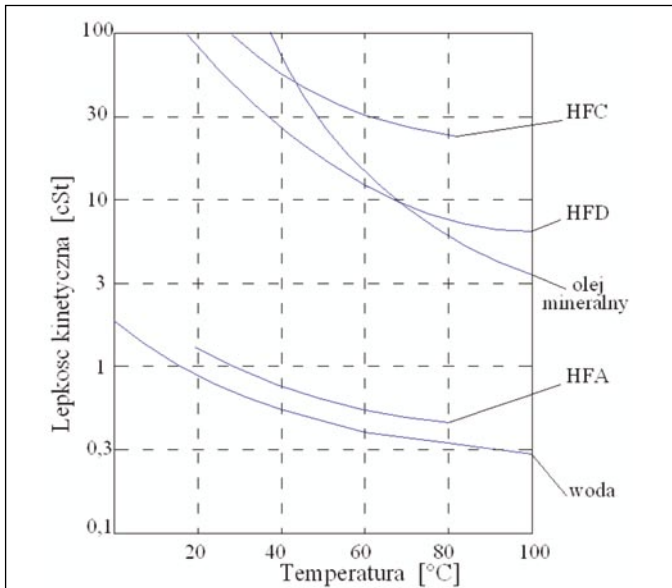


sza wielkość strat, które są już i tak niższe od strat w porównywalnym układzie olejowym ze względu na zdecydowanie niższą lepkość wody;

- dobre przewodnictwo cieplne, co znacznie ułatwia odprowadzenie ciepła do otoczenia.

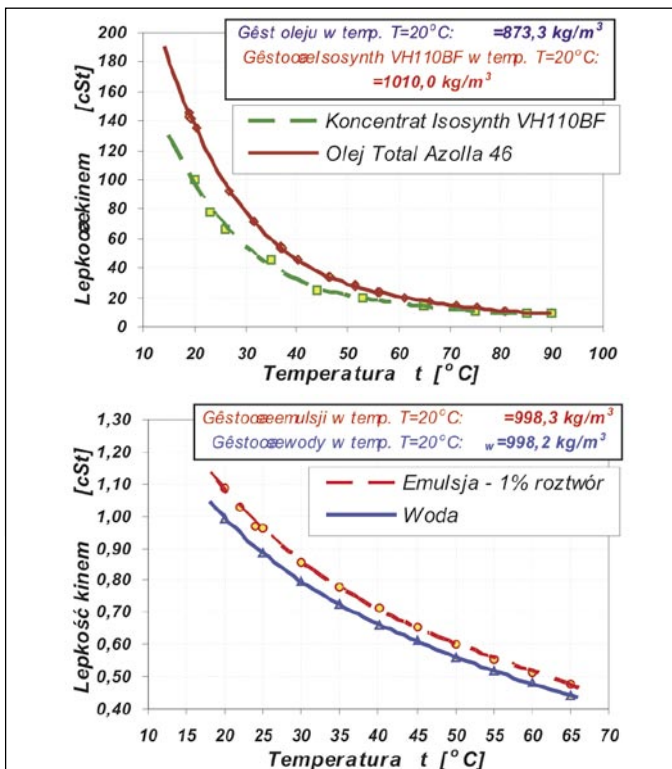


Rys. 3. Zależność lepkości cieczy roboczych od temperatury [2]

W trakcie badań eksperymentalnych używano następujących cieczy roboczych:

- 1) oleju Total Azolla 46 (olej hydrauliczny klasy HLP – rys. 2);
- 2) emulsji oleju w wodzie typu HFA-E o zawartości wody 99% w stosunku wagowym, sporządzonej na bazie koncentratu do sporządzania emulsji HFA-E Isosynth VH110BF.

Charakterystyki lepkościowo-temperaturowe wyżej wymienionych cieczy roboczych pokazano na rys. 4.



