

## Bogdan ZASTEMPOWSKI

e-mail: zastempowski@interia.pl

Zakład Inżynierii Produkcji, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

## Sprawność hydrostatycznych układów napędowych o złożonej strukturze

## Wprowadzenie

Najkorzystniejszym napędem płynowym dla przemysłu spożywczego jest napęd hydrostatyczny, w którym cieczą roboczą jest woda. Czysta woda jest idealnym medium spełniającym warunki higieniczno-sanitarne.

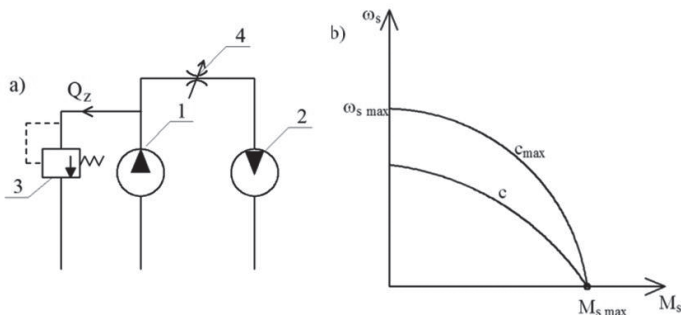
Napęd hydrostatyczny jest szeroko stosowany w budowie maszyn i urządzeń z uwagi na szereg zalet. Jedną z zalet napędu hydrostatycznego jest łatwość przenoszenia energii hydraulicznej na odległość. Jest to szczególnie ważne, gdy zasilanych ma być wiele odbiorników energii.

Za pomocą układu hydraulicznego łatwo jest zrealizować jednoczesny napęd wielu silników. Takie złożone struktury hydrauliczne są bardzo często stosowane.

Celem pracy jest ocena sprawności hydrostatycznych układów napędowych jako najważniejszej miary opisującej własności eksploatacyjne.

## Sprawność układów z jednym silnikiem

Na rys. 1a przedstawiono układ sterowania prędkością jednego silnika – 2. Pompa – 1 o stałej wydajności jest zablokowana zaworem przelewowym – 3, który utrzymuje stałe ciśnienie zasilania. Zmianę prędkości silnika uzyskuje się przez zmianę nastawy zaworu dławiącego – 4.



Rys. 1. Układ sterowania dławieniowego prędkością jednego silnika [1-3]: a) schemat układu, b) charakterystyka napędowa układu; 1 – pompa, 2 – silnik, 3 – zawór przelewowy, 4 – zawór dławiaczy

Charakterystyka napędowa układu dławieniowego (Rys. 1b) jest podatna. Prędkość kątowa silnika  $\omega_s$  zmienia się w funkcji obciążenia układu  $M_s$  [1-3]:

$$\omega_s = \frac{c \sqrt{p_p - \frac{M_s}{q_s}}}{q_s} \quad (1)$$

gdzie:

- $\omega_s$  – prędkość kątowa silnika,
- $q_s$  – chłonność jednostkowa silnika,
- $p_p$  – ciśnienie zasilania ustalone przez zawór przelewowy,
- $c$  – nastawa zaworu dławiącego.

Nastawa jest proporcjonalna do pola powierzchni przepływowej przez zawór i zależy od jego konstrukcji i gęstości cieczy [1, 2].

Maksymalna prędkość silnika  $\omega_{s \max}$  i maksymalne obciążenie układu  $M_{s \max}$  (Rys. 1b) wynoszą:

$$\omega_{s \max} = \frac{c_{\max} \sqrt{p_p}}{q_s}, \quad M_{s \max} = p_p q_s \quad (2)$$

gdzie:

 $c_{\max}$  – maksymalna nastawa zaworu dławiącego

Sprawność układu hydraulicznego (Rys. 1a) opisuje zależność:

$$\eta = \frac{M_s \omega_s}{M_p \omega_p} \quad (3)$$

która po rozwinięciu ma postać:

$$\eta = \frac{Q_p p_p Q_s p_s M_s \omega_s}{M_p \omega_p Q_p p_p Q_s p_s} \quad (4)$$

gdzie:

- $\eta$  – sprawność układu,
- $M_p$  – moment na wale pompy,
- $\omega_p$  – prędkość kątowa pompy,
- $M_s$  – moment na wale silnika,
- $\omega_s$  – prędkość kątowa silnika,
- $Q_p$  – natężenie przepływu na wyjściu z pompy,
- $p_p$  – ciśnienie na wyjściu z pompy,
- $Q_s$  – natężenie przepływu na wejściu do silnika (chłonność silnika),
- $p_s$  – ciśnienie na wejściu do silnika.

Poszczególne ilorazy opisują szczegółowe sprawności układu:

$$\eta = \eta_p \eta_i \eta_s \quad (5)$$

gdzie:

- $\eta_p$  – sprawność pompy,
- $\eta_i$  – sprawność instalacji hydraulicznej,
- $\eta_s$  – sprawność silnika.

