

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
I N S T Y T U T M A S Z Y N P R Z E P Ł Y W O W Y C H

**PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH**

**TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY**

61

WARSZAWA—POZNAŃ 1973

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH

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
JÓZEF ŚMIGIELSKI · ANDRZEJ ŻABICKI

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

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1973

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 410+90 egz.	Oddano do składania 22 VIII 1972 r.
Ark. wyd. 9,0. Ark. druk. 7,5	Podpisano do druku 14 III 1973 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 62 g	Druk ukończono w marcu 1973 r.
Nr zam. 554/128	D-4/155. Cena zł 27,-

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

STEFAN PERYCZ, ZYGFRYD DOMACHOWSKI, KONSTANTY PILECKI

Gdańsk

Studium optymalizacji regulatora mocy turbozespołu z adaptacją nastaw w zależności od obciążenia

Rozważono optymalizację regulatora mocy typu PI i PID dla turbozespołu z przegrzewem wtórnym. Przyjęto wymuszenie skokiem mocy systemu elektroenergetycznego; zastosowano jako kryterium jakości całkę z bezwzględnej wartości uchybu mocy i uwzględniono ograniczenia zapasem stabilności i wartością przesterowania zaworów. Uwzględniając wyraźną nieliniowość statyczną obiektu, zbadano możliwość prostego strojenia parametrów regulatora w pełnym zakresie obciążeń turbozespołu.

Główne oznaczenia

A – zapas wzmocnienia,	m – natężenie przepływu pary,
G – transmitancja,	n – prędkość obrotowa wirnika turbozespołu,
I – wskaźnik jakości,	s – operator Laplace'a,
P – moc,	t – czas,
T – stała czasowa,	y – sygnał wyjściowy z regulatora mocy,
e – uchyb mocy,	z – współczynnik tłumienia generatora,
f – częstotliwość,	α – statyzm systemu,
h – położenie zaworów,	δ – statyzm turbozespołu.
k – współczynnik proporcjonalności,	

Uwaga: jeżeli nie zaznaczono specjalnie wartości sygnałów, rozumie się je jako odchyłki odniesione do wartości sygnałów w stanie ustalonym.

Indeksy

G – dotyczy generatora,	S – dotyczy systemu elektroenergetycznego,
N – dotyczy turbiny niskoprężnej,	T – dotyczy turbiny,
0 – wielkość znamionowa,	U – dotyczy wielkości sterującej,
P – dotyczy przegrzewu wtórnego,	W – dotyczy turbiny wysokoprężnej,
R – dotyczy regulatora,	Z – dotyczy zaworów regulacyjnych turbiny.

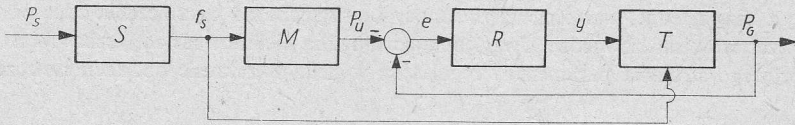
1. Wprowadzenie

W automatyzacji siłowni parowych stosuje się powszechnie regulatory ze stałymi nastawami, mimo że dynamiczne właściwości obiektów (kotłów, turbin itp.) silnie zmieniają się, zwłaszcza w zależności od obciążenia bloku. Regulatory takie z konieczności

są strojone z uwzględnieniem tego poziomu obciążeń, przy którym układ wykazuje najmniejszy zapas stabilności. W ostatnich latach również w energetyce wzrasta zainteresowanie regulatorami adaptacyjnymi dla kotłów i turbin, w tym także rozwiązaniami z prostym dopasowaniem nastaw do obciążenia [3, 5, 7, 14].

Celem pracy jest analiza optymalnych nastaw regulatora mocy turbozespołu z uwzględnieniem wpływu nieliniowości statycznej obiektu regulacji. Badania przeprowadzono przy użyciu elektronicznej maszyny analogowej, zakładając wymuszenia zdeterminowane [9].

Przyjęto turbozespół z przegrzewem wtórnym, pracujący na dużą sieć energetyczną (dużą w tym sensie, że zmiany mocy rozważanego zespołu nie wywołują zauważalnych zmian częstotliwości sieci). W równaniu turbiny [8] uwzględniono zmianę udziału mocy turbiny wysokoprężnej w zależności od obciążenia maszyny. Stałe równania dobrano podobnie jak w turbozespole krajowym o mocy 200 MW [13].



Rys. 1. Schemat blokowy układu sterowania mocy turbozespołu

Generator synchroniczny opisano równaniem drugiego rzędu [6]. Można założyć, zgodnie z [6], że moment zwrotny i tłumiący zmieniają się niewiele ze zmianą obciążenia; przyjęto je tu jako stałe.

Podstawę badań stanowi schemat blokowy układu sterowania podany na rysunku 1. Zmiana obciążenia czynnego systemu elektroenergetycznego P_s wywołuje zmianę częstotliwości sieci f_s , która stanowi wymuszenie oddziaływające na turbozespół dwuwejściowo:

- 1) jako sygnał mierzony przez regulator mocy,
- 2) jako wielkość powodująca chwilową zmianę poślizgu generatora.

Przyjęto skokową zmianę mocy P_s . Właściwości dynamiczne systemu (w realcji $P_s \rightarrow f_s$) aproksymowano z grubsza równaniem członu inercyjnego pierwszego rzędu [1, 2, 4]. Wydaje się, że założenie to, chociaż niedoskonałe, jest bardziej uzasadnione od często stosowanego wymuszenia standardowym skokiem jednostkowym częstotliwości sieci. Ponadto, badania takie ułatwią (być może) konfrontację z zamierzoną analizą regulatora optymalnego w warunkach stochastycznych i pozwolą odpowiedzieć na pytanie, czy przyjęta aproksymacja właściwości sieci daje dobrą zgodność i czy wobec tego może zastąpić bardziej skomplikowaną aproksymację stochastyczną.

Jako regulator rozważono człon PI oraz PID. Za wskaźnik jakości przyjęto całkę z wartości bezwzględnej uchybu mocy (kryterium „energetyczne”). Przeanalizowano wpływ ograniczeń tego kryterium w postaci założonego zapasu stabilności oraz maksymalnie dopuszczalnego przesterowania zaworów.

2. Model układu sterowania

2.1. Model systemu elektroenergetycznego

Przyjęto transmitancję systemu (oznaczonego S na rysunku 1), w relacji $P_S \rightarrow f_S$, jako

$$G_S = \frac{\alpha}{1 + T_S s}, \quad (1)$$

gdzie α oznacza statyzm systemu, zaś T_S jego zastępczą stałą czasową. W badaniach przyjęto $\alpha=0,04$ oraz $T_S=3$ s [1, 2]. W warunkach europejskich wartość współczynnika α zawiera się w granicach $0,04 \div 0,20$. W naszych badaniach jej dobór nie ma znaczenia.

2.2. Model przetwornika zmian częstotliwości

Założono, że przetwornik (oznaczony M na rys. 1) jest bezinercyjny o transmitancji

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

gdzie δ oznacza statyzm turbospołu (odpowiadający stopniowi udziału turbospołu w podtrzymywaniu częstotliwości sieci). Zasadnicze badania wykonano przy $\delta=0,04$. Dla porównania przeprowadzono część badań przy $\delta=0,01$ i $0,10$.

