

DZIAŁANIE PODZESPOŁÓW STERUJĄCYCH UKŁADÓW HYDRAULICZNYCH W NISKICH TEMPERATURACH OTOCZENIA W WARUNKACH ZASILANIA GORĄCYM CZYNNIKIEM ROBOCZYM

Ryszard JASIŃSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Hydrauliki i Pneumatyki
Gdańsk ul. Narutowicza 11/12, tel.: 58-3472932, Email: rjasinsk@pg.gda.pl

Streszczenie

Podczas eksploatacji układów hydraulicznych w niskich temperaturach otoczenia powstaje cały szereg trudności ich prawidłowego działania. Może wystąpić między innymi przypadek rozruchu wychłodzonych podzespołów sterujących i wykonawczych zasilanych olejem (nawet gorącym) o temperaturze przewyższającej temperaturę podzespołu. Nagły dopływ gorącego oleju do oziębionego podzespołu hydraulicznego (np. rozdzielacza czy silnika) powoduje tzw. „szok termiczny”, któremu towarzyszy niejednakowe nagrzewanie się elementów tego podzespołu w czasie, wskutek różnych cech konstrukcyjnych i własności materiałowych. Przebieg temperatury poszczególnych elementów podzespołu hydraulicznego wywołany warunkami szoku termicznego jest różny. Powoduje to różną w czasie rozszerzalność cieplną elementu podzespołu wpływając na wielkość luzów w procesie przejściowym i może wywołać nieprawidłową pracę całego układu hydraulicznego.

Słowa kluczowe: napędy hydrostatyczne, elementy sterujące, procesy cieplne

PERFORMANCE OF HYDRAULIC CONTROL SYSTEMS FED WITH HOT WORKING FLUID IN LOW AMBIENT TEMPERATURES

Abstract:

Many problems may be encountered when hydraulic systems are operated in low ambient temperatures. Among them there may be a case of starting-up frozen controls and actuators supplied with oil of temperature higher (even hot) than the temperature of a hydraulic element. An abrupt flow of the hot oil into the frozen hydraulic element (eg directional valve or motor) causes so called “thermal shock”, which is accompanied by a non-uniform heating of the element’s parts caused by different material and structure properties. The thermal shock causes different temperature responses in particular parts of a hydraulic element. Different thermal expansion of those parts influences height of clearances during this transient process and may jeopardize the performance of the whole hydraulic system.

Key-words: hydrostatic drive, controls, thermal processes

1. WPROWADZENIE

Podczas zasilania gorącym czynnikiem roboczym wychłodzonych zaworów jest obawa wystąpienia ich nieprawidłowego działania. Taka sytuacja może mieć miejsce podczas uruchomienia oziębionej wciągarki na pokładzie statku, który znajdował się w obszarze koła podbiegunowego.

Przeprowadzone badania zaworów miały na celu potwierdzić te przypuszczenia, ustalić rodzaj nieprawidłowości i ich bezpośrednie przyczyny. W konsekwencji pozwoliło to określić zdolność wybranych zaworów do prawidłowej pracy w określonych warunkach.

2. PRZYCZYNY NIEPRAWIDŁOWEGO DZIAŁANIA ZAWORÓW W WARUNKACH SZOKU TERMICZNEGO

Najczęściej występującymi podzespołami sterującymi w układach hydraulicznych maszyn i urządzeń są rozdzielacze i zawory przelewowe.

W wielu zaworach podstawowym elementem jest suwak. Przyczyną nieprawidłowego działania większości zaworów w warunkach szoku termicznego jest nieprawidłowa współpraca suwaka i tulei cylindrycznej korpusu zaworu, gdzie może dojść do zaniku luzu promieniowego.

