

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

92

WARSZAWA—POZNAŃ 1990

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

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

RADA REDAKCYJNA—EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WŁODZIMIERZ PROSNAK · KAZIMIERZ STELLER
ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY—CHAIRMAN) · JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY—EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA—EDITORIAL OFFICE

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

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1990

Printed in Poland

ISBN 83-01-10189-X
ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Ark. wyd. 17,75. Ark. druk. 13. Papier druk. sat. kl. III, 70 g, 70 × 100 cm
Oddano do składania w lipcu 1989 r. Podpisano do druku w listopadzie 1990 r.
Druk ukończono w grudniu 1990 r. Zam. nr 1079/89

Zakłady Graficzne im. KEN w Bydgoszczy

ZYGFRYD DOMACHOWSKI, ZYGMUNT KLIMACKI

Gdańsk

Automatyczna regulacja częstotliwości i mocy czynnej elektroenergetycznego systemu wydzielonego*

Przedstawiono problemy występujące w automatycznej regulacji przemysłowych systemów elektroenergetycznych, w których wymaga się z powodów technologicznych niezawodnego zasilania energią elektryczną, o parametrach nie wykraczających poza narzucone przedziały. Omówiono proponowaną opatentowaną koncepcję regulacji częstotliwości i mocy czynnej w takim systemie, wyniki badań modelowych oraz eksploatacyjnych.

Wstęp

Zakłady produkcyjne przemysłu włókien syntetycznych, papierniczego, chemicznego itp. wymagają najczęściej zasilania zarówno energią elektryczną, jak energią cieplną (w postaci pary wodnej). Przy tym, ze względów technologicznych, wymagają pewności w zasilaniu, a ponadto wymagają odpowiedniej jakości energii, zwłaszcza elektrycznej. Oznacza to, że w szczególności częstotliwość i napięcie zasilającego prądu elektrycznego powinny spełniać odpowiednie warunki (wartości tych parametrów powinny zawierać się w narzuconych przedziałach), narzucone przez wymagania procesu technologicznego odbiorcy energii elektrycznej. Na przykład, w rozważanej dalej technicznej sytuacji zakładu włókien sztucznych:

- dopuszczalna przerwa w zasilaniu energią elektryczną nie powinna trwać dłużej niż 0,5 s,
- dopuszczalny czas trwania obniżonego napięcia, nie niższego niż 0,5 wartości nominalnej, nie powinien przekraczać 1 s,
- częstotliwość prądu elektrycznego powinna być możliwie stała i nie powinna wykraczać poza przedział $49,5 \div 50,2$ Hz,
- uchyb przejściowy częstotliwości nie powinien być większy niż 0,7 Hz.

W normalnych warunkach wymagania odnoszące się do pewności w zasilaniu energią elektryczną oraz do jakości energii elektrycznej mogą być najlepiej spełnione, gdy elektroenergetyczny system zakładowy (sieć zakładowa) jest połączony z ogólnokrajowym systemem elektroenergetycznym. Jednak zakłócenia i awarie w ogól-

* Praca wykonana w ramach Programu Rządowego PR-8: „Kompleksowy rozwój energetyki”, zadanie 6.4.9.12.

nokrajowym systemie elektroenergetycznym (lokalne zakłócenia atmosferyczne, awarie, przepięcia, błędy łączeniowe) zmuszają do odłączania sieci zakładowej od systemu ogólnokrajowego.

Gdy sieć zakładowa jest połączona z systemem ogólnokrajowym, to regulacja częstotliwości (mocy czynnej) i napięcia (mocy biernej) jest wykonywana, ogólnie mówiąc, przez odpowiednie układy automatycznej regulacji ogólnokrajowego systemu elektroenergetycznego. Po odłączeniu sieci zakładowej od systemu ogólnokrajowego regulacje częstotliwości i napięcia odbywają się w systemie wydzielonym. Regulacja ciśnienia pary zasilającej zakład przemysłowy odbywa się przez turbozespoły, upustowe i przeciwprężne, tzn. przez turbinowe regulatory ciśnienia pary w upustach.

Do regulacji częstotliwości i napięcia w systemie wydzielonym niezbędny jest specjalny układ (układy) regulacji automatycznej. Jego podstawowe zadania są następujące:

- zapewnienie zasilania ważnych ze względów technologicznych odbiorników w systemie wydzielonym, np. przez utrzymywanie dodatniego bilansu mocy wymiany, gdy system wydzielony jest połączony z systemem ogólnokrajowym,
- ograniczenie przejściowej zwwyżki częstotliwości i napięcia podczas odłączania systemu wydzielonego od ogólnokrajowego,
- regulacja częstotliwości i napięcia w systemie wydzielonym,
- ponowna synchronizacja systemu wydzielonego z ogólnokrajowym.

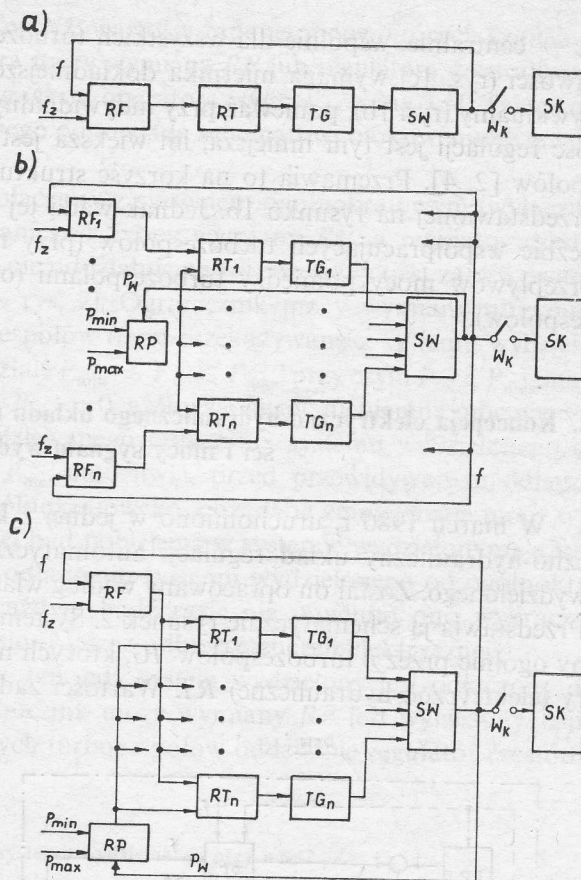
W dostępnej obcojęzycznej literaturze technicznej można znaleźć prace na temat takich problemów [1, 11, 12]. Niniejszy artykuł dotyczy w dalszym ciągu przede wszystkim automatycznej regulacji częstotliwości i mocy czynnej elektroenergetycznego systemu wydzielonego.

1. Struktura układu regulacji częstotliwości i mocy elektroenergetycznego systemu wydzielonego

Rysunek 1 przedstawia uproszczone schematy blokowe możliwych i spotykanych struktur układu regulacji częstotliwości i mocy elektroenergetycznego systemu wydzielonego. Na rysunku 1a przedstawiono sytuację, w której system wydzielony jest zasilany przez jeden turbozespół, lub — inaczej mówiąc — gdy z każdym spośród turbozespołów zasilających zakładową sieć elektroenergetyczną (system wydzielony) związany jest odrębny podsystem wydzielony. Wówczas każdy z tych turbozespołów ma odrębny regulator częstotliwości i mocy czynnej (systemu wydzielonego).