2.3. Model regulatora

W schemacie pominięto dynamikę przetwornika mocy. Badano układ z

a) regulatorem proporcjonalno-całkującym o transmitancji

$$G_R = k_R \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right), \quad (3)$$

optymalizując nastawy k_R , T_i oraz

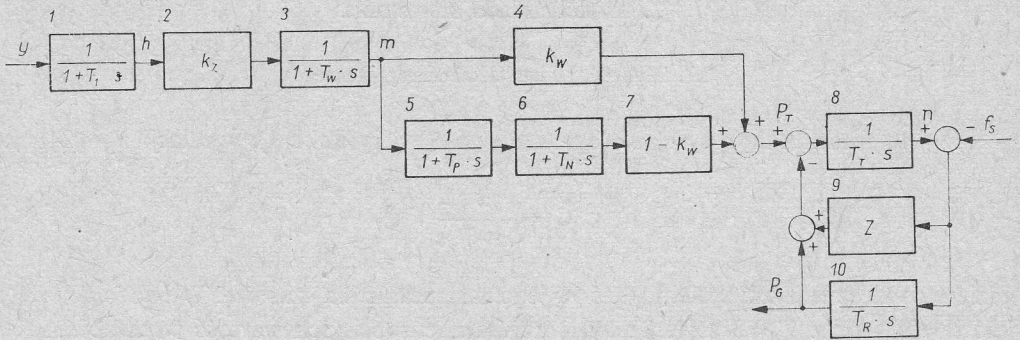
b) regulatorem proporcjonalno-całkująco-różniczkującym o transmitancji

$$G_R = k_R \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \tau s} \right). \quad (4)$$

Przyjęto $\tau=0,01$ s i poszukiwano optymalnych nastaw k_R , T_i , T_d .

2.4. Model turbospołu

Schemat blokowy liniowego modelu turbospołu przedstawiono na rys. 2. Kolejnymi numerami oznaczono człony:



Rys. 2. Schemat blokowy turbozespołu jako obiektu sterowania mocy

1 – Serwomotor zaworów regulacyjnych. Oceniając wszystkie inercyjności w układzie regulatora przyjęto zastępczą stałą $T_1=0,5$ s.

2 – Zawory regulacyjne (wysokoprężne). Przemianę w zaworach $h \rightarrow m$ oceniono jako bezinercyjną. Współczynnik proporcjonalności zaworów, zdefiniowany jako

$$k_z = \frac{d\left(\frac{P_T}{P_{T0}}\right)}{d\left(\frac{h}{h_0}\right)}, \quad (5)$$

określa nieliniowość statyczną obiektu $P_T(h)$, obejmującą nieliniową charakterystykę przepływową zaworu $m(h)$ oraz charakterystykę statyczną turbiny $P_T(m)$. Zależność $P_T(m)$ jest nieliniowa z uwagi na zmienną z obciążeniem sprawność turbiny, zarówno części wysoko- jak niskoprężnej, oraz zmienność udziału mocy turbiny wysokoprężnej k_W .

W badaniach optymalizacyjnych przyjęto $k_z=1$. Zawory regulacyjne niskoprężne („intercepcyjne”) są pełnootwarte w obszarze powyżej minimum technicznego, nie oddziałują więc na maszynę i w schemacie zostały pominięte.

3 – Przestrzeń szkodliwa przed częścią WP turbiny. Na podstawie dokumentacji turbiny TK 200 oceniono $T_W=0,2$ s.

4 – Część WP turbiny. Udział mocy tej części oznaczono jako $k_W = P_{TW}/(P_{TW} + P_{TN})$. W turbinie TK 200 współczynnik k_W zmienia się od 0,4 przy minimum technicznym (ok. 30% mocy pełnej) do ok. 0,2 przy mocy znamionowej. Do badań przyjęto $k_W=0,2$ jako wartość główną, pewne dodatkowe badania wykonano przy $k_W=0,3$ i 0,4.

5 – Przegrzewacz wtórny; jego stałą czasową przyjęto $T_P=6$ s.

6 – Przestrzeń szkodliwa przed częścią niskoprężną turbiny. Przyjęto $T_N=0,3$ s.

7 – Część niskoprężna turbiny.

8 – Wirnik turbozespołu; przyjęto $T_T=8$ s.

9 – Moment tłumiący generatora synchronicznego; przyjęto $z=25$ według [6].

10 – Moment zwrotny generatora; przyjęto $T_R=0,002$ s według [6].

3. Dobór parametrów regulatora mocy

W rozpatrywanym zagadnieniu regulator winien zapewnić spełnienie trzech warunków:

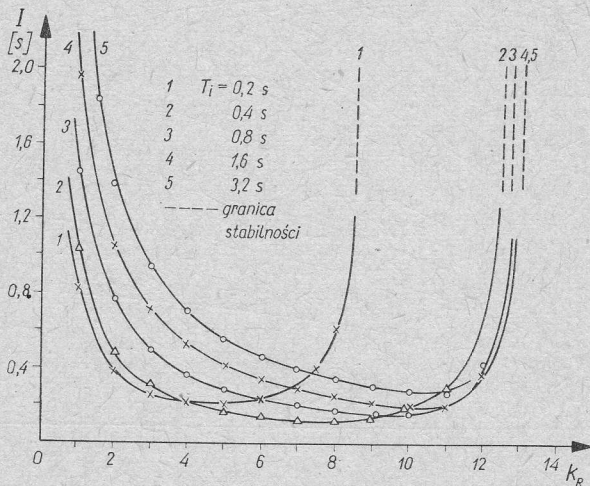
1) układ sterowania musi wykazywać określony zapas stabilności,
 2) przesterowanie zaworów regulacyjnych turbiny nie może przekraczać pewnej zadanej wartości,

3) przy spełnieniu poprzednich warunków, wartość całki $I = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$, przy skokowej zmianie sygnału P_S , winna być minimalna.

Badania zmierzające do określenia optymalnych nastaw regulatora przeprowadzono na maszynie analogowej SOLARTRON. Wprowadzono skokowe wymuszenie P_S i zapisywano przebiegi przejściowe mocy turbozespołu P_G , mocy turbiny P_T , prędkości obrotowej n i położenia zaworów regulacyjnych h na rejestratorze pisakowym HELIGE. Dodatkowo rejestrowano całkę kryterialną I na woltomierzu cyfrowym V524 ELPO.

3.1. Optymalizacja regulatora PI

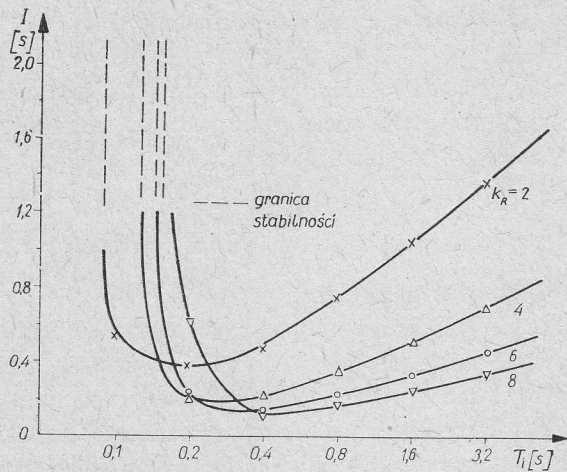
Na rysunkach 3, 4 i 5 podano wykresy współczynnika jakości I w zależności od parametrów regulatora k_R , T_i dla $\delta=0,04$ oraz $k_w=0,2$.



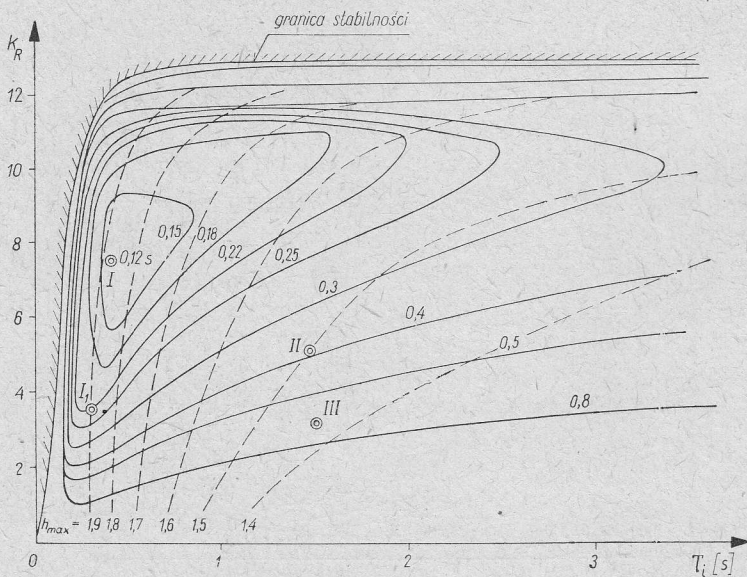
Rys. 3. Wskaźnik jakości w funkcji parametrów regulatora PI ($k_w=0,2$, $\delta=0,04$)

