(j\omega)$, co najmniej w pasmie sygnału sterującego, zdefiniowanym w pracy [6].

Jeżeli zdefiniujemy transmitację rozpatrywanego układu sterowania mocy turbozespołu jako

$$K(j\omega) = - \frac{P_G(j\omega)}{P_u(j\omega)} \quad (6)$$

(ujemna wartość sygnału sterującego P_u , odpowiadająca ujemnemu uchybowi częstotliwości f_s , wywołuje wzrost mocy turbozespołu), to zgodnie z rysunkiem 1, otrzymamy

$$K(j\omega) = \frac{G_R(j\omega) \cdot G_T(j\omega) - G_{T_1}(j\omega)/G_M(j\omega)}{1 + G_R(j\omega) \cdot G_T(j\omega)}, \quad (7)$$

gdzie G_{T_1} jest transmitancją turbozespołu ze względu na bezpośrednie oddziaływanie

uchybu częstotliwości. Przekształcając wyrażenie (7) otrzymamy

$$K = \frac{1 - \frac{G_{T_i}}{G_M G_R G_T}}{1 + \frac{1}{G_R G_T}}. \quad (8)$$

Z postaci wyrażenia (8) wynika, że dla danego turbosespołu (ustalone G_T , G_{T_i} , G_M) $K(j\omega)$ będzie tym bliższe jedności, a więc wariancja uchybu regulowanego będzie tym mniejsza, im większy będzie moduł transmitancji regulatora $|G_R(j\omega)|$. Oznacza to, że dla minimalizacji wariancji uchybu regulowanego wystarczy, aby w pasmie sygnału sterującego moduł transmitancji regulatora był możliwie duży.

Zauważmy, że zgodnie z (1), moduł transmitancji bezinercyjnego regulatora PID przedstawia następujące wyrażenie:

$$|G_R(j\omega)| = k_R \sqrt{1 + 1/T_i^2 \omega^2 + T_d^2 (\omega^2 - 2/T_d T_i)}. \quad (9)$$

Otóż w porównaniu z regulatorem PI ($T_d=0$) można spodziewać się korzystnego wpływu działania różniczkującego regulatora PID o tyle, o ile pomiędzy szerokością pasma sygnału sterującego ω_g a parametrami regulatora wystąpi relacja

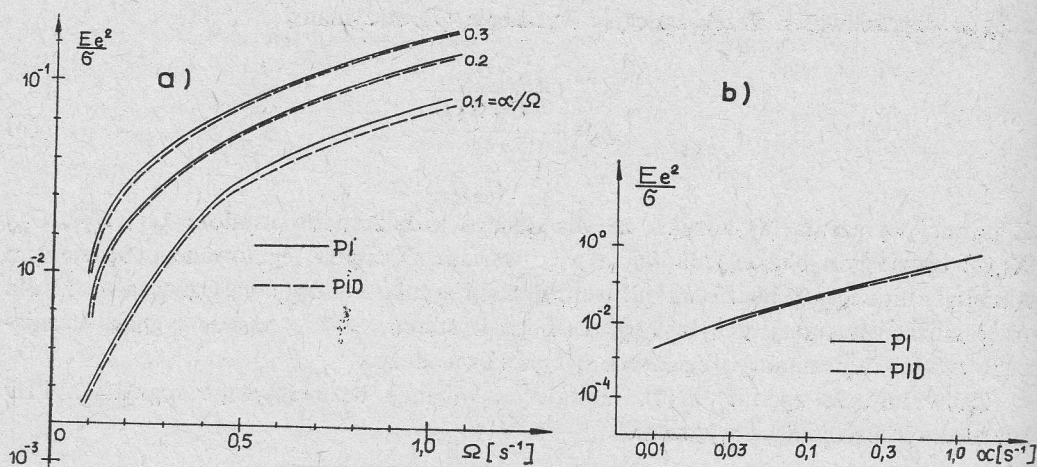
$$\omega_g > \sqrt{2/T_d T_i}. \quad (10)$$

Wówczas, w każdym bądź razie, przy dużych częstościach (z pasma sygnału sterującego), moduł transmitancji regulatora PID będzie większy niż regulatora PI. Będzie tak wówczas dodatkowo również dlatego, że jak wynika z wcześniejszych badań [6], optymalny współczynnik wzmocnienia k_R jest większy, a optymalny czas zdwojenia T_i jest mniejszy w regulatorze PID niż w regulatorze PI. Jednakże, trudno ogólnie ocenić, czy oznacza to istotne zmniejszenie wskaźnika jakości (wariancji uchybu regulowanego) w rozważanym układzie sterowania. (Jak wynika z wcześniejszych badań [6], gdy szerokość pasma sygnału sterującego rośnie, to wariancja uchybu regulowanego, w układzie sterowania ze statystycznie optymalnym regulatorem PI, zmierza do wariancji sygnału sterującego). Ocena taka wymaga szczegółowych obliczeń numerycznych, opisanych poniżej.

