



Profesor **Zenon Jędrzykiewicz** od 1967 roku jest pracownikiem Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. W 1992 roku współtworzył Katedrę Automatykacji Procesów na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, był wieloletnim zastępcą kierownika tej katedry, obecnie jest na emeryturze. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na zagadnieniach napędu i sterowania hydrostatycznego. Jest autorem lub współautorem kilku monografii, wielu artykułów i referatów naukowych, skryptów i podręczników akademickich oraz patentów i wzorów użytkowych. Prowadził lub nadal prowadzi autorskie wykłady z „Napędu i sterowania hydrostatycznego” i „Projektowania układów hydrostatycznych”. Wypromował ok. 100 inżynierów i magistrów inżynierów na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych, a także 4 doktorów nauk technicznych.



Dr inż. **Jerzy Stojek** jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Katedry Automatykacji Procesów na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Autor lub współautor ponad 50 artykułów i referatów naukowych obejmujących tematykę napędu hydrostatycznego, diagnostyki układów hydrostatycznych i procesów odlewania ciśnieniowego. Prowadzi zajęcia dla studentów II i III roku z przedmiotów Napęd i Sterowanie Hydrostatyczne, Napędy Maszyn oraz wykłady z Podstaw Automatyki. Zdobyte doświadczenie naukowe wykorzystuje w realizacji prac badawczych oraz na organizowanych kursach i szkoleniach z dziedziny napędu i sterowania hydrostatycznego.



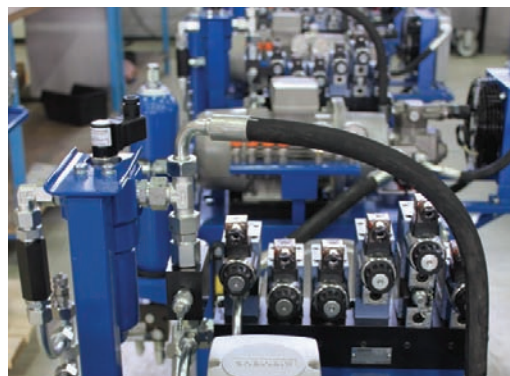
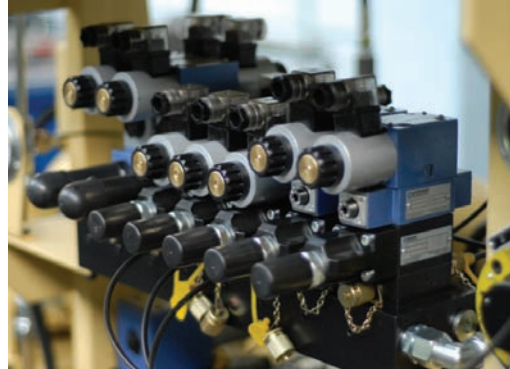
Dr inż. **Piotr Rosikowski** jest absolwentem Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej, gdzie w 2012 roku uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn, specjalność Napęd i Sterowanie Hydrauliczne. Jest autorem lub współautorem kilku artykułów i referatów naukowych oraz patentów i wzorów użytkowych. Od początku swojej pracy zawodowej związany jest z przemysłem maszynowym gdzie jest odpowiedzialny za realizowanie prac badawczo-rozwojowych w zakresie napędów i sterowań hydraulicznych. Obszar zainteresowań naukowych, badawczych i dydaktycznych obejmuje: projektowanie, uruchamianie oraz eksploatację układów hydraulicznych maszyn i urządzeń mobilnych, ze szczególnym uwzględnieniem maszyn górniczych. Współrealizator projektów badawczo-rozwojowych realizowanych we współpracy z wyższymi uczelniami technicznymi oraz Narodowym Centrum Badań i Rozwoju.

ISBN 978-83-946026-0-4



ZENON JĘDRZYKIEWICZ
JERZY STOJEK
PIOTR ROSIKOWSKI

NAPĘD I STEROWANIE
HYDROSTATYCZNE



NAPĘD I STEROWANIE HYDROSTATYCZNE



ZENON JĘDRZYKIEWICZ

JERZY STOJEK

PIOTR ROSIKOWSKI

ZENON JĘDRZYKIEWICZ
JERZY STOJEK
PIOTR ROSIKOWSKI

NAPĘD i STEROWANIE HYDROSTATYCZNE

Kraków 2016

SPIS TREŚCI

WSTĘP	13
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	15
1. WPROWADZENIE	17
1.1. Zalety i wady układów hydrostatycznych	17
1.2. Ogólny schemat blokowy układu hydrostatycznego	19
1.3. Przykłady układów hydrostatycznych	20
2. HYDRAULICZNE CIECZE ROBOCZE	28
2.1. Funkcje oraz wymagane właściwości fizyko-chemiczne cieczy roboczych	28
2.2. Ciecze palne	39
2.3. Ciecze trudnopalne i niepalne	41
2.4. Dobór cieczy roboczych	48
3. POMPY WYPOROWE	51
3.1. Zasada działania i klasyfikacja	51
3.2. Określenia podstawowe i charakterystyki statyczne	59
3.2.1. Wydajność nominalna	59
3.2.2. Ciśnienie nominalne	60
3.2.3. Nominalne zapotrzebowanie mocy	60
3.2.4. Wydajności jednostkowe	61
3.2.5. Charakterystyki statyczne	66
3.3. Schematy konstrukcyjne pomp	66
3.3.1. Pompa zębata o zazębieniu zewnętrznym i zębach prostych	66
3.3.2. Pompa zębata o zazębieniu wewnętrznym i zębach prostych z wkładką sierpową	67
3.3.3. Pompa zębata o wewnętrznym zazębieniu specjalnym i zębach prostych bez wkładki sierpowej (gerotorowa)	68
3.3.4. Pompa śrubowa	68
3.3.5. Pompa łopatkowa pojedynczego działania z wirującymi łopatkami	69
3.3.6. Pompa łopatkowa podwójnego działania z wirującymi łopatkami	70
3.3.7. Pompa wielotłoczkowa promieniowa z niewirującymi tłoczkami	71
3.3.8. Pompa wielotłoczkowa osiowa z wychylnym wirnikiem, o stałej wydajności	71
3.3.9. Pompa wielotłoczkowa osiowa z wychylnym wirnikiem, o zmiennej wydajności	72
3.3.10. Pompa wielotłoczkowa osiowa z wychylną tarczą, o zmiennej wydajności	73
3.4. Symbole graficzne pomp wporowych	74