Rysunek 1b przedstawia sytuację, gdy elektroenergetyczny system wydzielony jest zasilany przez ogólnie n współpracujących turbozespołów, przy czym każdy z nich jest zaopatrzony w odrębny regulator częstotliwości i mocy.

Na rysunku 1c przedstawiono podobną jak poprzednio strukturę zasilania elektroenergetycznego systemu wydzielonego (zasilanego przez n turbozespołów), jednakże regulacja częstotliwości i mocy systemu wydzielonego odbywa się przez jeden ogólnosystemowy regulator częstotliwości i mocy.



Rys. 1. Uproszczone schematy blokowe różnych struktur elektroenergetycznego systemu wydzielonego

f — częstotliwość (f_z — wartość zadana), P_w — moc czynna wymiany, RF — regulator częstotliwości systemu wydzielonego, RP — ogranicznik mocy wymiany, RT — regulator turbozespołu, SK — elektroenergetyczny system krajowy, SW — elektroenergetyczny system wydzielony, TG — turbozespoł, W — wyłącznik

W praktyce spotyka się każdy z wymienionych przypadków struktury i regulacji elektroenergetycznego systemu wydzielonego. Każdy z nich ma pewne zalety i wady.

Zasilanie systemu wydzielonego przez jeden turbozespoł (rys. 1a) jest niewłaściwe i nie zalecane. Ewentualna awaria turbozespołu pracującego w systemie wydzielonym (co już jest najczęściej sytuacją wymuszoną, awaryjną) pozbawiłaby całkowicie zasilania energią elektryczną sieć zakładową. Z tych powodów, w przypadku sieci zakładowych wymagających pewności w zasilaniu energią elektryczną — o czym napisano już we wstępie — zaleca się zasilanie systemu wydzielonego przez co najmniej dwa turbozespoły (ogólnie przez $n > 1$ turbozespołów). Gdy system wydzielony jest zasilany przez dokładnie dwa turbozespoły, wówczas moc każdego z nich powinna zapewniać — z powodów niezawodnościowych — zasilanie co najmniej wszystkich ważnych z powodów technologicznych odbiorników.

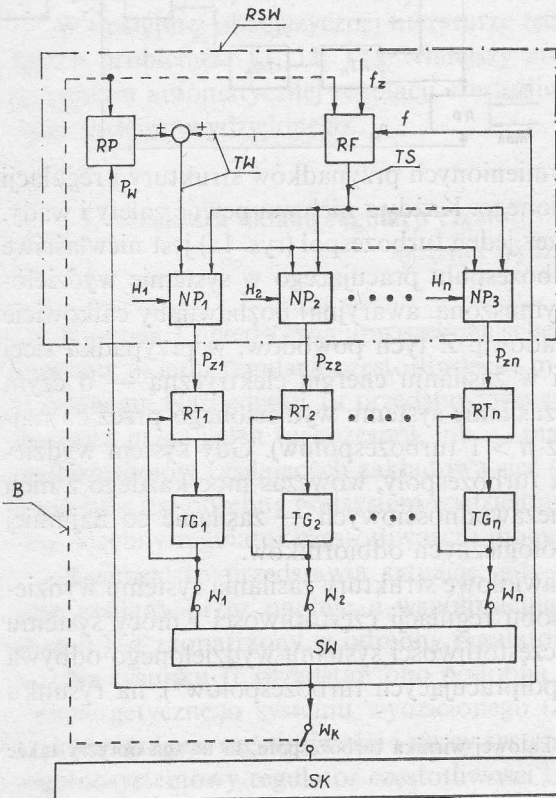
Rysunki 1b i 1c, przedstawiające prawidłowe struktury zasilania systemu wydzielonego, różnią się pod względem sposobu regulacji częstotliwości i mocy systemu wydzielonego. Na rysunku 1b pomiar częstotliwości systemu wydzielonego odbywa się indywidualnie, przy każdym ze współpracujących turbozespołów*), na rysunku

*) Może to być również pomiar prędkości kątowej wirnika turbozespołu, ta uwaga dotyczy także rysunku 1a.

1c — centralnie, wspólnie dla wszystkich turbozespołów. Centralny pomiar częstotliwości (rys. 1c) wymaga miernika dokładniejszego (wyższej klasy) niż pomiar indywidualny (rys. 1b), ponieważ przy indywidualnym pomiarze częstotliwości nieczułość regulacji jest tym mniejsza, im większa jest liczba współpracujących turbozespołów [2, 4]. Przemawia to na korzyść struktury regulacji systemu wydzielonego przedstawionej na rysunku 1b. Jednak wadą tej struktury regulacji jest, przy małej liczbie współpracujących turbozespołów (przy małym n), obawa o występowanie przepływów mocy pomiędzy turbozespołami (obawa o niestateczną pracę turbozespołów).

2. Koncepcja elektryczno-hydraulicznego układu regulacji automatycznej częstotliwości i mocy sygnału wydzielonego

W marcu 1980 r. uruchomiono w jednej z krajowych elektrociepłowni elektryczno-hydrauliczny układ regulacji automatycznej elektroenergetycznego systemu wydzielonego. Został on opracowany według własnej opatentowanej koncepcji [9,10]. Przedstawia ją schematycznie rysunek 2. System zakładowy (wydzielony) jest zasilany ogólnie przez n turbozespołów TG , których moc regulują indywidualne regulatory (elektryczno-hydrauliczne) RT . Wartości zadane mocy poszczególnych turboze-



Rys. 2. Opatentowana koncepcja układu regulacji automatycznej elektroenergetycznego systemu wydzielonego [9]

B — sygnał blokujący regulator RF , gdy wyłącznik W_k jest zamknięty, a blokujący regulator RP , gdy W_k jest otwarty, H — sygnał sterowany (zadawany) ręcznie, NP — nastawnik mocy zadanej turbozespołu, P_z — czynna moc zadana, RSW — regulator mocy i częstotliwości systemu wydzielonego, TS — tor szybki regulatora częstotliwości, TW — tor wolny regulatora częstotliwości (pozostałe oznaczenia patrz rys. 1)

społów P_z pochodzą z nastawników NP wartości zadanej mocy, których sygnałami wejściowymi są sygnały z regulatora mocy wymiany RP lub regulatora częstotliwości RF systemu wydzielonego oraz sygnał od operatora (sygnał „ręczny”) H . Taka koncepcja regulacji systemu wydzielonego odpowiada schematowi blokowemu przedstawionemu na rysunku 1c.

Gdy system wydzielony jest połączony z systemem ogólnokrajowym (wyłącznik W_k jest zamknięty), to działa ogranicznik mocy wymiany RP , a regulator częstotliwości systemu wydzielonego RF nie oddziałuje na turbozespoły (jest zablokowany, w wyniku działania sygnału B — rys. 2). Ogranicznik mocy wymiany utrzymuje sumaryczną moc wymiany turbozespołów (moc przekazywaną z systemu wydzielonego do ogólnokrajowego) w przedziale $P_{\min} \leq P_w \leq P_{\max}$, przy czym P_{\min} , P_{\max} mają wartości nastawialne. Nastawia się $P_{\min} \geq 0$, ażeby zapewnić nieujemną moc wymiany w chwili ewentualnego niespodziewanego odłączenia systemu wydzielonego od ogólnokrajowego. Nastawialność P_{\max} umożliwia, przed przewidywanym odłączeniem systemu wydzielonego od ogólnokrajowego, pożądane zmniejszenie mocy wymiany (nadwyżki mocy wytwarzanej nad pobieraną w systemie wydzielonym), ażeby przeregulowanie częstotliwości po odłączeniu systemu wydzielonego od ogólnokrajowego było jak najmniejsze, w każdym bądź razie nie powinno ono wykraczać poza dopuszczalny przedział, określony przez odbiorcę energii elektrycznej.

