

Adam BARTNICKI, Agnieszka KLIMEK

WYSOKOCIŚNIENIOWE HYDROSTATYCZNE UKŁADY NAPĘDOWE W BUDOWIE MASZYN I URZĄDZEŃ

Rosnące zapotrzebowanie na duże siły i momenty, między innymi w pracach montażowych powoduje, że coraz częściej czynności te wykonuje się z użyciem wysokociśnieniowych narzędzi hydraulicznych. W artykule przybliżono wybrane zastosowania wysokociśnieniowych narzędzi hydraulicznych. Omówiono również problematykę uzyskiwania wysokich ciśnień w układach hydraulicznych, w kontekście możliwości wykorzystania wzmacniacza ciśnienia hydraulicznego do zasilenia omówionych wcześniej hydraulicznych narzędzi i urządzeń.

WSTĘP

Dynamiczny rozwój hydrostatycznych układów napędowych, łatwość przenoszenia energii, możliwość uzyskania dużych sił i momentów, odporność na przeciążenia to tylko wybrane zalety hydrostatycznych układów napędowych, które powodują, że układy te coraz częściej wykorzystywane są w charakterze układów napędowych współczesnych maszyn i narzędzi.

Swoistą grupę narzędzi zasilanych z wykorzystaniem hydrostatycznych układów napędowych stanowią narzędzia wysokociśnieniowe. Możliwość uzyskania bardzo dużych sił i momentów obrotowych przy stosunkowo niewielkich gabarytach i masie narzędzia determinuje ich zastosowanie w wielu przypadkach.

1. HYDRAULICZNE URZĄDZENIA WYSOKOCIŚNIENIOWE

1.1. Przemysłowe narzędzia hydrauliczne

Wysokociśnieniowe narzędzia hydrauliczne znalazły szerokie zastosowanie w przemyśle. Liczne zalety tego typu urządzeń – niewielka masa i wymiary w stosunku do rozwijanych sił i momentów obrotowych, wysoka dokładność ustawienia wymaganych wartości, powtarzalność oraz łatwość użycia – sprawiają, że w chwili obecnej trudno jest wskazać gałąź przemysłu, w której nie wykorzystuje się wysokociśnieniowych narzędzi hydraulicznych.

Wśród wysokociśnieniowych narzędzi hydraulicznych wyróżnić można m.in.:

- klucze dynamometryczne;
- napinacze do śrub;
- przecinaki do nakrętek;
- podnośniki hydrauliczne.

Klucze dynamometryczne

Klucze dynamometryczne (rys.1) – nasadowe lub płaskie – zasilane są z agregatów hydraulicznych o ciśnieniu do 700 bar. Olej hydrauliczny doprowadzany jest do narzędzia dwoma przewodami (linia wysokiego i niskiego ciśnienia) zakończonymi szybkozłączami. Do każdego klucza dynamometrycznego dedykowana jest tablica przedstawiająca znamionowy moment obrotowy w zależności od zadanego ciśnienia. Płynna regulacja ciśnienia tłoczenia (realizowana z wykorzystaniem zaworu przelewowego) pozwala na precyzyjne ustawienie wartości momentu obrotowego. Powszechnie

dostępne na rynku klucze dynamometryczne charakteryzuje wartość maksymalnego momentu obrotowego rzędu $35\ 000 \div 50\ 000$ Nm. Parametry wybranych kluczy dynamometrycznych zebrano w tabeli 1.



Rys.1. Hydrauliczne klucze dynamometryczne firmy ENERPAC [14]

Tab. 1. Wybrane parametry hydraulicznych kluczy dynamometrycznych

Producent	Typ	Maksymalne ciśnienie pracy [bar]	Maksymalny moment obrotowy [Nm]
ATW Tools	30 ATWH 160-175	700	44593
SPX Flow	TWLC 30	700	39620
Enerpac	W35000PX	690	47454

Przedstawione cechy kluczy dynamometrycznych sprawiają, że znalazły one zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu.