W rozpatrywanym obszarze parametrów wskaźnik jakości osiąga minimum przy $k_{R\text{opt}} \approx 7,5$, $T_{i\text{opt}} \approx 0,4$ s, które wynosi $I_{\text{min}} = 0,12$ s (punkt 1 na rysunku 5). Transmittancja optymalnego regulatora ma w tym przypadku postać

$$G_{R10} = 7,5 \left(1 + \frac{1}{0,4s} \right). \quad (6)$$



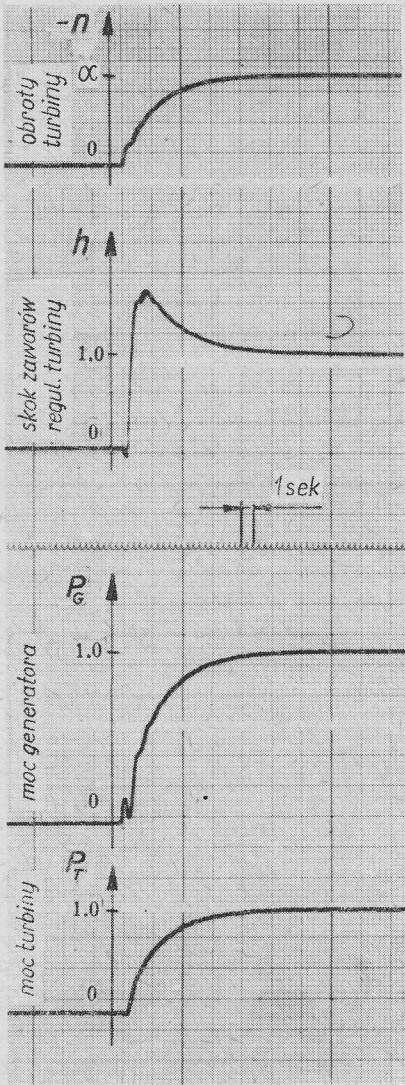
Rys. 4. Wskaźnik jakości w funkcji parametrów regulatora PI ($k_w=0,2$, $\delta=0,04$)



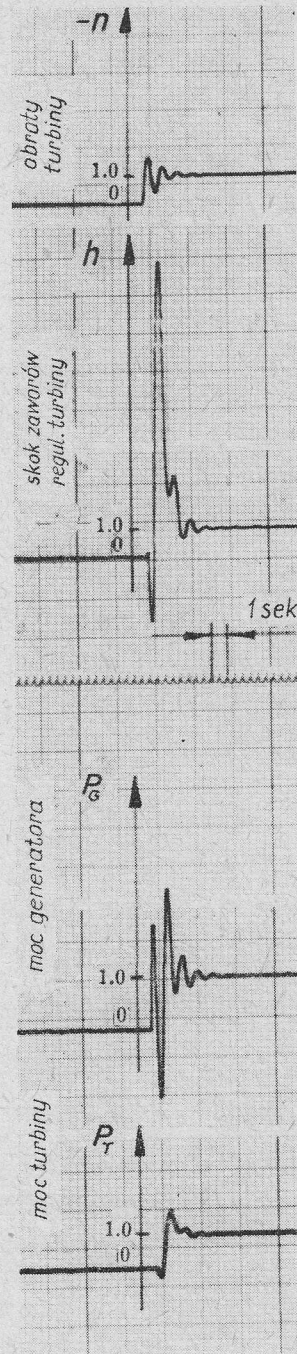
Rys. 5. Wskaźnik jakości i przesterowanie zaworów regulacyjnych w funkcji parametrów regulatora PI ($k_w=0,2$, $\delta=0,04$)

W otoczeniu punktu optymalnego wskaźnik I zmienia się przede wszystkim ze zmniejszeniem czasu zdwojenia T_i , jest natomiast mało wrażliwy na zmiany współczynnika wzmocnienia regulatora k_R .

Na rysunku 6 podano oscylogramy przebiegów prędkości obrotowej n , położenia zaworów h oraz mocy generatora P_G i turbiny P_T dla optymalnych nastaw regulatora



Rys. 6. Oscylogramy przebiegów przejściowych przy optymalnych nastawach regulatora PI

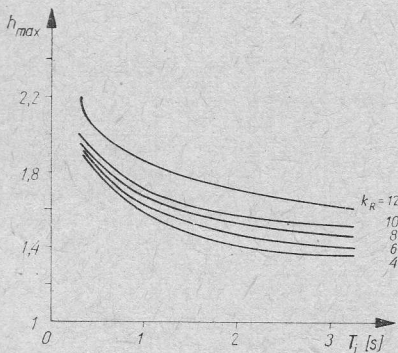


Rys. 7. Przebiegi przejściowe przy optymalnych nastawach regulatora PI i wymuszeniu skokową zmianą częstotliwości sieci

PI. Dla zilustrowania skutków filtrującego działania systemu elektroenergetycznego podano na rysunku 7 przebiegi przejściowe przy tych samych nastawach, ale z wymuszeniem skokową zmianą częstotliwości sieci.

3.1.1. Stabilność układu i przesterowanie zaworów w zależności od parametrów regulatora

Na rysunku 5 naniesiono granicę stabilności układu sterowania mocy we współrzędnych k_R , T_i . Przy $T_i=0,4$ s, graniczne ze względu na stabilność wzmocnienie regulatora wynosi $k_{R\text{ gr}} \approx 12$, zatem zapas wzmocnienia przy $k_{R\text{ opt}}=7,5$ wynosi $A=k_{R\text{ gr}}/k_{k\text{ opt}} \approx 1,6$. Przy $k_R=7,5$ układ osiąga granicę stabilności, gdy $T_{i\text{ gr}} \approx 0,16$ s, zapas czasu zdwojenia wynosi w tym przypadku 2,5.



Rys. 8. Przesterowanie zaworów turbiny w funkcji parametrów regulatora PI

Na rysunku 5 naniesiono też linie stałych wartości przesterowania zaworów regulacyjnych h_{max} . Podobną zależność przedstawiono na rysunku 8, podając h_{max} w funkcji parametrów regulatora k_R , T_i . Przesterowanie h_{max} rośnie ze wzrostem współczynnika wzmocnienia k_R oraz maleje ze wzrostem czasu zdwojenia T_i .

3.1.2. Wpływ udziału mocy turbiny WP na optymalizację regulatora

W turbozespołach z regulacją dławieniową lub poślizgową udział mocy turbiny WP jest praktycznie niezależny od obciążenia, $k_W = \text{const}$. Przy regulacji napełnieniowej wartość k_W maleje ze wzrostem obciążenia maszyny. Przykładowo, w turbozespołe TK 200 przy obciążeniu 30% (minimum techniczne) $k_W \approx 0,4$, zaś przy mocy nominalnej $k_W \approx 0,2$.