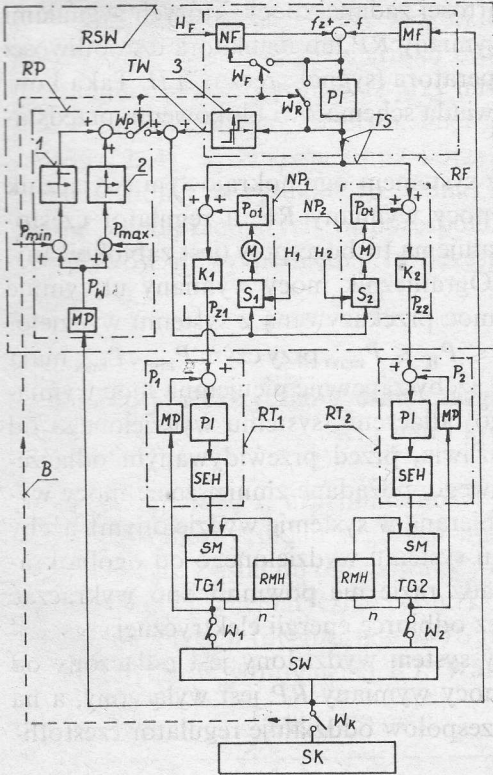
Gdy wyłącznik W_k jest otwarty, tzn. gdy system wydzielony jest odłączony od systemu ogólnokrajowego, to ogranicznik mocy wymiany RP jest wyłączony, a na układy regulacji mocy poszczególnych turbozespołów oddziałuje regulator częstotliwości systemu wydzielonego RF .

2.1. Regulacja systemu wydzielonego przy $n = 2$

We wspomnianej wcześniej elektrociepłowni system wydzielony jest zasilany przez dwa turbozespoły upustowo-kondensacyjne, każdy o mocy nominalnej około 30 MW. Zastosowany w tym przypadku elektryczno-hydrauliczny układ regulacji automatycznej systemu wydzielonego, według omówionej wyżej koncepcji, jest szczegółowo przedstawiony za pomocą schematu blokowego na rysunku 3. Regulatory elektryczno-hydrauliczne RT oddziałują na urządzenia nastawcze (serwomotory) zaworów regulacyjnych turbin równoległe z regulatorami mechaniczno-hydraulicznymi RMH (w które turbozespoły były pierwotnie zaopatrzone), które pozostawiono w działaniu. Przy tym, gdy regulatory elektryczno-hydrauliczne są włączone, to działanie regulatorów mechaniczno-hydraulicznych jest eliminowane z powodu proporcjonalności działania regulatorów elektryczno-hydraulicznych.

Gdy system wydzielony jest połączony z systemem ogólnokrajowym oraz $P_w < P_{\min}$, to ogranicznik mocy wymiany oddziałuje na nastawniki NP mocy turbozespołów w kierunku zwiększenia mocy, a gdy $P_w > P_{\max}$, to następuje zmniejszanie mocy turbozespołów (rys. 3).

Regulator częstotliwości systemu wydzielonego jest w stałej gotowości działania. Wartość zadana częstotliwości systemu wydzielonego f_z nadąża automatycznie za wartością aktualną częstotliwości w systemie ogólnokrajowym (nastawnik NF na



Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy zrealizowanego elektryczno-hydraulicznego regulatora systemu wydzielonego z dwoma turboszespołami

K — współczynnik proporcjonalności, M — silnik elektryczny, MF — miernik częstotliwości, MP — miernik mocy czynnej, NF — nastawnik automatyczny wartości zadanej częstotliwości systemu wydzielonego, n — szybkość obrotowa wirnika turboszespołu, P_1, P_2 — regulator proporcjonalno-całkujący, Pot — potencjometr, RMH — regulator mechaniczno-hydrauliczny turboszespołu, S — sterownik, SEH — serwomechanizm (przetwornik) elektryczno-hydrauliczny, SM — serwomotor zaworów regulacyjnych (patrz opis w [13]), 1, 2, 3 — przełączniki (pozostałe oznaczenia patrz rys. 1 i 2)

rysunku 3), ażeby w chwili odłączenia systemu wydzielonego od ogólnokrajowego uchyb częstotliwości był bliski zera. Podczas regulacji częstotliwości w systemie wydzielonym, sygnał z regulatora częstotliwości oddziałuje na turboszespoły dwoma torami: torem szybkim TS — bezpośrednio na regulatory mocy turboszespołów, torem wolnym TW — poprzez przełącznik 3 oraz silnik elektryczny M sterujący położeniem potencjometru Pot . To sprawia, że w stanie ustalonym sygnał z regulatora częstotliwości w torze szybkim jest bliski zera, co jest pożądane (ewentualny awaryjny zanik sygnału elektrycznego z regulatora częstotliwości nie spowoduje istotnej zmiany mocy turboszespołu). Ponieważ regulator częstotliwości systemu wydzielonego jest typu proporcjonalno-całkującego, to uchyb regulacji w stanie ustalonym jest równy zero.

Najtrudniejsze warunki pracy omawianego układu regulacji występują po nagłym odłączeniu systemu wydzielonego od ogólnokrajowego, ze względu na występującą wówczas nadwyżkę sumarycznej mocy wytwarzanej przez turboszespoły nad łączną mocą odbieraną w systemie wydzielonym. Dlatego, podczas badań eksploatacyjnych, nastawienia regulatorów dobierano tak, ażeby odpowiednio ograniczyć maksymalną zwyżkę częstotliwości w procesie przejściowym po nagłym odłączeniu systemu wydzielonego od ogólnokrajowego oraz czas trwania procesu przejściowego. Dobrano następujące nastawienia regulatorów (przy transmitancji zapisanej w postaci $G = K + 1/T \cdot s$):

— regulatora mocy turbozespołu $TG1$

$$K_{RT1} = 0,05 (0), \quad T_{RT1} = 6,0 (3,0) \text{ s},$$

— regulatora mocy turbozespołu $TG2$

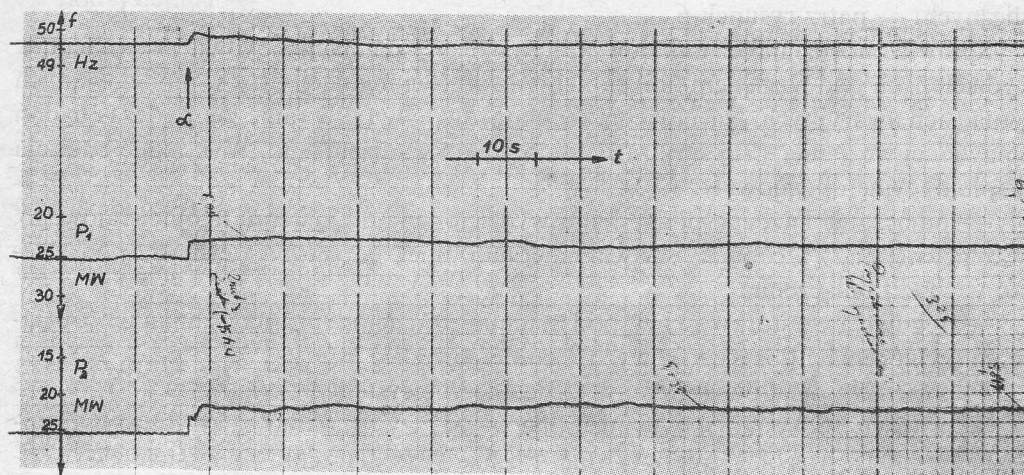
$$K_{RT2} = 0,05 (0), \quad T_{RT2} = 6,0 (1,5) \text{ s},$$