W energetyce stosowane są m.in. w obsłudze turbin wiatrowych (rys.2) – do mocowania śrub łopat turbiny, jej podstawy oraz obsługi i konserwacji instalacji turbiny. Klucze dynamometryczne stosowane są również w elektrowniach atomowych do mocowania wszelkiego rodzaju osłon oraz wymienników ciepła z reaktorem. Dla przykładu w tabeli 2 przedstawiono wybrane wartości momentów obrotowych niezbędnych do montażu podzespołów elektrowni atomowej [12].

Tab. 2. Montaż podzespołów energetycznych – wymagany moment obrotowy

Nazwa podzespołu (elementu)	Wymagany moment obrotowy [Nm]
Pompa wody	6000+30000
Wysokociśnieniowe kolnierze rur	1000+7500
Wymiennik ciepła z reaktorem	7500+24000
Pokrywa turbiny	4000+20000
Turbina	6500+30000



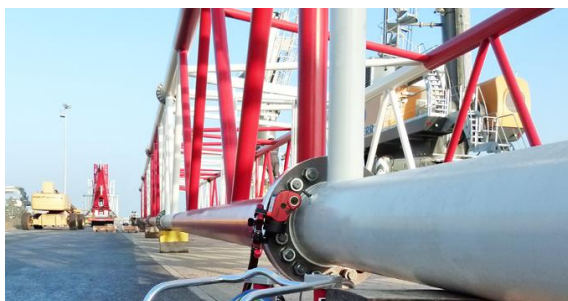
Rys.2. Montaż połączenia kotłierowego turbiny wiatrowej [3]

Hydrauliczne klucze dynamometryczne szerokie zastosowanie znalazły również w przemyśle górniczym – zarówno podziemnym jak i odkrywkowym. Ze względu na rozwijane siły oraz małe gabaryty stanowią narzędzie niezbędne w codziennej obsłudze maszyn i urządzeń górniczych (obsługa układów jezdnych koparek, spycharek, wiertnic, wozideł, obsługa ram kruszarek, młynów, tarcz do drażenia tuneli). Przykładowe wartości momentów obrotowych niezbędnych do konserwacji urządzeń górniczych przedstawiono w tabeli 3 [11].

Tab. 3. Konserwacja maszyn i urządzeń górniczych – wymagany moment obrotowy

Nazwa urządzenia	Wymagany moment obrotowy [Nm]
Młyn kulowy	3500÷9000
Kruszarka Nordberg	18000÷20000
Zamki łańcuchowe	2200÷5500

Hydrauliczne klucze dynamometryczne znajdują również zastosowanie przy wszelkiego rodzaju pracach montażowych wielkogabarytowych konstrukcji – w montażu rurociągów, żurawiach (rys.3), technice okrętowej itd.



Rys.3. Montaż wieży żurawia [15]

Hydrauliczne napinacze do śrub

Napinanie śrub jest metodą kontrolowanego dokręcania, które obciąża śrubę poprzez jej osiowe rozciąganie. W efekcie napinania śruba zachowuje się jak sprężyna – po napięciu śruba pozostaje pod napięciem tworząc na złączu wymaganą siłę. Metodę tą stosuje się dla kluczowych połączeń śrubowych ze względu na uzyskanie dużej szczelności połączenia.

Hydrauliczne napinacze do śrub są narzędziami pracującymi w zakresie najwyższych ciśnień – standardem jest tu 1500 bar, spotyka się również rozwiązania o maksymalnym ciśnieniu roboczym do 3000 bar.

Podobnie jak hydrauliczne klucze dynamometryczne napinacze hydrauliczne znajdują zastosowanie w energetyce (rys.4), górnictwie, petrochemii (konstrukcje platform wiertniczych), technice

okrętowej a także innych, odpowiedzialnych konstrukcjach wielkogabarytowych.