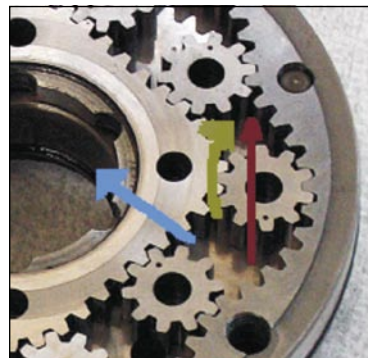
Rys. 4. Charakterystyki lepkościowo-temperaturowe oleju Total Azolla 46, koncentratu do sporządzania emulsji Isosynth VH110BF, emulsji HFA-E i wody [9]

Wszystkie badania laboratoryjne prowadzono w temperaturze:

- oleju $t_o \sim 43^\circ\text{C}$, co odpowiada lepkości $\nu_E = 40\text{cSt}$ i gęstości $\rho_o = 860\text{ kg/m}^3$,
- emulsji $t_E \sim 30^\circ\text{C}$, co odpowiada lepkości $\nu_E = 0,86\text{cSt}$ i gęstości $\rho_E = 995,8\text{ kg/m}^3$.

Badania strat objętościowych w silnikach satelitowych

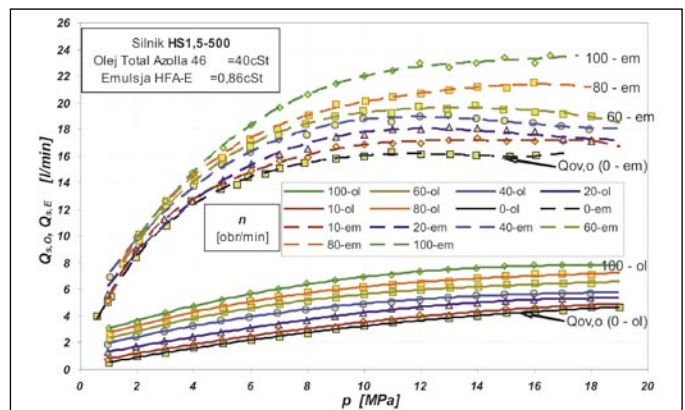
W silnikach satelitowych mogą występować przecieki z komór wysokiego ciśnienia do komór niskiego ciśnienia oraz z komór wysokiego ciśnienia do przestrzeni wału silnika (rys. 5). Przecieki te występują głównie w szczelinach między płytami bocznymi a satelitami i między płytami bocznymi a rotorem. Sumaryczny luz w wymienionych szczelinach badanych silników wynosił $20\ \mu\text{m}$.



Rys. 5. Mechanizm roboczy silnika satelitowego z zaznaczonymi kierunkami przepływu cieczy w szczelinach z komory wysokiego ciśnienia [9]

Dla przykładu na rys. 6 przedstawiono charakterystyki całkowitych strat objętościowych dla silnika HS1,5-500 zasilanego olejem i zasilanego emulsją.

Można zauważyć znaczną różnicę w przebiegu eksperymentalnych charakterystyk $Q_{ov,E} = f(\Delta p)$ silników badanych zasilanych emulsją w porównaniu z wartościami oczekiwanymi $Q'_{ov,E} = k_p \cdot Q_{ov,O}$, gdzie k_p jest stosunkiem lepkości dynamicznej μ_o oleju do μ_E emulsji.



Rys. 6. Charakterystyki natężenia przepływu strat $Q_{s,o} = f(\Delta p)_n$ i $Q_{s,E} = f(\Delta p)_n$ w silniku HS1,5-500 zasilanym olejem i zasilanym emulsją w zależności od spadku ciśnienia Δp , wyznaczone przy stałej prędkości obrotowej $n = \text{const}$ [9]

