

# SPIS TREŚCI

Wielkości podstawowe i ważniejsze oznaczenia.....	9
1. Wstęp.....	13
1.1. Wprowadzenie.....	13
1.2. Określenia podstawowe.....	13
1.3. Transport rurowy.....	15
1.4. Rola układów pompowych w procesach technologicznych.....	16
2. Elementy układów pompowych.....	17
2.1. Wiadomości podstawowe.....	17
2.2. Ciecze.....	20
2.2.1. Ciśnienie.....	20
2.2.2. Gęstość (masa właściwa).....	21
2.2.3. Objętość właściwa.....	22
2.2.4. Ciężar właściwy (wielkość spoza układu SI).....	22
2.2.5. Lepkość.....	22
2.2.6. Lepkość kinematyczna.....	23
2.2.7. Parowanie cieczy.....	24
2.2.8. Ścisłość cieczy.....	25
2.2.9. Rozszerzalność objętościowa cieczy.....	25
2.2.10. Ciepło, energia wewnętrzna, ciepło właściwe.....	25
2.2.11. Związek między pracą właściwą $Y$ a wysokością ciśnienia $H$ .....	26
2.2.12. Równanie Bernoulliego.....	28
2.2.13. Klasyfikacja cieczy.....	29
2.3. Rurociągi.....	31
2.3.1. Straty przepływu.....	31
2.3.2. Straty liniowe wg Darcy'ego–Weisbacha.....	32
2.3.3. Straty liniowe wg Wiliamsa–Hazena.....	35
2.3.4. Straty miejscowe.....	36
2.4. Armatura.....	37
2.4.1. Rola armatury w układzie.....	37
2.4.2. Charakterystyki i współczynniki przepływu zaworów.....	39
2.4.3. Współczynnik przepływu zaworu $k_v$ .....	40
2.4.4. Kawitacja w zaworach.....	42
2.4.5. Zawory odcinające.....	42
2.4.6. Zawory zwrotne.....	43
2.4.7. Zawory regulacyjne.....	43
2.4.8. Zawory upustowe.....	43
2.5. Pompy.....	44
2.5.1. Klasyfikacja pomp.....	44
2.5.2. Własności pomp i agregatów pompowych.....	46
2.5.3. Pompy wyporowe.....	49
2.5.4. Pompy wirowe.....	60

3. Podstawowe wiadomości o układach pompowych.....	81
3.1. Podział układów pompowych.....	81
3.2. Bilans energetyczny układu pompowego.....	83
3.2.1. Podstawowe parametry układu pompowego.....	83
3.2.2. Definicje ciśnień.....	85
3.2.3. Wysokości geometryczne i wysokość podnoszenia.....	86
4. Napęd pompy.....	91
4.1. Klasyfikacja napędów.....	91
4.2. Podstawy napędów elektrycznych.....	93
4.3. Rodzaje silników elektrycznych.....	103
4.3.1. Silniki indukcyjne klatkowe.....	103
4.3.2. Silniki indukcyjne pierścieniowe.....	104
4.3.3. Dobór mocy silnika napędowego.....	105
4.4. Współpraca pompy wirowej z napędem elektrycznym.....	107
4.4.1. Wpływ wydajności pompy wirowej na charakterystykę obciążenia silnika.....	107
4.4.2. Charakterystyki „naturalne”.....	110
4.4.3. Charakterystyki dla stałej prędkości obrotowej.....	110
4.4.4. Obliczanie charakterystyki zestawu pompowego.....	111
4.5. Układy rozruchowe.....	115
4.5.1. Rozruch silnika elektrycznego.....	115
4.5.2. Układ rozruchowy gwiazda – trójkąt.....	117
4.5.3. Układ z transformatorem rozruchowym.....	118
4.5.4. Softstarty.....	119
4.5.5. Rozruch silników pierścieniowych.....	121
4.6. Regulacja prędkości obrotowej.....	121
4.6.1. Przemienneniki częstotliwości.....	121
4.6.2. Układy kaskadowe.....	126
4.6.3. Napędy ze sprzęgłem hydrokinetycznym.....	128
4.6.4. Napęd turbinowy.....	136
4.6.5. Napęd spalinowy.....	137
4.6.6. Inne napędy pomp.....	138
5. Metody doboru pomp i obliczania układów pompowych.....	139
5.1. Pojęcia podstawowe.....	139
5.2. Połączenia pomp i rurociągów.....	144
5.2.1. Rurociągi połączone szeregowo.....	144
5.2.2. Rurociągi połączone równolegle.....	147
5.2.3. Rurociągi połączone szeregowo-równolegle.....	153
5.2.4. Pompy połączone szeregowo.....	153
5.2.5. Pompy połączone równolegle.....	155
5.2.6. Pompy połączone szeregowo-równolegle.....	157
5.3. Podstawowe układy pompowe.....	157
5.3.1. Prosty układ pompowy.....	157
5.3.2. Obiegowy układ pompowy.....	159
5.4. Układy drzewiaste (dendryty).....	160
5.4.1. Zasady rozwiązywania układów pompowych (drzewiastych).....	160
5.4.2. Sieć zbiorcza.....	161
5.4.3. Sieć rozdzielcza.....	163
5.4.4. Algorytm obliczania dendrytów.....	164
5.5. Układy pierścieniowe (sieci).....	172
5.5.1. Elementy sieci (pojęcia podstawowe).....	172

