

Zygryd Domachowski

**REGULACJA
AUTOMATYCZNA
TURBOZESPOŁÓW
CIEPLNYCH**

Gdańsk 2011

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Romuald Szymkiewicz

RECENZENT
Andrzej Miller

PROJEKT OKŁADKI
Katarzyna Olszonowicz

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<http://www.pg.gda.pl/WydawnictwoPG>

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2011

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978-83-7348-356-9

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 11,3, ark. druku 12,25, 962/612

Druk i oprawa: *EXPOL* P. Rybiński, J. Dąbek, Sp. Jawna
ul. Brzeska 4, 87-800 Włocławek, tel. 54 232 37 23

Spis treści

1. CHARAKTERYSTYKA ZMIENNYCH WARUNKÓW RUCHU, WIELKOŚCI CHARAKTERYSTYCZNE PROCESU REGULACJI AUTOMATYCZNEJ TURBOZESPOŁU	13
2. WSPÓLDZIAŁANIE UKŁADU REGULACJI AUTOMATYCZNEJ TURBOZESPOŁU Z INNYMI UKŁADAMI REGULACJI I ZABEZPIECZEŃ	17
2.1. Praca samodzielna turbozespołu i współpraca turbozespołów w systemie elektroenergetycznym	17
2.1.1. System elektroenergetyczny wydzielony zasilany pojedynczym turbozespołem ...	18
2.1.2. System elektroenergetyczny wydzielony zasilany kilkoma turbozespołami.....	19
2.1.3. System elektroenergetyczny dużej mocy	20
2.1.3.1. Praca podstawowa turbozespołu.....	20
2.1.3.2. Uczestnictwo turbozespołu w regulacji pierwotnej częstotliwości systemu elektroenergetycznego	21
2.1.3.3. Uczestnictwo turbozespołu w regulacji wtórnej częstotliwości systemu elektroenergetycznego	21
2.2. Wzajemne oddziaływanie układu regulacji turbozespołu i innych układów regulacji	22
2.2.1. Współdziałanie układu regulacji turbozespołu i kotła (wytwornicy pary).....	22
2.2.1.1. Regulacja bloku z prowadzącą turbiną	23
2.2.1.2. Regulacja bloku z prowadzącym kotłem	23
2.2.1.3. Regulacja bloku z sygnałem wyprzedzającym	24
2.2.1.4. Regulacja turbiny zasilanej z szybu geotermicznego	25
2.3. Współdziałanie układu regulacji automatycznej mocy czynnej/częstotliwości (regulacja turbiny) i mocy biernej/napięcia (regulacja prądnicy).....	26
2.4. Współdziałanie układu regulacji turbozespołu z układami regulacji urządzeń pomocniczych.....	28
2.5. Współdziałanie układu regulacji turbozespołu i układu zabezpieczeń	28
2.6. Literatura	29
3. WPŁYW ŹRÓDŁA ENERGII PIERWOTNEJ NA CHARAKTERYSTYKI UKŁADU REGULACJI TURBOZESPOŁU	31
3.1. Turbozespoły w elektrowniach jądrowych	31
3.2. Turbozespoły w elektrowniach geotermicznych.....	33
3.3. Literatura	33
4. PODSTAWY PROJEKTOWANIA UKŁADU REGULACJI AUTOMATYCZNEJ TURBOZESPOŁU	35
4.1. Podstawowe zadania układu regulacji automatycznej turbozespołu	35
4.1.1. Charakterystyki statyczne układu regulacji automatycznej turbozespołu	35
4.1.2. Charakterystyki dynamiczne układu regulacji automatycznej turbozespołu.....	36
4.1.2.1. Stabilność	36
4.1.2.2. Odpowiedzi skokowe.....	36
4.1.2.3. Szybkie zamykanie zaworów regulacyjnych turbiny (fast valving)	36