Dla scharakteryzowania i wyjaśnienia powyższej niezgodności wprowadzono zależność:

$$Q_{ov,E} = k_s \cdot Q_{ov,O} \quad (1)$$

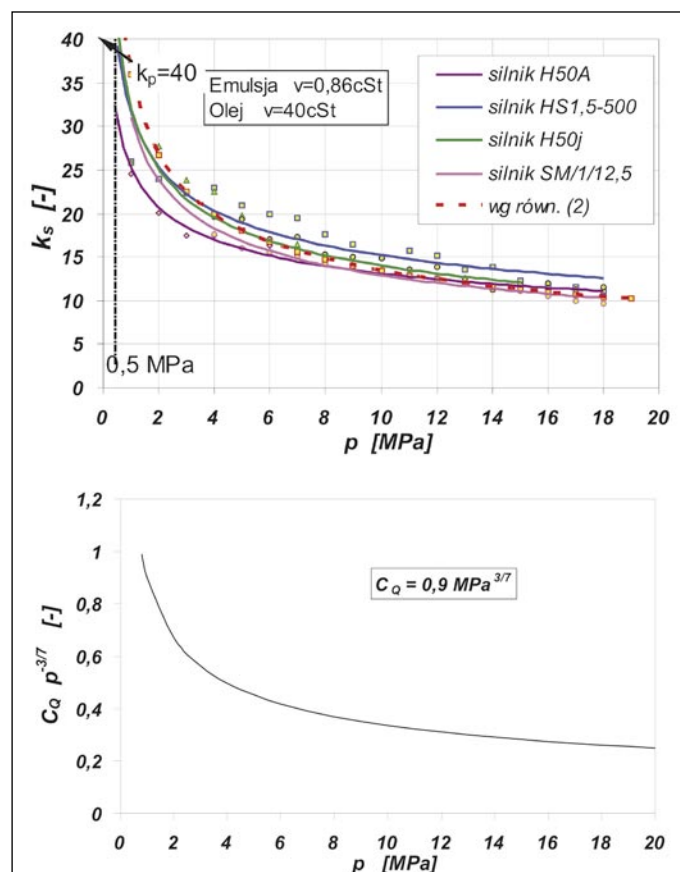
gdzie współczynnik k_s jest wsp. proporcjonalności wyznaczonym eksperymentalnie dla danego silnika zależnym od spadku ciśnienia Δp na silniku $k_s = f(\Delta p)$.

Wyznaczone eksperymentalnie wartości współczynnika k_s dla badanych silników satelitowych przedstawiono w postaci charakterystyk $k_s = f(\Delta p)$ na rys. 7.

Najlepsze przybliżenie uzyskanych z eksperymentu charakterystyk $k_s = f(\Delta p)$ badanych silników daje równanie

$$k_s = C_Q \cdot \frac{\mu_{o,o}}{\mu_{o,e}} \cdot \Delta p^{-3/7} \quad (2)$$

przy czym stała $C_Q = 0,8-1,0$. W ostateczności, do dalszych analiz przyjęto średnią wartość współczynnika $C_Q = 0,9$.



Rys. 7. Wyznaczone eksperymentalnie charakterystyki współczynników $k_s = f(\Delta p)$ dla silników H50A, HS1,5-500, H50j i SM/1/12,5 w zależności od spadku ciśnienia w silniku Δp oraz charakterystyka zależności $C_Q \cdot \Delta p^{-3/7} = f(\Delta p)$ zawartej w równaniu (2) [9]

Na rys. 7 przedstawiono charakterystykę członu $C_Q \cdot \Delta p^{-3/7}$ występującego w równaniu (2) w zależności od Δp przy założeniu $C_Q = 0,9 \text{ MPa}^{3/7}$.

Z badań eksperymentalnych silników zasilanych emulsją zauważono, że w zakresie spadku ciśnienia w silnikach $\Delta p = (0-0,5)$ MPa, występuje przepływ laminarny $Q_{ovl,E}$. Wobec tego, w celu uściślenia opisu zjawisk zachodzących przy przepływie oleju i emulsji w szczelinach silników satelitowych, dla zakresu spadku ciśnienia $\Delta p = (0-0,5)$ MPa, proponuje się przyjąć:

$$(k_s)_{\Delta p=(0+0,5)} = k_p = \frac{\mu_o}{\mu_e} \quad (3)$$

zaś dla $\Delta p > 0,5$ MPa współczynnik k_s należy opisywać zależnością (2).