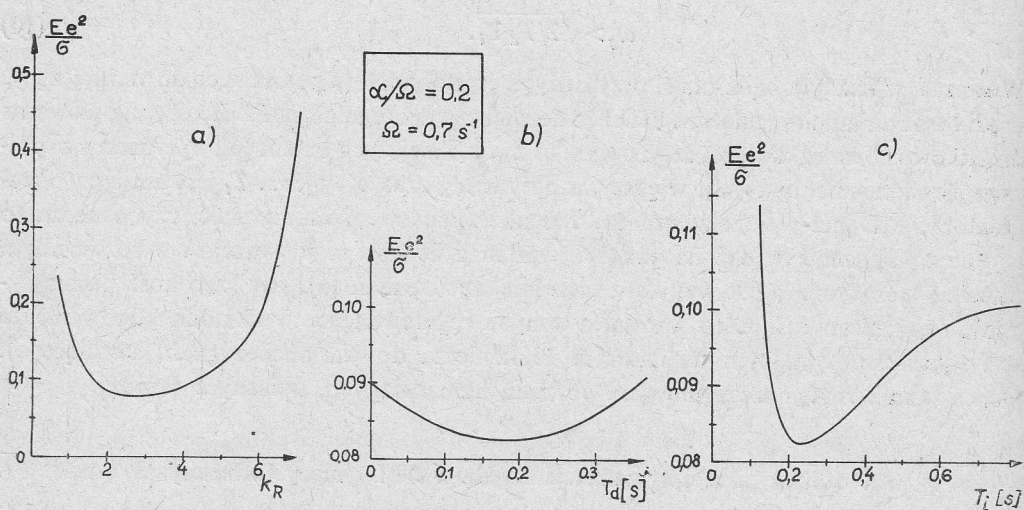
3. Statystyczna optymalizacja regulatora PID mocy turbosespołu

3.1. Wariancja uchybu regulowanego w optymalnym układzie sterowania

Minimalna wartość wariancji uchybu regulowanego w układzie sterowania mocy turbosespołu z regulatorem PID jest niewiele mniejsza niż w układzie sterowania z regulatorem PI, dla danej funkcji korelacyjnej sygnału sterującego (patrz rys. 2). W otoczeniu punktu optymalnego parametrów regulatora PID, wariancja uchybu regulowanego, jako wskaźnik jakości układu sterowania, zmienia się mało, ze zmianą parametrów regulatora. Przykładowo, na rysunku 3 przedstawiono przebieg wskaźnika jakości układu sterowania mocy turbosespołu z regulatorem PID, w otoczeniu punktu optymalnego, odpowiadającego parametrom $\Omega = 0,7 \text{ s}^{-1}$, $\alpha/\Omega = 0,2$ oscylacyjno-wykładniczej funkcji ko-



Rys. 2. Zależność minimalnego błędu średniokwadratowego od parametrów funkcji korelacyjnej sygnału sterującego; a) oscylacyjno-wykładnicza funkcja korelacyjna, b) wykładnicza funkcja korelacyjna

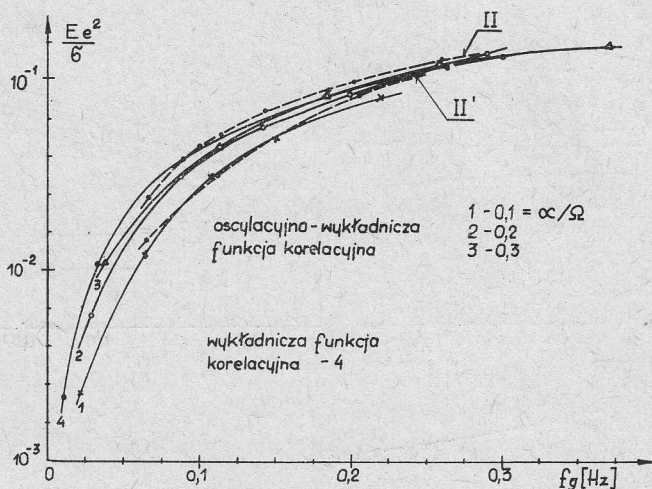


Rys. 3. Błąd średniokwadratowy w funkcji parametrów regulatora PID

relacyjnej sygnału sterującego. Na wartość statystycznego wskaźnika jakości układu sterowania wpływają przede wszystkim parametry funkcji korelacyjnej sygnału sterującego, w znacznie mniejszym stopniu parametry regulatora, zarówno PI jak PID (patrz również, w związku z tym [1, 2, 6]). Przy tym, okazuje się, że na wariancję uchybu regulowanego w optymalnym układzie sterowania mocy turbozespołu wpływa głównie szerokość pasma sygnału sterującego, jak to pokazuje rysunek 4.

Podsumowując, można powiedzieć, że z punktu widzenia kryterium minimum błędu średniokwadratowego, regulator PID nie wykazuje istotnej przewagi nad regulatorem

PI w układzie sterowania mocy turbosespołu. Podobnie jak w układzie sterowania mocy turbosespołu optymalnym ze względu na skok mocy w systemie elektroenergetycznym [11, 12].