4.1.2.4. Wrażliwość charakterystyk układu regulacji automatycznej turbozespołu.....	36
4.1.3. Rodzaj działania turbozespołu	37
4.1.4. Współdziałanie z innymi układami regulacji automatycznej	37
4.1.5. Prostota konstrukcyjna i technologiczna układu regulacji automatycznej turbozespołu.....	37
4.1.6. Zmęczenie wytrzymałościowe materiałów	37
4.1.7. Niezawodność działania układu regulacji automatycznej.....	38
4.1.8. Bezpieczeństwo działania turbozespołu.....	38
4.1.9. Koszt ekonomiczny	39
4.2. Zasady projektowania układu regulacji automatycznej turbozespołu.....	39
4.2.1. Rola teorii sterowania w projektowaniu układu regulacji automatycznej turbozespołu.....	39
4.2.2. Rola symulacji komputerowej w projektowaniu układu regulacji automatycznej turbozespołu	40
4.2.3. Rola badań doświadczalnych w projektowaniu układu regulacji automatycznej turbozespołu.....	40
4.3. Literatura	41
5. STEROWANIE MOCY TURBOZESPOŁU CIEPLNEGO A ZUŻYCIE ENERGII.....	42
5.1. Sterowanie optymalne źródłem zwiększenia sprawności energetycznej	42
5.2. Automatyzacja rozruchu (odstawiania) turbozespołu.....	44
5.3. Sterowanie czasowo optymalne mocy turbozespołu	46
5.4. Sterowanie ekstremalne mocy turbozespołu.....	50
5.5. Literatura	53
6. CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE UKŁADU REGULACJI AUTOMATYCZNEJ TURBOZESPOŁU	55
6.1. Rozdział obciążenia między współpracujące turbozespoły	57
6.2. Charakterystyka statyczna regulacji częstotliwości turbozespołu w rozkładzie łańcuchowym na charakterystyki składowe	58
6.2.1. Charakterystyka statyczna serwowalności narzucona	58
6.2.1.1. Charakterystyka $h_{SM}=F_d(h_v)$ narzucona.....	59
6.2.1.2. Charakterystyka $h_{SM}=F_d(h_v)$ projektowana	60
6.2.2. Charakterystyka statyczna serwowalności projektowana	61
6.3. Wykres poczwórny	62
6.3.1. Charakterystyka statyczna serwowalności oraz charakterystyka – sygnał wyjściowy serwowalności/ sygnał wyjściowy zaworu regulacyjnego narzucone	62
6.3.2. Narzucone nieprofilowane zawory regulacyjne	64
6.4. Charakterystyki statyczne elementów składowych układu sterowania turbozespołu	66
6.4.1. Charakterystyka statyczna turbozespołu	66
6.4.2. Charakterystyki statyczne elementów regulatora turbozespołu	68
6.4.2.1. Miernik prędkości kątowej wirnika turbozespołu	68
6.4.2.2. Przetwornik sygnału prędkości kątowej wirnika turbozespołu	71
6.4.2.3. Wzmacniacz sygnału regulacyjnego	72
6.4.2.4. Serwowalność zaworów regulacyjnych turbiny	74
6.4.3. Linearyzacja charakterystyki statycznej regulatora turbozespołu	78
6.4.4. Wrażliwość charakterystyki statycznej regulatora na zmiany parametrów konstrukcyjnych	80
6.5. Literatura	82

7. CHARAKTERYSTYKI DYNAMICZNE UKŁADU REGULACJI AUTOMATYCZNEJ TURBOZESPOŁU	83
7.1. Model matematyczny turbiny parowej	83
7.1.1. Turbina kondensacyjna z przegrzewem wtórnym	87
7.1.1.1. Przegrzewacz wtórny	88
7.1.1.2. Schemat blokowy turbiny parowej kondensacyjnej z przegrzewem wtórnym	89
7.1.1.3. Przykłady modelu (w postaci transmitancji) turbiny kondensacyjnej z przegrzewem wtórnym	92
7.1.2. Turbina kondensacyjna bez przegrzewu wtórnego	93
7.1.3. Turbina przeciwprężna	93
7.1.4. Turbina upustowo-kondensacyjna	94
7.1.5. Turbina upustowo-przeciwprężna	95
7.1.6. Model przestrzeni szkodliwej w turbinie parowej	95
7.2. Model matematyczny turbiny gazowej	96
7.2.1. Moment napędowy turbiny gazowej	98
7.2.2. Komora spalania	99
7.2.3. Objętość gazu	101
7.2.3.1. Objętość między sprężarką a komorą spalania	102
7.2.3.2. Objętość między komorą spalania a turbiną	103
7.2.4. Schemat blokowy turbiny gazowej	104
7.3. Model wirnika turbozespołu	105
7.4. Charakterystyki dynamiczne wybranych elementów regulatora	106
7.4.1. Mierniki częstotliwości (prędkości kątowej) i mocy	107
7.4.2. Wzmacniacz mechaniczno-hydrauliczny sygnału regulacyjnego	107
7.4.3. Serwomotor hydrauliczny dwustronnego działania	108
7.5. Literatura	110
8. PROJEKTOWANIE WYBRANYCH ELEMENTÓW REGULATORA TURBOZESPOŁU .	112
8.1. Projektowanie zaworów regulacyjnych	112
8.1.1. Obliczenia termodynamiczne zaworów	113
8.1.2. Wymiary zaworu	115
8.1.3. Zawory jednosiedziskowe, dwusiedziskowe, zawory wstępne	116
8.2. Projektowanie serwomotorów	119
8.3. Literatura	121
9. SPECYFIKA REGULACJI TURBOZESPOŁÓW PAROWYCH.....	122
9.1. Podstawowe sposoby regulacji turbin parowych	122
9.1.1. Regulacja dławieniowa	122
9.1.2. Regulacja napełnieniowa	123
9.1.3. Regulacja obejściowa	125
9.1.4. Regulacja poślizgowa	126
9.2. Regulacja turbin z przegrzewem wtórnym	127
9.3. Regulacja turbin przeciwprężnych	131
9.4. Regulacja turbin upustowych	132
9.5. Charakterystyki termodynamiczne regulacji turbin parowych	136
9.5.1. Termodynamiczne aspekty regulacji dławieniowej	136
9.5.2. Termodynamiczne aspekty regulacji napełnieniowej	139
9.5.3. Porównanie, pod względem termodynamicznym, regulacji dławieniowej i napełnieniowej	141
9.5.4. Zależność sprawności stopnia turbiny parowej od obciążenia	142