4.	SILNIKI WYPOROWE	76
4.1.	Zasada działania i klasyfikacja	76
4.2.	Określenia podstawowe i charakterystyki statyczne	83
4.2.1.	Chłonność nominalna	83
4.2.2.	Ciśnienie nominalne - moment rozwijany przez silnik	84
4.2.3.	Moc nominalna	85
4.2.4.	Charakterystyki statyczne	85
4.3.	Schematy konstrukcyjne silników wysokoobrotowych niskomomentowych	86
4.3.1.	Silnik niskomomentowy zębaty	86
4.3.2.	Silnik niskomomentowy wielotłoczkowy promieniowy	87
4.3.3.	Silnik niskomomentowy wielotłoczkowy osiowy o stałej chłonności	88
4.3.4.	Silnik niskomomentowy wielotłoczkowy osiowy o zmiennej chłonności	88
4.4.	Schematy konstrukcyjne silników niskoobrotowych wysokomomentowych	90
4.4.1.	Silnik wysokomomentowy zębaty satelitowy	90
4.4.2.	Silnik wysokomomentowy orbitalny zębaty	91
4.4.3.	Silnik wysokomomentowy orbitalny rolkowy	92
4.4.4.	Silnik wysokomomentowy wielotłoczkowy promieniowy	93
4.4.5.	Silnik wysokomomentowy wielotłoczkowy osiowy z ruchomym korpusem i nieruchomym wałem	94
4.5.	Symbolne graficzne silników wyporowych	94
5.	SIŁOWNIKI HYDRAULICZNE	96
5.1.	Zasada działania i klasyfikacja	96
5.2.	Określenia podstawowe	100
5.2.1.	Parametry siłowników tłoczkowych	100
5.2.2.	Parametry siłowników wahliwych	101
5.2.3.	Parametry siłowników nurnikowych	102
5.3.	Schematy konstrukcyjne siłowników dwustronnego działania	102
5.3.1.	Siłowniki jednoczęstkowe	102
5.3.2.	Siłowniki dwutłoczkowe	104
5.3.3.	Siłowniki wielotłokowe	106
5.3.4.	Siłowniki teleskopowe	107
5.3.5.	Siłowniki wahliwe łopatkowe	108
5.3.6.	Siłowniki wahliwe zębatkowe	109
5.3.7.	Siłowniki wahliwe śrubowe	109
5.4.	Schematy konstrukcyjne siłowników jednostronnego działania	110
5.4.1.	Siłowniki nurnikowe	110
5.4.2.	Siłowniki teleskopowe	111
5.5.	Symbolne graficzne siłowników hydraulicznych	112
6.	WPROWADZENIE DO ELEMENTÓW STERUJĄCYCH	115
7.	ELEMENTY STERUJĄCE KIERUNKIEM PRZEPIYWU	125
7.1.	Klasyfikacja elementów sterujących kierunkiem przepływu	125
7.2.	Zawory odcinające	125

7.3.	Zawory zwrotne	126
7.3.1.	Zawory zwrotne zwykłe (niesterowane)	127
7.3.2.	Zawory zwrotne sterowane pojedyncze bez odprowadzenia przecieków	128
7.3.3.	Zawory zwrotne sterowane pojedyncze z odprowadzeniem przecieków	130
7.3.4.	Zawory zwrotne sterowane podwójne	131
7.3.5.	Symbole graficzne zaworów zwrotnych	132
7.4.	Rozdzielacze	133
7.4.1.	Wprowadzenie i klasyfikacja	133
7.4.2.	Rozdzielacze suwakowe – zasada działania	135
7.4.3.	Rozdzielacze suwakowe jednostopniowe sterowane mechanicznie	136
7.4.4.	Rozdzielacze suwakowe jednostopniowe sterowane hydraulicznie lub pneumatycznie	138
7.4.5.	Rozdzielacze suwakowe jednostopniowe sterowane elektrycznie	141
7.4.6.	Rozdzielacze suwakowe dwustopniowe sterowane mechanicznie lub hydraulicznie	142
7.4.7.	Rozdzielacze suwakowe, dwustopniowe, sterowane elektrycznie	143
7.4.8.	Rozdzielacze gniazdowe jednostopniowe	146
7.4.9.	Przykłady zastosowań rozdzielaczy	150
7.4.10.	Charakterystyki statyczne rozdzielaczy	151
7.4.11.	Symbole graficzne rozdzielaczy	152
8.	ELEMENTY STERUJĄCE CIŚNIENIEM	159
8.1.	Zawory maksymalne	160
8.1.1.	Zawory maksymalne jednostopniowe – zasada działania	161
8.1.2.	Przykłady zaworów maksymalnych jednostopniowych	161
8.1.3.	Zawory maksymalne dwustopniowe – zasada działania	164
8.1.4.	Przykłady zaworów maksymalnych dwustopniowych	165
8.1.5.	Charakterystyki statyczne zaworów maksymalnych	168
8.1.6.	Symbole graficzne zaworów maksymalnych	169
8.2.	Zawory redukcyjne	171
8.2.1.	Zawory redukcyjne jednostopniowe – zasada działania	172
8.2.2.	Przykłady zaworów redukcyjnych	173
8.2.3.	Charakterystyki statyczne zaworów redukcyjnych	177
8.2.4.	Symbole graficzne zaworów redukcyjnych	178
8.3.	Zawory przełączające	179
8.3.1.	Przykłady zaworów przełączających	180
8.3.2.	Symbole graficzne zaworów przełączających	185
9.	ELEMENTY STERUJĄCE NATĘŻENIEM PRZEPŁYWU	188
9.1.	Zawory dławiące	189
9.1.1.	Zasada działania zaworów dławiących	190
9.1.2.	Przykłady zaworów dławiących	190
9.1.3.	Charakterystyki statyczne zaworów dławiących	194
9.1.4.	Symbole graficzne zaworów dławiących	197