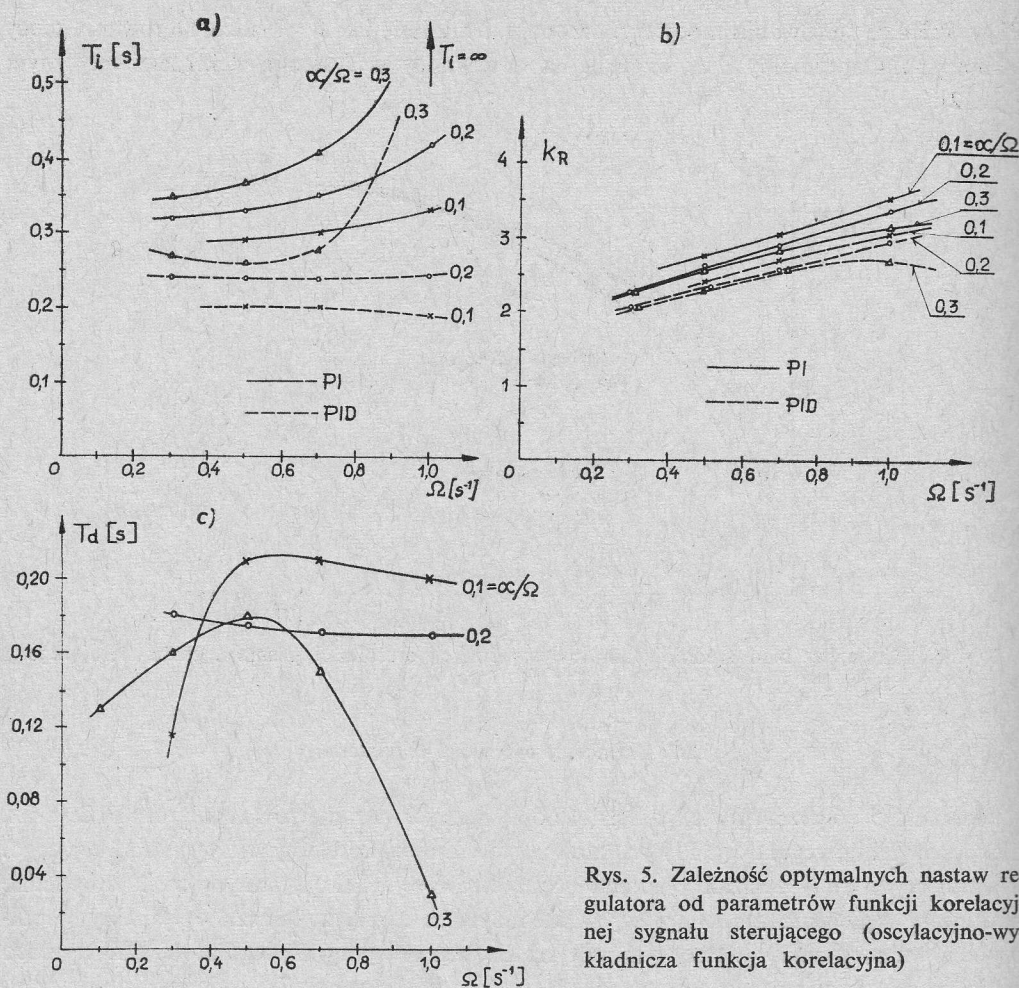
Rys. 4. Minimalny błąd średniokwadratowy w funkcji szerokości pasma sygnału sterującego

3.2. Parametry optymalne regulatora

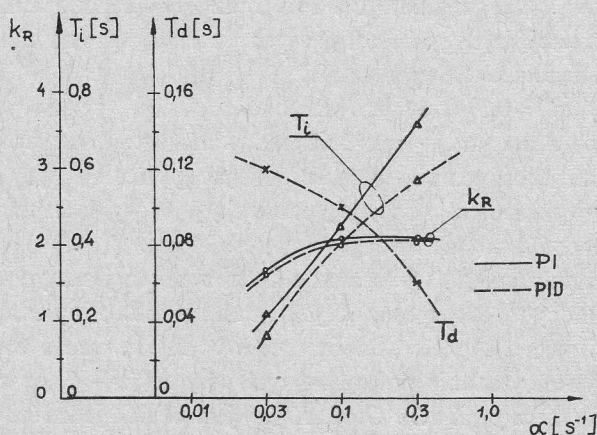
Rysunki 5 i 6 przedstawiają zależność optymalnych parametrów regulatora PID (oraz, dla porównania, regulatora PI) od parametrów funkcji korelacyjnej sygnału sterującego. W przyjętym do rozważań obszarze parametrów tej funkcji, statystycznie optymalne parametry regulatora zmieniają się w niedużym zakresie, zwłaszcza optymalny współczynnik wzmocnienia k_R . Przy tym, optymalne parametry k_R , T_i regulatora PID są nieco mniejsze od odpowiednich parametrów regulatora PI. Rysunek 7 przedstawia zbiór optymalnych parametrów k_R , T_i regulatorów PID oraz PI, dla rozważanego obszaru parametrów funkcji korelacyjnej sygnału sterującego; przedstawiono na nim ponadto granice stabilności rozważanego układu sterowania.

Gdy $\Omega = 1 \text{ s}^{-1}$, $\alpha/\Omega = 0,3$ (wówczas szerokość pasma sygnału sterującego wynosi 0,37 Hz), to $T_i \rightarrow \infty$, a wariancja uchybu regulowanego zmierza do wariancji sygnału sterującego. Gdy szerokość pasma sygnału sterującego maleje (gdy maleją parametry Ω , α/Ω oscylacyjno-wykładniczej funkcji korelacyjnej, α wykładniczej funkcji), to czas zdwojenia regulatora, T_i , zmierza do granicy stabilności.