Charakterystykę $k_s = f(\Delta p)$ wyznaczoną na podstawie równania (2) wykreślono na rys. 7 linią przerywaną.

Z badań wynika, że w przypadku zasilania silnika satelitowego emulsją w jego szczelinach występuje przepływ turbulentny, praktycznie w całym zakresie spadku ciśnienia Δp w silniku.

Model matematyczny opisu strat objętościowych w silniku zasilanym emulsją

Proponując model do opisu strat objętościowych $Q_{s,E}$ w silniku zasilanym emulsją, postanowiono wykorzystać model strat objętościowych $Q_{s,O}$ dla silnika zasilanego olejem, który szczegółowo opisano w [1, 5, 6].

Dominującą składową strat objętościowych $Q_{s,O}$ silników zasilanych olejem jest składowa $Q_{ovl,O}$ przepływu w szczelinach o charakterze laminarnym. Natomiast badania eksperymentalne pokazują, że w przypadku zasilania silnika emulsją wraz ze wzrostem spadku ciśnienia Δp w silniku, udział składowej laminarnej $Q_{ovl,E}$ w ogólnym bilansie strat objętościowych $Q_{s,E}$ maleje. Czyli wraz ze wzrostem spadku ciśnienia Δp w silniku przepływ laminarny $Q_{ovl,E}$ emulsji w szczelinach przechodzi w przepływ turbulentny $Q_{ovt,E}$. Relację między natężeniami przepływu $Q_{ov,O}$ a $Q_{ov,E}$ w silniku przy $n = 0$ obr./min ujmując współczynnik k_s opisany zależnością (2).

Ponadto z danych eksperymentalnych wynika silna zależność strat objętościowych $Q_{s,E}$ od prędkości obrotowej n silnika, co wyjaśnia się wpływem strat ciśnienia $\Delta p_{H,E}$ w kanałach wewnętrznych silnika i malejącą wartością wewnętrznej różnicy ciśnień Δp_w przy nieziennej wartości spadku ciśnienia Δp w silniku [9].

W związku z tym proponuje się przyjąć uproszczony model matematyczny strat objętościowych $Q_{s,E}$ w silniku zasilanym emulsją, w odniesieniu do modelu matematycznego strat objętościowych w silniku zasilanym olejem, w postaci [9]:

$$Q_{s,E} = \underbrace{k_c \cdot \Delta Q_{s,O}}_{\Delta Q_{s,E}} + \underbrace{k_s \cdot (Q_{ovl,O} + Q_{ovt,O})}_{Q_{ov,E}} + Q_{oz,E} \quad (4)$$

gdzie poszczególne składowe opisane są następującymi zależnościami:

– $\Delta Q_{s,E} = k_c \cdot C_{s,O} \cdot \frac{V_t}{2\pi} \cdot \Delta p_{w,E} \cdot \omega$ – składowa strat objętościowych w silniku zasilanym emulsją zależna od wewnętrznego spadku ciśnienia $\Delta p_{w,E}$ i od prędkości kątowej ω wału silnika. Wyrażając współczynnik K_c stosunkiem modułów ściśliwości oleju K_o i emulsji K_e otrzymuje się:

$$\Delta Q_{s,E} = \underbrace{\frac{K_o}{K_e} \cdot C_{s,O}}_{C_{s,E}} \cdot \frac{V_t}{2\pi} \cdot \Delta p_{w,E} \cdot \omega \quad (5)$$

– $Q_{ovl,O} = \frac{C_{oi,O}}{\mu_{o,O}} \frac{V_t}{2\pi} \Delta p_{w,O}$ – składowa strat objętościowych o charakterze laminarnym w silniku zasilanym olejem;

– $Q_{ovt,O} = C_{oi,O} \sqrt{\frac{2\Delta p_{w,O}}{\rho_O}} \sqrt{\left(\frac{V_t}{2\pi}\right)^2}$ – składowa strat objętościowych o charakterze turbulentnym w silniku zasilanym olejem; (6)

– $Q_{oz,E} = \frac{C_{oz,E}}{\mu_{o,E}} \frac{V_t}{2\pi} p_{2,E}$ – składowa strat objętościowych na przecieki zewnętrzne; (7)

