

Bogdan ZASTEMPOWSKI

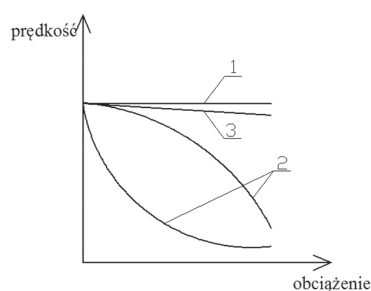
e-mail: zastempowski@interia.pl

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

Sprawność strukturalna jako miara efektywności energetycznej układów hydraulicznych

Wprowadzenie

Użytkownicy napędów mają różne potrzeby. Jedni poszukują jednostek napędowych o sztywnych charakterystykach napędowych (Rys. 1) inni oczekują, aby charakterystyka napędowa była podatna. Napęd hydrostatyczny jest pod tym względem bardzo uniwersalny, umożliwia poprzez odpowiednie zaprojektowanie układu, uzyskanie dowolnej charakterystyki napędowej (sztywnej lub podatnej).



Rys. 1 Charakterystyki napędowe [1, 2]: 1 – sztywna charakterystyka, 2 – podatna charakterystyka, 3 – quasi-sztywna charakterystyka

Znane są dwie grupy sterowań prędkością silników hydraulicznych: – sterowanie objętościowe (przekładnie hydrostatyczne), zmianę prędkości uzyskuje się przez odpowiednią nastawę wydajności pompy lub chłonności silnika, – sterowanie dławieniowe, zmianę uzyskuje się przez nastawę elementu dławiącego, a nadmiar cieczy roboczej przepływa do zbiornika.

Charakterystyka napędowa przekładni hydrostatycznej nieznacznie odbiega od sztywnej charakterystyki napędowej, jest charakterystyką *quasi-sztywną* (Rys. 1). Wynika to ze strat objętościowych (przecieków wewnętrznych) w pompie i silniku hydraulicznym, Straty te są proporcjonalne do ciśnienia panującego w układzie, czyli tym samym do obciążenia napędu. Podatną charakterystykę uzyskuje się stosując przekładnie hydrostatyczne specjalnej konstrukcji: przekładnia hydrostatyczna z regulatorem stałej mocy na pompie [1, 2] lub przekładnia hydrostatyczna z regulatorem stałego ciśnienia na silniku [3].

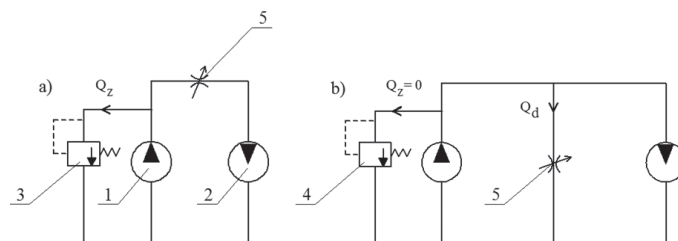
W układach sterowania dławieniowego sztywną charakterystykę napędową uzyskuje się, gdy elementem dławiącym jest regulator przepływu. Otrzymanie podatnej charakterystyki wymaga stosowania zaworów dławiących.

Układy sterowania dławieniowego w porównaniu z układami o sterowaniu objętościowym charakteryzują się:

- zdecydowanie mniejszą sprawnością (większymi stratami energetycznymi),
- niższymi kosztami układu,
- możliwością uzyskania małych stabilnych prędkości (przy stosowaniu regulatorów przepływu),
- możliwością jednoczesnego napędu kilku silników z jednej pompy.

Sprawność strukturalna układów dławieniowych

Element dławiący może być umieszczony w układzie szeregowo (Rys. 2a) lub równolegle (na odgałęzieniu) (Rys. 2b). Przy usytuowaniu szeregowym element dławiący może być zainstalowany na dopływie do



Rys. 2. Układy sterowania dławieniowego [1, 2]: a) szeregowy, b) równoległy, 1 – pompa, 2 – silnik, 3 – zawór przelewowy, 4 – zawór bezpieczeństwa, 5 – zawór dławiący

silnika, jak zaznaczono to na rys. 2a lub na odpływie z silnika. Oba te sterowania ze względu na sprawność są identyczne.

Jednoczesny napęd kilku silników z jednej pompy jest możliwy przy szeregowym usytuowaniu elementu dławiącego.

Ogólnie sprawność układu hydraulicznego η opisać można zależnością:

$$\eta = \eta_p \eta_i \eta_s \quad (1)$$

gdzie:

η_p, η_i, η_s – sprawność pompy, instalacji hydraulicznej, silnika.