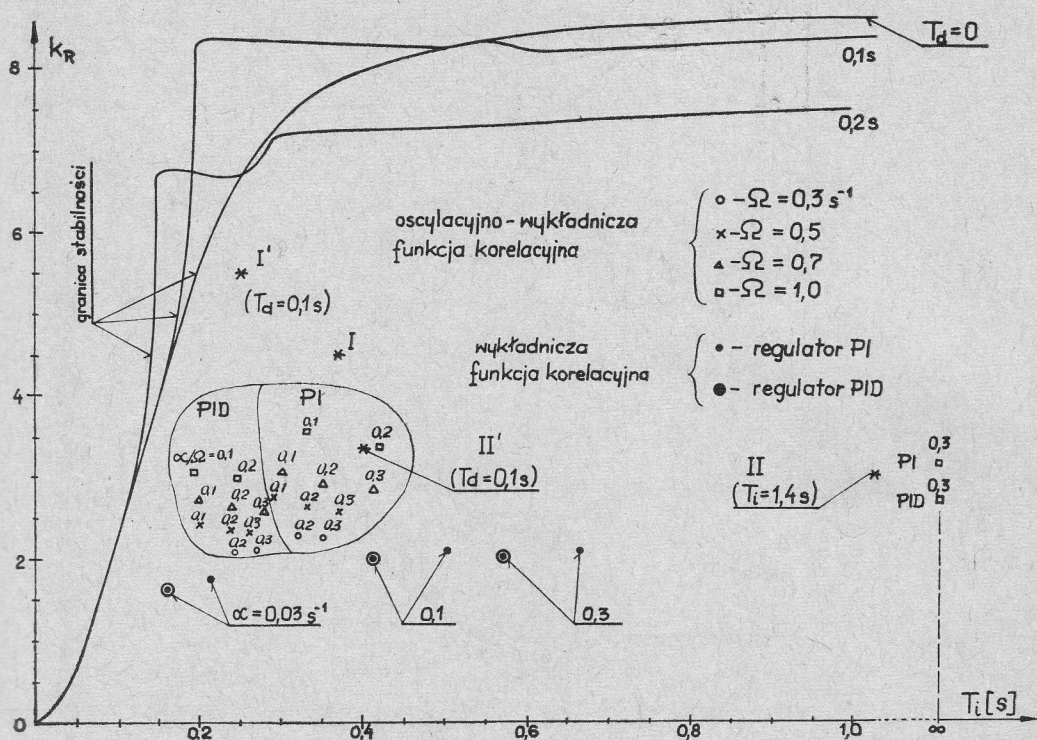
Na rysunku 8 przedstawiono wykres modułu transmitancji statystycznie optymalnego układu sterowania mocy turbosespołu, $|K(j\omega)|$, a na rysunku 9 wykres jej fazy, dla trzech wartości szerokości pasma sygnału sterującego. W odniesieniu do transmitancji układu sterowania rozpatrywane zadanie polega na tym, aby $K(j\omega) \rightarrow 1$, co najmniej w pasmie sygnału sterującego (patrz punkt 2). Otóż, $K(j\omega)$ jest bliskie jedności tylko przy małych częstotliwościach sygnałów sterujących. Mianowicie, gdy częstotać sygnału sterującego $f < 0,2 \text{ Hz}$ (wówczas $\omega < 1,26 \text{ s}^{-1}$), to $|K(j\omega)| \approx 1$, $\text{Arg } K(j\omega) > -35^\circ$, gdy regulator jest typu PID,



Rys. 5. Zależność optymalnych nastaw regulatora od parametrów funkcji korelacyjnej sygnału sterującego (oscylacyjno-wykładnicza funkcja korelacyjna)



Rys. 6. Zależność optymalnych nastaw regulatora od parametrów funkcji korelacyjnej sygnału sterującego (wykładnicza funkcja korelacyjna)