W sposobie hydraulicznego naprężenia śrub istotnym aspektem jest jednoczesne naprężanie śrub na całym obwodzie, co pozwala na uzyskanie najwyższych parametrów realizowanego złącza śrubowego, stąd też zastosowanie w procesie napinania śrub wymaga równoczesnego napinania śrub na całym obwodzie konstrukcji z wykorzystaniem wielu napinaczy hydraulicznych.



Rys.4. Montaż połączenia śrubowego turbiny wiatrowej z wykorzystaniem napinacza hydraulicznego [5]

Hydrauliczne przecinaki do nakrętek

Narzędzia tego typu (rys.5) stosowane są podczas konserwacji i remontów wszelkiego typu konstrukcji stalowych pracujących w ciężkich warunkach – w przemyśle stoczniowym, górnictwie, petrochemii, kolejnictwie. Hydrauliczne przecinaki do nakrętek szerokie zastosowanie znajdują dzięki niewielkim rozmiarom umożliwiającym zastosowanie ich w ograniczonej przestrzeni. Usunięcie skorodowanej lub uszkodzonej nakrętki możliwe jest dzięki wykorzystaniu kątovej głowicy tnącej zasilanej energią oleju hydraulicznego o ciśnieniu do 700 bar.



Rys.5. Usuwanie skorodowanej nakrętki z wykorzystaniem przecinaka hydraulicznego SPX [8]

Dźwigniki hydrauliczne

Dźwigniki hydrauliczne (rys.6) znajdują zastosowanie wszędzie tam gdzie wymagane są bardzo duże siły udźwigu przy niewielkich rozmiarach dźwignika. Dźwignik hydrauliczny zasilany energią oleju hydraulicznego o ciśnieniu 700 bar zdolny jest podnieść masę 200 ton na wysokość 60 cm [6]. Właściwość ta wykorzystywana jest przede wszystkim podczas obsługi wielkogabarytowych maszyn (np. wozidła sztywnoramowe) oraz precyzyjnego ustalania położenia elementów łączonych (rurociągi).



Rys.6. Zastosowanie podnośnika hydraulicznego Pow'R-LOCK firmy ENERPAC [7]

Szczególnym rozwiązaniem dźwignika hydraulicznego są rozpieraki hydrauliczne (rys.7) o niewielkim skoku (liczonym w milimetrach) wykorzystywane do wstępnego podnoszenia elementów których usytuowanie uniemożliwia zastosowanie innych dźwigników.



Rys.7. Rozpierak hydrauliczny firmy ENERPAC [6]

1.2. Prasy hydrauliczne

Zalety pras hydraulicznych (m.in.: możliwość łatwej regulacji skoku, prostota procesu automatyzacji, duża dokładność realizowanego procesu, możliwość uzyskania bardzo dużych nacisków przy niewielkich wymiarach gabarytowych) sprawiają, że tego typu maszyny znajdują coraz szersze zastosowanie różnych gałęziach przemysłu. Maszyny te najczęściej spotykane są w przemyśle hutniczym, maszynowym, metalowym, motoryzacyjnym czy lotniczym. W przemyśle hutniczym prasy hydrauliczne wykorzystywane są przy kuciu, odlewaniu pod ciśnieniem, wyciskaniu rur i prętów. W przemyśle motoryzacyjnym prasy znajdują zastosowanie między innymi przy tłoczeniu ram podwozi, bębnow hamulcowych czy blach karoseryjnych.



Rys.8. Warsztatowe prasy hydrauliczne firmy ENERPAC [3]

Ciekawą grupę pras hydraulicznych stanowią klamry C-kształtne (rys.9), które umożliwiają ustawienie obrabianego elementu zarówno w pionie jak i poziomie. Tego typu prasy hydrauliczne zasilane są energią oleju hydraulicznego o ciśnieniu 700 bar, zapewniając nacisk rzędu 5÷30 ton, w zależności od dobranej siłownika hydraulicznego.



Rys.9. Klamra C-kształtna firmy SPX Flow [17]

Klamry C-kształtne znajdują również zastosowanie w ustalaniu położenia względem siebie mocowanych elementów np. rurociągów (rys.10).



