

JAROSŁAW BIAŁY
Bosch Rexroth Sp. z o. o.

MARIAN J. ŁOPATKA
Wojskowa Akademia Techniczna

Wybrane problemy doboru czynnika roboczego w hydrostatycznych układach napędu i sterowania

1. Wprowadzenie

W większości współczesnych maszyn budowlanych przeniesienie napędu (tj. siły, momentu, ruchu) od silnika do sprzętu roboczego i sterowania odbywa się poprzez układ hydrostatyczny, wykorzystujący energię ciśnienia cieczy. Jednym z najważniejszych funkcjonalnych elementów układu hydrostatycznego jest czynnik roboczy, którego podstawowym zadaniem jest przenoszenie energii między poszczególnymi elementami układu, smarując przy tym współpracujące części, chroniąc je przed korozją i zapewniając odpowiednie warunki termiczne. Jego właściwy dobór determinuje, zatem poprawną i bezawaryjną pracę układu oraz spełnienie oczekiwań użytkownika.

2. Rodzaj czynnika roboczego

Zróżnicowane oczekiwania spowodowały opracowanie wielu typów czynników roboczych - wymagane właściwości i charakterystyki zależą głównie od jego zastosowania (tab.1).

Od czasu przeprowadzenia przez Ignacego Łukasiewicza w Charkowce w roku 1852 pierwszej destylacji ropy naftowej, czynnikiem roboczym w układach hydrostatycznych są zazwyczaj oleje mineralne będące produktami destylacji ropy naftowej. Noszą one nazwę olejów hydraulicznych. Ich właściwości zależą przede wszystkim od: rodzaju ropy naftowej, stopnia rafinacji, rodzaju i ilości dodatków uszlachetniających. Właściwy dobór oleju wymaga precyzyjnego określenia przewidywanych warunków pracy układu – tab.2.

Drugą grupę czynników roboczych stanowią ciecz niepalne, do których zaliczamy emulsje, roztwory wodne i ciecz bezwodne (tab.3). Ele-

menty i zespoły układów, w których stosuje się ciecze HFA, HFB i HFC nie mogą być wykonane z aluminium, ani też zawierać cynk. Ponadto w przypadku cieczy HFC nie można stosować elementów wykonanych ze stopów zawierających kadm i magnez.

Tabela 1. Dopuszczalny zakres zastosowań czynników roboczych: 1 - olej mineralny, 2 - syntetyczne ciecze hydrauliczne, 3 - ciecze przyjazne otoczeniu, 4 - woda, HFA, HFB, 5 - ciecze specjalne

Zastosowanie	Czynnik roboczy	Maks. ciśnienie	Temperatura otoczenia	Miejsce zabudowy
Pojazdy	1 · 2 · 3	25,0 MPa	-40 do +60 °C	wewn./zewn.
Maszyny budowlane i drogowe	1 · 2 · 3	31,5 MPa	-40 do +60 °C	wewn./zewn.
Pojazdy specjalne	1 · 2 · 3 · 4	25,0 MPa	-40 do +60 °C	wewn./zewn.
Pojazdy i maszyny rolnicze oraz leśne	1 · 2 · 3	25,0 MPa	-40 do +50 °C	wewn./zewn.
Budowa okrętów	1 · 2 · 3	31,5 MPa	-60 do +60 °C	wewn./zewn.
Lotnictwo	1 · 2 · 5	28,0 MPa	-65 do +60 °C	wewn./zewn.
Przenośniki	1 · 2 · 3 · 4	31,5 MPa	-40 do +60 °C	wewn./zewn.
Obrabiarki	1 · 2	20,0 MPa	18 do +40 °C	wewn.
Prasy	1 · 2 · 3	63,0 MPa	18 do +40 °C	gł. wewn.
Hutnictwo, walcownie, odlewnictwo	1 · 2 · 4	31,5 MPa	-40 do +60 °C	wewn.
Hydraulika w budown. wodnym	1 · 2 · 3	22,0 MPa	-10 do +60 °C	wewn./zewn.
Elektrownie	1 · 2 · 3 · 4	25,0 MPa	18 do +30 °C	gł. wewn.
Technika teatralna	1 · 2 · 3 · 4	16,0 MPa	18 do +150 °C	gł. wewn.
Stanowiska symulac. i badawcze	1 · 2 · 3 · 4	100,0 MPa	-40 do +60 °C	gł. wewn.
Górnictwo	1 · 2 · 3 · 4	100,0 MPa	do +60 °C	wewn. i pod ziemią
Technika specjalna	2 · 3 · 4 · 5	25,0 MPa	-65 do +150 °C	wewn./zewn.