— regulatora częstotliwości systemu wydzielonego

$$K_{RC} = 50 (50), \quad T_{RC} = 2,0 (0,15) \text{ s}.$$

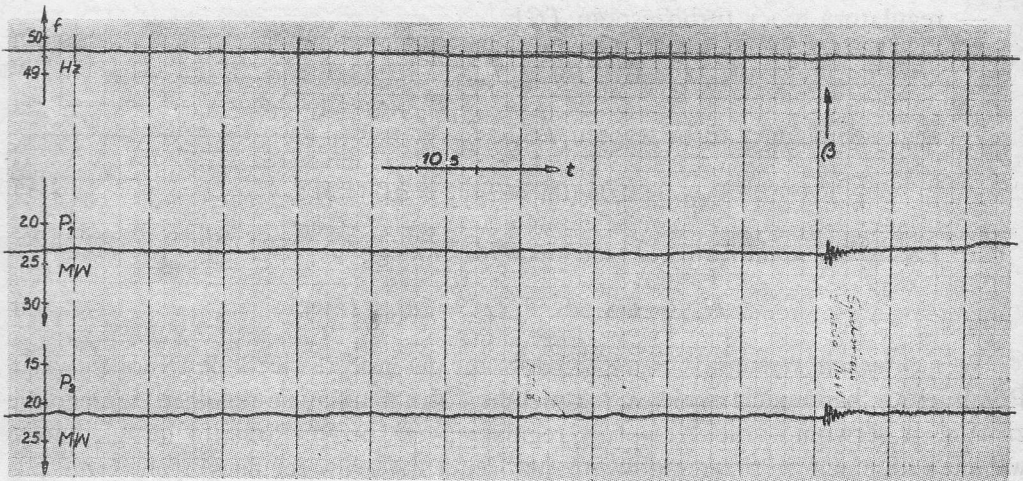
W nawiasach występują wartości dobrane na podstawie badań modelowych. Pominięto w badaniach modelowych nieliniowości w układzie regulacji, szczególnie znaczne w serwowmotorach zaworów regulacyjnych turbin. Ponadto uwzględniono w tych badaniach, że przeregulowanie położenia zaworów regulacyjnych turbin powinno być nie większe niż 1,5, a zapas stabilności układu regulacji nie mniejszy niż 2,0.

Prześciowa zwyżka częstotliwości podczas odłączania systemu wydzielonego od ogólnokrajowego nie przekraczała 0,3 Hz (tzn. 0,6% wartości nominalnej), gdy moc wymiany wynosiła około 10% łącznej mocy nominalnej turbozespołów (patrz rys. 4). Podczas skokowych zmian obciążenia systemu wydzielonego, wynoszących około 1,7 i 3,5%, przejściowe odchyłki częstotliwości nie przekraczały odpowiednio 0,09 i 0,14 Hz. Regulacja częstotliwości w systemie wydzielonym, z powodu przypadkowych zmian obciążenia, odbywała się z dokładnością większą niż 0,1 Hz. Częstotliwość w systemie wydzielonym dobrze nadążała za zmianami wartości zadanej. Ponowna synchronizacja systemu wydzielonego, za pomocą nastawnika częstotliwości, odbywała się każdorazowo płynnie (patrz rys. 5).



Rys. 4. Przebieg w czasie częstotliwości i mocy po odłączeniu systemu wydzielonego od systemu krajowego, przy mocy wymiany $P_w \approx 6 \text{ MW}$ (10%)

α — moment otwarcia wyłącznika W_k



Rys. 5. Przebieg w czasie częstotliwości i mocy podczas synchronizacji systemu wydzielonego z systemem krajowym
 β — moment zamknięcie wyłącznika W_k

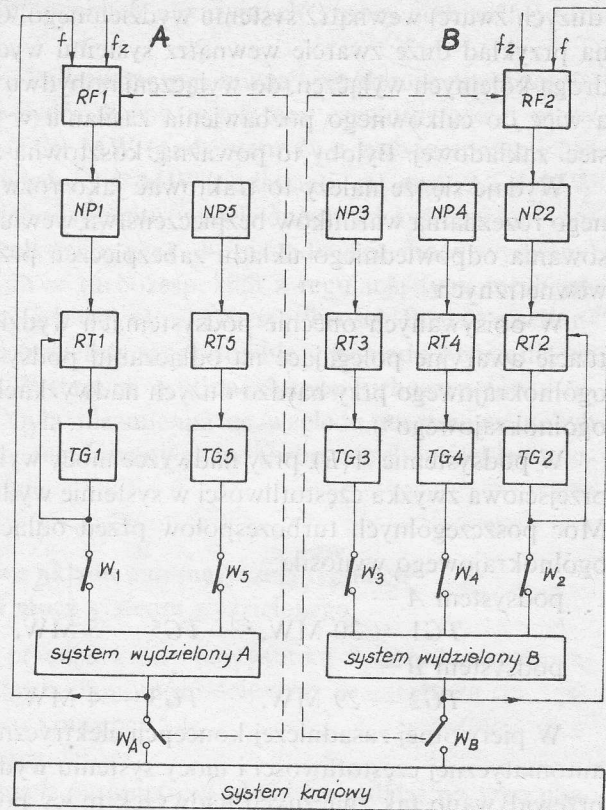
2.2. Regulacja systemu wydzielonego przy $n = 1$

W wymienionej elektrociepłowni dokonano następnie zmiany struktury elektroenergetycznego systemu wydzielonego. Dotychczasowy system wydzielony podzielono na dwa podsystemy, jeden — związany z wymienionym wcześniej turbozespołem TG1, drugi — z turbozespołem TG2. Ponadto obydwie podsystemy są zasilane przez turbozespoły ze starszej części elektrociepłowni, nie objęte elektryczno-hydrauliczną regulacją systemu wydzielonego (nie mające regulatorów elektryczno-hydraulicznych) — patrz rysunek 6.

Sprawdzono działanie układów automatycznej regulacji obydwu podsystemów wydzielonych pod względem funkcjonalnym, jakości regulacji oraz w modelowanych sytuacjach awaryjnych. Nastawienia regulatorów były takie same jak podczas badań omawianej wcześniej struktury zasilania systemu wydzielonego. Wykonane badania eksploatacyjne obejmowały:

- odłączanie każdego podsystemu wydzielonego od systemu ogólnokrajowego, przy pewnej nadwyżce mocy wytwarzanej nad mocą pobieraną wewnątrz podsystemu w chwili odłączenia,
- regulację częstotliwości w podsystemie wydzielonym, przy zmianach obciążenia (zakłócenia) przypadkowych i zamierzonych,
- synchronizację podsystemu wydzielonego z systemem krajowym.