Sprawność pompy i silnika odczytuje się z katalogów producentów tych maszyn. W celu określenia ogólnej sprawności układu niezbędne jest wyznaczenie sprawności instalacji hydraulicznej. Sprawność instalacji η_i w zależności od usytuowania elementu dławiącego ma postać [4]:

– dla układu szeregowego

$$\eta_i = \left(1 - \frac{Q_z}{Q_p}\right) \left(1 - \frac{\Delta p}{p_0} - \frac{\Delta p_d}{p_0}\right) \quad (2)$$

– dla układu równoległego

$$\eta_i = \left(1 - \frac{Q_d}{Q_p}\right) \left(1 - \frac{\Delta p}{p_p}\right) \quad (3)$$

gdzie:

Q_p – wydajność pompy,

Q_z – natężenie przepływu do zbiornika przez zawór przelewowy,

Q_d – natężenie przepływu do zbiornika przez element dławiący,

Δp – spadek ciśnienia wzdłuż przewodów na odcinku od pompy do silnika (bez straty ciśnienia na elemencie dławiącym),

Δp_d – spadek ciśnienia na elemencie dławiącym.

Wyznaczenie sprawności instalacji a tym samym określenie ogólnej sprawności układu jest utrudnione przez złożoność zależności na sprawność instalacji i wpływ parametrów eksploatacyjnych (obciążenia i prędkości) na sprawności instalacji.

W celu uproszczenia procedury wyznaczania sprawności układów sterowania dławieniowego wprowadzić można pojęcie sprawności strukturalnej [1, 2].

Sprawność strukturalna to część sprawności instalacji hydraulicznej ujmująca następujące straty energetyczne:

- stratę ciśnienia przy przepływie przez element sterujący strumieniem (zawór dławiący lub regulator przepływu). Pomija się straty ciśnienia przez pozostałą część instalacji,
- przepływ cieczy do zbiornika przez zawór przelewowy lub element dławiący. W związku z tym pompa musi podawać natężenie przepływu większe niż to wynika z aktualnych warunków pracy układu napędowego (prędkości silnika),

– pompa pracuje na wyższe ciśnienie niż to wynika z aktualnego obciążenia układu. Ta strata energetyczna występuje przy sterowaniu dławieniowym szeregowym.

Powyższe straty energetyczne nie występują w układach sterowania objętościowego, dlatego sprawność strukturalna tych układów $\eta_{str} = 0$. Pojęcie sprawności strukturalnej jest istotne tylko w układach sterowania dławieniowego.

W rzeczywistych układach sterowania dławieniowego strata ciśnienia związana z przepływem przez element dławiący jest wielokrotnie wyższa od straty ciśnienia przez pozostałą część instalacji.

Przyjmując w równaniach (2, 3) $\Delta p = 0$ otrzymujemy sprawność strukturalną układów opisaną zależnościami:

– dla układu z elementem dławiącym usytuowanym szeregowo (Rys. 2a)

$$\eta_{str} = \left(1 - \frac{Q_z}{Q_p}\right) \left(1 - \frac{\Delta p_d}{P_p}\right) \quad (4)$$

– dla układu z elementem dławiącym usytuowanym równolegle (Rys. 2b)

$$\eta_{str} = 1 - \frac{Q_d}{Q_p} \quad (5)$$

Z porównania zależności (4) i (5) wynika, że sprawność strukturalna dla układu z elementem dławiącym umieszczonym równolegle jest wyższa od układów z elementem umieszczonym szeregowo. Pompa w tym układzie (Rys. 2b) pracuje przy ciśnieniu wynikającym z aktualnego obciążenia. Natomiast przy sterowaniu dławieniowym szeregowym pompa pracuje z nadwyżką ciśnienia.

Z powyższej analizy wynika, że w układach sterowania dławieniowego sprawność instalacji hydraulicznej jest nieznacznie mniejsza od sprawności strukturalnej. Sprawność ogólną przekładni hydrostatycznej (1) można zastąpić równaniem (6):

$$\eta = \eta_p \eta_{str} \eta_s \quad (6)$$

Przy projektowaniu układów sterowania dławieniowego dla oceny sprawności układu można zastąpić sprawność instalacji hydraulicznej η , sprawnością strukturalną η_{str} .