9.2.	Regulatory przepływu	198
9.2.1.	Regulatory nienastawne	198
9.2.2.	Regulatory nastawne – wprowadzenie	199
9.2.3.	Regulatory nastawne dwudrogowe	200
9.2.4.	Regulatory nastawne trójdrogowe	202
9.2.5.	Charakterystyki statyczne regulatorów nastawnych	204
9.2.6.	Symbole graficzne regulatorów przepływu	205
9.3.	Synchronizatory prędkości	208
9.3.1.	Synchronizatory silnikowe	209
9.3.2.	Synchronizatory dławieniowe	211
10.	TECHNIKA NABOJOWA	215
10.1.	Określenia podstawowe	216
10.2.	Zawory gniazdowe sterujące kierunkiem przepływu	222
10.2.1.	Zawory gniazdowe rozdzielcze (rozdzielacze)	223
10.2.2.	Zawory gniazdowe zwrotne niesterowane	229
10.2.3.	Zawory gniazdowe zwrotne sterowane	231
10.3.	Zawory gniazdowe sterujące ciśnieniem	233
10.3.1.	Zawór gniazdowy ograniczający ciśnienie	233
10.3.2.	Zawór gniazdowy ograniczający ciśnienie z zaworem odciążającym	235
10.3.3.	Zawór gniazdowy redukujący ciśnienie	237
10.3.4.	Zawór gniazdowy sekwencyjny	238
10.4.	Zawory gniazdowe sterujące natężeniem przepływu	239
10.5.	Symbole graficzne zaworów gniazdowych	241
11.	TECHNIKA PROPORCJONALNA I SERWOZAWOROWA	243
11.1.	Wprowadzenie	243
11.1.1.	Technika proporcjonalna – uwagi ogólne	243
11.1.2.	Zalety i wady techniki proporcjonalnej	247
11.1.3.	Układy sterowania w technice proporcjonalnej	248
11.1.4.	Technika serwozaworowa – uwagi ogólne	250
11.1.5.	Zalety i wady techniki serwozaworowej	253
11.1.6.	Układy regulacji w technice serwozaworowej	254
11.1.7.	Porównanie techniki serwozaworowej i proporcjonalnej	257
11.2.	Technika proporcjonalna – elementy sterujące	257
11.3.	Rozdzielacze proporcjonalne	258
11.3.1.	Określenie rozdzielaczy proporcjonalnych	258
11.3.2.	Przykłady rozdzielaczy proporcjonalnych	258
11.3.3.	Przetworniki elektromechaniczne rozdzielaczy proporcjonalnych	271
11.3.4.	Przetworniki przemieszczenia suwaków	276
11.3.5.	Elektronika w technice proporcjonalnej	278
11.3.6.	Symbole graficzne rozdzielaczy proporcjonalnych	284
11.4.	Proporcjonalne zawory sterujące ciśnieniem	288
11.4.1.	Określenie proporcjonalnych zaworów ciśnieniowych	288

11.4.2.	Przykłady proporcjonalnych zaworów maksymalnych	288
11.4.3.	Symbole graficzne proporcjonalnych zaworów maksymalnych	297
11.4.4.	Przykłady proporcjonalnych zaworów redukcyjnych	299
11.4.5.	Symbole graficzne proporcjonalnych zaworów redukcyjnych	307
11.5.	Proporcjonalne zawory sterujące natężeniem przepływu	310
11.5.1.	Określenie zaworów sterujących natężeniem przepływu	310
11.5.2.	Przykłady proporcjonalnych zaworów dławiących	311
11.5.3.	Przykłady proporcjonalnych regulatorów przepływu	312
11.5.4.	Symbole graficzne proporcjonalnych zaworów przepływowych	317
11.6.	Technika serwozaworowa – elementy sterujące	321
11.6.1.	Określenie i ogólny opis serworozdzielaczy	322
11.6.2.	Przekrycia okien dławiących i charakterystyki statyczne serworozdzielaczy	323
11.6.3.	Charakterystyki dynamiczne serworozdzielaczy	326
11.6.4.	Silniki momentowe serworozdzielaczy	328
11.6.5.	Wzmocniacze hydrauliczne serworozdzielaczy	329
11.6.6.	Sprężenia zwrotne serworozdzielaczy	332
11.6.7.	Przetworniki przemieszczenia	336
11.6.8.	Elektronika serworozdzielaczy	337
11.6.9.	Przykłady serworozdzielaczy	339
11.6.10.	Symbole graficzne serworozdzielaczy	347
12.	AKUMULATORY HYDRAULICZNE	351
12.1.	Przeznaczenie akumulatorów	351
12.2.	Klasyfikacja i zasada działania akumulatorów	352
12.3.	Przykłady konstrukcji akumulatorów gazowych	355
12.3.1.	Akumulatory pęcherzowe	355
12.3.2.	Akumulatory membranowe	358
12.3.3.	Akumulatory tłokowe	360
12.4.	Dodatkowe butle gazowe	361
12.5.	Bloki zabezpieczająco-odcinające	362
12.6.	Symbole graficzne akumulatorów	363
13.	FILTRACJA I FILTRY	364
13.1.	Zanieczyszczenia cieczy roboczej	364
13.2.	Podział filtrów	366
13.3.	Współczynniki określające filtrację	370
13.4.	Zadania filtrów w układach hydraulicznych	374
13.5.	Schematy konstrukcji filtrów	375
13.6.	Wskaźniki zanieczyszczeń	379
13.7.	Symbole graficzne filtrów	381
13.8.	Kryterium doboru filtrów	382
14.	CHŁODNICE I NAGRZEWNICE	387
14.1.	Zasada działania, klasyfikacja i przykłady rozwiązań konstrukcyjnych	387
14.2.	Symbole graficzne chłodziń i nagrzewnic	391