W obszarze poniżej minimum technicznego wchodzi (z reguły) w działanie zawory niskoprężne (intercepcyjne) i struktura obiektu zmienia się. Transmitancja turbiny (przy pewnych założeniach upraszczających) odpowiada wówczas transmitancji turbiny bez przegrzewu [8], mianowicie

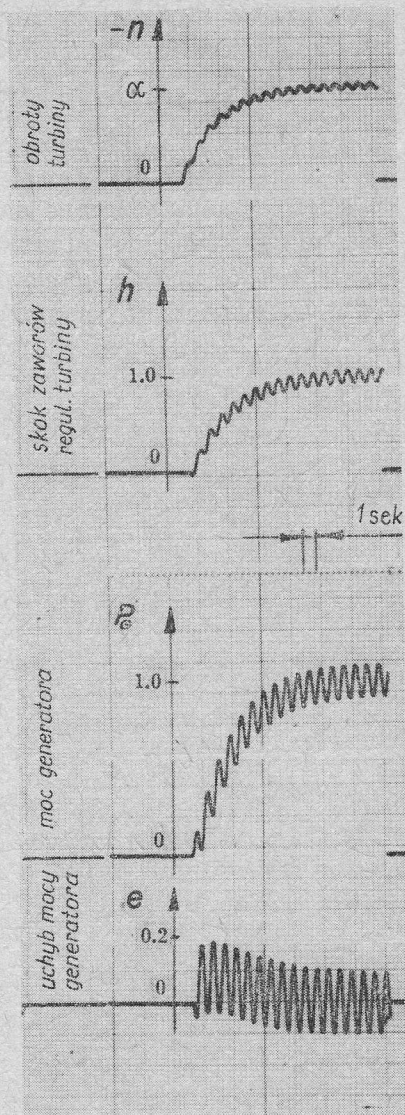
$$G_T = \frac{1}{1 + T_W s} \quad (7)$$

Dopuszczalne wzmocnienie regulatora k_R maleje ze wzrostem k_W . W obszarze poniżej minimum technicznego układ osiąga granicę stabilności przy $k_R=2,5$ (tj. przy wartości trzy razy mniejszej niż optymalna dla $k_W=0,2$), patrz rysunek 9.

a. Wskaźniki optymalne regulatora w funkcji współczynnika mocy

Przeprowadzone dodatkowe badania optymalizacyjne dla $k_W=0,3$ i $0,4$ dostarczyły wyników zilustrowanych na rysunku 10 i w tabeli 1. Podano tam optymalne parametry regulatora PI, w funkcji współczynnika k_W . Ze wzrostem udziału mocy turbiny wysokoprężnej k_W wartość wzmocnienia regulatora $k_{R\text{opt}}$ wyraźnie maleje (od 7,5 do 3,5), natomiast iloczyn $k_W \cdot k_{R\text{opt}}$ jest niemal stały. Wartość optymalnego czasu zdwojenia $T_{i\text{opt}}$ zmienia się niewiele, malejąc nieco ze wzrostem k_W . Zmierzony minimalny wskaźnik jakości jest w badanych trzech przypadkach ($k_W=0,2, 0,3, 0,4$) jednakowy i wynosi $I_{\text{min}} \approx 0,12$ s.

Regulator strojony optymalnie przy $k_W=0,2$ prowadzi do niestabilnych przebiegów gdy $k_W=0,4$. Na odwrót, regulator optymalny przy $k_W=0,4$ zapewnia stabilność również przy $k_W=0,2$ ale ma współczynniki ($k_{R\text{opt}}=3,5, T_{i\text{opt}}=0,3$ s) dające nie-



Rys. 9. Przebiegi przejściowe w obszarze poniżej minimum technicznego mocy ($k_W=1$; wzmocnienie regulatora PI $k_R=2,5$)

optymalny przebieg przy $k_W=0,2$. Z rysunku 5 można odczytać (punkt I_1), że w takim przypadku wskaźnik $I \approx 0,22$ s jest więc ok. 1,8 razy większy od I_{min} .

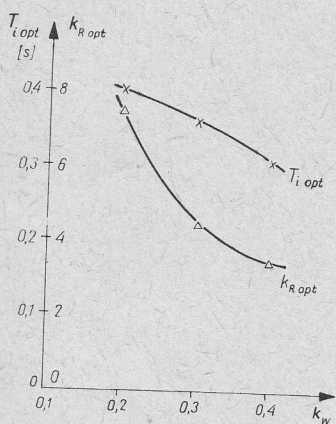
Tabela 1

k_W	I_{min} [s]	$k_{R\text{opt}}$	$k_W \cdot k_{R\text{opt}}$	$T_{i\text{opt}}$ [s]
0,2	0,12	7,5	1,5	0,4
0,3	0,12	4,5	1,35	0,37
0,4	0,12	3,5	1,40	0,31

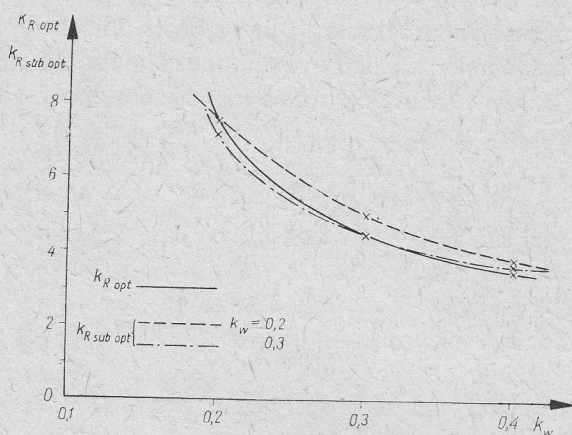
Optymalność regulatora w całym przedziale mocy można zapewnić przez zastosowanie samostrojenia jego parametrów w funkcji mocy turbozespołu, zgodnie z wartościami podanymi w tabeli 1.

b. Wskaźniki suboptymalne regulatora z nastawialnym współczynnikiem wzmocnienia

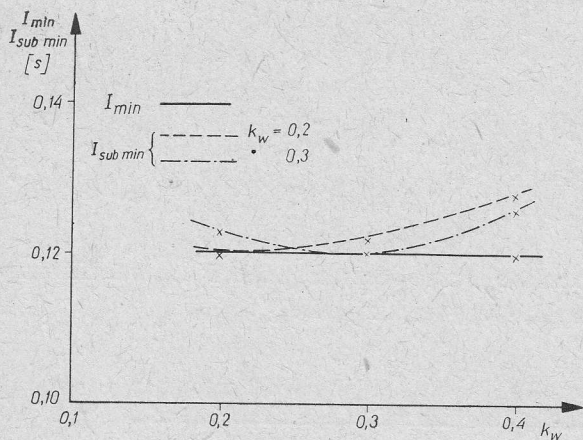
Względnie prosta technicznie jest realizacja samostrojenia współczynnika wzmocnienia regulatora k_R ; trudniejsze jest samostrojenie czasu zdwojenia T_i . Zauważyliśmy jednak, że ze zmianą k_W zmienia się głównie wzmocnienie regulatora optymalnego k_R , mniej zaś czas T_i . W związku z tym, przeprowadzono optymalizację przy nieziennej wartości



Rys. 10. Optymalne nastawy regulatora PI w zależności od współczynnika k_W



Rys. 11. Wzmocnienie regulatora PI optymalnego i suboptymalnego w zależności od współczynnika k_W



Rys. 12. Wskaźnik jakości układu z regulatorem PI optymalnym i suboptymalnym w zależności od współczynnika k_W

T_i i tak otrzymane suboptymalne wzmocnienie $k_{R\ sub\ opt}$ regulatora przedstawiono na rysunku 11 i porównano z wartościami optymalnymi $k_{R\ opt}$. Na rysunku 12 podano wskaźniki jakości układu suboptymalnego dla dwóch rodzajów suboptymalizacji:

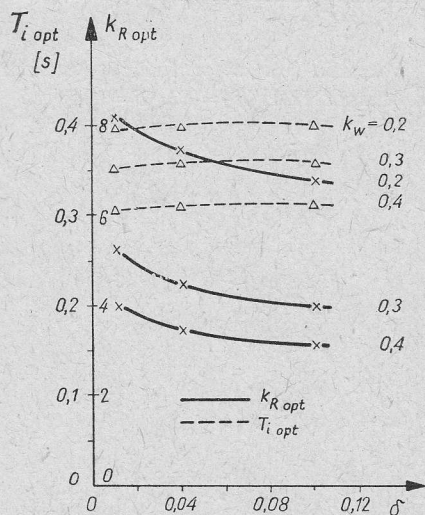
- 1) dla T_i optymalnego przy $k_w=0,2$ oraz
- 2) dla T_i optymalnego przy $k_w=0,3$.

W obu przypadkach maksymalna różnica pomiędzy $k_{R \text{ sub opt}}$ a $k_{R \text{ opt}}$ nie przekracza 10%, zaś różnice wskaźników jakości są praktycznie pomijalne.