Kolejną grupę czynników roboczych tworzą ciecze przyjazne środowisku (tab.4), tzn. spełniające poniższe wymagania:

- uleganie szybkiej biodegradacji,
- nietoksyczność dla ryb i bakterii,
- brak zagrożenia dla wody, żywności, i paszy,
- obojętność dla skóry, śluzówki (jako roztwór, ciecz i gaz),
- niedrażniący, a nawet przyjemny zapach.

Z uwagi na duże podobieństwo cech użytkowych do olejów mineralnych - do układów hydraulicznych w budowie maszyn zaleca się ciecze HEES, natomiast pozostałe tj., HEPG i HETG zalecane są tylko do szczególnych zastosowań.

Tabela 2. Klasy olejów mineralnych w zależności od zastosowania

PN-91/C - 96057	DIN 51 302	Rodzaj oleju	Zastosowanie
L-HH ...	H	oleje mineralne bez dodatków uszlachetniających	Urządzenia z napędem hydrostatycznym pracujące w warunkach umiarkowanych
L-HL ...	HL	oleje mineralne z dodatkami przeciwutleniającymi i przeciwkorozyjnymi	Urządzenia z napędem hydrostatycznym pracujące w warunkach, w których występuje podwyższona temperatura pracy i może powstawać korozja na skutek zawilgocenia
L-HR ...		oleje klasy HL o poprawionych właściwościach lepkościowo-temperaturowych (wysoki wskaźnik lepkości)	
L-HM ...	HLP HLP-D	oleje klasy HL o poprawionych właściwościach przeciwzużyciowych	Urządzenia z napędem hydrostatycznym pracujące w warunkach, których występują wysokie temperatury pracy i wskutek obecności wody może zachodzić proces korozji, zaś konstrukcja lub warunki eksploatacji układu wymagają olejów o dobrych właściwościach przeciwzużyciowych; nie mogą jednak być stosowane do automatycznych skrzyń biegów i hydraulicznych układów hamulcowych
L-HV ...	HV	oleje klasy HM o poprawionych właściwościach lepkościowo-temperaturowych (wysoki wskaźnik lepkości)	

Czynnikiem roboczym zastosowanym w pierwszych hydrostatycznych układach napędowych, z uwagi na jej dostępność była woda. Po ponad dwustu latach od tej chwili, po okresie, w którym w układach hydraulicznych dominowały oleje mineralne, z uwagi przede wszystkim na ochronę środowiska coraz częściej możemy się spotkać z zastosowaniem ponownie wody do ww. układów – stawia to jednak wysokie wymagania wszystkim komponentom, co wiąże się również z ich wysoką ceną.

Wymieniając ciecze stosowane w układach hydraulicznych, należy zwrócić uwagę, że producenci maszyn z hydraulicznymi układami napędu coraz częściej dopuszczają do stosowania w układach hydrostatycznych również oleje silnikowe. Muszą one jednak posiadać pewne ogólne

właściwości jakościowe i lepkościowe podobne do cech olejów hydraulicznych.