14.3.	Zasady wyznaczania mocy cieplnej chłodnic	391
14.3.1.	Współczynniki przepływu ciepła ze zbiornika i przewodów do otoczenia	393
14.4.	Przykłady zastosowań	395
15.	ZBIORNIKI HYDRAULICZNE	397
15.1.	Przeznaczenie i opis budowy	397
15.2.	Podstawowy osprzęt zbiorników	400
15.3.	Przykłady konstrukcji zbiorników	403
15.4.	Zasady obliczeń zbiorników	406
16.	ELEMENTY POMIAROWE	409
16.1.	Zasada działania i klasyfikacja czujników i przetworników	409
16.1.1.	Przyrządy do pomiaru ciśnienia	409
16.1.2.	Czujniki i przetworniki natężenia przepływu	414
16.1.3.	Czujniki i przetworniki temperatury	417
16.2.	Przyrządy do pomiaru parametrów medium roboczego	418
16.3.	Symbole graficzne elementów pomiarowych	420
17.	POŁĄCZENIA I PRZEWODY HYDRAULICZNE	421
17.1.	Rurowe połączenia śrubowe	421
17.2.	Połączenia kołnierzowe	426
17.3.	Połączenia typu Stecko	427
17.4.	Przewody hydrauliczne	428
17.5.	Przykłady połączeń hydraulicznych	431
18.	STACJONARNE UKŁADY HYDROSTATYCZNE W TECHNICIE KONWENCJONALNEJ I NABOJOWEJ	433
18.1.	Zagadnienia podstawowe w technice konwencjonalnej	433
18.1.1.	Obiegi cieczy	433
18.1.2.	Podstawowe zabezpieczenie układu hydrostatycznego przed przeciążeniem	435
18.1.3.	Współpraca kilku pomp	437
18.1.4.	Umiejscowienie filtrów	439
18.1.5.	Umiejscowienie akumulatorów hydraulicznych	442
18.1.6.	Dławieniowe nastawianie prędkości odbiornika	444
18.1.7.	Objętościowe ciągłe nastawianie prędkości ruchu silnika hydraulicznego	463
18.1.8.	Objętościowe, stopniowane nastawianie prędkości odbiornika	473
18.1.9.	Hydrauliczny układ mostkowy	478
18.1.10.	Napędzanie z prędkością niezależną od kierunku ruchu siłownika	479
18.1.11.	Bezpośrednie zabezpieczenia odbiornika przed przeciążeniem technologicznym i bezwładnościowym	480
18.1.12.	Blokady hydrauliczne	483
18.2.	Wybrane układy hydrostatyczne w technice konwencjonalnej	486
18.2.1.	Układ z siłownikiem jednotłoczkowym, pracującym poziomo	486

18.2.2.	Układ z siłownikiem nurnikowym	487
18.2.3.	Układ z siłownikiem jednotłoczkowym, pracującym pionowo	488
18.2.4.	Układ z silnikiem hydraulicznym	489
18.2.5.	Układ z dwoma obwodami hydraulicznymi	490
18.2.6.	Układ z siłownikiem o dużym zapotrzebowaniu na ciecz	491
18.2.7.	Przekładnia hydrostatyczna pracująca w obiegu zamkniętym	492
18.3.	Zagadnienia podstawowe w technice naboju	494
18.3.1.	Układ hamowania silnika hydraulicznego	494
18.3.2.	Układ sterowania siłownikiem hydraulicznym z zaworem podporowym	495
18.3.3.	Dwudrogowy regulator przepływu w szeregowym połączeniu z rozdzielaczem 2/2	497
18.3.4.	Układ nastawy niezależnej prędkości wsuwu i wysuwu tłocznika siłownika	499
18.4.	Wybrane układy hydrostatyczne w technice naboju	501
18.4.1.	Układ stopniowania siły i prędkości tłocznika siłownika hydraulicznego	501
18.4.2.	Układ sekwencyjnego sterowania pracą odbiorników hydraulicznych	503
19.	STACJONARNE UKŁADY HYDROSTATYCZNE W TECHNICIE PROPORCJONALNEJ I SERWOZAWOROWEJ	506
19.1.	Układy ciągłego nastawiania siły i momentu obrotowego	506
19.2.	Układy ciągłego nastawiania prędkości liniowej i obrotowej	511
19.3.	Układy pozycjonowania	517
20.	UKŁADY REGULACJI I STEROWANIA HYDROSTATYCZNEGO	521
20.1.	Nastawniki i regulatory pomp waporowych	521
20.1.1.	Nastawniki hydrauliczne, mechaniczne i elektryczne	521
20.1.2.	Regulator ciśnienia	525
20.1.3.	Regulator ciśnienia i wydajności	526
20.1.4.	Regulator stałej mocy	529
20.2.	Nastawniki i regulatory silników waporowych	531
20.2.1.	Nastawnik dwustanowy	531
20.2.2.	Nastawnik proporcjonalny	534
20.2.3.	Regulator ciśnieniowy	537
20.3.	Regulatory jazdy drogowej	538
20.4.	Układy sterowania dławieniowego czynnego – load sensing	541
20.4.1.	Zasada działania układów load sensing i ich klasyfikacja	542
20.4.2.	Układ z pompą stałowydawkową	543
20.4.3.	Układ z pompą zmiennowydawkową	544
20.4.4.	Układ prekompensowany (LS)	545
20.4.5.	Układ postkompensowany (LUDV)	547
20.4.6.	Przykłady zastosowań	548
	PODSUMOWANIE	552

LITERATURA	553
Książki i skrypty	553
Czasopisma i biuletyny	554
Katalogi, materiały informacyjne i prospekty	555
Literatura internetowa – strony WWW	556
Streszczenie/Summary	558

1. WPROWADZENIE

Napędy hydrauliczne służą do przekazywania energii mechanicznej z miejsca jej wytwarzania do miejsca użytkowania za pośrednictwem cieczy roboczej. Cieczą roboczą jest najczęściej olej mineralny uszlachetniony dodatkami, a także – w specjalnych warunkach – emulsja oleju w wodzie lub wody w oleju oraz roztwory glikoli w wodzie, bezwodne ciecze syntetyczne oraz woda.