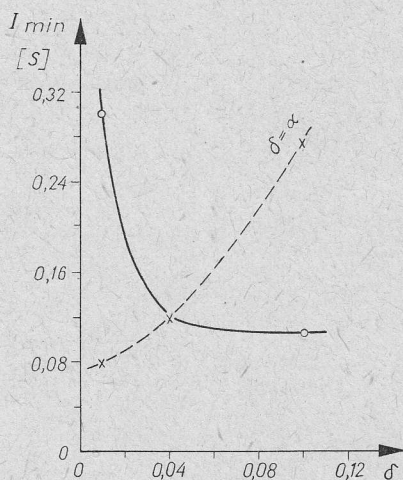
Wydaje się, że w rozpatrywanym układzie sterowania mocy turboszespołu wystarczy, z punktu widzenia jego adaptacji, strojenie wyłącznie współczynnika wzmocnienia przy stałej wartości czasu zdwojenia T_i .

3.1.3. Wpływ stopnia udziału turboszespołu w podtrzymywaniu częstotliwości sieci δ na optymalizację regulatora mocy

Im mniejsza wartość współczynnika δ tym większa jest wrażliwość układu sterowania mocy turboszespołu na zmiany częstotliwości w systemie elektroenergetycznym, tym mniejszy udział ich oddziaływania na bezpośrednią zmianę mocy generatora, poprzez chwilowy poślizg. Na rysunku 13 przedstawiono zależność optymalnych parametrów regulatora od δ (dla różnych wartości k_w). Ze zmianą δ zmienia się nieco optymalne



Rys. 13. Optymalne nastawy regulatora PI w zależności od statyzmu turboszespołu δ , dla różnych wartości współczynnika k_w

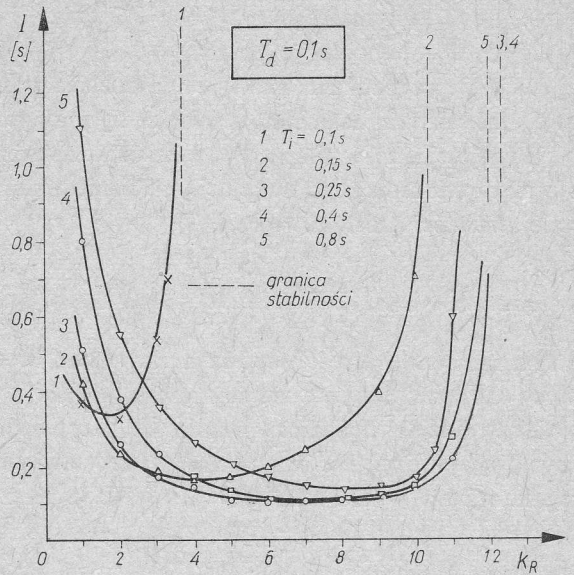
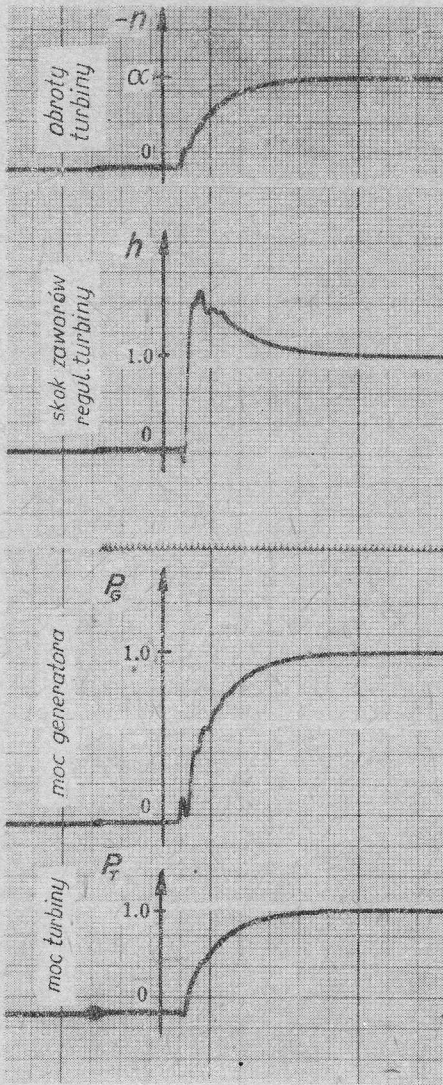


Rys. 14. Wskaźnik jakości układu z regulatorem PI w zależności od statyzmu turboszespołu δ

wzmocnienie k_R , natomiast czas zdwojenia T_i pozostaje prawie stały. Na rysunku 14 podano przebieg wskaźnika jakości. Ze wzrostem δ całka I_{min} maleje; gdyby jednak przyjmować każdorazowo $\delta = \alpha$, wskaźnik I_{min} wzrastałby ze wzrostem δ (linia przerywana na rys. 14). Dla danego δ minimalny wskaźnik I_{min} nie zależy od wartości współczynnika mocy turbiny WP, k_w .

3.2. Optymalizacja regulatora PID

Na rysunku 15 podano przebiegi przejściowe przy optymalnych parametrach regulatora PID. Nie różnią się one wyraźnie od przebiegów w układzie z optymalnym regula-



Rys. 16. Wskaźnik jakości w funkcji parametrów regulatora PDI ($k_w=0,2$, $\delta=0,04$)

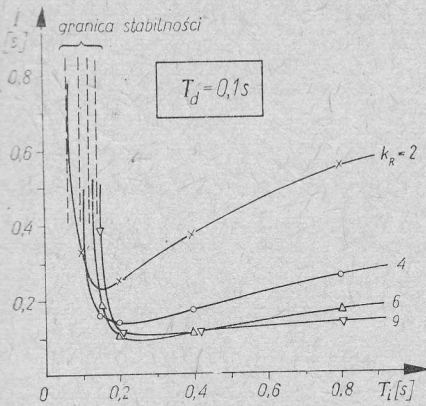
Rys. 15. Przebiegi przejściowe przy optymalnych nastawach regulatora PDI

torem PI (porównaj rys. 6). Dla $\delta=0,04$ i $k_w=0,2$ otrzymano $k_{R\text{opt}}=8$, $T_{i\text{opt}}=0,25$ s, $T_{d\text{opt}}=0,10$ s. Transmitancja regulatora optymalnego ma więc postać

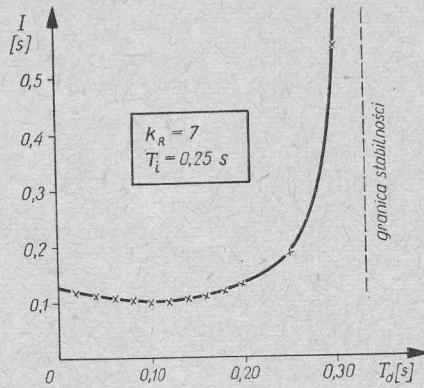
$$G_{R20}=8 \left(1 + \frac{1}{0,25s} + \frac{0,1s}{1+0,01s} \right). \quad (8)$$

Dla członu D przyjęto stałą czasową inercyjności równą $0,01$ s (nie optymalizując jej). Minimalny wskaźnik jakości układu sterowania wynosi $I_{\text{min}}=0,10$ s.

W otoczeniu punktu optymalnego wskaźnik I jest najbardziej wrażliwy na zmianę czasu zdwojenia T_i , zwłaszcza w obszarze $T_i < T_{i\text{opt}}$ (por. rys. 16, 17 i 18).