– $\Delta p_{w,E} = \Delta p - \Delta p_{H,E}$ – wewnętrzna różnica ciśnień w silniku zasilanym emulsją. Jeśli odnieść $\Delta p_{w,E}$ do zjawisk związanych z przepływem oleju w kanałach wewnętrznych silnika zasilanego olejem, to

$$\Delta p_{w,E} = \Delta p - \underbrace{k_H \cdot \Delta p_{H,O}}_{\Delta p_{H,E}} \quad (8)$$

gdzie współczynnik k_H jest wyrażony zależnością

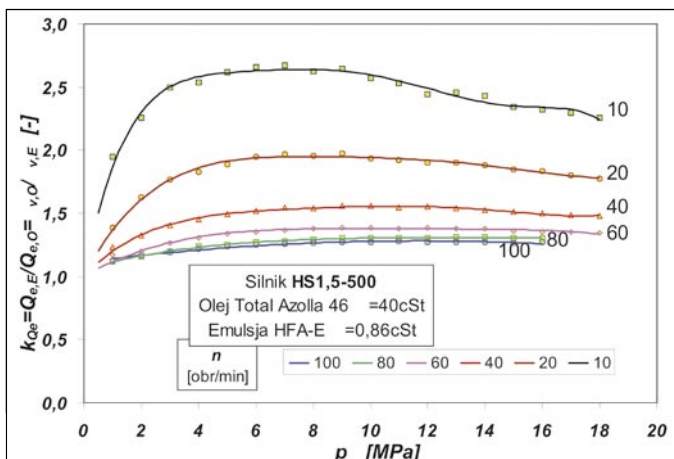
$$k_H = \frac{\Delta p_{H,E}}{\Delta p_{H,O}} = \frac{\rho_E}{\rho_O} \cdot \left(\frac{Q_{e,E}}{Q_{e,O}} \right)^2 = \frac{\rho_E}{\rho_O} \cdot k_{Qe}^2 \quad (9)$$

Wartości współczynnika k_{Qe} podano w postaci charakterystyk na rys. 8.

– $\Delta p_{H,E} = k_H \cdot C_{Hp,O} \cdot \rho_O \cdot \omega^2 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{V_t}{2\pi}\right)^2}$ – spadek ciśnienia w kanałach dolotowych i wylotowych silnika zasilanego emulsją. Wyrażając współczynnik k_H zależnością (9) otrzymuje się

$$\Delta p_{H,E} = \underbrace{k_{Qe}^2 \cdot C_{Hp,O}}_{C_{Hp,E}} \cdot \rho_E \cdot \omega^2 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{V_t}{2\pi}\right)^2} \quad (10)$$

- $\rho_E, \mu_{0,E}$ – gęstość i lepkość dynamiczna emulsji wyznaczona przy ciśnieniu atmosferycznym w temperaturze T_1 na wejściu do silnika;
- $p_{2,E}$ – ciśnienie na wyjściu z silnika zasilanego emulsją;
- k_s – współczynnik określony zależnością (2) dla turbulentnego przepływu emulsji lub stosunkiem lepkości dynamicznych oleju i emulsji dla przepływu laminarnego emulsji;
- $C_{s,O}, C_{s,E}, C_{oz,E}, C_{ol,O}, C_{ol,O}, C_{Hp,O}, C_{Hp,E}$ – współczynniki proporcjonalności modelu opisującego straty objętościowe w silniku zasilanym emulsją.