Przepływający przez oziębiony zawór gorący olej będzie powodował jego nagrzewanie. Suwak posiadający wielokrotnie mniejszą masę niż korpus, a więc i pojemność cieplną, będzie nagrzewał się

szybciej. Wraz z temperaturą szybciej będą wzrastały jego wymiary, co może doprowadzić do likwidacji jego luzu w korpusie. Jak wiadomo luzy te są bardzo małe ze względu na przecieki proporcjonalne do ich trzeciej potęgi, a ograniczenie swobodnego rozszerzania wiąże się z powstawaniem dużych reakcji między elementami. Powstaną znaczne siły tarcia utrudniające, czy wręcz uniemożliwiające ich przemieszczanie się względem siebie.

Aby stwierdzić istnienie takiego problemu wystarczy wziąć pod uwagę wzór opisujący rozszerzalność liniową ciał:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T \quad (1)$$

gdzie: Δl - przyrost długości,
 α [1/K] - współczynnik cieplnej rozszerzalności liniowej,
 l - długość początkowa,
 ΔT - przyrost temperatury

i obliczyć o jaką temperaturę należy podgrzać suwak (np. o średnicy 19mm), aby liniowy przyrost jego średnicy był równy jego początkowemu luzowi w korpusie. Podstawiając do powyższego wzoru $l = 19\text{mm}$, $\Delta l_{\min} = 7,5\mu\text{m}$, $\Delta l_{\max} = 23,5\mu\text{m}$, $\alpha = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ (dla stali w 20°C), otrzymuje się:

- dla minimalnego luzu $\Delta T = 33,2\text{K}$,
- dla maksymalnego luzu $\Delta T = 103,9\text{K}$.

Z tego wynika, że niezbyt wielka przewaga temperatury suwaka nad temperaturą korpusu doprowadzi do zupełnego wykasowania luzu. Zjawisku temu sprzyjać będzie to, że suwak i korpus wykonane są z różnych materiałów, czyli o różnym współczynniku rozszerzalności liniowej.

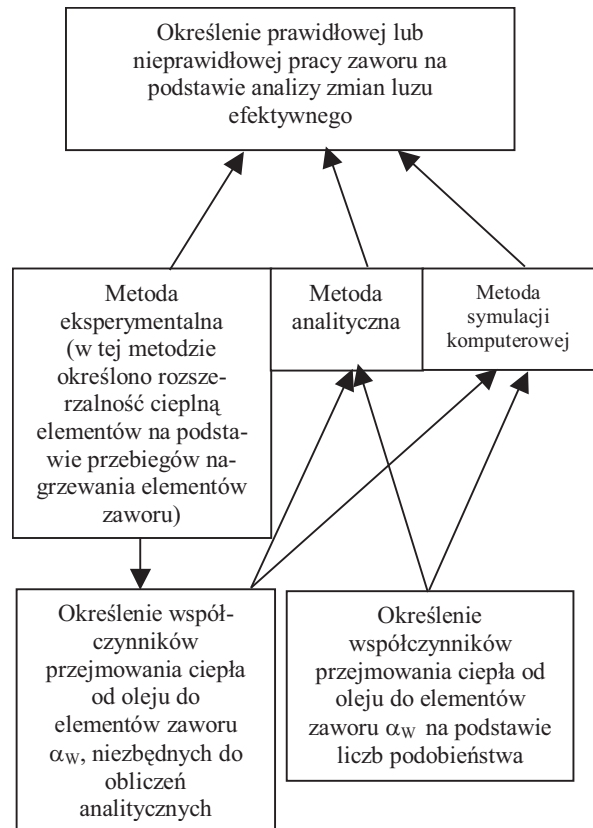
Oprócz szoku termicznego mogą wystąpić usterki związane z dużą lepkością oleju w niskich temperaturach i związanym z tym utrudnionym przepływem przez dławiki, szczeliny, kanały itp.

3. METODY OKREŚLANIA EFEKTYWNEGO LUZU ZAWORÓW HYDRAULICZNYCH [1]

Prawidłowe działanie zaworu w warunkach szoku termicznego można określić na podstawie analizy zamiany efektywnego luzu promieniowego. Luz ten można określić kilkoma metodami przedstawionymi na rys. 1.