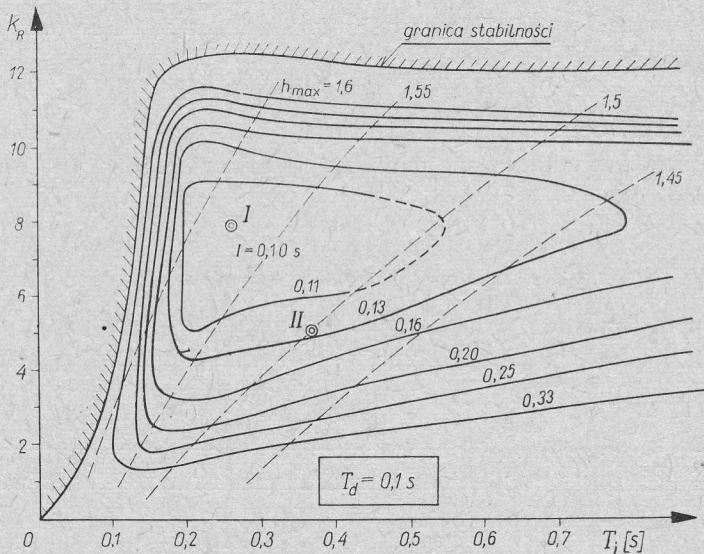
Rys. 17. Wskaźnik jakości w funkcji parametrów regulatora PID ($k_w=0,2$, $\delta=0,04$)



Rys. 18. Wskaźnik jakości w funkcji czasu wyprzedzenia regulatora PID

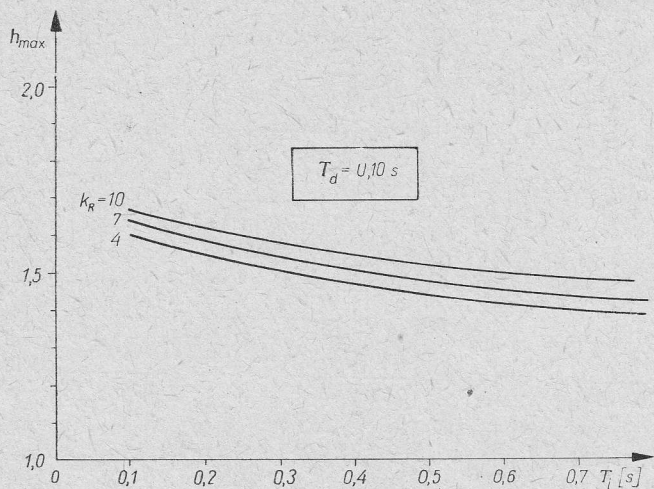
3.2.1. Stabilność układu i przesterowanie zaworów w zależności od parametrów regulatora

Na rysunku 19 (sporządzonym dla jednej wartości $T_d=0,10$ s) zaznaczono granicę stabilności oraz naniesiono linie stałych przesterowań zaworów h_{max} , we współrzędnych k_R , T_i .



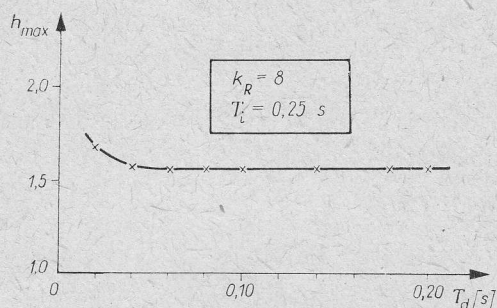
Rys. 19. Wskaźnik jakości i przesterowanie zaworów regulacyjnych w funkcji parametrów regulatora PID

Zapas stabilności dla punktu optymalnego I wynosi około 1,6 we współczynniku wzmocnienia oraz około 1,7 w czasie zdwojenia. Wpływ parametrów k_R i T_i na przesterowanie h_{max} przedstawiono dodatkowo na rysunkach 20 i 21. Przesterowanie h_{max}



Rys. 20. Przerastanie zaworów turbiny w funkcji nastaw regulatora PID

Rys. 21. Przerastanie zaworów turbiny w funkcji czasu wyprzedzenia regulatora PID



maleje ze wzrostem T_i oraz rośnie ze wzrostem k_R . Czas wyprzedzenia T_d ma – w dość szerokim zakresie zmian w otoczeniu punktu optymalnego – niewielki wpływ na przesterowanie zaworów.

3.2.2. Wpływ udziału mocy turbiny WP na optymalizację regulatora

Przeprowadzono badania optymalizacyjne (podobnie jak w przypadku regulatora PI, patrz punkt 3.1.2) dla wartości $k_W = 0,2, 0,3$ i $0,4$. Wyniki podano na rysunku 22 oraz w tabeli 2.

Tabela 2

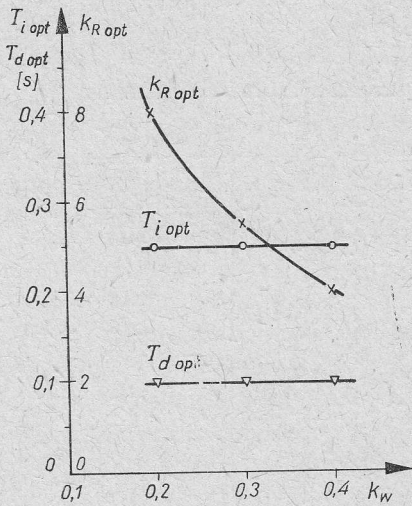
k_W	I_{\min} [s]	$k_{R \text{ opt}}$	$k_W \cdot k_{R \text{ opt}}$	$T_{i \text{ opt}}$ [s]	$T_{d \text{ opt}}$ [s]
0,2	0,10	8,0	1,6	0,25	0,10
0,3	0,10	5,5	1,65	0,25	0,10
0,4	0,10	4,0	1,6	0,25	0,10

Nie stwierdzono mierzalnych zmian czasów $T_{i \text{ opt}}$ oraz $T_{d \text{ opt}}$. Ze wzrostem k_W maleje wartość optymalna współczynnika proporcjonalności regulatora $k_{R \text{ opt}}$, przy czym iloczyn $k_W \cdot k_{R \text{ opt}}$ prawie się nie zmienia. Całka kryterialna jest w całym obszarze zmian k_W stała i wynosi $I_{\min} \approx 0,10$ s.

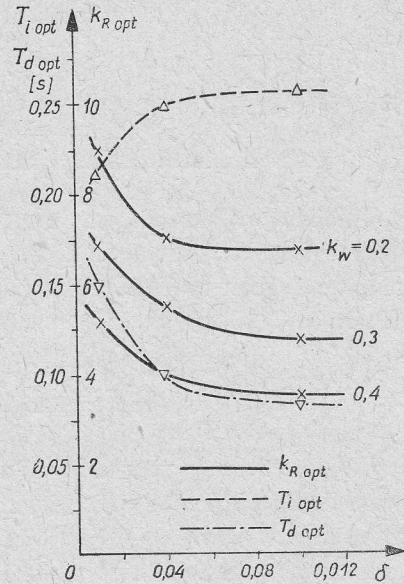
Zgodnie z tabelą 2 oraz rysunkiem 22, adaptacja regulatora PID ze względu na współczynnik udziału mocy turbiny WP wymagałaby jedynie strojenia współczynnika wzmocnienia k_R .

3.2.3. Wpływ stopnia udziału turbozespołu w podtrzymywaniu częstotliwości sieci δ na optymalizację regulatora mocy

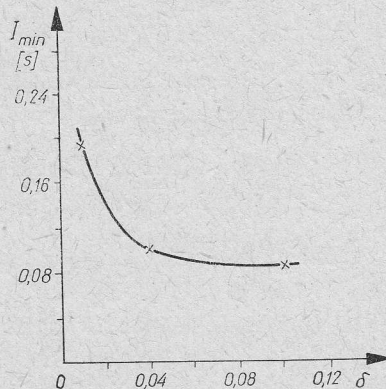
Podobnie jak w przypadku regulatora PI, ze wzrostem δ maleje optymalna wartość współczynnika wzmocnienia regulatora PID, natomiast czas zdwojenia $T_{i\ opt}$ nieco rośnie, a czas wyprzedzenia $T_{d\ opt}$ maleje (patrz rys. 23). Na rysunku 24 podano zależność optymalnego wskaźnika jakości od δ .