W obydwu podsystemach wymienione wyżej fazy działania elektryczno-hydraulicznej regulacji przebiegały poprawnie. Po nagłym odłączeniu podsystemu wydzielonego od systemu ogólnokrajowego przejściowa zwyżka częstotliwości wynosiła około 0,40 Hz w podsystemie A, przy nadwyżce mocy wynoszącej około 3,5 MW, oraz około 0,60 Hz w podsystemie B, przy nadwyżce mocy około 6,0 MW. W stanie



Rys. 6. Uproszczony schemat blokowy regulacji częstotliwości podsystemów wydzielonych

A, B — podsystemy (pozostałe oznaczenia patrz rys. 1 i 2)

ustalonym uchyb częstotliwości wynosił 0. Przed odłączeniem podsystemu wydzielonego od systemu ogólnokrajowego moc poszczególnych turbozespołów wynosiła:

podsystem A —

TG1 — 20,5 MW, TG5 — 5 MW,

podsystem B —

TG2 — 21,6 MW, TG3 — 0 MW, TG4 — 4 MW.

Regulacja częstotliwości odbywała się z dokładnością $\pm 0,1$ Hz w obydwu podsystemach wydzielonych. Obejmowało to również próby nagłego włączania i wyłączania odbiornika o mocy około 1,2 MW.

Synchronizacja podsystemu wydzielonego z systemem ogólnokrajowym odbywała się całkowicie poprawnie i płynnie.

Zgodnie z uwagami w punkcie 1, omawiana obecnie struktura zasilania elektroenergetycznego systemu wydzielonego (tzn. zasilanie systemu wydzielonego przez jeden turbozespół — jak na rys. 1a) jest niewłaściwą z powodów niezawodnościowych, odnoszących się do pewności działania turbozespołu, ze względu na przeregulowanie częstotliwości podczas odłączania systemu wydzielonego od ogólnokrajowego oraz ze względu na czułość i dokładność regulacji częstotliwości w systemie wydzielonym. Mimo to, elektrociepłownia zdecydowała się na tego rodzaju strukturę zasilania sieci zakładowej, powodowana obawami o skutki ewentualnych awarii

(dużych zwarć) wewnątrz systemu wydzielonego. Obawa wówczas polega na tym, że na przykład duże zwarcie wewnątrz systemu wydzielonego mogłoby doprowadzić, drogą kolejnych wyłączeń, do wyłączenia obydwu współpracujących turbozespołów, a więc do całkowitego pozbawienia zasilania w energię elektryczną przemysłowej sieci zakładowej. Byłoby to poważną, kosztowną awarią.

Wydaje się, że należy to traktować jako rozwiązanie przejściowe, do czasu pełnego rozeznania warunków bezpieczeństwa wewnątrz systemu wydzielonego i zastosowania odpowiedniego układu zabezpieczeń przed skutkami ewentualnych zwarć wewnętrznych

W opisywanych obecnie podsystemach wydzielonych modelowano również sytuacje awaryjne polegające na odłączaniu podsystemów wydzielonych od systemu ogólnokrajowego przy bardzo dużych nadwyżkach mocy przekazywanej do systemu ogólnokrajowego*).

W podsystemie *A (B)*, przy nadwyżce mocy wynoszącej około 12,5 MW (20 MW), przejściowa zwyżka częstotliwości w systemie wydzielonym wynosiła 1,2 Hz (1,3 Hz). Moc poszczególnych turbozespołów przed odłączeniem podsystemów od systemu ogólnokrajowego wynosiła:

podsystem *A* ---

TG1 --- 30 MW, TG5 --- 5 MW,

podsystem *B* ---

TG2 --- 29 MW, TG3 --- 4 MW, TG4 --- 4 MW.

W pierwotnej zasadniczej koncepcji elektryczno-hydraulicznego układu regulacji automatycznej częstotliwości i mocy systemu wydzielonego (rys. 3 oraz [7 ÷ 10]) nie przewidywano tak znacznych nadwyżek mocy podczas odłączania systemu wydzielonego od ogólnokrajowego. Do ograniczania (zmniejszania) mocy wymiany w szczególności przed odłączeniem systemu wydzielonego od ogólnokrajowego służył nastawnik maksymalnej mocy wymiany P_{\max} (rys. 3 oraz [7 ÷ 10]).

Wymienione wyżej znaczne zwyżki częstotliwości w podsystemach wydzielonych, występujące przy bardzo dużych nadwyżkach mocy wymiany podczas odłączania rozpatrywanych podsystemów wydzielonych od systemu ogólnokrajowego, są spowodowane tym, że tzw. suwak dynamiki w torze szybkim serwomechanizmu elektryczno-hydraulicznego**) w układzie regulacji mocy turbozespołu *TG1* oraz *TG2* ma ograniczony skok (ograniczenie skoku w dół podczas opisywanych prób odpowiadało około 30% mocy nominalnej turbozespołu, a w górę około 14%). To ograniczenie skoku suwaka dynamiki zastosowano dla zapobieżenia niepożądanym gwałtownym zmianom mocy turbozespołu przy ewentualnych błędnych elektrycznych sygnałach sterujących [13, 14]. Sprawia to, że przy nagłym odciążeniu turbozespołu sygnał w torze szybkim serwomechanizmu elektryczno-hydraulicznego, powodujący zamykanie zaworów regulacyjnych turbiny, nie przekracza wartości odpowiadającej

*) Uwaga: Ze względów bezpieczeństwa wszystkie próby w rzeczywistym systemie wydzielonym, obejmującym przemysłową sieć zakładową, poprzedzano próbami w zastępczym systemie wydzielonym, nie obejmującym przemysłowej sieci zakładowej.

**) Opis serwomechanizmu elektryczno-hydraulicznego jest podany w [13].

na przykład 30% (jak w opisywanych próbach „awaryjnych”) mocy nominalnej turbozespołu.

Na wzmiankę zasługuje również całkowicie poprawna współpraca turbozespołów zaopatrzonych w elektryczno-hydrauliczne regulatory częstotliwości i mocy czynnej 32 MW (podsystem A) oraz 30 MW (podsystem B) z turbozespołami bez takich regulatorów, o mocy odpowiednio 5 MW (podsystem A) oraz 9 i 4 MW (podsystem B). Podczas odłączania podsystemu wydzielonego od systemu ogólnokrajowego następowało znaczne (całkowite przy dużej nadwyżce mocy wymiany) przymknięcie zaworów regulacyjnych w turbozespołach z regulacją typu mechaniczno-hydraulicznego, z powodu przejściowej zwwyżki częstotliwości. Po kilku sekundach zawory w tych turbozespołach otwierały się ponownie, z powodu obniżania się częstotliwości do zadanej wartości. W stanach ustalonych moc turbozespołów z regulacją mechaniczno-hydrauliczną była niezmienna ze względu na zerowy uchyb częstotliwości w stanach ustalonych, regulowany przez turbozespoły z elektryczno-hydrauliczną regulacją częstotliwości.

3. Badania modelowe układu automatycznej regulacji częstotliwości i mocy systemu wydzielonego

Układ regulacji automatycznej przedstawiony na rysunku 3, przed zastosowaniem go w elektrociepłowni, poddano badaniom modelowym, mającym za cel

- sprawdzenie poprawności jego koncepcji,
- dobór struktury i nastawień regulatora,
- sprawdzenie wpływu wybranych parametrów układu regulacji na jego charakterystyki,
- zbadanie własności układu regulacji przy nagłym odciążeniu turbozespołów (odłączeniu od systemu ogólnokrajowego), zmianach obciążenia systemu wydzielonego, zakłóceniach w upustach technologicznych turbin.

Podczas badań modelowych zamierzono wykonać możliwie wszechstronną analizę rozważanego układu regulacji w różnych sytuacjach operacyjnych, biorąc pod uwagę stawiane mu wymagania.