Rys. 10. Zastosowanie klamry C-kształtnej do ustalenia położenia elementów łączonych [4]

1.3. Hydrauliczne obudowy ścianowe

Zmechanizowane obudowy hydrauliczne (rys.11) są podstawowym elementem wykorzystywanym w procesach wydobywczych opartych na ścianowych systemach eksploatacji. Obudowa zmechanizowana ma za zadanie zapewnienie bezwypadkowego wybiegania kopaliny poprzez zabezpieczenie wyrobiska przed osypywaniem stropu. Obudowa zmechanizowana składa się z sekcji osłonowych. W obudowach hydraulicznych rolę stojaka pełni siłownik hydrauliczny, zasilany energią oleju hydraulicznego o ciśnieniu roboczym rzędu 400 bar. Ciśnienie zasilania decyduje o kluczowym dla obudów ścianowych parametrze – podporności roboczej. Dane techniczne przykładowej sekcji hydraulicznej obudowy ścianowej przedstawiono w tabeli 4. Dzięki zastosowaniu hydraulicznych elementów wykonawczych istnieje możliwość regulacji wysokości sekcji, w zależności od typu obudowy oraz producenta spotyka się obudowy o wysokościach od 1 do 8 m.

Tab. 4. Wybrane dane techniczne obudowy ścianowej zmechanizowanej BW 24/46 POz

Ciśnienie zasilania [bar]	250
Ciśnienie robocze stojaków [bar]	380
Podporność wstępna (dla 250 bar) [kN]	2070
Podporność robocza (dla 430 bar) [kN]	3050
Liczba stojaków w sekcji	2
Minimalna wysokość [m]	2,4
Maksymalna wysokość [m]	4,6
Masa sekcji [kg]	21425



Rys.11. Obudowa zmechanizowana firmy Becker Warkop [10]

1.4. Hydrauliczne narzędzia ratownicze

Hydrauliczne narzędzia ratownicze są specyficzną grupą narzędzi przemysłowych, stworzoną na potrzeby ratownictwa technicznego. Wykorzystywane są przez służby ratunkowe (w szczególności przez Straż Pożarną) podczas akcji ratunkowych w wypadkach komunikacyjnych lub katastrofach budowlanych. Narzędzia ratownicze stanowią przede wszystkim narzędzia dwustronnego działania – zarówno ruch roboczy jak i powrotny wywołany jest działaniem oleju hydraulicznego. Ze względu na konieczność rozwijania dużych sił użytkowych oraz zachowania niewielkich gabarytów (umożliwiających posługiwanie się narzędziami często jedną ręką) narzędzia ratownicze pracują z ciśnieniami roboczymi rzędu 600-700 bar.

Wśród ratowniczych narzędzi hydraulicznych wyróżnić można:

- rozpieracze hydrauliczne – wykorzystywane do rozpierania, podnoszenia lub ściągania elementów w rozbitych pojazdach samochodowych; szczególną grupę rozpieraczy stanowią rozpieracze kolumnowe (rys.12), które mogą posiadać jedno lub dwa tłoczyska (również wysuwane teleskopowo) co pozwala na osiągnięcie znacznej rozpiętości roboczej przy niewielkich gabarytach rozpieracza;
- nożyce (rys.13) – przeznaczone do cięcia prętów, krat, słupków karoserii samochodowych, stalowych profili budowlanych; kształt ostroza nożyc (półkolisty, półkolisty wydłużony, trójkątny) jednoznacznie determinuje ich przeznaczenie;
- nożyco-rozpieracze – uniwersalne narzędzie ratownicze, łączące w sobie zalety ww. grup, rozwijające jednak mniejsze siły niż narzędzia wyspecjalizowane.