Za pomocą badań eksperymentalnych można na podstawie przebiegów temperatur określić tempa nagrzewania, współczynniki przyjmowania ciepła od oleju do elementów zaworów.

Wykorzystując te dane oraz przyjmując warunki początkowe można określić przebiegi temperatur elementów zaworów za pomocą metody analitycznej lub symulacji komputerowej MES.



Rys. 1. Metody określające wartość efektywnego luzu pomiędzy współpracującymi elementami

W metodzie analitycznej korzysta się z zależności określającej przebieg temperatury elementu zaworu w czasie:

$$T_E = T_{ol} - (T_{ol} - T_{ot})e^{-\sigma_E \tau} \quad (2)$$

gdzie:

T_E - temperatura elementu, T_{ol} - temperatura oleju,

T_{ot} - temperatura otoczenia $\sigma_E = \frac{\alpha_E \cdot F_E}{m_E \cdot c_s}$ - tempo

nagrzewania, (α_E - współczynnik przyjmowania ciepła od oleju do elementu, F_E - powierzchnia wymiany ciepła, m_E - masa elementu, c_s - ciepło właściwe), τ - czas od momentu zasilenia gorącym olejem zawór.

Te dane posłużą do określenia różnicy Δl_t rozszerzalności cieplnej współpracujących elementów, a następnie do wyznaczenia luzu efektywnego pomiędzy tymi elementami.

Różnice rozszerzalności cieplnej liniowej np. korpusu wykonanego z żeliwa i suwaka wykonanego ze stali oblicza się z zależności (3):

$$\Delta l_t = l \cdot (\alpha_s \cdot T_s - \alpha_z \cdot T_k) \quad (3)$$

gdzie: α_s , α_z - współczynnik rozszerzalności liniowej stali i żeliwa, l - wysokość elementu, T_s - temperatura suwaka, T_k - temperatura korpusu.

Jeżeli otrzymane wartości luzu efektywnego w czasie zasilania gorącym olejem oziębionego zaworu są dodatnie ($l_e > 0$) to można stwierdzić, że przy tych warunkach zawór będzie pracował prawidłowo.

Metoda symulacji komputerowej polega na obliczeniach numerycznych rozkładu pól temperatury na podstawie warunków brzegowych i początkowych. Obecnie znanych jest wiele metod dyskretyzacji układów ciągłych. Do najważniejszych i najbardziej rozpowszechnionych zaliczyć można metodę różnic skończonych i metodę elementów skończonych. Istnieje kilka podstawowych programów obliczeniowych MES, jak: NASTRAN, ABAKUS, ANSYS, COSMOS/M i inne.

Metoda eksperymentalna jest metodą najskuteczniejszą ze wszystkich, gdyż za jej pomocą można określić dopuszczalne warunki szoku termicznego, dla których zawór będzie prawidłowo pracował w czasie zasilania gorącym olejem.

Inne metody, czyli metoda analityczna i symulacji komputerowej, umożliwiają określanie parametrów początkowych pracy zaworu (temperatury gorącego oleju zasilającego zawór i zimnego zaworu oraz natężenia przepływu), dla których zawór będzie pracował prawidłowo, szybciej i z mniejszym nakładem finansowym. Jednak metoda analityczna i symulacji komputerowej jest mniej dokładna od metody eksperymentalnej określenia obszaru parametrów zasilania zaworu w warunkach szoku termicznego.

4. BADANE ZAWORY [2]

W laboratorium Katedry Hydrauliki i Pneumatyki Politechniki Gdańskiej przebadano następujące zawory:

- **4WEH16C33/6AW220-50** - rozdzielacz dwustopniowy firmy REXROTH (rys. 3),
- **UZPP16** - zawór przelewowy pośredniego działania firmy PONAR WADOWICE (rys. 4),

O ich wyborze zdecydowały następujące argumenty:

1. Oba zawory należą do dwóch różnych grup zaworów; rozdzielacz do zaworów sterujących kierunkiem przepływu, a zawór przelewowy do zaworów sterujących ciśnieniem.
2. Są to dwa najczęściej spotykane elementy, wykorzystywane niemal we wszystkich układach hydrostatycznych.
3. Zawór przelewowy o działaniu pośrednim (występuje współpraca suwaka z tuleją cylindryczną korpusu) jest bardziej narażony na szok termiczny, niż o działaniu bezpośrednim.