Sprawność instalacji tego układu przedstawić można w postaci [4]:

$$\eta_i = \left(1 - \frac{Q_z}{Q_p}\right) \left(1 - \frac{\Delta p_d}{p_p} - \frac{\Delta p}{p_p}\right) \quad (6)$$

gdzie:

- $Q_z$  – natężenie przepływu cieczy przez zawór przelewowy,
- $\Delta p_d$  – spadek ciśnienia na zaworze dławiącym,
- $\Delta p$  – spadek ciśnienia na odcinku od pompy do silnika z pominięciem spadku ciśnienia na zaworze dławiącym.

Sprawność pompy i silnika określa się na podstawie danych producentów zawartych w katalogach. Wyznaczenie sprawności układu (5) wymaga określenia sprawności instalacji hydraulicznej (6).

W rzeczywistych układach sterowania dławieniowego strata ciśnienia  $\Delta p_d$  związana z przepływem przez zawór dławiaczy jest wielokrotnie wyższa od straty ciśnienia  $\Delta p$  przez pozostałą część instalacji. Przyjmując  $\Delta p = 0$  w równaniu (6) wprowadza się pojęcie sprawności strukturalnej  $\eta_{str}$  [1, 5]:

$$\eta_{str} = \left(1 - \frac{Q_z}{Q_p}\right) \left(1 - \frac{\Delta p_d}{p_p}\right) \quad (7)$$

Sprawność strukturalna jest wygodnym pojęciem umożliwiającym porównywanie, pod względem energetycznym, układów o różnych strukturach. Po podstawieniu równań (1, 2), opisujących charakterystykę napędową układu, do zależności (7) otrzymano sprawność strukturalną w postaci funkcji współczynników  $\alpha$  i  $\gamma$  [6]:

$$\eta_{str} = \gamma \sqrt{1 - \alpha} \quad (8)$$

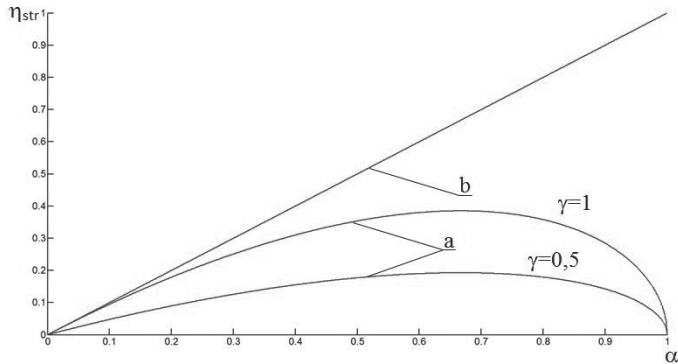
gdzie:

- $\gamma$  – parametr opisujący nastawę zaworu dławiącego  $\gamma = c/c_{\max}$ ,
- $\alpha$  – parametr opisujący obciążenie układu  $\alpha = M_s/M_{s \max}$ .

Sprawność układu opisaną zależnością (8) przedstawiają krzywe *a* na rys. 2. Układ ten charakteryzuje się bardzo małą sprawnością. Maksymalną sprawność osiąga układ przy  $\alpha = 2/3$ . Średnia sprawność w przedziale  $\alpha(0,1)$  dla nastawy  $\gamma = 0,5$  wynosi zaledwie 0,133.

Zdecydowaną poprawę sprawności można uzyskać zastępując prosty układ zasilania, jakim jest pompa o stałej wydajności, pompą o zmiennej wydajności z regulatorem stałego ciśnienia. Przy takiej strukturze zasilania nie ma strat związanych z bezużytecznym przepływem cieczy przez zawór przelewowy do zbiornika ( $Q_z = 0$ ) i zależność (8) upraszcza się do równania linii prostej *b* (Rys. 2):

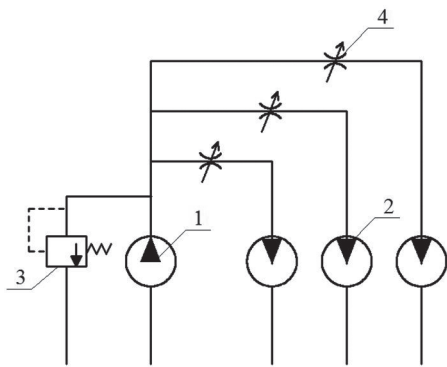
$$\eta_{str} = \alpha \tag{9}$$



Rys. 2 Sprawność strukturalna układów z zaworem dławiącym na dopływie przy sterowaniu prędkością jednego silnika [6]: a) pompa o stałej wydajności, b) pompa o zmiennej wydajności z regulatorem stałego ciśnienia

### Sprawność układów z wieloma silnikami

Na rys. 3 przedstawiono układ sterowania prędkością wielu silników – 2, które są zasilane z jednej pompy – 1 o stałej wydajności, zablokowanej zaworem przelewowym – 3. Zmianę prędkości poszczególnych silników uzyskuje się przez zmianę nastawy odpowiedniego zaworu dławiącego – 4.