9.5.5. Charakterystyki termodynamiczno-przepływowe ostatniego stopnia turbiny parowej w zmiennych warunkach obciążenia.....	144
9.6. Regulacja turbin parowych w elektrowniach jądrowych.....	147
9.6.1. Porównanie modelu matematycznego kotła w bloku konwencjonalnym i wytwornicy pary w bloku jądrowym	149
9.6.2. Porównanie modelu matematycznego turbozespołu w bloku konwencjonalnym i jądrowym	150
9.6.3. Porównanie modelu układu regulacji automatycznej bloku jądrowego i konwencjonalnego.....	151
9.7. Regulacja turbin w elektrowniach geotermicznych.....	152
9.8. Literatura	154
10. SPECYFIKA REGULACJI AUTOMATYCZNEJ TURBIN GAZOWYCH.....	156
10.1. Regulacja temperatury gazów spalinowych	156
10.2. Wrażliwość mocy i sprawności termodynamicznej turbiny gazowej na zakłócenia.....	158
10.3. Regulacja automatyczna dwuwałowej turbiny gazowej.....	158
10.4. Literatura.....	160
11. REGULACJA AUTOMATYCZNA BLOKÓW KOMBINOWANYCH GAZOWO-PAROWYCH.....	162
11.1. Koncepcja regulacji automatycznej bloku kombinowanego gazowo-parowego.....	162
11.2. Charakterystyki statyczne bloku kombinowanego gazowo-parowego.....	164
11.2.1. Przedział mocy bloku $0,7 < \bar{P}_B < 1,07$	166
11.2.2. Przedział mocy bloku $\bar{P}_B < 0,7$	170
11.3. Algorytm regulacji automatycznej bloku kombinowanego gazowo-parowego	172
11.4. Struktura układu regulacji automatycznej bloku kombinowanego gazowo-parowego .	173
11.5. Literatura.....	176
12. REGULACJA AUTOMATYCZNA TURBIN OKRĘTOWYCH.....	178
12.1. Regulacja okrętowych turbin parowych.....	180
12.2. Regulacja okrętowych turbin gazowych	180
12.3. Dobór regulatora turbiny okrętowej.....	182
12.4. Nawrotność turbin okrętowych	183
12.5. Regulacja częstotliwości okrętowego systemu elektroenergetycznego zasilanego przez prądnice napędzane turbinami napędu głównego.....	184
12.6. Porównanie regulacji mocy turbiny i regulacji prędkości kątowej śruby okrętowej.....	185
12.7. Literatura.....	186
13. ROLA MODELOWANIA, BADAŃ SYMULACYJNYCH, BADAŃ LABORATORYJNYCH	187
13.1. Znaczenie badań symulacyjnych w projektowaniu, optymalizacji i diagnostyce układu regulacji automatycznej turbozespołu	187
13.1.1. Projektowanie układu regulacji turbozespołu	188
13.1.2. Optymalizacja układu regulacji turbozespołu	190
13.1.3. Testowanie regulatora turbozespołu.....	191
13.1.4. Diagnostyka układu regulacji turbozespołu	192
13.2. Znaczenie badań laboratoryjnych w projektowaniu, wytwarzaniu i działaniu regulatora turbozespołu.....	192
13.3. Literatura.....	194