Rys. 8. Charakterystyki współczynnika $k_{Qe} = f(\Delta p)$ dla silnika HSI,5-500 w zależności od spadku ciśnienia Δp na silniku, wyznaczone przy stałej prędkości obrotowej n silnika [9]

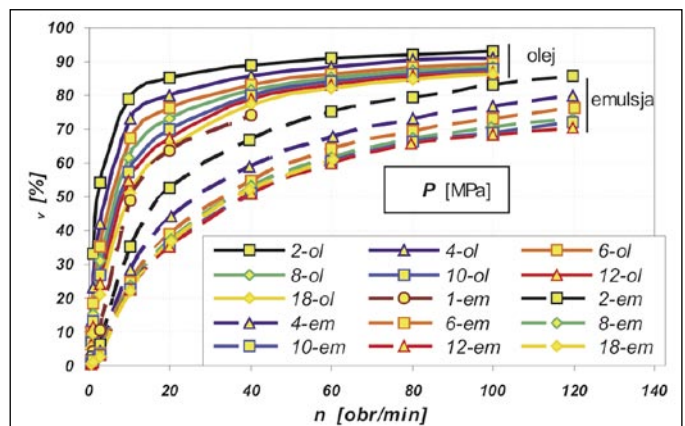
Praktycznie w całym zakresie spadku ciśnienia $\Delta p_{w,E}$ w silniku zasilanym emulsją (dla $\Delta p_{w,E} > 0,5$ MPa) występuje składowa przepływu turbulentnego w szczelinach mechanizmu roboczego. Wobec tego w równaniu (4) należy przyjąć współczynnik k_s opisany równaniem (2). Wówczas, po rozwinięciu,

otrzymuje się model matematyczny opisujący straty objętościowe $Q_{s,E}$ w silniku zasilanym emulsją [9]:

$$Q_{s,E} = C_{s,E} \frac{V_t}{2\pi} \Delta p_{w,E} \cdot \omega + 0,9 \frac{C_{ol,O}}{\mu_{0,E}} \frac{V_t}{2\pi} \frac{\Delta p_{w,E}}{\sqrt[3]{\Delta p_{w,O}^3}} + 0,9 \cdot C_{ol,O} \frac{\mu_{o,O}}{\mu_{o,E}} \sqrt{\frac{2}{\rho_O}} \sqrt[3]{\left(\frac{V_t}{2\pi}\right)^2} \frac{\Delta p_{w,E}}{\sqrt[14]{\Delta p_{w,O}^{13}}} + \frac{C_{oz,E}}{\mu_{0,E}} \frac{V_t}{2\pi} p_{2,E} \quad (11)$$

W trakcie badań laboratoryjnych nie zaobserwowano występowania przecieków zewnętrznych w silnikach zarówno zasilanych olejem, jak i zasilanych emulsją. Wobec tego w powyższej zależności składową strat objętościowych $Q_{oz,E}$ można pominąć.

Na rys. 9 przedstawiono wyznaczone eksperymentalnie charakterystyki sprawności objętościowej $\eta_v = f(\Delta p)$ jednego z badanych silników satelitowych, tj. silnika HSI,5-500.



Rys. 9. Wyznaczone eksperymentalnie charakterystyki sprawności objętościowej $\eta_v = f(n)$ silnika HSI,5-500 w zależności od prędkości obrotowej n dla danych stałych wartości spadku ciśnienia Δp w silniku [9]

Model sprawności objętościowej silnika zasilanego emulsją dla $\Delta p > 0,5$ MPa opisuje poniższe równanie [9]:

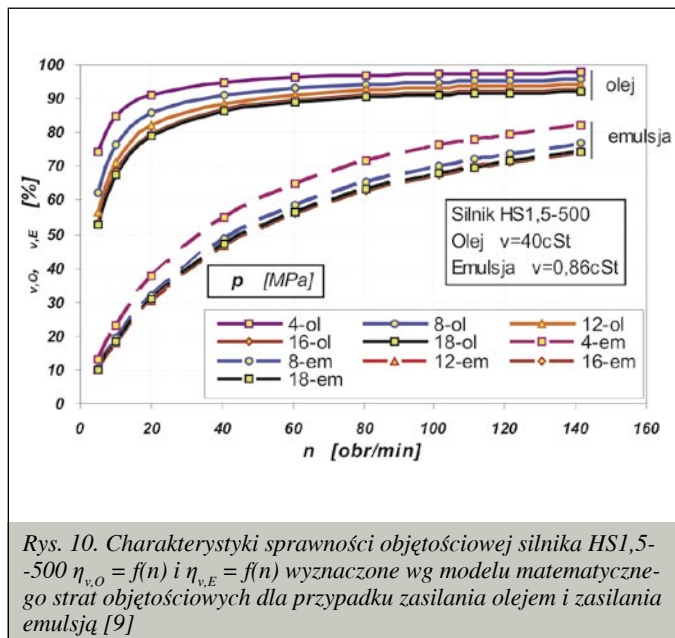
$$\eta_{v,E} = \frac{1}{1 + C_{s,E} \cdot \Delta p_{w,E} + \frac{0,9 C_{ol,O}}{\omega \mu_{0,E}} \frac{\Delta p_{w,E}}{\sqrt[3]{\Delta p_{w,O}^3}} + 0,9 \frac{C_{ol,O}}{\omega} \frac{\mu_{o,O}}{\mu_{o,E}} \sqrt{\frac{2}{\rho_O}} \sqrt[3]{\left(\frac{V_t}{2\pi}\right)^2} \frac{\Delta p_{w,E}}{\sqrt[14]{\Delta p_{w,O}^{13}}} + \frac{C_{oz,E}}{\mu_{0,E}} \frac{1}{\omega} p_{2,E}} \quad (12)$$

Tabela 1. Wsp. modelu matematycznego strat objętościowych silnika HSI,5-500 [9]

Lp.	Wielkość	Jednostka	Rodzaj cieczy roboczej	
			OLEJ	EMULSJA
1	V_t	dm ³ /obr.	0,494	0,494
2	C_{Hr}	–	480	480 × (k _{Qe}) ^{2(*)}
3	$C_s \cdot 10^{-3}$	1/MPa	3	1,95
4	$C_s \cdot 10^{-10}$	–	17,7	17,7 × k _s ^(**)
5	A_{ovl}	dm ³ /(min × MPa)	0,25	0,25 × k _s ^(**)
6	B_h	1/MPa	–0,012	–0,012

(*) – współczynnik k_{Qe} wyznaczone eksperymentalnie
 (**) – współczynnik k_s określony jest równaniem (2)

Dysponując danymi zestawionymi w tabeli 1, można zilustrować graficznie straty objętościowe Q_v oraz współczynniki sprawności η_v , w zależności od prędkości obrotowej i ciśnienia p , dla określonej lepkości ν oleju i emulsji. Na rys. 9 przedstawiono przykładowe charakterystyki $\eta_{v,o} = f(n)$ dla silnika HS1,5-500 zasilanego olejem o lepkości $\nu = 40\text{cSt}$ i zasilanego emulsją o lepkości $\nu = 0,86\text{cSt}$.



Rys. 10. Charakterystyki sprawności objętościowej silnika HS1,5-500 $\eta_{v,o} = f(n)$ i $\eta_{v,E} = f(n)$ wyznaczone wg modelu matematycznego strat objętościowych dla przypadku zasilania olejem i zasilania emulsją [9]

Podsumowanie

Badania wpływu emulsji i oleju na charakterystyki strat objętościowych pokazały, że [9]:

- dla tych samych zewnętrznych spadków ciśnień Δp i dla tych samych prędkości obrotowych n chłonność efektywna $Q_{e,E}$ silników zasilanych emulsją jest nawet kilkukrotnie większa od chłonności efektywnej $Q_{e,o}$ tych silników zasilanych olejem. Stosunek tych chłonności (wyrażony współczynnikiem k_{Q_e}) rośnie przy malejącej prędkości obrotowej silników oraz wraz ze wzrostem spadku ciśnienia w silnikach;
- dla danej prędkości obrotowej i dla danego spadku ciśnienia straty objętościowe w silniku zasilanym emulsją są kilkakrotnie większe od strat objętościowych w tym silniku zasilanym olejem;
- w przypadku zasilania silnika satelitowego olejem w całym zakresie wewnętrznych spadków ciśnienia w silniku dominującym przepływem w szczelinach tego silnika jest przepływ laminarny, natomiast w przypadku zasilania silnika emulsją w jego szczelinach występuje przepływ turbulentny w zakresie wewnętrznych spadków ciśnienia w silniku $\Delta p_w > 0,5 \text{ MPa}$. Czyli dla $\Delta p_w > 0,5 \text{ MPa}$ stosunek tych strat jest mniejszy od stosunku lepkości dynamicznych tych cieczy. Stosunek wartości natężeń przepływu emulsji i oleju został zdefiniowany współczynnikiem K_s (równanie 2);
- dla danej zewnętrznej różnicy ciśnień Δp w silniku opory przepływu emulsji w kanałach wewnętrznych silnika są większe od oporów przepływu oleju w tych kanałach tego silnika. Spowodowana tymi oporami mniejsza różnica ciśnień w komorach roboczych silnika wymusza mniejszy przepływ w szczelinach mechanizmu roboczego;