5. WIELKOŚCI MIERZONE

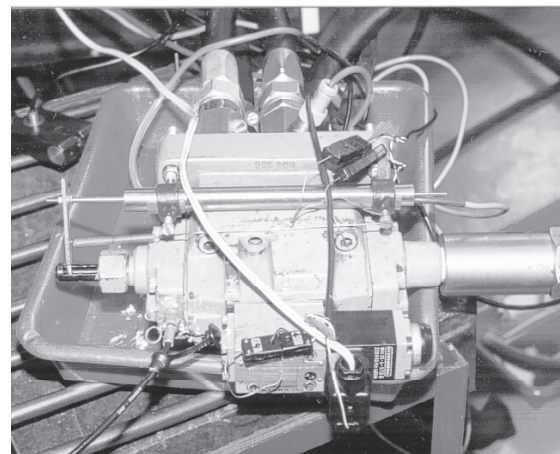
Określono i zilustrowano zjawisko szoku termicznego na podstawie charakterystyk zarejestrowanych następujących wielkości:

- $p_1(\tau)$ - ciśnienie na wejściu do zaworu,
- $p_2(\tau)$ - ciśnienie na wyjściu z zaworu (zawór przelewowy),
- $p_{st}(\tau)$ - ciśnienie sterowania (rozdzielacz),
- $s(\tau)$ - przemieszczenie suwaka (rozdzielacz),
- $Q(\tau)$ - natężenie przepływu, zmierzone przy pomocy przepływomierza turbinkowego,
- $T_{cht.}$ - temperatura początkowa w komorze chłodniczej,
- $T1(\tau)$ - temperatura oleju na dopływie do zaworu, zmierzona przy pomocy czujnika platynowego,
- $T2(\tau)$ - temperatura oleju na odpływie z zaworu, zmierzona przy pomocy czujnika platynowego,
- $Tmp1(\tau), Tmp2(\tau), \dots, Tmp8(\tau)$ - temperatury w poszczególnych miejscach zaworu zmierzone przy pomocy termopar.

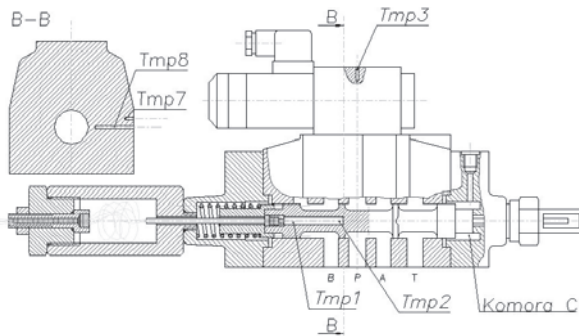
Czujniki termoparowe zostały umieszczone w miejscach mniej oraz bardziej oddalonych od źródeł ciepła. Pozwoliło to lepiej określić rozkład temperatury badanych elementów. Przy rozmieszczaniu kierowano się także tym, aby kilka czujników znajdowało się w tym samym przekroju poprzecznym suwaka i korpusu. Chodziło tu o określenie temperatur w miejscach współpracy rozszerzających się termicznie elementów.

W zaworze przelewowym *UZPP16* wykonano badania modelowe pomiaru temperatury suwaka przy temperaturze oleju, otoczenia i natężeniu przepływu zbliżonym do zarejestrowanych w trakcie, kiedy była przeprowadzana próba poprawności działania zaworu.