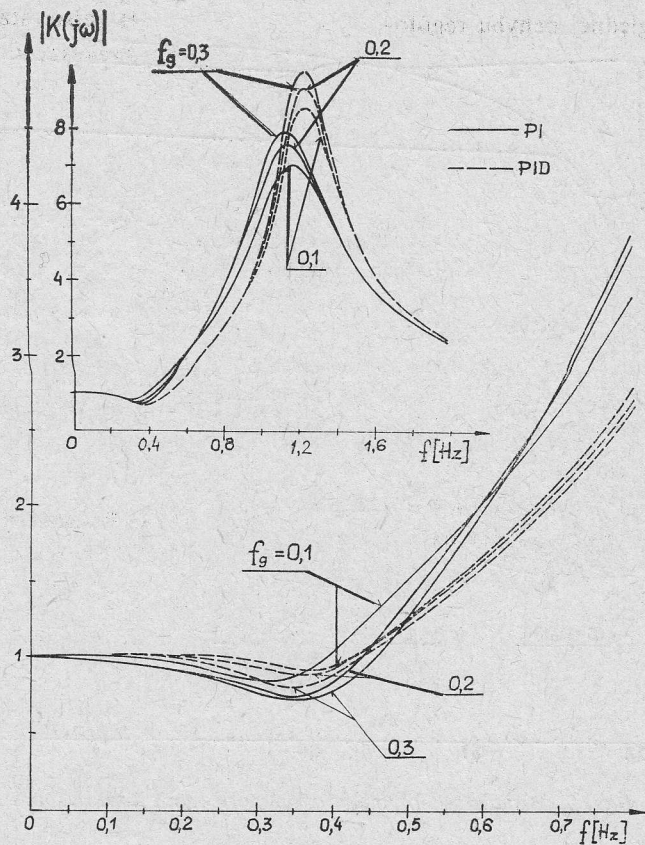


Rys. 7. Parametry optymalne regulatora mocy turbozespołu

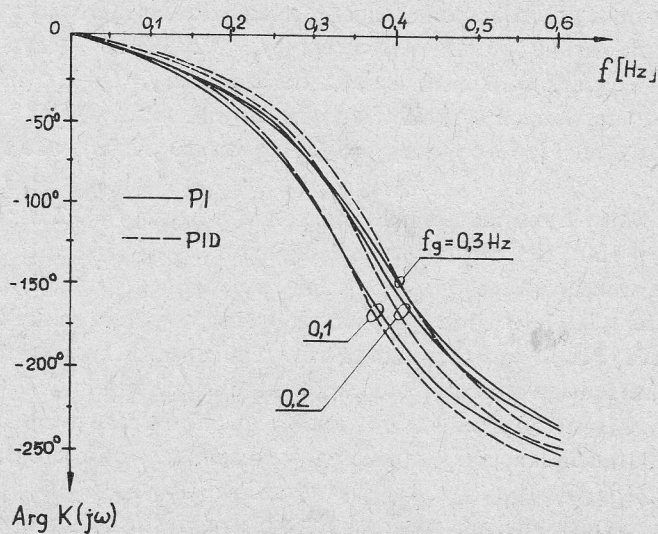
oraz $|K(j\omega)| > 0,8$, $\text{Arg } K(j\omega) > -45^\circ$, gdy regulator jest typu PI. Moduł transmitancji układu sterowania mocy turbozespołu, $|K(j\omega)|$, z regulatorem PID statystycznie optymalnym przy szerokim pasmie sygnału sterującego ($f_g = 0,2, 0,3 \text{ Hz}$ – rys. 8) jest w tym zakresie częstości również bliski jedności, aż do częstości $f = 0,4 \text{ Hz}$ (maksymalna szerokość pasma rozpatrywanych sygnałów sterujących jest bliska $0,4 \text{ Hz}$ – patrz rys. 4). Gdy regulator jest typu PI, to powyżej $f = 0,2 \text{ Hz}$ wartość $|K(j\omega)|$ odbiega znacznie od jedności.

Faza rozpatrywanej transmitancji maleje znacznie powyżej $f = 0,2 \text{ Hz}$; przy $f = 0,4 \text{ Hz}$ jest mniejsza od -150° , dla obydwu typów regulatora.

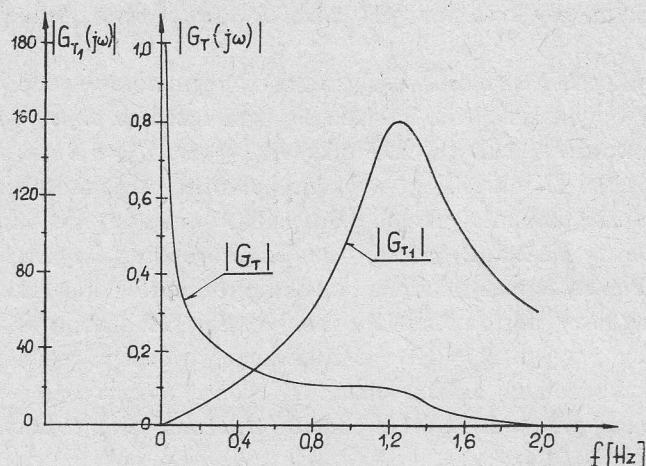
Transmitancja rozpatrywanego statystycznie optymalnego układu sterowania jest więc bliska jedności tylko przy bardzo niskich częstościach sygnału sterującego, bez względu na strukturę (PI, PID) i wartości parametrów regulatora. Przyczyną są postaci transmitancji obiektu, przedstawione na rysunku 10. Moduł transmitancji G_T (sygnał regulatora mocy → moc wytwarzana generatorem) maleje gwałtownie ze wzrostem częstości f , natomiast moduł transmitancji G_{T_1} rośnie ze wzrostem częstości f . Sprawia to, że zarówno wyrażenie $|1/G_R G_T|$ (por. rys. 11), jak wyrażenie $|G_{T_1}/G_M \cdot G_R \cdot G_T|$ przyjmują małe wartości tylko w zakresie małych częstości i tylko dzięki stosownemu doborowi parametrów transmitancji regulatora. (Przykładowo, gdy $f = 0,4 \text{ Hz}$, to $|1/G_R \cdot G_T| \approx 1,5$, bez