Rys.12. Zastosowanie rozpieracza kolumnowego [2]



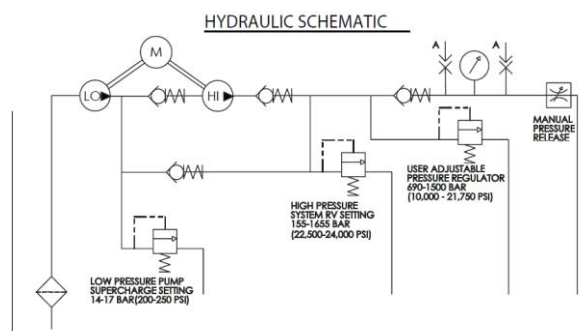
Rys.13. Zastosowanie nożyc hydraulicznych [13]

2. METODY UZYSKIWANIA WYSOKICH CIŚNIEŃ W HYDROSTATYCZNYCH UKŁADACH NAPĘDOWYCH

W hydrostatycznych układach napędowych wyróżnić można dwa podstawowe sposoby uzyskiwania wysokich ciśnień: zastosowanie wysokociśnieniowej pompy hydraulicznej lub zastosowanie wzmacniacza ciśnienia hydraulicznego. Wybrany przez użytkownika sposób uzyskania wysokiego ciśnienia w układzie determinuje budowę układu hydraulicznego zasilającego odbiornik (rys.14). W przypadku zastosowania wysokociśnieniowej pompy hydraulicznej wszystkie elementy hydrauliczne znajdujące się w linii tłocznej (przewody, zawory, odbiornik) muszą być przystosowane do pracy pod wysokim ciśnieniem, co znacznie zwiększa koszt całej instalacji oraz zwiększa ryzyko awarii. Zastosowanie wzmacniacza hydraulicznego sprawia, że jedynym elementem pracującym pod wysokim ciśnieniem jest odbiornik co zmniejsza koszty budowy układu hydraulicznego.

2.1. Wysokociśnieniowe zasilacze hydrauliczne

Szerokie spektrum wykorzystania wysokociśnieniowych narzędzi hydraulicznych powoduje, że na rynku znaleźć można coraz więcej firm, które oferują wysokociśnieniowe agregaty hydrauliczne. Do najważniejszych podzespołów takiego zasilacza zaliczyć należy źródło zasilania, pompę hydrauliczną oraz zawór (ciśnieniowy lub sterujący natężeniem przepływu) pozwalający użytkownikowi ustalić wymagane ciśnienie pracy. Przykładową budowę agregatu hydraulicznego zasilanego silnikiem elektrycznym przedstawiono na rysunku 15. Na rynku dostępne są agregaty zasilane ręcznie, mechanicznie (silnikami spalinowymi) lub elektrycznie (rys.16), pozwala to na dobór źródła zasilania w zależności od potrzeb użytkownika. Do wytworzenia wysokich ciśnień wykorzystuje się najczęściej pompy tłokowe promieniowe.



Rys.15. Schemat układu hydraulicznego agregatu SPX PE8 [1]



Rys.16. Agregat hydrauliczny ENERPAC TQ-700E [9]

W praktyce producenci wysokociśnieniowych narzędzi hydraulicznych oferują własne, dedykowane dla tych narzędzi agregaty hydrauliczne. Parametry wybranych wysokociśnieniowych zasilaczy hydraulicznych zebrano w tabeli 5.

Tab. 5. Dane techniczne wybranych zasilaczy hydraulicznych

Model	Ciśnienie robocze [bar]	Źródło zasilania/moc [kW]	Wydajność nominalna [dm ³ /min]	Masa [kg]
Enerpac TQ-700E	700	Silnik elektryczny/0,75	0,5	30
SPX PE8	1500	Silnik elektryczny/0,37	0,13	20,6
Enerpac HPT-1500	1500	Ręczne	0,61 (na skok)	9,0
ATW HNSP06BZT20-30	3000	Silnik elektryczny/1,1	0.032	24

2.2. Wzmacniacze ciśnienia hydraulicznego

Zasada działania wzmacniacza hydraulicznego jest analogiczna do zasady działania pompy tłokowej (rys.17). W tym przypadku olej hydrauliczny działając na znacznie większą powierzchnię tłoka generuje siłę, która poprzez tłoczysko generuje wysokie ciśnienie. Kolorem pomarańczowym oznaczono ciśnienie wejściowe, kolorem czerwonym oznaczono natomiast ciśnienie wzmacnione.