Ze względu na sposób przekazywania energii rozróżniamy dwie grupy napędów hydraulicznych:

- napędy hydrokinetyczne, wykorzystujące głównie energię kinetyczną cieczy roboczej,
- napędy hydrostatyczne, wykorzystujące głównie energię ciśnienia cieczy roboczej.

Napędy hydrokinetyczne występują zwykle pod postacią sprzęgieł i przekładni hydrokinetycznych. Stosowane są one na ogół rzadko, w specjalnych wykonaniach i w związku z tym nie będą omawiane w niniejszym podręczniku.

Napędy hydrostatyczne znalazły bardzo szerokie zastosowanie niemal we wszystkich typach maszyn i mechanizmów. Współczesne napędy hydrostatyczne – oprócz elementów niezbędnych do zrealizowania typowych funkcji napędowych – zawierają również bardzo zróżnicowane elementy sterujące, które umożliwiają kształtowanie charakterystyk statycznych i dynamicznych zgodnie z wymaganiami maszyn, dla których są przeznaczone. W związku z tym zamiast ukształtowanego historycznie określenia **napęd i sterowanie hydrauliczne** będziemy używać ogólniejszej nazwy **układy hydrostatyczne**.

1.1. Zalety i wady układów hydrostatycznych

Do najważniejszych zalet układów hydrostatycznych należy zaliczyć:

1. Dużą wydajność energetyczną z jednostki masy lub objętości. Przykładowo w przekładniach wielotłoczkowych osiowych osiąga ona $4 \div 6$ [kW/kg] i przewyższa pod tym względem wszelkie znane rodzaje napędów, np. silnik hydrauliczny w porównaniu z silnikiem elektrycznym o tej samej mocy i prędkości obrotowej jest 14 razy lżejszy i zajmuje 26 razy mniejszą przestrzeń.
2. Dużą łatwość sterowania podstawowymi parametrami ruchowymi, znacznie wyższą niż w układach mechanicznych, a w tym możliwość łatwego uzyskania bardzo dużych wysokosprawnych przełożeń zmiennych w sposób ciągły, a także dużą łatwość zamiany ruchu obrotowego na prostoliniowy.
3. Bardzo małą bezwładność układu, umożliwiającą dokonywanie częstych i gwałtownych zmian prędkości i obciążenia przy dobrych właściwościach

tłumienia procesów przejściowych, np. silnik hydrauliczny ma moment bezwładności około 72 razy mniejszy od momentu bezwładności porównywalnego silnika elektrycznego.

4. Samosmarowność. W charakterze cieczy roboczych wykorzystuje się najczęściej różne rodzaje olejów, które są jednocześnie czynnikiem smarującym. Odrębnym zagadnieniem jest zastosowanie emulsji, cieczy syntetycznych, a nawet wody jako czynnika roboczego.
5. Łatwość bezpośredniej i ciągłej kontroli obciążenia, a także łatwość ograniczenia tego obciążenia.
6. Dużą łatwość przestrzennego usytuowania elementów tworzących układy, wynikającą z możliwości wykonania połączeń za pomocą dowolnie ułożonych przewodów sztywnych lub elastycznych.
7. Możliwość komponowania układów przeznaczonych do różnych maszyn i różnych celów z ograniczonej i zunifikowanej liczby elementów typowych, produkowanych przez wyspecjalizowane firmy.
8. Łatwość automatyzacji lub zdalnego sterowania, uzyskiwana na drodze elektrohydraulicznej czy elektroniczno-hydraulicznej.

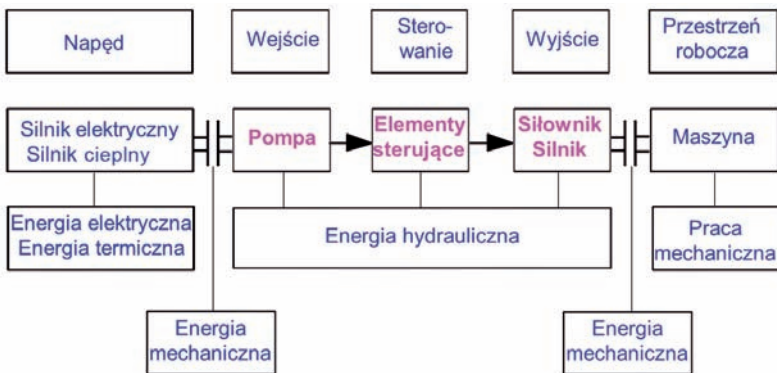
Układy hydrostatyczne nie pozbawione są również wad. Do najważniejszych należą:

1. Duża podatność na zanieczyszczenia cieczy roboczej, prowadząca w następstwie do uszkodzeń. Z tego względu układy hydrostatyczne wymagają odpowiedniego zaprojektowania i wykonania oraz obsługiwanego przez pracowników o odpowiednich kwalifikacjach.
2. Zmiany właściwości statycznych i dynamicznych, spowodowane zmianami lepkości cieczy roboczej pod wpływem temperatury. W tej sytuacji, przy wysokich wymaganiach stawianych przed układami, stosuje się chłodnice i nagrzewnice wchodzące w skład układów stabilizacji temperatury cieczy roboczej.
3. Duża hałaśliwość wzrastająca wraz ze wzrostem ciśnienia pracy. Poziom hałas przekracza niejednokrotnie 90 [dB]. Skuteczne sposoby tłumienia hałasu czekają na opracowanie.
4. Trudności w uzyskaniu bardzo dokładnej synchronizacji ruchów silników lub siłowników obciążonych w zróżnicowany sposób i zasilanych z jednego źródła.
5. Występowanie nieuniknionych, brudzących wycieków cieczy roboczej, które są szkodliwe dla środowiska naturalnego i trudne do neutralizacji.