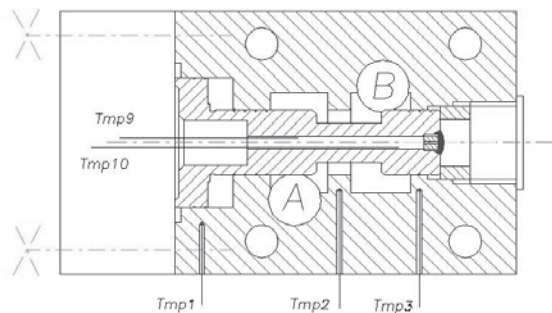
Na rys. 2 przedstawiony jest rozdzielacz *4WEH16C33/6AW220-50* przygotowany do badań. Widać sposób połączenia czujnika przemieszczeń liniowych z trzpieniem suwaka.



Rys. 2. Rozdzielacz *4WEH16C33/6AW220-50* przygotowany do badań.



Rys. 3. Rozdzielacz przygotowany do badań: Tmp1, Tmp2, Tmp3, Tmp7, Tmp8 - miejsca pomiaru temperatury

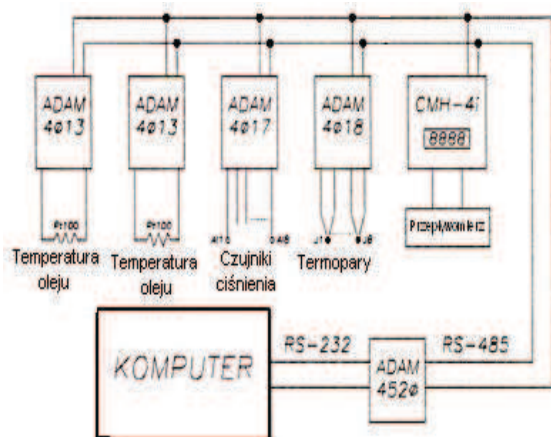


Rys. 4. Zawór przelewowy UZPP16 przygotowany do badań: Tmp1, Tmp2, Tmp3 – miejsca pomiaru temperatury termoparami

5. STANOWISKO BADAWCZE

5.1 Układ pomiarowy

Przebiegi wszystkich mierzonych wielkości zostały zarejestrowane przez komputer za pomocą programu *VisiDAQ* (rys. 5).



Rys. 5. Schemat blokowy instalacji akwizycji danych stanowiska badawczego (przedstawiono tylko elementy wykorzystane w trakcie badań zaworów)

5.2 Układ hydrauliczny

Badania zaworów w warunkach szoku termicznego zostały przeprowadzone na stanowisku Katedry Hydrauliki i Pneumatyki Wydziału Mechanicznego z wykorzystaniem komory niskich temperatur. Komora pozwala uzyskać temperaturę do $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez cyrkulacji powietrza.

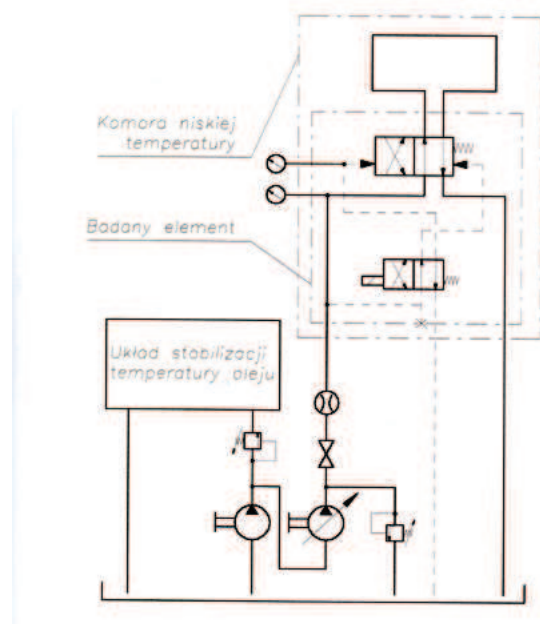
Właściwa temperatura oleju została uzyskana dzięki układowi automatycznej stabilizacji temperatury.

Na rysunku 6 widoczny jest schemat hydrauliczny stanowiska do badania rozdzielacza.

Wykorzystane tu zostały dwie pompy: pompa główna, (wielotłoczkowa o zmiennej wydajności) i pompa śrubowa, zasilająca pompę główną oraz obieg stabilizacji temperatury.