- dla danej prędkości obrotowej i dla danego spadku ciśnienia w silniku wartość składowej strat objętościowych wynikająca ze ściśliwości emulsji jest mniejsza od wartości składowej strat objętościowych wynikającej ze ściśliwości oleju.

Literatura

- BALAWENDER A.: *Analiza energetyczna i metodyka badań silników hydraulicznych wolnoobrotowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Mechanika nr 54, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1988.
- STRYCZEK S.: *Napęd Hydrostatyczny*, Tom I. Wydawnictwo PWN, Warszawa 1990.
- ŚLIWIŃSKI P.: *Stanowisko do badań silników hydraulicznych zasilanych emulsją wodno-olejową lub wodą*. V Seminarium Naukowe Środowiskowego Studium Doktoranckiego „Współczesne technologie i konwersja energii”. Gdańsk, wrzesień 2002.
- BALAWENDER A., ŚLIWIŃSKI P. (współrealizator projektu): *Badania nad rozwojem silników hydraulicznych satelitowych III generacji*. Sprawozdanie z prac projektu badawczego KBN nr 8 T07C 047 20. Politechnika Gdańska, luty 2004.
- ŚLIWIŃSKI P., BALAWENDER A.: *Stanowisko, metodyka i badania silników hydraulicznych zasilanych emulsją wodno-olejową*. Konferencja CYLINDER 2004 „Badanie, konstrukcja, wytwarzanie i eksploatacja układów hydraulicznych”, Ustroń, 20–23 września 2004, Gliwice: KOMAG 2004.
- BALAWENDER A.: *Physical and mathematical model of losses in hydraulic motors*. Developments in mechanical engineering, Gdańsk University of Technology Publishers, Gdańsk 2005.
- BOCK W.: *Hydraulic-Fluide – ein Konstruktions element*, Teil VI. O+P 3/2005.
- BOCK W.: *Hydraulic-Fluide – ein Konstruktions element*, Teil XI. O+P 8/2005.
- ŚLIWIŃSKI P.: *Porównanie zjawisk w hydraulicznych silnikach satelitowych zasilanych emulsją wodno-olejową lub olejem (praca doktorska)*, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej. Promotor: Balawender A. Gdańsk, 2006.
- Patent Polska, nr 185724. *Maszyna wyporowa typu obiegowo-krzywkowego z kompensacją luzów, zwłaszcza jako silnik hydrauliczny o dużej chłonności*, (Gdańsk PL). Twórca wynalazku: Sieniawski B. Zgłoszony nr P.321438 z 31.07.1997, opubl. 02.12.2003.
- Patent Polska, PL 171305 B1 *Maszyna wyporowa typu obiegowo-krzywkowego, zwłaszcza przystosowana do pracy na ciecz roboczą o niskiej lepkości* (Gdańsk PL). Twórca wynalazku: Sieniawski B. z dn. 20.03.1993.

Prof. dr hab. Andrzej Balawender,
dr inż. Paweł Śliwiński – Katedra Hydrauliki
i Pneumatyki, Wydział Mechaniczny Politechniki
Gdańskiej
e-mail: psliw@wp.pl
email: khip@mech.pg.gda.pl