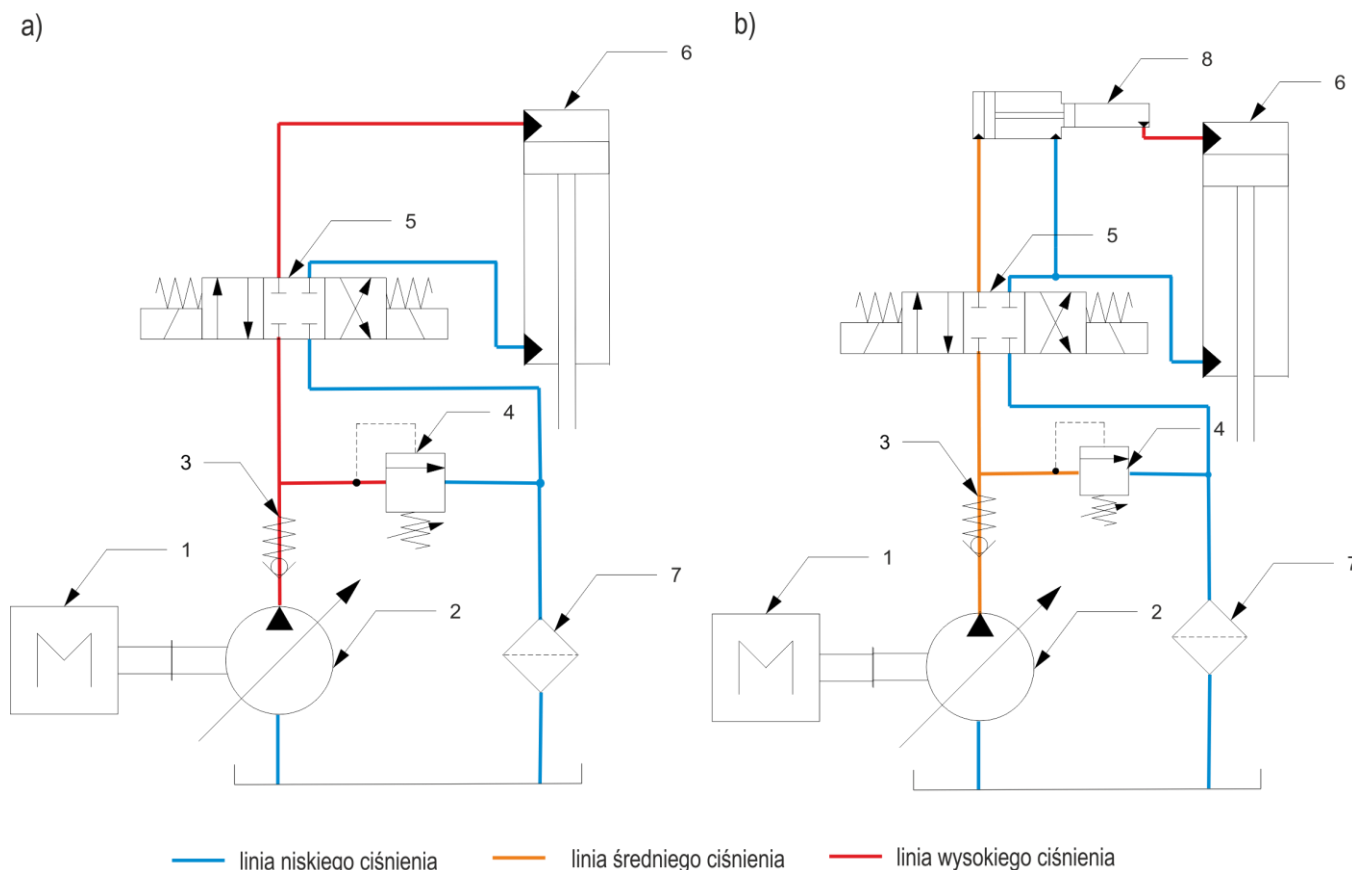


Rys.17. Zasada działania wzmacniacza ciśnienia

Schemat budowy wzmacniacza ciśnienia przedstawiono na rysunku 18. Olej hydrauliczny doprowadzany jest do przyłącza wejściowego P, skąd poprzez zawory odcinające CV1, CV2 oraz POCV dopływa do przyłącza wyjściowego HP. W momencie osiągnięcia w linii wysokiego ciśnienia wartości ciśnienia wejściowego zawory są zamykane. Ciśnienie wzmacnienia uzyskiwane jest dzięki oscylacyjnemu ruchowi tłoczka. Ruch ten odbywa się, aż do momentu osiągnięcia ciśnienia maksymalnego. W przypadku spadku ciśnienia w linii wysokiego ciśnienia ruch tłoczka jest wznowiany. Doprowadzenie oleju hydraulicznego do przyłącza zlewowego T powoduje otwarcie sterowanego zaworu zwrotnego i zmniejszenie ciśnienia w linii wysokociśnieniowej.

Podstawowym parametrem decydującym o wyborze wzmacniacza hydraulicznego do konkretnych zastosowań jest współczynnik wzmacnienia opisany zależnością:

$$p_w = i \cdot \Delta p = i(p_p - p_z) \quad (1)$$



Rys. 14. Wysokociśnieniowe hydrostatyczne układy napędowe: a) z wysokociśnieniową pompą hydrauliczną, b) ze wzmacniaczem ciśnienia hydraulicznego: 1 – silnik elektryczny, 2 – pompa hydrauliczna, 3 – zawór zwrotny, 4 – zawór przelewowy, 5 – rozdzielacz hydrauliczny, 6 – siłownik hydrauliczny, 7 – filtr, 8 – wzmacniacz hydrauliczny

gdzie:

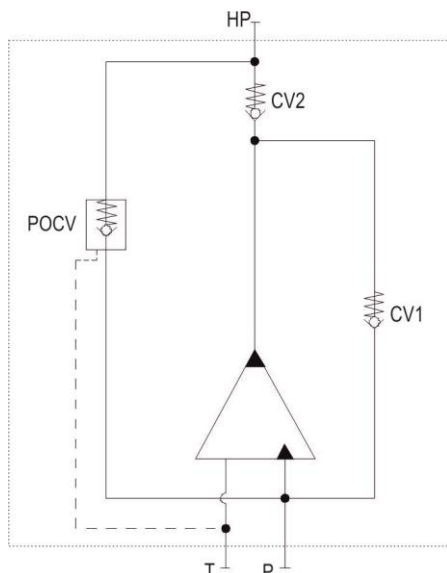
p_w – ciśnienie wzmocnienia;

i – współczynnik wzmocnienia deklarowany w karcie katalogowej produktu;

Δp – różnica ciśnień pomiędzy przewodem tłocznym a linią zlewową;

p_p – ciśnienie w przewodzie tłocznym;

p_z – ciśnienie w linii zlewowej.



Rys.18. Schemat hydrauliczny wzmacniacza ciśnienia hydraulicznego

Wykorzystanie wzmacniacza ciśnienia hydraulicznego (rys.19) pozwala na uzyskanie ciśnień maksymalnych o wartości do 5000 bar. Parametry wybranych wzmacniaczy ciśnienia hydraulicznego przedstawiono w tabeli 6.