Tabela 3. Hydrauliczne ciecze niepalne

Oznaczenie*)	Rodzaj cieczy	Zakres temperatury	Zawartość wody	Rodzaj uszczelnień
HFA	emulsja			
HFA-E	- emulsja oleju w wodzie			
HFA-M	- mikroemulsja z substancjami organicznymi	+5 do 55 °C	95...98 %	NBR**)
HFA-S	- roztwory wodne z solami lub rozpuszczone w wodzie estry organiczne		(> 80 %)	
HFB	emulsja-woda w oleju	+5 do 60°C	> 40 %	NBR**)
HFC	roztwory wodne glikoli	-20 do 60°C	35...55 %	NBR, KBS, EPDM, NR**)
HFD	ciecze bezwodne:			
HFDR	- estry fosforanowe			
HFDS	- chlorowane węglowodory	-20 do		
	- mieszaniny HFDR i HFDS	150°C	≤ 0,1 %	IIR, FPM, EPDM**)
HFDT	- poliglikol alkilenowy			
HFDU	- polioli estrowy			

*) wg ISO DIS 6071 lub DIN51 502

***) NBR – kauczuk nitrylowy, EPDM – kauczuk etylenowo-propylenowy, KBS – kauczuk butadienowo-styrenowy, FPM – kauczuk fluorowy, np. Viton, IIR – kauczuk butylowy, NR – kauczuk naturalny

Tabela 4. Ciecze hydrauliczne przyjazne dla środowiska

Oznaczenie	Rodzaj cieczy
HEES	syntetyczne ciecze hydrauliczne na bazie estrów
HEPG	syntetyczne ciecze hydrauliczne na bazie poliglikolu, (np. trójglicerydy lub na bazie poliglikolu etylenu - PEG)
HETG	ciecze hydrauliczne na bazie cieczy roślinnych, (np. na bazie oleju rzepakowego)

Dokonany na podstawie przewidywanych warunków pracy dobór czynnika roboczego powoduje daleko idące konsekwencje – m.in. określa maksymalne parametry pracy podzespołów hydraulicznych – tab.5. Należy, zatem przeprowadzić go na wstępnym etapie projektowania układu.

Tabela 5. Przykład wpływu rodzaju czynnika roboczego na nominalne ciśnienie pracy oraz maksymalną prędkość obrotową dla jednego typoszeregu pomp

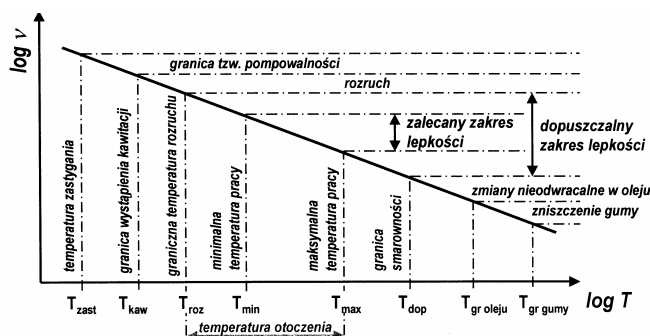
Rodzaj czynnika roboczego	Ciśnienie nomin, MPa	Wielkość pompy, cm ³ /obr						
		10	18	28	45	71	100	140
		Maksymalna prędkość obrotowa, obr/min						
Olej mineralny HLP (L-HM)	28,0	3600	3300	3000	2600	2200	2000	1800
HFA	14,0	2700	2450	2250	1950	1650	1500	1350
HFB	14,0	2900	2650	2400	2100	1760	1600	1450
HFC	17,5	2900	2650	2400	2100	1760	1600	1450
HFDR, HFDU- glikole	21,0	2900	2650	2400	2100	1760	1600	1450
HFDU - poliestry		3600	3300	3000	2600	2200	2000	1800

Szczególne wymagania stawiają przed czynnikiem roboczym układy hydrostatyczne stosowane w lotnictwie i innych dziedzinach tzw. techniki specjalnej (astronautyka, sprzęt wojskowy). W tym celu opracowano szereg cieczy specjalnych, wyróżniających się przede wszystkim ulepszonymi charakterystykami lepkościowo-temperaturowymi.