1.2. Ogólny schemat blokowy układu hydrostatycznego

Na rysunku 1.1 pokazano ogólny schemat blokowy układu hydrostatycznego, obrazujący zamianę i przekazywanie poszczególnych form energii, mianowicie:

- dostarczanie energii mechanicznej do układu przez silnik elektryczny, ciepły lub za pomocą napędu ręcznego,
- zamianę energii mechanicznej na energię ciśnienia, nazywaną inaczej energią hydrauliczną. Zamiana ta zachodzi w pompie hydraulicznej,
- przekazywanie energii hydraulicznej za pomocą przewodów i elementów sterujących, reagujących na zewnętrzne lub wewnętrzne sygnały sterujące pracą układu. Sygnały te mogą mieć różny charakter fizyczny: elektryczny, mechaniczny, hydrauliczny oraz pneumatyczny,
- zamianę energii hydraulicznej na mechaniczną. Zamiana ta zachodzi w hydraulicznym silniku obrotowym lub siłowniku hydraulicznym,
- przekazywanie energii mechanicznej do elementów maszyny roboczej, wykonujących pracę użyteczną.



Rys. 1.1. Ogólny schemat blokowy układu hydrostatycznego; rys. wg Bosch Rexroth

W związku z tym w każdym układzie hydrostatycznym możemy wyróżnić elementy zaliczane do jednej z poniższych czterech grup:

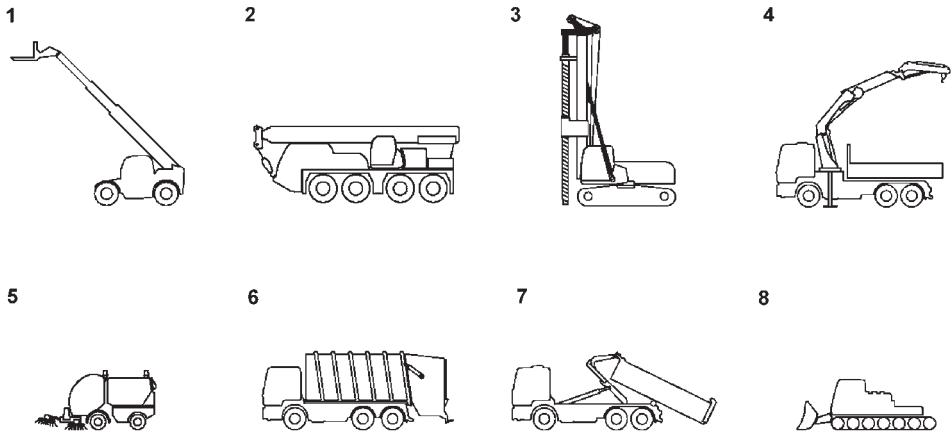
- pompy, czyli elementy zamieniające dostarczoną z zewnątrz energię mechaniczną na energię ciśnienia cieczy roboczej,
- elementy sterujące. Jest to bardzo rozbudowana grupa, do której zaliczamy elementy sterujące: kierunkiem przepływu, ciśnieniem, natężeniem przepływu, kierunkiem i natężeniem przepływu oraz magazynujące energię,
- odbiorniki energii hydraulicznej występujące jako silniki hydrauliczne obrotowe i siłowniki hydrauliczne, czyli elementy zamieniające dostarczoną energię hydrauliczną na energię mechaniczną i przekazującą ją do napędzanego urządzenia,

- elementy pomocnicze, czyli elementy, które nie biorą udziału w funkcjach napędowych i sterujących pracą układu, jednak ich obecność warunkuje połączenie elementów i poprawne działanie układu. Zaliczymy do nich: przewody sztywne i elastyczne oraz złącza, zbiorniki, filtry, chłodnice, nagrzewnice i elementy pomiarowe.

1.3. Przykłady układów hydrostatycznych

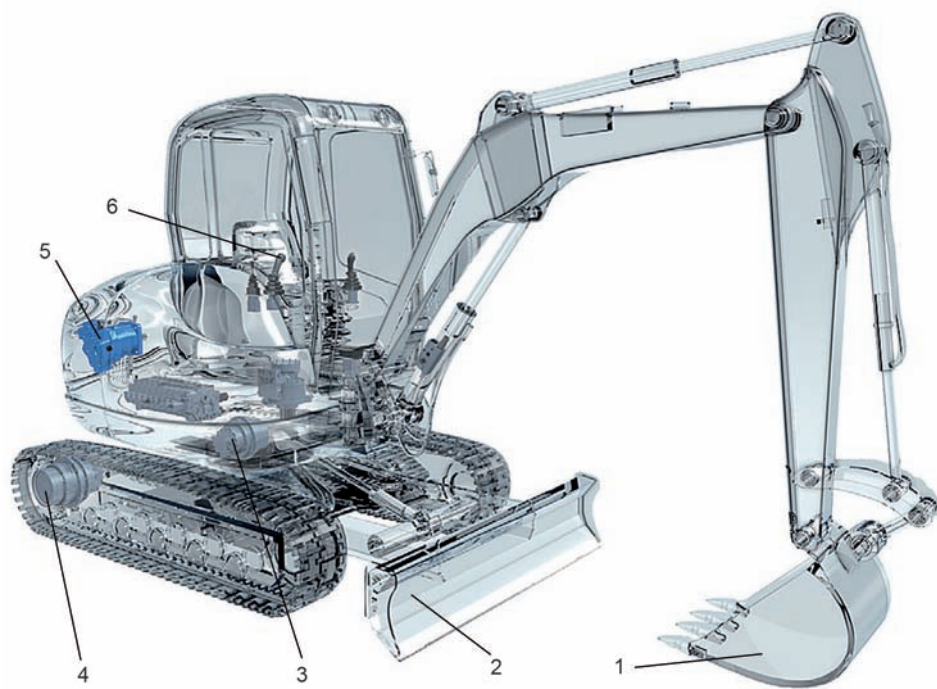
Układy hydrostatyczne spotykamy w wielu zastosowaniach, np. w maszynach roboczych i transportowych, w przemyśle maszynowym i samochodowym, w górnictwie, hutnictwie, rolnictwie, leśnictwie, lotnictwie czy okrętownictwie. Ze względu na możliwość przemieszczania się układów wraz z maszynami możemy mówić o układach stacjonarnych lub mobilnych.