Rys.19. Wzmacniacz ciśnienia hydraulicznego HC6H [16]

Tab. 6. Dane techniczne wybranych wzmacniaczy ciśnienia hydraulicznego

Model	Współczynnik wzmocnienia	Maksymalne ciśnienie wejściowe [bar]	Maksymalne ciśnienie wzmocnienia [bar]	Natężenie przepływu przy maksymalnym wzmocnieniu [dm ³ /min]	Masa [kg]
miniBOOSTER					
HC1-9	5	207	500	0,4	0,75
HC2D2	12	207	800	0,6	4,15
HC8	20	207	2000	0,3	4,5
HC6H	25	207	5000	1,0	11
Scanwill					
MP-L	2	200	400	2	9
MP-T	5	200	800	0,3	1,3
MP-2000	16	125	2000	0,1	2,7
MPL-4000	20	200	4000	2	9
Parker					
SD 500	4	125	500	brak danych	3

PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule wybrane zastosowanie wysokociśnieniowych narzędzi hydraulicznych wskazują, że tego typu rozwiązania w wielu przypadkach nie mogą być zastąpione alternatywnymi technologiami.

Zastąpienie wysokociśnieniowych generatorów energii hydraulicznej (pomp hydraulicznych), których stosowanie wiąże się z wysokimi kosztami zarówno samych jednostek głównych jak i poszczególnych elementów układów hydraulicznych, wzmacniaczami hydraulicznymi wydają się zasadnymi chociażby z ekonomicznego punktu widzenia.

Niemniej jednak pulsacyjny charakter pracy wzmacniaczy hydraulicznych może być przyczyną ograniczenia ich zastosowania do napędu wysokociśnieniowych urządzeń i narzędzi hydraulicznych. Zbadanie właściwości wzmacniaczy hydraulicznych i wyznaczenie ich charakterystyk roboczych pozwoli na zdefiniowanie zakresu ich zastosowań w aspekcie wyeliminowania pomp i elementów wysokociśnieniowych hydrostatycznych układów napędowych.

Badania takie prowadzone są obecnie w Instytucie Budowy Maszyn Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej.

BIBLIOGRAFIA

- Instrukcja obsługi: SPX Bolting System 1500 Series Electric Hydraulic Pump
- Katalog Weber Rescue Systems: Hydrauliczne narzędzia ratownicze 2017
- Karta katalogowa: Bench and Workshop Presses, Enerpac
- Karta katalogowa: A-series, C-clamp and Arbor Presses, Enerpac
- Karta katalogowa: GT-series hydraulic bolt tensioners, Enerpac
- Karta katalogowa: Hydraulic Vertical Lifting Wedge, Enerpac
- Karta katalogowa: PL-Series, POW'R-LOCK Portable Lift System, Enerpac
- Karta katalogowa: SPX Hydraulic Nut Splitters, SPX Flow
- Karta katalogowa: TQ-series Electric Wrench Pumps, Enerpac
- <http://www.becker-mining.com.pl/obudowy.html>
- <http://blog.maxprocorp.com/industrial-bolting-tool-applications-for-the-mining-industry>
- <http://blog.maxprocorp.com/industrial-bolting-tool-applications-for-the-power-generation-industry>
- https://rescue.lukas.com/cutters_s511.html
- <https://www.enerpac.com/en/news/steel-hydraulic-torque-wrenches> dostęp: 26.02.2018r.
- <http://www.ith.com/en/tension-and-torque-tools/hydraulic-torque-wrenches/hydraulic-torque-wrench-type-cx.php>
- <https://www.minibooster.com/products/boosters-oil-2/hc6h.html>
- <http://www.spxflow.com/en/power-team/pd-c-clamps-5-25t/>

High pressure hydrostatic driving systems in machine's construction

This paper aims at presenting selected high pressure hydraulic tools and machines and describing the ways of receiving high pressure in hydrostatic drive systems.

Autorzy:

plk dr inż. **Adam BARTNICKI** – Wojskowa Akademia Techniczna, adam.bartnicki@wat.edu.pl

por. mgr inż. **Agnieszka KLIMEK** – Wojskowa Akademia Techniczna, agnieszka.klimek@wat.edu.pl

JEL: L64 DOI: 10.24136/atest.2018.090

Data zgłoszenia: 2018.05.22 Data akceptacji: 2018.06.15