3. Charakterystyki lepkościowo-temperaturowe

Lepkość czynnika roboczego ma wieloraki wpływ na pracę układu hydraulicznego. Charakterystyka lepkościowo temperaturowa w połączeniu z wymaganiami dotyczącymi zastosowanych jednostek hydraulicznych określa jednoznacznie wielkości przedstawione na rys. 1. Należą do nich m.in.:

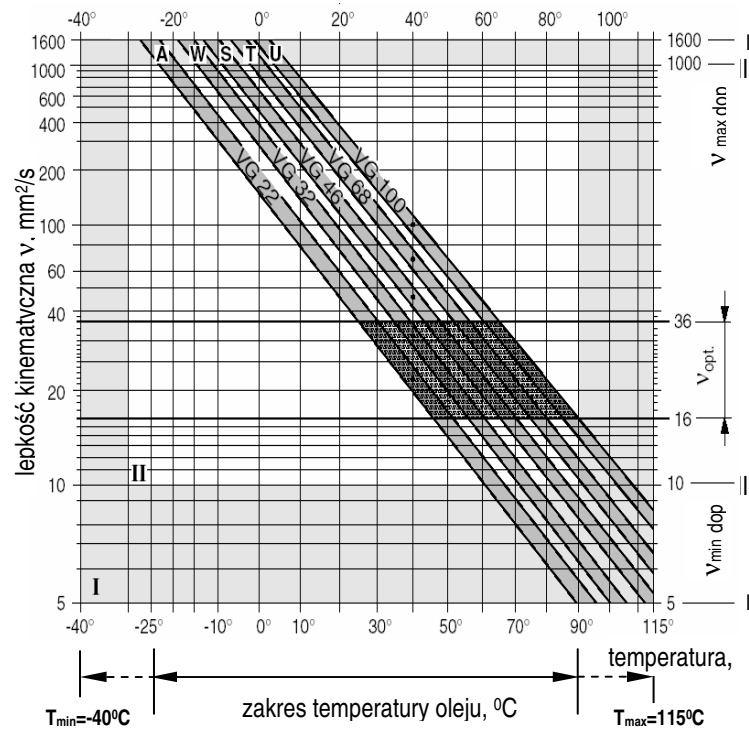
- ✓ temperatura minimalna uruchomienia (graniczna rozruchu) układu;
- ✓ zakres temperatury pracy, w której układ może rozwijać pełną moc;
- ✓ temperatura optymalna - najwyższej sprawności;



Rys. 1. Charakterystyka lepkościowo – temperaturowa: dobór czynnika roboczego

Fig. 1. Viscosity / temperature diagram: example of selection of hydraulic fluid

- ✓ temperatura maksymalna – granicznego smarowania, powyżej której następuje przyspieszone zużycie ścierne; nie może ona ponadto przekraczać temperatury pojawienia się nieodwracalnych zmian w oleju oraz temperatury zniszczenia uszczelnień (np. wykonanych kauczuku).



Rys.2. Dopuszczalny zakres temperatur pracy układu z olejami mineralnymi o wskaźniku lepkości WL=100 (wg. ISO 3448) dla zespołów hydrostatycznych:
 I - $v_{\min \text{ dop}} = 5 \text{ mm}^2/\text{s}$ ($T_{\max} = 115^\circ\text{C}$), $v_{\max \text{ dop}} = 1600 \text{ mm}^2/\text{s}$ ($T_{\min} = -40^\circ\text{C}$) oraz
 II - $v_{\min \text{ dop}} = 10 \text{ mm}^2/\text{s}$ ($T_{\max} = 90^\circ\text{C}$), $v_{\max \text{ dop}} = 1000 \text{ mm}^2/\text{s}$ ($T_{\min} = -25^\circ\text{C}$)

Fig.1. Permissible temperature range of hydraulic system operation for oil with viscosity index VI=100

W przypadku stosowania standardowych olejów mineralnych (o wskaźniku lepkości WL=100) zaleca się dobierać nominalną lepkość oleju zgodnie z charakterystyką przedstawioną na rys.2, gdzie: **A** = warunki arktyczne lub układy o wyjątkowo długich przewodach hydraulicznych, **W** = warunki zimowe w Europie Centralnej, **S** = warunki lata w Europie Centralnej lub układy w pomieszczeniach zamkniętych, **T** = warunki tropikalne lub rejony o wysokiej temperaturze, **U** = wyjątkowo wysokie temperatury (np. wewnątrz silników spalinowych).