Badania modelowe wykazały poprawność koncepcji układu automatycznej regulacji częstotliwości i mocy przemysłowego systemu wydzielonego. Stwierdzono zadowalające własności układu regulacji w różnych modelowych warunkach pracy, zarówno podczas zmian mocy wymiany jak podczas nagłego odłączania systemu wydzielonego od ogólnokrajowego, przy zmianach obciążenia systemu wydzielonego oraz przy zakłóceniach w turbinowych upustach pary.

3.1. Dobór struktury i nastawień regulatora częstotliwości i mocy systemu wydzielonego

Rolą regulatora częstotliwości i mocy systemu wydzielonego jest

- regulacja mocy turbozespołów zasilających przemysłowy system wydzielony, gdy jest on połączony z systemem ogólnokrajowym — spełniają to zadanie regulatory mocy poszczególnych turbozespołów,

— regulacja częstotliwości w systemie wydzielonym, po odłączeniu go od systemu ogólnokrajowego — to zadanie spełnia regulator częstotliwości systemu wydzielonego.

Założono ogólnie, że regulatory mocy turbozespołu są typu proporcjonalno-całkującego (PI). Podobnie założono, że regulator częstotliwości systemu wydzielonego jest również typu PI (działanie całkujące spełnia postulat zerowego uchybu częstotliwości w stanie ustalonym w systemie wydzielonym).

Jak już wspomniano, (punkt 2.1), najtrudniejsze warunki pracy badanego układu regulacji występują po nagłym odłączeniu przemysłowego systemu wydzielonego od ogólnokrajowego. W tym momencie bowiem istnieje nadwyżka mocy wytwarzanej przez turbozespoły nad sumaryczną mocą odbieraną w przemysłowym systemie wydzielonym, ponieważ moc przekazywana do systemu ogólnokrajowego jest w rozpatrywanej koncepcji układu regulacji zawsze większa od pewnej wartości minimalnej, $P_W \geq P_{\min} > 0$. Dlatego nastawienia regulatora częstotliwości systemu wydzielonego oraz regulatorów mocy turbozespołu optymalizowano ze względu na przeregulowanie częstotliwości, rozumiane tu jako maksymalna wartość częstotliwości w procesie przejściowym, a ponadto ze względu na czas trwania procesu przejściowego po nagłym odłączeniu systemu wydzielonego od ogólnokrajowego. Równocześnie kontrolowano przeregulowanie zaworów regulacyjnych turbin (wymagając nie większego niż 1,5) oraz zapas stabilności (wymagając nie mniejszego niż 2,0). Pominięto w badaniach modelowych nieliniowości, występujące w charakterystykach obiektu regulacji.

Kierując się tym, ażeby przeregulowanie częstotliwości i czas jej stabilizacji po odłączeniu systemu wydzielonego od ogólnokrajowego były jak najmniejsze, przyjęto jako optymalne następujące nastawienia regulatorów:

— regulatora mocy turbozespołu $TG1$

$$K_{RT1} = 0, \quad T_{RT1} = 3,0 \text{ s},$$

— regulatora mocy turbozespołu $TG2$

$$K_{RT2} = 0, \quad T_{RT2} = 1,5 \text{ s},$$

— regulatora częstotliwości systemu wydzielonego

$$K_{RC} = 50, \quad T_{RC} = 0,15 \text{ s}.$$

Przy tych nastawieniach regulatorów, przeregulowanie częstotliwości po odłączeniu systemu wydzielonego od ogólnokrajowego, gdy moc wymiany w chwili odłączania wynosiła 5% (sumarycznej mocy nominalnej turbozespołów), osiągnęło wartość 0,35% wartości nominalnej, tzn. 0,175 Hz. Czas stabilizacji częstotliwości wynosił 20 s, przeregulowanie zaworów regulacyjnych w turbozespolu $TG1$ wynosiło 1,45, w turbozespolu $TG2$ — 1,1, a zapas stabilności ze względu na wszystkie wymienione parametry regulatorów przekraczał 3,0.

Badania modelowe wskazały, że w rozważanej koncepcji układu regulacji regulatory mocy turbozespołu powinny być typu całkującego I (a nie proporcjonalno-całkującego PI , jak założono). Wynika to stąd, że po odłączeniu systemu wydzie-

lonego od ogólnokrajowego w układach regulacji mocy turbozespołów pojawia się skokowy dodatni uchyb mocy. Powodowałby on skokowy wzrost otwarcia zaworów regulacyjnych turbin, gdyby regulatory mocy turbozespołu zawierały działanie proporcjonalne P . Byłaby to reakcja regulatorów mocy turbozespołu przeciwna niż wymagana po odłączeniu systemu wydzielonego od ogólnokrajowego, gdy zadaniem regulatora częstotliwości systemu wydzielonego jest zmniejszenie otwarcia zaworów regulacyjnych turbin.

Ze względu na regulację częstotliwości systemu wydzielonego regulacja mocy turbozespołów nie jest potrzebna (ale jest potrzebna, gdy system wydzielony jest połączony z ogólnokrajowym). Co więcej, rozważanego typu regulacja mocy (tzn. gdy sygnałem regulowanym jest moc turbozespołu) jest niekorzystna ze względu na przeregulowanie częstotliwości po nagłym odłączeniu systemu wydzielonego od ogólnokrajowego.

W związku z wymienionym wyżej spostrzeżeniem wykonano również optymalizację nastawień regulatorów w modelu bez pomiaru mocy turbozespołów. Optymalne nastawienia wynoszą:

— regulatora mocy turbozespołu $TG1$

$$K_{RT1} = 0, \quad T_{RT1} = 3,0 \text{ s.}$$

— regulatora mocy turbozespołu $TG2$

$$K_{RT2} = 0, \quad T_{RT2} = 1,5 \text{ s.}$$

— regulatora częstotliwości systemu wydzielonego

$$K_{RC} = 40, \quad T_{RC} = 10 \text{ s.}$$

W porównaniu z nastawieniami regulatorów w modelu z pomiarem mocy turbozespołów, zwraca uwagę wyraźnie większa wartość stałej całkowania T_{RC} regulatora częstotliwości systemu wydzielonego. Przeregulowanie częstotliwości wynosi 0,30%, tzn. 0,15 Hz (gdy moc wymiany w chwili odłączania systemu wydzielonego od ogólnokrajowego wynosi 5%), a czas jej stabilizacji wynosi 18 s. Obie te wartości są nieco mniejsze niż w układzie regulacji z pomiarem mocy turbozespołów. Natomiast przeregulowanie zaworów regulacyjnych turbin jest większe, w turbozespołe $TG1$ nieznacznie większe — wynosi 1,54, a w turbozespołe $TG2$ wyraźnie większe — wynosi 1,53. Ten model układu regulacji systemu wydzielonego ma jeszcze jedną wadę, polegającą na braku kontroli rozdziału mocy pomiędzy turbozespołami. Jest to tym istotniejsze, gdy turbozespoły mają regulowane upusty turbin, jak w rozważanym praktycznym przypadku.

Warto w tym miejscu nadmienić, że gdy częstotliwość systemu wydzielonego jest regulowana wyłącznie przez regulatory mechaniczno-hydrauliczne RMH (w które turbozespoły były pierwotnie zaopatrzone), tzn. gdy nie działa elektryczno-hydrauliczny regulator częstotliwości systemu wydzielonego i nie ma regulacji mocy turbozespołów, to przeregulowanie częstotliwości po odłączeniu systemu wydzielonego od ogólnokrajowego wynosi 0,31%, tzn. 0,155 Hz. Jest więc nieznacznie większe niż odpowiednie przeregulowanie w elektryczno-hydraulicznym układzie regulacji często-

liwości systemu wydzielonego, w którym nie odbywa się pomiar mocy turbozespołów — wynosi ono wówczas 0,30%.