Zawory połączone były z układem hydraulicznym za pomocą przewodów elastycznych, przy czym część przewodów znajdowała się w komorze niskiej temperatury (po ok. 400 mm na każdy przewód). Przewód łączący wejścia A i B w rozdzielaczu 4WEH16C33/6AW220-50 miał długość 800 mm i znajdował się w całości w komorze.

Czujniki ciśnienia znajdowały się poza komorą.



Rys. 6. Schemat stanowiska do badania rozdzielacza 4WEH16C33/6AW220

6. WYNIKI BADAŃ ZAWORÓW [2]

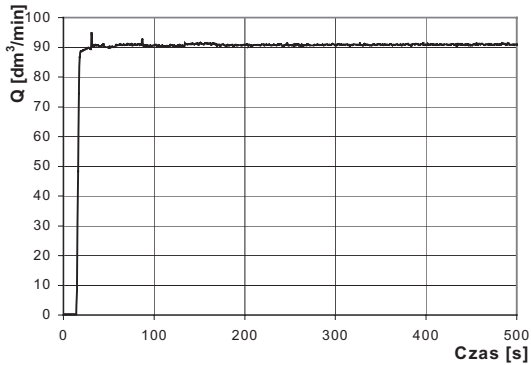
6.1 Wyniki badań rozdzielacza

Zostały przeprowadzone próby poprawności działania rozdzielacza. Jego prawidłowe działanie w warunkach szoku termicznego powinno objawiać się natychmiastową zmianą położenia suwaka po pojawieniu się bądź zaniku ciśnienia sterującego w komorze C.

Wykonano kilkanaście pomiarów w różnych warunkach.

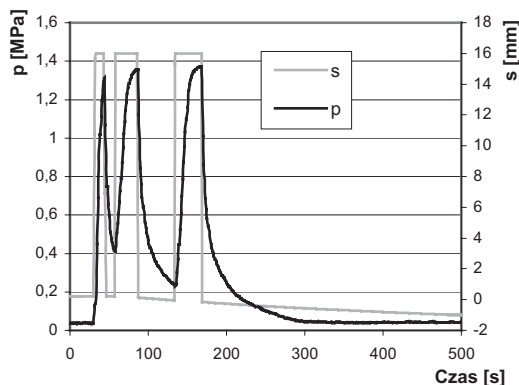
Jeden z tych pomiarów przeprowadzono w następujących warunkach:

- temperatura komory chłodniczej $T_{chl} = -24^{\circ}\text{C}$,
- ciśnienie oleju na wejściu $p_{we} = 1,25\text{MPa}$,
- natężenie przepływu $Q = 91\text{ dm}^3/\text{min}$ (rys. 7),
- temperatura oleju $T_{ol} = 54,6^{\circ}\text{C}$ (rys. 9).

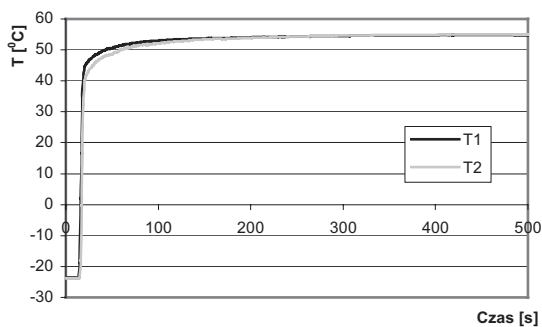


Rys. 7. Przebieg natężenia przepływu mierzonego na wejściu do rozdzielacza

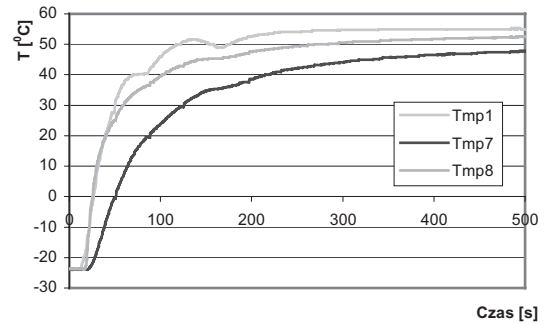
Zmiana położenia suwaka pod wpływem ciśnienia sterującego została przedstawiona na rys. 8 w postaci przebiegów w funkcji czasu.