Rys. 22. Optymalne nastawy regulatora PID w zależności od współczynnika udziału mocy k_W



Rys. 23. Optymalne nastawy regulatora PID w zależności od statyzmu turbozespołu δ , przy różnych wartościach współczynnika k_W



Rys. 24. Wskaźnik jakości układu z regulatorem PID w funkcji statyzmu turbozespołu δ

3.3. Porównanie układu sterowania mocy turbozespołu z przegrzewem wtórnym przy optymalnym regulatorze PI oraz przy optymalnym regulatorze PID

W tabeli 3 podano dane porównawcze dla obu typów regulatorów przy $\delta=0,04$ oraz $k_w=0,2$. Minimalny wskaźnik jakości I_{\min} układu z regulatorem PI jest o 20% większy

Tabela 3

	PI	PID
$k_{R \text{ opt}}$	7,5	8,0
$T_{i \text{ opt}}$ [s]	0,4	0,25
$T_{d \text{ opt}}$ [s]	—	0,10
I_{\min} [s]	0,12	0,10
$k_{R \text{ gr}}/k_{R \text{ opt}}$	$12/7,5=1,6$	$12,5/8,0=1,56$
$T_{i \text{ opt}}/T_{i \text{ gr}}$	$0,4/0,16=2,5$	$0,25/0,15=1,67$
$T_{d \text{ gr}}/T_{d \text{ opt}}$	—	$0,33/0,10=3,3$
h_{\max}	1,9	1,6

od odpowiedniego wskaźnika w układzie sterowania z regulatorem PID. Zapasy stabilności ze względu na k_R są jednakowe, a ze względu na T_i nieco mniejsze w przypadku optymalnego regulatora PID. Przeszterowanie zaworów h_{\max} jest mniejsze przy regulatorze PID.

3.4. Wpływ ograniczeń kryterium jakości na parametry regulatora

Z rysunków 5 i 19 (oraz tabeli 3) wynika, że punkt I , odpowiadający optymalnym nastawom regulatora PI lub PID, leży zbyt blisko granicy stabilności i w obszarze dużych przesterowań zaworów.

Ograniczając przesterowanie zaworów do wartości

$$h_{\max} \leq 1,5$$

oraz przyjmując zapas wzmacnienia

$$A = \frac{k_{R \text{ gr}}}{k_R} \geq 2,5,$$

otrzymamy inne nastawy regulatora i gorsze wskaźniki jakości. I tak, transmitancja regulatora PI spełniającego założone ograniczenia ma postać (patrz rys. 5, punkt II)

$$G_{R11} = 5 \left(1 + \frac{1}{1,4s} \right), \quad (9)$$

przy czym wskaźnik jakości wzrasta od wartości $I_{\min}=0,12$ s do $I \approx 0,4$ s, to jest ponad 3-krotnie.

Podobnie dla regulatora PID (punkt II na rys. 19) mamy

$$G_{R21} = 5 \left(1 + \frac{1}{0,4s} + \frac{0,1s}{1+0,01s} \right). \quad (10)$$

Wskaźnik jakości wzrasta tu nieznacznie, od wartości $I_{\min}=0,10$ s do $I \approx 0,13$ s, więc zaledwie o 30%.

[Uwaga: nie uwzględniono tu możliwości pewnej poprawy wskaźnika I przez odpowiednią zmianę wartości T_d].

Porównując parametry regulatora PI „optymalnego z ograniczeniami” (patrz (9))

$$k_R=5, \quad T_i=1,4 \text{ s}, \quad (9.1)$$

z wynikami otrzymanymi przy podobnej optymalizacji przez Próchnickiego [11],

$$k_R=3,1 \quad T_i=1,5 \text{ s}, \quad (9.2)$$

należy zwrócić uwagę, że badania [11] prowadzono dla bardziej uproszczonego modelu obiektu, nie uwzględniając dynamiki generatora ($G_{\text{gen}} \equiv 1$) ani oddziaływania częstotliwości na zmiany mocy generatora ($G_{\text{gen}} \equiv 0$). Wprowadzono wymuszenie skokowe mocą zadaną turbozespołu, co prowadziło do większych przesterowań zaworów. Przyjęto $h_{\max}=2$ oraz optymalizowano regulator przy $k_W=0,3$. Redukując wzór (9) do wartości $k_W=0,3$ (zgodnie z tabelą 1), otrzymujemy

$$G_{PJ} \approx 3 \left(1 + \frac{1}{1,4 \text{ s}} \right), \quad (11)$$

czyli

$$k_R \approx 3, \quad T_i \approx 1,4 \text{ s}.$$

Parametry (11) oraz (9.2) wykazują nieoczekiwanie dobrą zgodność.

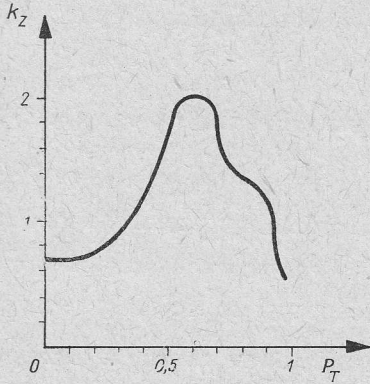
4. Dobór typu regulatora mocy

Stosując jako kryterium optymalizacji układu sterowania mocy turbozespołu całość z bezwzględnej wartości uchybu, otrzymuje się zbyt mały zapas stabilności i nadmierne przesterowanie zaworów regulacyjnych. Wprowadzając do tego kryterium jakości ograniczenia, otrzymano transmitancje regulatorów (9) i (10), realizujących oczywiście gorsze wartości wskaźnika jakości. O ile różnice pomiędzy układami z optymalnymi regulatorami PI i PID bez uwzględnienia ograniczeń są znikome, to w przypadku uwzględnienia ograniczeń otrzymano wskaźnik jakości przy regulatorze PI około 3 razy większy niż przy regulatorze PID. Mimo to, jak się wydaje, wskaźniki te są wystarczająco dobre z punktu widzenia wymagań technicznych stawianych regulacji pierwotnej turbozespołów, i można uznać, że regulator PI wystarcza dla spełnienia zadania.

5. Adaptacja regulatora przy zmiennych obciążeniach

W przypadku turbozespołu parowego posiadamy wystarczająco dokładny model matematyczny obiektu, co ułatwia zadanie samostrojenia nastaw regulatora i nie wymaga stosowania skomplikowanej procedury identyfikacyjnej [12]. Parametry generatora zmie-

niają się niewiele ze zmianą mocy [6]. Głównie znaczenie ma nieliniowość statyczna turbiny w postaci zmiennego współczynnika udziału mocy turbiny WP, $k_W(P_T)$, oraz nieliniowości w układzie zaworów parowych $k_Z(P_T)$, powodujące dość znaczne zmiany



Rys. 25. Współczynnik proporcjonalności zaworów parowych turbiny TK 200 w zależności od obciążenia maszyny

miejscowych wartości współczynnika proporcjonalności obiektu. Tak na przykład w turbinie TK 200 współczynnik proporcjonalności zaworów zmienia się w zakresie

$$0,6 \leq k_Z \leq 2$$

(patrz rys. 25), co może prowadzić do lokalnej niestabilności przy sztywnych nastawach regulatora.