Na rys. 1.2 pokazano schematycznie kilka maszyn mobilnych, w których te układy mają zastosowanie.



Rys. 1.2. Przykłady schematycznych rysunków maszyn mobilnych, w których stosuje się układy hydrostatyczne: 1 – wysięgnik teleskopowy, 2 – dźwig samojezdny, 3 – wiertnica, 4 – żuraw samochodowy, 5 – zamiatarka samobieżna, 6 – śmieciarka, 7 – ładowarka hakowa, 8 – spycharka gąsienicowa; rys. Bosch Rexroth

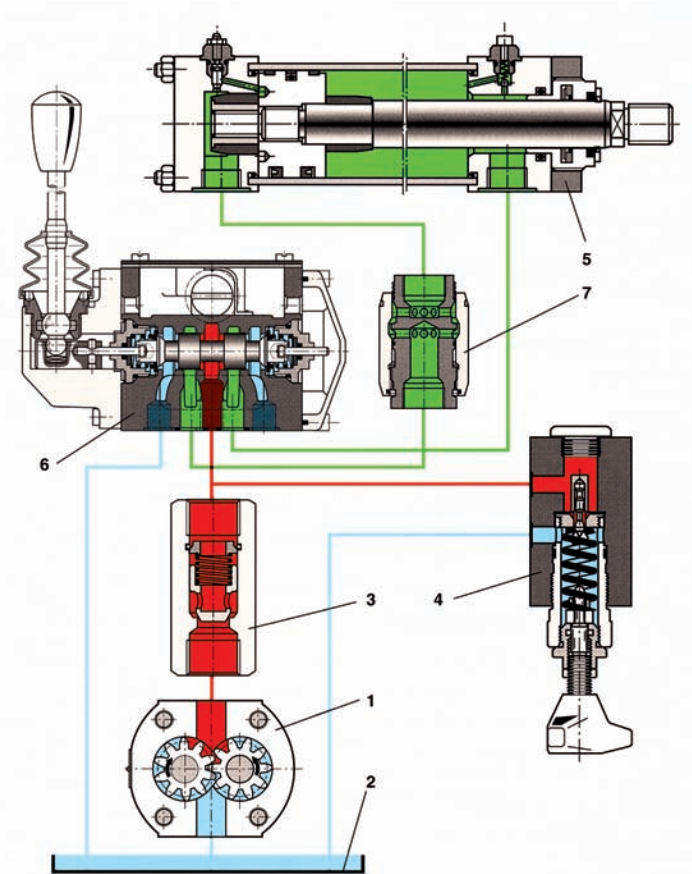
Kolejną mobilną maszyną roboczą jest koparka gąsienicowa pokazana poglądowo na rysunku 1.3.



Rys. 1.3. Koparka gąsienicowa w ujęciu poglądowym. W koparce występuje kilka współpracujących ze sobą układów hydrostatycznych: układ manipulacji łyżką 1, układ manipulacji lemieszem 2, układ obrotu nadwozia 3, układ (mechanizm) jazdy 4. Układy te zasilane są z pompy 5 i sterowane joystickami 6 z kabiny przez operatora koparki; rys. Bosch Rexroth

Nawiązując do rysunku 1.3 poniżej przedstawimy bardziej szczegółowo dwa układy hydrostatyczne, które mogą znaleźć zastosowanie w pokazanych maszynach.

Na rysunku 1.4 przedstawiono schemat konstrukcyjny układu z siłownikiem jednoczyskowym, złożony z wyżej wymienionych elementów.



Rys. 1.4. Schemat konstrukcyjny układu z siłownikiem jednołoczyskowym: 1 – pompa będąca źródłem energii hydraulicznej, czyli źródłem cieczy pod ciśnieniem dostarczanej do układu, 2 – zbiornik zawierający ciecz roboczą w ilości niezbędnej do funkcjonowania układu, 3 – zawór zwrotny pełniący rolę pomocniczą podczas uruchamiania nowego układu, 4 – zawór maksymalny zabezpieczający układ przed wzrostem ciśnienia ponad wartość dopuszczalną, 5 – siłownik jednołoczyskowy z hamowaniem (tłumieniem) ruchu w skrajnych położeniach tłoka, pokazano dwa rodzaje tłoka, 6 – rozdzielacz do sterowania pracą siłownika, czyli do jego uruchamiania na wysuw lub wsuw oraz do zatrzymywania w dowolnym położeniu, 7 – zawór dławiący do nastawiania prędkości wysuwu lub wsuwu tłoka z tłoczyskiem; rys. Bosch Rexroth

Działanie układu można opisać następująco:

Pompa 1 zasysa ciecz ze zbiornika 2 i przez zawór zwrotny 3 podaje ją do rozdzielacza 6. Przewód łączący pompę 1 z rozdzielaczem 6 jest przewodem tłocznym układu. Przewód ten ma odgałęzienie prowadzące do zaworu maksymalnego 4.

W sytuacji pokazanej na rysunku rozdzielacz 6 odcina przepływ z pompy 1 do siłownika 5 i wobec tego cała wydajność pompy 1 kierowana jest do zawo-

ru maksymalnego 4, zabezpieczającego układ przed przeciążeniem prowadzącym do uszkodzenia. Zabezpieczenie polega na odprowadzeniu nadmiaru cieczy przez zawór maksymalny 4 do zbiornika 2, w tym przypadku odprowadzana jest cała wydajność pompy 1. Ponadto rozdzielacz 6 odcina całkowicie połączenie siłownika 5 z pompą 1 i zbiornikiem 2, więc tłok siłownika 5 jest unieruchomiony.