Rys. 8. Zmiana położenia suwaka pod wpływem ciśnienia sterującego (ciśnienie sterowania w komorze C (rys. 3) – p, przemieszczenie suwaka –s)

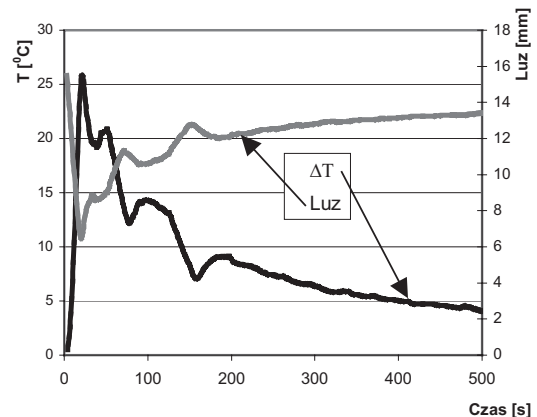


Rys. 9. Przebieg temperatur oleju na dopływie T1 i wypływie T2 z rozdzielacza



Rys. 10. Zestawienie przebiegów temperatur suwaka i korpusu (termopara umieszczona we wnętrzu suwaka Tmp1, termopara umieszczona w korpusie: płytko Tmp7, głęboko Tmp8)

Na podstawie otrzymanych przebiegów temperatury, przedstawionych między innymi na rys. 10, określono średnią temperaturę korpusu i suwaka. Korzystając z zależności 3 wyznaczono efektywny luz pomiędzy suwakiem i korpusem w funkcji czasu (luz początkowy $l_0 = 17\text{ }\mu\text{m}$). Na podstawie charakterystyki efektywnego luzu suwaka i korpusu (rys. 11) można stwierdzić, że rozdzielacz będzie działał prawidłowo. W momencie, kiedy różnica temperatury suwaka i korpusu była największa, efektywny luz wynosił około $11\text{ }\mu\text{m}$, czyli luz początkowy zmniejszył się tylko o $6\text{ }\mu\text{m}$.



Rys. 11. Różnica temperatury suwaka i korpusu oraz luz efektywny pomiędzy suwakiem i korpusem w funkcji czasu

Dla wszystkich prób zasilania gorącym czynnikiem oziębionego rozdzielacza nie stwierdzono nieprawidłowego jego działania.

6.2 Wyniki badań zaworu przelewowego UZPP16

Zostało przeprowadzonych kilkanaście prób działania oziębionego zaworu przelewowego UZPP16 w warunkach zasilania gorącym olejem.

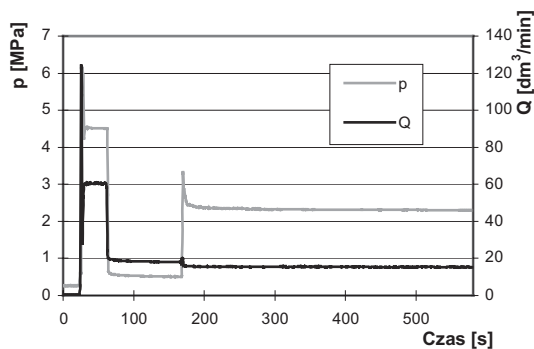
Podczas kilku prób zawór ten działał nieprawidłowo.

Parametry badań zaworu przelewowego, w którym badany zawór działał nieprawidłowo:

- temperatura komory chłodniczej $T_{\text{chl}} = -34^{\circ}\text{C}$,
- temperatura oleju $T_{\text{ol}} = 44^{\circ}\text{C}$,
- natężenie przepływu Q (rys. 12).