Mechaniczno-hydrauliczne regulatory turbozespołów oddziałują w najkrótszej możliwej pętli regulacji, praktycznie bezinercyjnie. Dodany elektryczno-hydrauliczny regulator częstotliwości systemu wydzielonego oddziałuje w wieloczołowym, inercyjnym torze. Jednakże uczynione tu porównanie dotyczy tylko modeli matematycznych układu regulacji częstotliwości systemu wydzielonego. W praktycznym zastosowaniu regulatory mechaniczno-hydrauliczne turbozespołów są nieprzydatne do regulacji częstotliwości systemu wydzielonego z powodu małej, niewystarczającej czułości i dokładności, a także z powodu niemożliwości objęcia ich kompleksową regulacją turbozespołu, bloku i systemu elektroenergetycznego.

Przytoczone badania modelowe zdają się świadczyć o tym, że przeregulowanie częstotliwości w rozważanych warunkach zależy przede wszystkim od własności dynamicznych turbozespołów, głównie turbin, a w nich przestrzeni parowych. Świadczą o tym również inne badania modelowe, na przykład badania wpływu na przeregulowanie częstotliwości szybkości działania serwomechanizmów elektryczno-hydraulicznych. Mianowicie w przedziale $0 \div 0,2$ s wartości stałej czasowej toru „szybkiego” serwomechanizmu elektryczno-hydraulicznego, przebiegi częstotliwości systemu wydzielonego, po odłączeniu go od ogólnokrajowego, okazały się praktycznie jednako- we. Jednakże od wartości stałej czasowej toru „szybkiego” serwomechanizmu elektryczno-hydraulicznego zależy np. przeregulowanie położenia zaworów regulacyjnych turbin.

3.2. Wpływ regulacji ciśnienia pary w upustach turbin na regulację częstotliwości w elektroenergetycznym systemie wydzielonym

Wykonano badania modelowe dotyczące wpływu zmian ciśnienia pary w upustach turbin na regulację częstotliwości w systemie wydzielonym [7]. Rozpatrywano strukturę systemu wydzielonego według rysunku 3 (nastawienia regulatorów — patrz punkt 2.1, wartości w nawiasach). Założono skokowe zmiany natężenia przepływu pary w upustach regulowanych turbin, o wartościach -10 , -20 i -40% w odniesieniu do natężenia nominalnego.

Skokowe zmniejszenie natężenia przepływu pary w upuście wyłącznie turbozespołu *TG1* (o mocy 32 MW) spowodowało przejściowe zwiększenie częstotliwości w systemie wydzielonym o maksymalnej wartości wynoszącej odpowiednio: 0,015 Hz (0,03%), 0,04 Hz (0,08%), 0,10 Hz (0,20%). Wystąpił również przejściowy przepływ mocy pomiędzy turbogeneratorami oraz, również przejściowo, zmniejszyło się otwarcie zaworów regulacyjnych turbiny *TG2* (o mocy 30 MW) odpowiednio o 2,5, 4,5 i 9%, z powodu wzrostu częstotliwości. Czas trwania procesu przejściowego wyniósł około 15 s.

Przy podobnym oddziaływaniu wyłącznie w upuście turbozespołu *TG2* wystąpiło przejściowe obniżenie częstotliwości w systemie wydzielonym; minimalne odchylenie wynosiło odpowiednio $-0,02$ Hz ($-0,04\%$), $-0,025$ Hz ($-0,05\%$), $-0,03$ Hz ($-0,06\%$). Przejściowy uchyb częstotliwości jest w tym przypadku przeciwnego zna-

ku, a przy dużych zakłóceniach znacznie mniejszy niż przy oddziaływaniu sygnałem zakłócającym w upuście turbozespołu *TG1*. Z powodu zmniejszenia się częstotliwości w systemie wydzielonym zawory regulacyjne turbiny *TG1* przejściowo zwiększyły swe otwarcie o wartość odpowiednio 1, 2 i 3%. Jest to spowodowane zapewne tym, że w turbinie *TG2* sygnał zmian ciśnienia pary w upuście oddziałuje na obydwa serwomotory — *WP* (napędzające zawory regulacyjne pary świeżej) i *SP* (napędzające zawory regulacyjne pary za upustem), z dużym wzmocnieniem — wynoszącym 20; w turbinie *TG1* — tylko na serwomotor *SP*, ze wzmocnieniem wynoszącym 6.

Przy równoczesnym w obydwu turbozespołach oddziaływaniu jednakowymi sygnałami zakłócającymi w upustach pary wahania częstotliwości w systemie wydzielonym były małe. Maksymalny uchyb częstotliwości przy zakłóceniach w upustach wynoszących 40% nominalnego poboru pary nie przekraczał 0,03 Hz, tzn. 0,06% wartości nominalnej.

4. Wpływ regulacji napięcia na regulację częstotliwości w elektroenergetycznym systemie wydzielonym

Między innymi, jak napisano we wstępie, obniżenie napięcia w ogólnokrajowym systemie elektroenergetycznym poniżej określonej wartości, w czasie przekraczającym dopuszczalną wartość, oraz podobnie całkowite pozbawienie zasilania w energię elektryczną przemysłowej sieci zakładowej wymagają odłączenia przemysłowej sieci zakładowej od systemu ogólnokrajowego, a następnie regulacji napięcia i częstotliwości w systemie wydzielonym. Z drugiej strony, zmiany napięcia i częstotliwości w systemie wydzielonym są z sobą wzajemnie powiązane. Wynika to zarówno z teoretycznych rozważań [3, 5] jak z doświadczeń praktycznych. W szczególności, zmiany napięcia w systemie wydzielonym wywołują zmiany częstotliwości. Z tych powodów np. ewentualne uchybienia w działaniu regulacji napięcia w systemie wydzielonym oddziałują na regulację częstotliwości.

Podczas jednej z prób w systemie wydzielonym wystąpiła niesprawność w działaniu regulatora napięcia turbozespołu *TG1* (o mocy 32 MW). Powodowało to oscylovanie napięcia w systemie wydzielonym z częstością około 0,35 Hz (okres oscylacji wynosił około 2,8 s); amplituda oscylacji wynosiła około 0,2 kV (około 3,1%). Pociągało to za sobą równoczesne oscylovanie częstotliwości i mocy w systemie wydzielonym. Okres oscylacji wynosił około 2,8 s, a amplituda oscylacji częstotliwości wynosiła około 0,1 Hz. Ta sytuacja stanowiła m. in. praktyczne potwierdzenie istotnego wzajemnego powiązania i oddziaływania napięcia i częstotliwości oraz ich układów regulacji w systemie elektroenergetycznym.

5. Uwagi końcowe

Regulacja częstotliwości i mocy czynnej elektroenergetycznego systemu wydzielonego (obejmującego przemysłową sieć zakładową) stawia specyficzne szczegółowe wymagania odnoszące się do niezawodności i dokładności działania. Spełnienie tych

wymagań odgrywa zasadniczą rolę, ponieważ w szczególności awaryjne przerwy w zasilaniu energią elektryczną rozpatrywanych zakładów przemysłowych powodują każdorazowo ogromne straty.