Zależności $k_W(P_T)$ oraz $k_Z(P_T)$ są z dostateczną dokładnością znane już w fazie projektowania turbiny. Jak wynika z prezentowanych badań, adaptacja regulatora sprowadza się do zmiany nastawy współczynnika wzmocnienia regulatora, według przybliżonej zasady

$$k_R k_Z k_W = k_{R0} k_{W0} = \text{const}, \quad (12)$$

czyli

$$k_R(P_T) = k_{R0} k(P_T), \quad (13)$$

gdzie

$$k(P_T) = \frac{1}{k_Z} \frac{k_{W0}}{k_W}$$

Zasada ta obowiązuje w zakresie mocy od minimum technicznego do wartości znamionowej. W przybliżeniu można ją zastosować w całym zakresie mocy od zera do maksimum. Jeżeli poniżej minimum technicznego wchodzi w działanie zawory niskoprężne, to struktura obiektu zmienia się i w otoczeniu tego punktu zachodzi skokowa zmiana współczynnika k_W , od wartości

$$k_W|_{P_{T\min}}$$

do

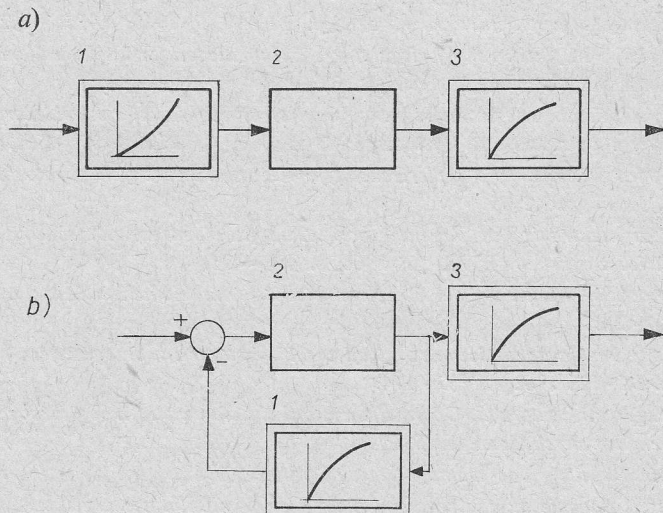
$$k_W = 1$$

dla

$$P_T < P_{T\min}$$

(14)

Realizacja techniczna adaptacji (13) polega na strojeniu współczynnika $k_R(P_T)$, zgodnie z (13), lub zastosowaniu funkcji $P_T/P_{T_0} = \int kd(h/h_0)$ w sprzężeniu zwrotnym toru głównego regulatora, ewentualnie na wykorzystaniu funkcji odwrotnej w układzie szeregowym (patrz rys. 26).



Rys. 26. Kompensacja nielineowości w układzie szeregowym (a) i w układzie ze sprzężeniem zwrotnym (b)

1 – człon nielineowy adaptacyjny, 2 – element (liniowy) serwomechanizmu, 3 – nielineowość statyczna obiektu

W relacji $k=k(P_T)$ można wprowadzić zamiast mocy turbiny inną wielkość do niej proporcjonalną lub w przybliżeniu proporcjonalną (np. ciśnienie pary w stopniu regulacyjnym bądź za przegrzewaczem wtórnym, położenie zaworów lub inny sygnał regulacyjny do niego proporcjonalny).

Warto tu zauważyć, że wartość współczynnika adaptacyjnego $k(P_T)$ może zmieniać się w szerokich granicach. Według przykładowych danych dla turbiny TK 200,

$$0,38 \leq k(P_T) \leq 2,5.$$

6. Wnioski końcowe

W układzie sterowania mocy turbozespołu z przegrzewem wtórnym celowe wydaje się stosowanie regulatora PI optymalizowanego według kryterium całki z wartości bezwzględnej uchybu mocy, z uwzględnieniem ograniczenia zapasu stabilności i przesterowania zaworów (8). Silną nielineowość obiektu można skompensować prostym strojeniem współczynnika wzmocnienia regulatora (12). Pozwala to na uzyskanie dobrych właściwości dynamicznych układu w pełnym zakresie obciążeń maszyny.

Literatura

- [1] R. Baranowsky, *Automatische Frequenz- und Übergabeleistungsregelung der DDR*. Wyd. 10 Jahre Institut für Energetik, Leipzig 1963.
- [2] G. Boll, *Regelungsaufgaben im Verbundbetrieb*. ETZ-A, 5, 1960, s. 154 - 162.
- [3] R. J. Družinskij i in., *Elektronnyj riegulator s awtomaticzeskim izmienienijem skorosti obratnoj swiazi*. Energomaszinostrojenije, 3, 1969, s. 37 - 38.
- [4] O. J. Elgard, *Optimum Megawattfrequency control of Multiarea electric energy systems*. JEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-89, No. 4, 1970, s. 556 - 563.
- [5] A. W. Iwanow, *Stacionarnyje i pieriechnodnyje riezimy moszcznych paroturbinnych ustanowok*. Izd. Energija, Leningrad 1971.
- [6] W. Latzel, *Zur elektronischen Regelung von Dampfturbinen mit Zwischenüberhitzung bei verschiedenen Betriebszuständen*. BWK 10, 1968, s. 486 - 493.
- [7] W. Peinke, *Adaptiv-Steuerung der Regelereinstellung mit einfachen Mitteln*. Regelungstechnik 6, 1966, s. 274 - 277.
- [8] S. Perycz, *Zagadnienia dynamiczne regulacji turbin parowych z przegrzewem międzystopniowym*. Prace IMP, z. 11 - 12, 1962, s. 137 - 174.
- [9] S. Perycz, Z. Domachowski, *Optymalizacja układu sterowania mocy turbozespołu przy wymuszeniach zdeterminowanych*. Biul. IMP PAN, nr 711, 1972.
- [10] P. Profos, *Die Regelung von Dampfanlagen*, Springer, 1962.
- [11] W. Próchnicki, *Badanie układu regulacji mocy i ciśnienia bloku energetycznego przy użyciu elektronicznej maszyny analogowej*. Prace IMP, z. 52, 1971, s. 45 - 80.
- [12] D. Rutkowski, *Optimale Identifizierung der Leistungsverteilungskoeffizienten des Turbogenerators und ihre Anwendung an einer adaptiven Steuerung*. Messen- steuern-regeln, 9, 1970, s. 342 - 345.
- [13] J. Szczęsny, *Właściwości dynamiczne turbin z przegrzewem wiórnym przy pracy w obwodzie regulacji mocy*. Biul. IMP PAN, nr 294, 1964.
- [14] D. Winkler, *Untersuchung verschiedener Verfahren für die Regelung des Druckes von Dampferzeugern*. Regelungstechnik 6, 1963, s. 253 - 261.

Исследование оптимизации регулятора мощности турбоагрегата с самонастройкой в зависимости от нагрузки

Резюме

Представлен анализ оптимальной настройки регулятора мощности турбоагрегата с промпрегревом, работающего на большую электроэнергетическую сеть. Основой исследований являются блочная схема регулируемого контура (рис. 1) и схема объекта (рис. 2). Возмущающей величиной считается изменение частоты сети, воздействующее двухходно на систему, в виде сигнала замеряемого регулятором мощности, как и величины вызывающей мгновенное изменение скольжения генератора. Принимаются скачкообразные помехи мощности электроэнергетической системы. Исследовались ПИ и ПИД регуляторы с помощью аналогового компьютера, оптимизируя пробеги по критерию интеграла абсолютных значений отклонений мощности турбоагрегата, с приемом ограничений запаса устойчивости и перерегулирования клапанов турбины. Получены трансмитанции оптимальных регуляторов (9) и (10) для номинальной мощности турбины. Констатируется отчетливая зависимость полезных параметров регулятора от нагрузки машины, именно от доли мощности, отдаваемой частью ВД турбины k_w . Доказывается возможность простой настройки регулятора в целом диапазоне нагрузок путем изменения только его усиления по зависимостям (12) и (13).

Optimization Study of a Turbine-Generator Power Governor with Adaptation of Settings in Function of Load

Summary

An analysis of optimum settings of the power governor of a turbine-generator with interstage reheat working for a large power grid is presented. Subject of the analysis are a block scheme of the control circuit (fig. 1) and the arrangement of the object (fig. 2). The shift in the grid frequency has been adopted as the forcing quantity, acting on the system as a double input: as a signal measured by the power governor and as a quantity causing instantaneous changes in the generator slip. A step disturbance of the power system loading has been assumed. PI and PID regulators have been examined with the use of an analogue computer. The response was optimized according to the criterion of the integral from the absolute value of the turbine-generator power error, with the assumption of limitations in the stability margin and overcontrol of the turbine values. Optimum transmittances of the regulators (9) and (10) for the rated power of the turbine have been obtained. It has been observed that there is a distinct dependence of the advantageous governor parameters on the load of the machine i. e. on the power developed by the h. p. turbine k_w .

A possibility has been proved of a simple adaptation of the regulator within the entire range of loads by solely altering the regulator gain in compliance with the rule (12), (13).