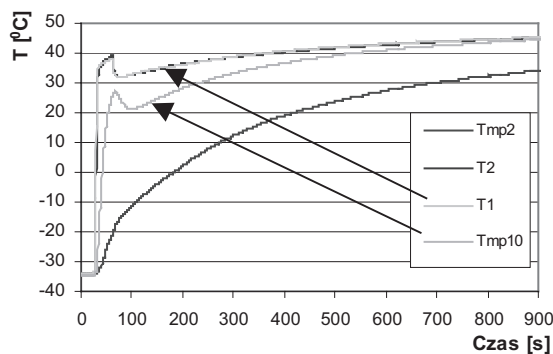
Znany jest wpływ natężenia przepływu na ciśnienie utrzymywane przez zawór przelewowy. Przy zwiększaniu natężenia przepływu nastawione ciśnienie nieco wzrasta, a przy zmniejszaniu spada o pewną wartość. Powodem tego są straty miejscowe zaworu zależne od prędkości przepływu oraz to, że siła sprężyny działającej na suwak zależy od jej ugięcia.

Dlatego, aby stwierdzić czy suwak uległ zakleszczeniu, w trakcie badań zmieniano wartość natężenia przepływu. Przebieg ciśnienia podczas zmieniającego się natężenia przepływu przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Przebieg ciśnienia utrzymywanego przez zawór w czasie zmieniającego się natężenia przepływu.

Po upływie około 40 sekund od momentu zasilania zaworu gorącym czynnikiem, zmniejszono w sposób skokowy natężenie przepływu (rys. 12). Spowodowało to gwałtowny spadek ciśnienia świadczący o zablokowaniu się suwaka w korpusie, ponieważ szczelina dławiąca nie dostosowała swoich wymiarów do nowych warunków zasilania. Zakleszczenie suwaka (nieprawidłowa praca zaworu) trwało około 100 sekund (rys. 12).



Rys. 13. Przebieg temperatury oleju na wejściu T1, wyjściu T2 z zaworu oraz suwaka Tmp10 i korpusu Tmp2

Na podstawie przebiegów temperatury suwaka i korpusu (rys. 13) oraz korzystając z zależności 3, można stwierdzić, że wystąpiła tak duża różnica temperatur suwaka i korpusu, która wynosiła około 50°C , że spowodowała wykasowanie luzu pomiędzy suwakiem (średnica suwaka 20 mm) i korpusem (luz początkowy $l_0 = 12 \mu\text{m}$).

7. WNIOSKI KOŃCOWE

- Zasadniczym czynnikiem konstrukcyjnym, decydującym o dopuszczalnych parametrach działania zaworów w warunkach szoku termicznego, jest efektywny luz określający wysokość szczeliny między powierzchniami współpracujących elementów. Dla badanych zaworów jest to efektywny luz promieniowy między suwakiem a tuleją cylindryczną korpusu.
- Zasilenie gorącym olejem, w sposób skokowy, zaworu w warunkach szoku termicznego powoduje zmianę luzu efektywnego na skutek różnic w rozszerzalności cieplnej elementów.
- Metodą symulacji komputerowej lub analityczną można ocenić działanie zaworów hydraulicznych w warunkach szoku termicznego.
- Badany rozdzielacz działał prawidłowo w warunkach szoku termicznego przy zasilaniu nominalnym natężeniem przepływu i różnicy temperatur oleju i zaworu w chwili początkowej 80°C , natomiast zawór przelewowy działał nieprawidłowo przy różnicy temperatur 78°C .
- Projektanci układów hydraulicznych powinni pamiętać o możliwości wystąpienia nieprawidłowej pracy elementów hydraulicznych, wykorzystywanych w urządzeniach i maszynach pracujących, w warunkach niskich temperatur otoczenia.

LITERATURA

- [1] Balaweder A., Jasiński R. i inni: Badania Własne, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2002.
- [2] Jasiński R.: Działanie wolnoobrotowych silników hydraulicznych w warunkach szoku termicznego. Praca doktorska, promotor: A. Balawender. Gdańsk 2002.