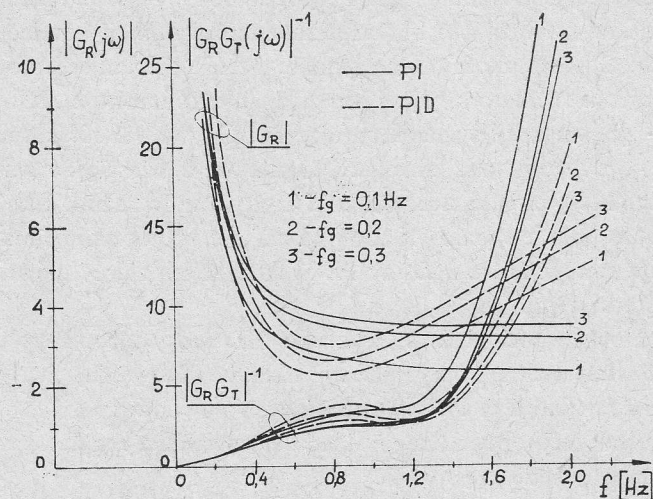
Rys. 8. Charakterystyka amplitudowa układu sterowania mocy turbozespołu z regulatorem optymalnym



Rys. 9. Charakterystyka fazowa układu sterowania mocy turbozespołu z regulatorem optymalnym



Rys. 10. Charakterystyki amplitudowe turbozespołu

Rys. 11. Moduł transmitancji optymalnego regulatora i transmitancji $(G_R G_T)^{-1}$ w funkcji częstości

względem szerokości pasma sygnału sterującego oraz typu regulatora). Sprawia to dalej, że również transmitancja układu sterowania mocy turbozespołu, ze statystycznie optymalnym regulatorem (PID, PI) jest bliska jedności tylko przy bardzo niskich częstościach.

4. Porównanie statystycznej optymalizacji i optymalizacji w warunkach zdefiniowanych regulatorów PID oraz PI mocy turbozespołu

Na rysunku 7 przedstawiono, w układzie współrzędnych k_R , T_i , optymalne wartości parametrów regulatora mocy turbozespołu, odpowiadające poszczególnym wariantom funkcji korelacyjnej sygnału sterującego. Ponadto, umieszczono również na tym rysunku parametry regulatora odpowiadające optymalizacji ze względu na skok mocy w systemie

elektroenergetycznym, gdy kryterium jest całka z wartości bezwzględnej uchybu regulowanego [11, 12].

Przy tym, punkty I , I' przedstawiają parametry regulatora — odpowiednio PI oraz PID — gdy przy optymalizacji nie nakłada się ograniczeń na zapas stabilności, ani na przesterowanie zaworów regulacyjnych. Punkty II ($k_R=3,0$, $T_i=1,4$ s; punkt ten wykracza poza ramy rysunku) i II' określają optymalne parametry regulatora przy narzuconych warunkach: 1) zapas stabilności układu sterowania, odniesiony do parametrów regulatora, nie jest mniejszy niż 2,5, 2) przesterowanie zaworów regulacyjnych turbiny nie jest większe niż 1,5. Punkty te otrzymano na podstawie rezultatów prac [11, 12], gdzie określono takie punkty przy wartości udziału mocy części WP turbiny $k_w=0,2$. Ponieważ w niniejszej pracy przyjęto $k_w=0,3$, poszukiwane parametry regulatora otrzymano, posługując się przybliżonymi zależnościami: $T_i \approx \text{const}$, $k_R k_w \approx \text{const}$ — patrz [12] (T_d przyjęto w cytowanej pracy równe 0,1 s; ponadto założono człon różniczkujący inercyjny o stałej czasowej $\tau=0,01$ s).

Otóż, parametry k_R , T_i regulatorów PI, PID, optymalizowane ze względu na daną postać funkcji korelacyjnej sygnału sterującego, są sobie bliskie. Ponadto zmieniają się w małym zakresie, w rozważanym obszarze zmienności funkcji korelacyjnej, w obydwu typach regulatora. Gdy szerokość pasma sygnału sterującego zmierza do 0,4 Hz, to optymalny czas zdwojenia regulatora, T_i , zmierza do nieskończoności, a wariancja uchybu regulowanego — do wariancji sygnału sterującego. Gdy szerokość pasma sygnału sterującego maleje, to optymalny czas zdwojenia regulatora zbliża się do wartości granicznej ze względu na stabilność układu sterowania. Statystyczny wskaźnik jakości układu sterowania mocy turbozespołu jest mało wrażliwy na zmianę, w otoczeniu punktu optymalnego, parametrów zarówno regulatora PID jak PI. Wskaźnik ten zależy głównie od szerokości pasma sygnału sterującego.