Opracowany (opatentowany) i uruchomiony układ automatycznej regulacji częstotliwości i mocy elektroenergetycznego systemu wydzielonego spełnia całkowicie stawiane mu wymagania. Mianowicie, odłączanie systemu wydzielonego od ogólnokrajowego odbywa się pewnie, z małym przejściowym uchybem częstotliwości; regulacja częstotliwości w systemie wydzielonym odbywa się z dobrą dokładnością, bez uchybu statycznego; synchronizacja odbywa się poprawnie i płynnie. Poprawność koncepcji wymienionego układu regulacji sprawdzono w różnych warunkach pracy. Jego charakterystyki dynamiczne mają korzystne przebiegi zarówno przy nagłym odciążeniu turbozespołów, jak przy zakłóceniach mocą obciążenia systemu wydzielonego i zakłóceniach w upustach technologicznych turbin.

Przy dużych odciążeniach („zrzutach” mocy) turbozespołu w systemie wydzielonym istotną rolę, ze względu na występującą wówczas przejściową wyższą częstotliwość, odgrywa rodzaj sprzężenia zwrotnego w elektryczno-hydraulicznym układzie regulacji mocy i częstotliwości turbozespołu. Mianowicie, przy zastosowaniu sprzężenia zwrotnego od położenia zaworów regulacyjnych turbiny przesterowanie (maksymalna wyżka) częstotliwości jest około 1,7 razy mniejsze niż w przypadku sprzężenia zwrotnego od mocy turbozespołu [6]. Z punktu widzenia przesterowania częstotliwości po odłączeniu systemu wydzielonego, tego rodzaju sprzężenie zwrotne można by zalecać w elektryczno-hydraulicznych układach regulacji automatycznej turbozespołów zasilających system wydzielony (stosowane dotychczas jest sprzężenie zwrotne od mocy turbozespołu).

Praca wpłynęła do Redakcji w listopadzie 1984 r.

Literatura

- [1] Didion E., *Turbinenregelungsprobleme im Industriekraftwerk beim Umschalten vom elektrischen Verbundbetrieb auf Inselbetrieb*. VGB Kraftwerkstechnik, Nr 10, 1974.
- [2] Domachowski Z., *Zależność niezłomości regulacji pierwotnej częstotliwości systemu elektroenergetycznego od niezłomości regulacji turbozespołów*. Biuletyn Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Nr 98/795/1974.
- [3] Domachowski Z., *O wpływie zmian napięcia na regulację prędkości kątowej turbozespołów*. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 6, 1976.
- [4] Domachowski Z., *Analiza porównawcza pomiaru prędkości kątowej i częstotliwości w układzie regulacji pierwotnej turbozespołu elektroenergetycznego*. Archiwum Energetyki Nr 4, 1977.
- [5] Domachowski Z., *Sur l'utilisation du signal de glissement dans la régulation de tension et de fréquence des groupes turbo-alternateurs*. Archiwum Energetyki, Nr 1, 1984.
- [6] Domachowski Z., Bugała G., *Wpływ rodzaju sprzężenia zwrotnego w układzie regulacji automatycznej mocy turbozespołu na charakterystyki regulacyjne bloku elektroenergetycznego*. Archiwum Energetyki, Nr 3, 1984.
- [7] Domachowski Z., Klimacki Z., *Elektrohydrauliczny układ regulacji mocy czynnej i częstotliwości sieci wydzielonej*. II Sympozjum „Problemy optymalizacji w energetyce”, zbiór referatów. Wyd. Stowarzyszenia Elektryków Polskich — Oddział Gdańsk i Instytutu Elektroenergetyki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, kwiecień 1979.

- [8] Domachowski Z., Klimacki Z., Myszkowski W., *Elektrohydrauliczny układ automatycznej regulacji częstotliwości i mocy czynnej systemu wydzielonego*. Energetyka, Nr 11, 1981.
- [9] Klimacki Z., Domachowski Z., Ordo B., Dąbrowski J., *Elektrohydrauliczny układ regulacji częstotliwości i mocy czynnej elektroenergetycznego systemu wydzielonego*. Urząd Patentowy PRL (nr patentu 117400).
- [10] Klimacki Z., Ordo B., *Elektrohydrauliczny układ regulacji częstotliwości i mocy czynnej elektroenergetycznego systemu wydzielonego*. Urząd Patentowy PRL (nr patentu 99205).
- [11] Leonhard A., *Frequenz – Leistungsregelung in einem Kraftwerk, das ein Inselnetz speist*. Regelungstechnische Praxis, Nr 5, 1975.
- [12] Magajna P., *Automatische Netzentkopplung für Industrie – Anlagen*. Brown Boveri Mitteilungen, Nr 1, 1974.
- [13] Ordo B., Klimacki Z., *Elektrohydrauliczny regulator częstotliwości i mocy turbozespołu*. Energetyka, Nr 12, 1974.
- [14] Perycz S., *Elektrohydrauliczny regulator mocy turbiny parowej*. Energetyka, Nr 1, 1973.

Проблемы автоматического регулирования частоты и активной мощности электроэнергетической выделённой системы

Резюме

По технологическим взглядам, производственные предприятия промышленности синтетических волокон, бумажной и химической промышленности и т.п. требуют часто безотказного питания электрической энергии, а кроме того соответственного качества этой энергии. По этому поводу помехи и аварии во внешней (а масштабе страны) энергетической системе (местные атмосферические помехи, короткие замыкания, перенапряжения, коммутационные ошибки) принуждают к отключениям заводской системы (т. наз. выделённой системы) от внешней системы. В связи с этим необходима специальная система автоматического регулирования и частоты и напряжения выделённой системы. Её основные задания следующие:

- 1) обеспечение питания важных по технологическим взглядам приёмников в выделённой системе,
- 2) ограничение повышения частоты и напряжения после отключения выделённой системы от внешней системы,
- 3) регулирование частоты и напряжения в выделённой системе,
- 4) вторичная синхронизация выделённой системы с внешней системой.

На рис. 1 представлены упрощённые блочные схемы возможных и встречаемых структур автоматического регулирования частоты и мощности электроэнергетической выделённой системы.

Рис. 2 представляет предлагаемую патентованную и применённую в практике идею электрогидравлического автоматического регулирования электроэнергетической выделённой системы. Применённая в теплоэлектростанции система автоматического регулирования представлена на рис. 3 при помощи блочной схемы.

Произведённые эксплуатационные испытания, в различных условиях работы, подтвердили абсолютную правильность предлагаемой идеи системы регулирования.

Automatic Control of Frequency and Active Power in an Industrial Electric Power System

Summary

Production engineering requirements in the synthetic fibre, paper, chemical and other industries are often such that an absolute reliability of the electric power supply system and, besides, an adequate quality of the electric power are necessary. For that reason disturbances and breakdowns occurring in

the external (national) electric power system (such as local atmospheric interference, short-circuits, over-voltages, switching faults) make it necessary to separate the electric power system of a production plant from the national electric power system. For such a separate (industrial) electric power system a special automatic frequency and voltage control system is required that would ensure:

- 1) power supply from the separate system for units important from the production engineering point of view,
- 2) limiting the frequency and voltage increase after cutting the industrial system off the external one,
- 3) frequency and voltage control in the industrial system,
- 4) repeated synchronization of the industrial system with the external one.

Figure 1 shows simplified block diagrams of structures that are or may be used for automatic control of frequency and power of a separate electric power system.

Figure 2 presents a novel, patented and already implemented conception of electrohydraulic automatic control of an industrial electric power system. An automatic control system installed in a thermal-electric power station is presented in a block diagram in Fig. 3.

Operation tests conducted under different operating conditions confirmed the correctness of the control system conception.