5.5.2.	Metoda Crossa .....	176
5.5.3.	Metoda Newtona.....	181
5.5.4.	Metoda gradientowa .....	187
5.5.5.	Metody określania parametrów pompy.....	195
5.6.	Symulacja i wizualizacja pracy układu .....	199
5.7.	Dobór pompy .....	200
5.7.1.	Sformułowanie zadania doboru pompy .....	200
5.7.2.	Metody doboru pompy.....	201
5.7.3.	Ograniczenia.....	202
5.7.4.	Kryteria dobroci dopasowania pompy do układów.....	203
5.7.5.	Poprawność doboru pompy do układu.....	204
5.8.	Kryteria doboru pompy i oceny pracy układu.....	205
5.8.1.	Definicja kryteriów .....	205
5.8.2.	Zużycie jednostkowe energii .....	205
5.8.3.	Sprawność pracy pompy w układzie.....	206
5.8.4.	Wskaźnik dopasowania pompy do układu .....	207
5.8.5.	Średnia sprawność pracy grupy pomp w układzie .....	207
5.8.6.	Sprawność pompowni (instalacji pompowej) .....	208
5.8.7.	Wskaźnik zużycia jednostkowego energii w układzie .....	208
5.8.8.	Wskaźnik struktury układu .....	209
5.8.9.	Wskaźnik doskonałości układu.....	210
5.8.10.	Dopasowanie punktu pracy.....	210
5.8.11.	Globalny koszt życia pompy – <i>LCC</i> .....	210
5.8.12.	Klucz zastosowań pompy .....	210
5.8.13.	Klucz konstrukcji pomp.....	213
5.9.	Wybrane procedury doboru pompy.....	214
5.9.1.	Dobór pompy „na punkt” pracy przy pompowaniu wody.....	214
5.9.2.	Dobór pompy „na pole pracy” .....	216
5.10.	Metody obiektowe w projektowaniu układów .....	217
5.10.1.	Wprowadzenie .....	217
5.10.2.	Programowanie obiektowe.....	217
5.10.3.	Relacyjne bazy danych .....	220
5.10.4.	Obiektowo-relacyjne bazy danych.....	220
5.10.5.	Obiektowe bazy danych .....	221
5.10.6.	Układ pompowy w ujęciu obiektowym .....	222
5.10.7.	Zastosowanie metod obiektowych do obliczania złożonych układów pompowych.....	222
5.10.8.	Obliczania układów pompowych z wykorzystaniem metod obiektowych.....	223
6.	Sterowanie i regulacja pomp i układów pompowych.....	227
6.1.	Zasady sterowania i regulacji parametrów pracy układu pompowego.....	227
6.2.	Regulacja układu .....	229
6.2.1.	Metody regulacji układów .....	229
6.2.2.	Regulacja dławieniowa układu z pompą wirową.....	234
6.2.3.	Regulacja upustowa układu z pompą wirową.....	237
6.2.4.	Porównanie strat regulacji dławieniowej i upustowej.....	239
6.2.5.	Regulacja upustowa układu z pompą wyporową .....	242
6.3.	Regulacja pomp .....	245
6.3.1.	Charakterystyki regulacyjne pomp wirowych.....	245
6.3.2.	Regulacja przez zmianę prędkości obrotowej.....	247
6.3.3.	Regulacja i dopasowanie przez zmianę kąta ustawienia łopatek.....	251
6.3.4.	Dopasowanie pomp do układów przez obtaczanie średnicy zewnętrznej wirnika ...	253