Mimo wymienionych podobieństw, regulator PID mocy turbozespołu o parametrach odpowiadających statystycznej optymalizacji układu sterowania, ma pewną przewagę nad odpowiednim regulatorem PI, z następujących powodów:

- 1) moduł transmitancji optymalnego układu sterowania z regulatorem PID jest bliski jedności w szerszym pasmie częstotliwości,
- 2) optymalne parametry regulatora PID zmieniają się w węższym zakresie, ze zmianą parametrów funkcji korelacyjnej sygnału sterującego, niż odpowiednie parametry regulatora PI,
- 3) parametry regulatora PID optymalnego ze względu na skok mocy w systemie elektroenergetycznym, z narzuconym ograniczeniem zapasu stabilności układu sterowania ($\geq 2,5$) i ograniczeniem przesterowania zaworów regulacyjnych turbiny ($\leq 1,5$), są bliskie obszarowi parametrów statystycznie optymalnych; przeciwnie niż w przypadku regulatora PI — patrz rys. 7, punkt II .

W związku z ostatnią spośród wymienionych wyżej zalet regulatora PID i w związku z tym, że statystycznie optymalne parametry tego regulatora zmieniają się w wąskim zakresie, przy zmianie parametrów funkcji korelacyjnej sygnału sterującego, a statystyczny wskaźnik jakości jest mało wrażliwy na zmiany parametrów regulatora w otoczeniu punktu optymalnego, regulator PID mocy turbozespołu, o parametrach określonych przez punkt II' na rysunku 7, spełnia następujące warunki:

- 1) zapas stabilności układu sterowania, ze względu na parametry regulatora, jest nie mniejszy niż 2,5,
- 2) przesterowanie zaworów regulacyjnych turbiny jest nie większe niż 1,5,
- 3) przy warunkach 1 i 2, całka z wartości bezwzględnej uchybu regulowanego, przy skoku mocy w systemie elektroenergetycznym, jest minimalna,
- 4) parametry regulatora są bliskie statystycznie optymalnych wartości, praktycznie w całym rozważanym zakresie szerokości pasm sygnału sterującego.

5. Wnioski

Z przeprowadzonych badań oraz z prac [1, 2, 6] wynika, że struktura PID regulatora lepiej odpowiada wymaganiom co do charakterystyk dynamicznych układu sterowania mocy turbozespołu, przy wymuszeniach stochastycznych i zdeterminowanych. Jednakże, gdy układ sterowania optymalizuje się bez uwzględniania ograniczeń (co do zapasu stabilności, przesterowania zaworów regulacyjnych), to przewaga regulatora PID nad regulatorem PI jest znikoma przy wymuszeniach stochastycznych i zdeterminowanych. Natomiast, gdy układ sterowania optymalizuje się z uwzględnieniem wymienionych ograniczeń, to przewaga regulatora PID uwidacznia się zarówno przy wymuszeniach zdeterminowanych — wskaźnik jakości jest 3 razy mniejszy niż w układzie z regulatorem PI, jak i przy wymuszeniach stochastycznych — przebieg wskaźnika jakości w rozpatrywanych dwu układach sterowania, w zależności od szerokości pasma sygnału sterującego, przedstawiają krzywe II , II' na rysunku 4.

Ostateczne wnioski porównawcze, dotyczące omawianych struktur regulatora mocy turbozespołu, wymagają znajomości widma sygnału sterującego, to znaczy sygnału zmian częstotliwości w systemie elektroenergetycznym. Otóż, jeśli w tym sygnale przeważałyby, co do energii, składowe o niskich częstościach, to można by do regulacji pierwotnej mocy turbozespołu zastosować regulator PI, odpowiadający punktowi II na rysunku 7. Spełniałby on wymagania co do zapasu stabilności, przesterowania zaworów regulacyjnych, a wskaźnik jakości, zarówno całka z wartości bezwzględnej uchybu regulowanego, jak wariancja uchybu regulowanego miałyby wystarczające, wydaje się, wartości z punktu widzenia wymagań stawianych układom regulacji pierwotnej turbozespołów; ponadto, regulator PI ma techniczne zalety, jest prostszy w realizacji i eksploatacji. Jeśli natomiast przeważały w sygnale zmian częstotliwości systemu elektroenergetycznego składowe o dużej częstości, na przykład większej niż 0,05 Hz, to właściwe wydaje się zastosowanie regulatora PID mocy turbozespołu, o parametrach odpowiadających punktowi II' na rysunku 7.

Praca wpłynęła do Redakcji w kwietniu 1974 r.

Literatura

- [1] 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.