Rys. 3. Układ sterowania dławieniowego prędkością wielu silników [1, 2]: 1 – pompa, 2 – silniki, 3 – zawór przelewowy, 4 – zawory dławiące

Sprawność strukturalna układu hydraulicznego z wieloma silnikami opisuje zależność:

$$\eta_{str} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{si} \omega_{si}}{M_p \omega_p} \tag{10}$$

gdzie:

- $M_{si}$  – moment *i*-tego silnika,
- $\omega_{si}$  – prędkość kątowa *i*-tego silnika,
- $n$  – liczba silników w układzie.

W ogólnym przypadku silniki hydrauliczne mogą mieć różne sprawności. Dlatego dla celów dalszej analizy wprowadzono pojęcie średniej sprawności  $\eta_{s, sr}$  silników:

$$\eta_{s, sr} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{si}}{n} \tag{11}$$

gdzie:

$\eta_{si}$  – sprawność *i*-tego silnika.

W wyniku przeprowadzonej analizy sprawność strukturalną układu z rys. 3 można przedstawić w postaci funkcji współczynników  $\alpha$ ,  $\gamma$  oraz  $\delta$ :

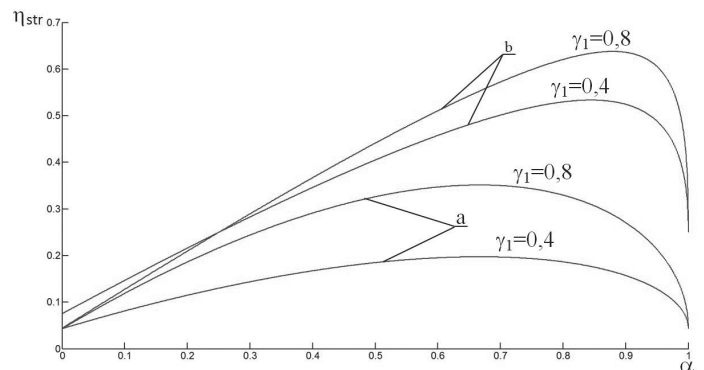
$$\eta_{str} = \sum_{i=1}^n \gamma_i \sqrt{1 - \alpha_i} \alpha_i \delta_i \tag{12}$$

$$\gamma_i = \frac{c_i}{c_{max}}, \quad \alpha_i = \frac{M_{si}}{M_{si, max}}, \quad \delta_i = \frac{\eta_{si}}{\eta_{s, sr}}, \quad c_{max} = \sum_{i=1}^n c_i \tag{13}$$

gdzie:

$c_i$  – nastawa zaworu dławiącego dla *i*-tego silnika,

$\eta_{si}$  – sprawność *i*-tego silnika.



Rys. 4. Sprawność strukturalna układów z wieloma silnikami: a) pompa o stałej wydajności, b) pompa o zmiennej wydajności z regulatorem stałego ciśnienia

Przy zasilaniu układu pompą o zmiennej wydajności z regulatorem stałego ciśnienia sprawność strukturalną opisuje zależność:

$$\eta_{str} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i \sqrt{1 - \alpha_i} \alpha_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i \sqrt{1 - \alpha_i}} \tag{14}$$

Na rys. 4 przedstawiono sprawności strukturalne układów z trzema silnikami (Rys. 3) dla obu struktur zasilania dla warunków:  $\gamma_2 = \gamma_3 = 0,1$  oraz  $\alpha_2 = \alpha_3 = 0,25$ .

### Podsumowanie

Sterowanie dławieniowe umożliwia jednoczesny napęd wielu silników z jednej pompy. Taka jednostka zasilająca wytwarza znaczne straty energetyczne związane z bezużytecznym przepływem cieczy przez zawór przelewowy do zbiornika.

Poprawę sprawności układu uzyskuje się przez zastosowanie do zasilania układu pompy o zmiennej wydajności z regulatorem stałego ciśnienia. W pracy przedstawiono zależności na sprawność strukturalną dla dowolnie złożonych układów.

### LITERATURA

- [1] A. Osiecki: Hydrostatyczny napęd maszyn. WNT, Warszawa 1998.
- [2] S. Stryczek: Napęd hydrostatyczny. Układy. WNT, Warszawa 1992.
- [3] B. Zastempowski, J. Musiał, M. Styp-Rekowski: Układy oraz elementy hydrauliczne i pneumatyczne w budowie maszyn. Wyd. UTP. Bydgoszcz 2008.
- [4] B. Zastempowski: Inż. Ap. Chem. 49, nr 5, 140 (2010).
- [5] B. Zastempowski: Inż. Ap. Chem. 49, nr 5, 138 (2010).
- [6] B. Zastempowski: Ocena sprawności układów sterowania dławieniowego prędkością silników hydraulicznych. Konferencja nt. Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne. Wrocław 2005.