6.3.5. Automatyczna regulacja prędkości obrotowej pompy. Pompy inteligentne z wewnętrznym modulem sterowania.....	260
6.4. Wpływ zmian parametrów cieczy.....	265
6.4.1. Wpływ parametrów cieczy na pracę układu.....	265
6.4.2. Wpływ gęstości cieczy na pracę układu.....	265
6.4.3. Wpływ lepkości cieczy na pracę układu.....	267
7. Dynamika układów pompowych.....	277
7.1. Podstawowe zasady dynamiki.....	277
7.2. Równania ruchu.....	277
7.3. Równania sił i ciśnień.....	278
7.3.1. Siła tarcia cieczy w rurociągu.....	278
7.3.2. Siła tarcia lepkiego.....	279
7.3.3. Siła tarcia suchego.....	280
7.3.4. Sprężyny.....	280
7.3.5. Ścisłość cieczy.....	281
7.3.6. Akumulatory gazowe.....	281
7.3.7. Akumulatory wieżowe.....	283
7.3.8. Sprężystość rurociągu.....	284
7.4. Równania ciągłości.....	285
7.5. Elementy układów.....	286
7.5.1. Pompa wirowa.....	286
7.5.2. Silnik elektryczny.....	289
7.5.3. Obliczanie momentu bezwładności zespołu wirującego.....	290
7.6. Metody obliczeń symulacyjnych.....	291
7.7. Przykłady.....	291
7.7.1. Przepływ między zbiornikami o różnych poziomach cieczy.....	291
7.7.2. Rozruch pompy wirowej przy zamkniętej zasuwie.....	294
7.7.3. Rozruch układu tłoczącego z pompą wirową.....	299
7.7.4. Rozruch klasycznego układu z pompą wirową.....	304
7.7.5. Model działania pompy inercyjnej (inercyjnego podnośnika cieczy).....	310
7.8. Uderzenie hydrauliczne.....	325
7.8.1. Mechanizm uderzenia hydraulicznego.....	325
7.8.2. Równanie ruchu cieczy.....	327
7.8.3. Uderzenie hydrauliczne w przewodzie poziomym.....	330
7.8.4. Uderzenie hydrauliczne w przewodzie poziomym podczas stopniowego zamykania zasuw... ..	334
7.8.5. Uderzenie hydrauliczne w przewodzie pionowym podczas stopniowego zamykania zasuw... ..	338
7.8.6. Bezpośrednie uruchamianie układu pompowego i nagły zanik napięcia zasilania.....	341
8. Kawitacja.....	345
8.1. Istota i mechanizm powstawania kawitacji.....	345
8.2. Nadwyżka antykawitacyjna.....	347
8.3. Krytyczna nadwyżka antykawitacyjna. Fazy rozwoju kawitacji.....	349
8.4. Wymagana nadwyżka antykawitacyjna.....	351
8.5. Wpływ parametrów pracy pompy na nadwyżkę antykawitacyjną.....	352
8.6. Rozporządzalna nadwyżka antykawitacyjna układu.....	354
8.7. Dopuszczalna geometryczna wysokość ssania.....	358
8.8. Metody zapobiegania kawitacji.....	358
9. Badania pomp i układów.....	361
9.1. Badania układu.....	361
9.2. Badania energetyczne pomp.....	365
9.3. Badania energetyczne pomp metodą termodynamiczną.....	367

9.4. Badania kawitacyjne pomp .....	371
10. Eksploatacja pomp i układów .....	377
10.1. Prognozowanie kosztów eksploatacji pompy.....	377
10.1.1. Klasyfikacja kosztów eksploatacji pompy .....	377
10.1.2. Analiza kosztów eksploatacji pompy .....	378
10.1.3. Przetłoczona ilość cieczy .....	379
10.1.4. Uśrednione jednostkowe straty energii .....	380
10.1.5. Jednostkowe koszty remontu pompy.....	380
10.1.6. Minimalny koszt eksploatacji pompy.....	381
10.1.7. Prognoza kosztów eksploatacji pompy .....	382
10.2. Optymalizacja średnicy rurociągu w układzie pompowym.....	382
10.3. Koszty zdyskontowane .....	385
11. Typowe układy pompowe .....	387
11.1. Układy głównego odwadniania kopalni głębinowych.....	387
11.1.1. Kryteria projektowania układów głównego odwadniania .....	387
11.1.2. Zasady projektowania układów głównego odwadniania, wynikające z kryterium pewności ruchowej.....	387
11.1.3. Topologia układów głównego odwadniania.....	391
11.1.4. Układ rozruchowy układu głównego odwadniania .....	397
11.1.5. Ocena energetyczna pracy układu.....	399
11.1.6. Zarastanie rurociągów głównego odwadniania .....	400
11.2. Studnie.....	403
11.3. Przepompownie zbiornikowe.....	411
11.3.1. Podstawowe informacje o pompowniach zbiornikowych .....	411
11.3.2. Przepompownia jednopompowa .....	415
11.3.3. Przepompownie dwupompowe .....	418
11.4. Zestawy wielopompowe do podwyższania ciśnienia.....	427
11.4.1. Topologia zestawów.....	427
11.4.2. Pole pracy zestawu.....	429
11.4.3. Pole wysokości ssania zestawu .....	434
11.4.4. Statystyka parametrów pracy .....	435
11.4.5. Dobór zestawów pompowych .....	437
11.4.6. Zestawy szeregowe .....	440
11.4.7. Zestawy równoległe .....	442
11.4.8. Zestawy szeregowo-równoległe .....	446
11.4.9. Zestawy dwusekcyjne. ....	447
11.4.10. Układy regulacji prędkości obrotowej w zestawach pompowych .....	448
11.5. Układ centralnego ogrzewania.....	449
11.5.1. Zasada działania układu centralnego ogrzewania.....	449
11.5.2. Wpływ regulacji odbiorników na charakterystykę układu centralnego ogrzewania.....	451
11.5.3. Uproszczona metoda obliczania układu centralnego ogrzewania.....	456
11.6. Układy pompowe w elektrowni cieplnej.....	459
11.6.1. Ogólna charakterystyka układów pompowych elektrowni.....	459
11.6.2. Układy pomp zasilających .....	463
11.6.3. Układy obiegów wodnych kotłowych.....	466
11.6.4. Układy pompowe skroplin .....	467
11.6.5. Układy pomp wody chłodzącej .....	468
12. Wzory i tabele.....	473
Spis programów na płycie CD .....	478
Literatura.....	479