- [2] Z. Domachowski, *Sterowanie mocy turbozespołu w warunkach stochastycznych, część 2. Badanie wpływu postaci funkcji korelacyjnej częstotliwości w systemie elektroenergetycznym na wartość błędu średniokwadratowego w układzie sterowania mocy turbozespołu*. Prace IMP, z. 59, 1972.
- [3] Z. Domachowski, *Zastosowanie metody Wienera do optymalizacji układu sterowania mocy turbozespołu, biorącego udział w regulacji pierwotnej częstotliwości sieci elektroenergetycznej*. Prace V Krajowej Konferencji Automatyki, zeszyt 6, Gdańsk, czerwiec 1971.
- [4] Z. Domachowski, A. Malinowski, *Generowanie „białego szumu” dolnoprędkowego do badań modelowych układu sterowania turbozespołu*. Prace V Krajowej Konferencji Automatyki, zeszyt 6, Gdańsk, czerwiec 1971.
- [5] Z. Domachowski, A. Malinowski, *Badania modelowe układu regulacji mocy turbozespołu przy wymuszeniach stochastycznych, część 1. Wytwarzanie stochastycznego sygnału zmian częstotliwości do badania układów regulacji turbin*. Prace IMP, z. 65, 1974.
- [6] Z. Domachowski, A. Malinowski, K. Pilecki, *Badania modelowe układu regulacji mocy turbozespołu przy wymuszeniach stochastycznych, część 2. Optymalizacja parametrów regulatora PI mocy turbozespołu, część 3. Wpływ postaci funkcji korelacji częstotliwości w systemie elektroenergetycznym na optymalizację regulatora mocy turbozespołu*. Prace IMP, z. 66, 1975.
- [7] V. Herfel, Chr. Walter, *Netzfrequenzanalyse und Blockregelung*. Energietechnik 1965, Nr 11, 12.
- [8] 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.
- [9] J. Malkiewicz, St. Trybuła, *Determination of the frequency bias of interconnected power systems*. Prace Instytutu Automatyki Systemów Energetycznych, Nr 10, 1968.
- [10] G. Mumdzijan, U. Chadzijskij, A. Kirij, *Statisticheskie charakteristiki izmienienija czastoty w eniergosistiemie NRB*. Tieploenergetika 1970, Nr 11.
- [11] St. Perycz, Z. Domachowski, *Optymalizacja układu sterowania mocy turbozespołu przy wymuszeniach zdeterminowanych*. Biuletyn IMP PAN w Gdańsku, Nr 711, 1972.
- [12] St. Perycz, Z. Domachowski, K. Pilecki, *Studium optymalizacji regulatora mocy turbozespołu z adaptacją nastaw w zależności od obciążenia*. Prace IMP, z. 61, 1973.

Статистическая оптимизация регулятора мощности турбоагрегата

Резюме

На ЭВМ производился анализ оптимальных установок регулятора PID и, для сравнения, регулятора PI турбоагрегата, при стохастических управляющих возмущениях. Такие возмущения воздействуют на турбоагрегат, участвующий в первичном регулировании электроэнергетической системы. Целью этих исследований являлось определение возможно технически простой структуры регулятора мощности турбоагрегата, исполняющего требования относительно характеристик управляющей системы при стохастических и скачкообразных возмущениях, запаса устойчивости этой системы и перерегулирования регулирующих клапанов турбины. В качестве объекта регулирования принят турбоагрегат с промперегревом, с вредными емкостями за регулируемыми клапанами турбины. Проведены оптимизирующие расчеты для нескольких вариантов корреляционной функции управляющего сигнала, т.е. отклонения частоты в электроэнергетической системе.

Когда система управления мощности турбоагрегата оптимизируется с учетом ограничений ее запаса устойчивости и перерегулирования регулирующих клапанов турбины, тогда регулятор PID имеет преимущество над регулятором PI, как при стохастических, так и при скачкообразных возмущениях. Когда оптимизация проводится без учета вышеперечисленных ограничений, тогда преимущество регулятора PID над регулятором PI — незначительно.

Для окончательного сравнения обсуждаемых структур регулятора мощности турбоагрегата необходимо знание спектра управляющего сигнала. Если бы в этом сигнале превосходными по энергии оказались составляющие низких частот, то для первичного регулирования мощности турбоагрегата можно было бы применять регулятор PI. Такой регулятор является простым с точки зрения

его осуществления и эксплуатации. В данных условиях он отвечал бы требованиям относительно запаса устойчивости и перерегулирования регулирующих клапанов турбины, а показатель качества системы управления достигал бы достаточного, значения, как при стохастических, так и при скачкообразных возмущениях. Если бы в управляющем сигнале превосходными оказались составляющие большой частоты, напр. большей чем 0,05 герц, тогда обоснованным кажется применение регулятора PID мощности турбоагрегата.

Statistic Optimization of a Turbine Set PID Type Power Controller

Summary

The method of numerical modelling on the computer was used for analyzing optimum settings of a PID controller and, for the sake of comparison, of a PI controller subjected to stochastic inputs. Inputs of this kind act on a turbine set utilized in the primary control of a power network. The investigations aimed at determining, from the viewpoint of technology, a possibly simple structure of a turbine set power controller meeting the appropriate requirements for the characteristics of the control system at stochastic and step inputs as well as for the stability margin of the system and the overshoot of the control valves of the turbine. A turbine set with the reheat and clearance spaces behind the control valves of the turbine was taken into consideration as the controlled plant. Optimizing calculations were made for several forms of the function of control signal correlation i.e. of the frequency error in the power network.

A PID controller is better than a PI controller for both stochastic and step inputs when a turbine set power control system is optimized, account taken of the limitations to the stability margin and overshoot of the control valves. If these limitations are omitted, a PID type controller will be only a little better than a PI controller.

The spectrum of a control signal is required to be known for making a final comparison of the turbine set controller structures. Should low-frequency components in the signal prevail, so far as the energy is concerned, then a PI type controller could be used for the primary control of the turbine set. Such a controller can easily be realized and operated. In the condition specified above it meets the requirements for the stability margins as well as for the overshoot of the control valves and the value of the control system quality factor would be high enough for both the stochastic and step inputs. Should high-frequency components prevail in the control signal, then a turbine set power PID type controller would be the appropriate one.