Dobór czynnika roboczego powinien uwzględniać wymagania lepkościowe układu - narzucane zwykle przez pompy wyporowe. Konkretnie wielkości tych parametrów zależą od konstrukcji jednostki wyporowej i jej zaawansowania technicznego (producenta) - przykładowe wymagania zawiera tab.6.

Tabela 6. Wymagania lepkościowe wybranych pomp wyporowych

Typ pompy	Producent	Lepkość, mm ² /s			
		maksymalna	dopuszczalna	optymalna	minimalna
zębate	Rexroth	1000/2000	300	10	
	Casappa	750	100	12	
łopatkowe	Rexroth	800	160	16	
	Denison	860	108	30	10/18
wielotłokowe	Rexroth	1000/1600	100	16/36	5/10
	Danfoss	1000	110	9	6,4
	Denison	1600	160	30	10
	Sauer-S	1600	60	12	7

Rozszerzenie zakresu dopuszczalnych temperatur pracy wymaga zastosowania olejów o wyższym wskaźniku lepkości (obecnie dostępne są oleje o wskaźniku przekraczającym WL = 250). Pozwala to obniżyć temperaturę „pompowności” oraz podnieść temperaturę granicznej lepkości. Jest to szczególnie istotne w przypadku konieczności przystosowania urządzenia do pracy wg standardów tzw. eksploatacji całorocznej.

4. Podsumowanie

Problem doboru właściwego czynnika roboczego do konkretnego układu hydraulicznego jest bardzo istotnym zagadnieniem z punktu widzenia m.in. jego warunków i parametrów pracy oraz trwałości. Jest jednocześnie zadaniem złożonym, które należy podjąć z chwilą rozpoczęcia projektowania układu. Należy powrócić do niego przy każdej zmianie aplikacji istniejącego układu lub w przypadku analizy niesprawności układu.

Przedstawione uwagi dotyczące doboru czynnika roboczego do hydrostatycznych układów napędowych, z pewnością nie wyczerpują zagadnienia. Jednakże stanowią podstawową wiedzę, popartą wieloletnimi doświadczeniami z eksploatacji ww. układów.

LITERATURA

- [1] Stryczek S.: Napędy hydrostatyczne. WNT, Warszawa 1999
- [2] Materiały szkoleniowe i informacyjne firmy Bosch Rexroth
- [3] Materiały informacyjne firm Casappa, Danfoss, Denison, Sauer – Sundstrand

Problems of fluid selection for drive and control systems

Modern hydraulic systems are operating in diverse conditions and have to fulfill different demands. One of the more important factors of good hydraulic system operation is the right fluid because it transmits power, lubricates and cools the system. Demands from peculiar tasks cause developing a wide range of hydraulic fluids like:

- hydraulic fluids based on mineral oil;
- fire-resistant fluids;
- environmentally-friendly fluids;
- synthetic hydraulic fluids;
- special fluids;
- water and other.

All these fluids have their own limitations and recommendations. For this reason, the selecting of the right fluid is a complex task. Moreover, because they have a big influence on hydraulic units' behavior and permissible parameters of their operation like maximal pressure and maximal RPM – the selection had to be done as the first part of hydraulic system design process.

Another problem connected with the type of used fluid is corrosion of components – it determines the permissible type of alloy, rubber and other components used for system building.

The special attention ought to be paid on hydraulic fluid viscosity and their temperature characteristics because they with hydraulic component demands limits:

- the lowest temperature of cold starting;
- the lowest temperature of full power transmission;
- the temperature of maximal efficiency and;
- the maximal permissible temperature of operation.

These features are key for long life operation and possibility of durable works in demanded range of climatic conditions.

All these features have a big influence on long life, reliability, durability and operation cost of hydraulic system and machinery in all. For this reason, the selecting of the right fluid is one of the more important tasks during developing of new hydraulic system or during preparing existing system for new conditions.