Jeżeli dźwignia rozdzielacza 6 zostanie wychylona w prawo, to suwak tego rozdzielacza zostanie przesunięty w lewo i spowoduje połączenie lewej komory siłownika 5 z pompą 1 a prawej komory ze zbiornikiem 2. Tak więc ciecz pod ciśnieniem wytworzonym przez pompę 1 spowoduje wysuw tłoka z tłoczkowym siłownika 5. Jednocześnie ciecz z prawej komory siłownika 5 pod niskim ciśnieniem zostanie odprowadzona do zbiornika 2. Przerzutowanie dźwigni rozdzielacza 6 w lewo spowoduje przesunięcie suwaka tego rozdzielacza w prawo i zmianę połączeń siłownika 5 z pompą 1 i zbiornikiem 2, a więc zmianę kierunku ruchu tłoka z tłoczkowym siłownika 5.

Między lewą komorą siłownika 5 a rozdzielaczem 6 znajduje się zawór dławiący 7. Zadaniem tego zaworu jest nastawianie prędkości ruchu tłoka z tłoczkowym siłownika 5, mianowicie:

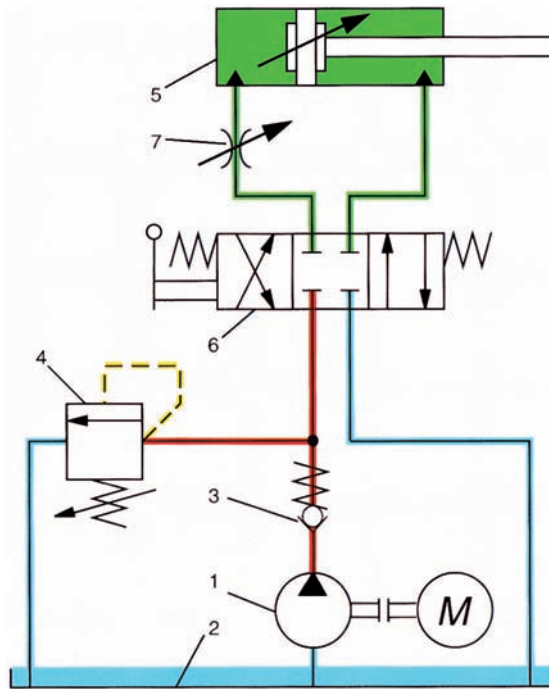
- w trakcie wysuwu tłoka zawór dławiący 7 przepuszcza do lewej komory siłownika 5 ciecz o natężeniu przepływu wynikającym (między innymi) z nastawy powierzchni przekroju przepływowego w dławiku tego zaworu; od nastawionego natężenia przepływu zależy prędkość ruchu tłoka – taki sposób usytuowania zaworu dławiącego 7 nosi nazwę dławienia na dopływie lub inaczej na wlocie,
- w trakcie wsuwu tłoka zawór dławiący 7 ogranicza wypływ cieczy z lewej komory siłownika 5 do wartości nastawionej na dławiku; od nastawionego natężenia przepływu zależy prędkość ruchu tłoka – taki sposób usytuowania zaworu dławiącego 7 nosi nazwę dławienia na wypływie lub inaczej na wylocie.

Zawór dławiący 7 może tylko zmniejszyć prędkość tłoka w porównaniu z układem bez tego zaworu – w układzie bez zaworu cała wydajność pompy 1 jest wykorzystywana do wytworzenia prędkości ruchu tłoka siłownika 5. Zatem pompa 1 w układzie z zaworem dławiącym 7 musi dysponować nadwyżką wydajności w stosunku do potrzeb siłownika 5, nadwyżka ta jest odprowadzana do zbiornika za pomocą zaworu maksymalnego 4.

Z dotychczasowego opisu działania układu wynika, że zarówno w trakcie postoju, jak i w trakcie ruchu siłownika 5, przez zawór maksymalny 4 odprowadzana jest całość lub część wydajności pompy 1. Zawór maksymalny 4 odprowadzający ciecz w sposób ciągły przez cały czas pracy pompy 1 lub część tego czasu nosi nazwę zaworu przelewowego.

W układzie znajduje się również zawór zwrotny 3. Zawór ten w trakcie pracy pompy 1 jest zawsze otwarty i praktycznie nic nie wnosi do funkcjonowania układu. Jego rola może uwidocznić się podczas prac remontowych, na przykład gdy zachodzi konieczność podłączenia silnika elektrycznego na kierunek obrotów wymagany przez pompę 1 – w przypadku niewłaściwego podłączenia zawór 3 zapobiegnie wysysaniu cieczy z układu, czyli zapobiegnie zapowietrzeniu układu.

Tworzenie schematów konstrukcyjnych jak na rysunku 1.4 jest bardzo pracochłonne, z uwagi na zbyt dużą liczbę szczegółów nie zawsze istotnych dla opisu funkcjonowania układów. W związku z tym stosuje się symbole graficzne elementów, analogiczne do symboli używanych na przykład w elektronice. Symbole te pozbawione są szczegółów konstrukcyjnych, a ich celem jest wyłącznie umowne przedstawienie cech funkcjonalnych elementów. Stosując zapis symboliczny układu z rysunku 1.4, otrzymamy znacznie prostszy i czytelniejszy schemat funkcjonalny układu, pokazany na rysunku 1.5.



Rys. 1.5. Schemat funkcjonalny (symboliczny, ideowy) układu z siłownikiem jednotłoczkowym z rys. 1.4, oznaczenia na rysunku są takie same jak poprzednio, mianowicie: 1 – pompa, 2 – zbiornik, 3 – zawór zwrotny, 4 – zawór maksymalny, 5 – siłownik jednotłoczkowy, 6 – rozdzielacz, 7 – zawór dławiący; opracowanie własne według Bosch Rexroth

Na rysunku 1.6 przedstawiono schemat konstrukcyjny układu hydrostatycznego z silnikiem obrotowym, nazywanego inaczej przekładnią hydrostatyczną.