Analiza sprawności strukturalnej układów sterowania dławieniowego

W tab. 1 zestawiono wyniki szczegółowej analizy [5] przeprowadzonej dla dużej grupy układów z podziałem na:

- rodzaj elementu dławieniowego:
 - zawór dławiący,
 - regulator przepływu (dwudrogowy, trójdrogowy (upustowy)).
- miejsce usytuowania elementu dławieniowego (szeregowy, równoległy),
- rodzaj układu zasilania:
 - pompa o stałej wydajności,
 - z zaworem przelewowym (konwencjonalnym),
 - z zaworem przelewowy obniżającym ciśnienie zasilania [5],
 - pompa o zmiennej wydajności z regulatorem stałego ciśnienia,
 - pompa o zmiennej wydajności z regulatorem stałej różnicy ciśnień na zaworze dławiącym.

Poprzez wybór rodzaju układu zasilania wpływa się na kompensację strat energetycznych [4].

Sprawność strukturalna układów sterowania z elementem dławiącym usytuowanym szeregowo opisać można ogólnym równaniem [5]:

$$\eta_{str} = \gamma f\left(\frac{M}{M_{max}}\right) \quad (7)$$

gdzie:

γ – bezwymiarowy współczynnik określający nastawę elementu dławiącego,

M, M_{max} – obciążenie aktualne i maksymalne układu napędowego,

f – funkcja zależna od rodzaju układu dławieniowego.

Tab. 1. Średnia sprawność strukturalna różnych układów [5]

Rodzaj elementu dławiącego	Miejsce usytuowania elementu dławiącego	Rodzaj układu zasilania	Średnia sprawność strukturalna
zawór dławiący	szeregowy	zawór przelewowy konwencjonalny	0,133
		zawór przelewowy obniżający ciśnienie zasilania	0,257
		pompa z regulatorem stałego ciśnienia	0,5
		pompa z regulatorem stałej różnicy ciśnień	0,848
	równoległy		0,5
regulator przepływu dwudrogowy	szeregowy	zawór przelewowy konwencjonalny	0,25
		zawór przelewowy obniżający ciśnienie zasilania	0,413
		pompa z regulatorem stałego ciśnienia	0,5
	równoległy		0,5
regulator przepływu trójdrogowy			0,424

Szczegółową postać funkcji dla różnych układów sterowania dławieniowego przedstawiono w pracy [5].

Sprawność strukturalna układów z elementem dławiącym usytuowanym równoległe ma prostą postać:

$$\eta_{str} = \frac{\omega}{\omega_{max}} \quad (8)$$

gdzie:

ω, ω_{max} – prędkość kątowna wału silnika, aktualna i maksymalna.

Dla układów dławieniowych z elementem usytuowanym szeregowo wyznaczono średnią wartość sprawności strukturalnej z zależności:

$$\bar{\eta}_{str} = \frac{1}{M_{max}} \int_0^{M_{max}} \eta_{str} dM \quad (9)$$

Podana w tab. 1 średnia wartość strukturalna $\bar{\eta}_{str}$ tych układów dotyczy nastawy $\gamma = 0,5$.

Podsumowanie

Sprawność strukturalna jest wygodnym pojęciem umożliwiającym porównanie różnych układów sterowania dławieniowego bez względu na długość i kształt sieci hydraulicznej.

Sprawność strukturalna jest funkcją bezwymiarowego parametru eksploatacyjnego M/M_{max} lub ω/ω_{max} . Można więc było określić średnią wartość sprawności strukturalnej (Tab. 1) w przedziale zmiany parametru eksploatacyjnego M/M_{max} lub ω/ω_{max} .

Procedura wyznaczania sprawności całego układu hydrostatycznego zostaje, więc znacznie uproszczona i sprowadza się do stosowania zależności (6).

Wartość sprawności strukturalnej odczytać można z tab. 1 a sprawność pompy η_p i silnika η_s z katalogów producentów tych maszyn.

Przy doborze struktury układu należy unikać układów o najniższych sprawnościach.

LITERATURA

- [1] A. Osiecki: Hydrostatyczny napęd maszyn. WNT, Warszawa 1998.
- [2] S. Stryczek: Napęd hydrostatyczny. Układy. WNT, Warszawa 1992.
- [3] B. Zastempowski: Optymalizacja lepkości cieczy w przekładni hydrostatycznej. Konferencja nt. Badanie, konstrukcja, wytwarzanie, eksploatacja układów hydraulicznych. Zakopane 1999.
- [4] B. Zastempowski: Inż. Ap. Chem. 49, nr 5, 140 (2010).
- [5] B. Zastempowski: Ocena sprawności układów sterowania dławieniowego prędkością silników hydraulicznych. Konferencja nt. Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne. Wrocław 2005.