

# Filtracja a czystość cieczy hydraulicznych

Klaudiusz Klarecki

## Wprowadzenie

Napędy i sterowanie hydrauliczne są przez część użytkowników uważane za kłopotliwe w utrzymaniu i awaryjne. Z drugiej strony, doświadczenia producentów elementów i układów hydraulicznych wskazują, że znaczna część awarii hydrauliki siłowej jest spowodowana w całości lub przynajmniej w części przez nadmierną ilość zanieczyszczeń w cieczy hydraulicznej (wg niektórych źródeł aż 70% awarii hydrauliki jest wywołanych przez brudne medium hydrauliczne).

Problemy związane z utrzymaniem należytej czystości cieczy hydraulicznych nie wynikają jednak ze złej woli użytkowników lub braku ich świadomości tego, że właściwa filtracja jest dla napędów i sterowań hydraulicznych kwestią zasadniczą (żeby nie powiedzieć „kwestią życia lub śmierci układu hydraulicznego”).

Powyższe oraz częste wątpliwości i pytania użytkowników hydrauliki siłowej „jak filtrować ciecz hydrauliczną” mogą znaleźć, w nadziei autora, przynajmniej częściową odpowiedź w niniejszym artykule.

## Filtry i filtracja

Podczas projektowania układu hydraulicznego należy ustalić:

- rodzaj filtra;
- miejsce zainstalowania filtra w układzie hydraulicznym.

W przypadku wyboru rodzaju filtra projektant może wybierać pomiędzy filtracją mechaniczną lub siłową i najczęściej wybiera tę pierwszą. Filtry mechaniczne z kolei dzielone są na powierzchniowe i wgłębne. Jako filtry robocze przyjmowane są filtry wgłębne, które cechują się dużą zdolnością gromadzenia zanieczyszczeń. Filtry ochronne, zabezpieczające wrażliwe elementy układu hydraulicznego (np. piloty serwowaworów), mogą być wykonane jako filtry siatkowe.

Wybór miejsca zainstalowania filtra zależy od tego, czy układ hydrauliczny jest otwarty czy zamknięty.

W układach zamkniętych filtry tłoczne niskociśnieniowe zakłada się na linii tłocznej pompy dopełniającej, służącej do uzupełniania przecieków i przepłukiwania układu głównego. Przy projektowaniu układów hydraulicznych otwartych istnieje więcej możliwych miejsc założenia filtrów [1]. Można przyjąć filtr:

- ssawny, umieszczony na przewodzie ssawnym głównej pompy;
- tłoczny, znajdujący się na jej przewodzie tłocznym;
- zlewowy, na przewodzie spływowym do zbiornika;
- filtr w układzie filtracji niezależnej.

Przy braku wysokich wymagań odnośnie do czystości cieczy stosuje się filtry zlewowe, przy dużych natężeniach przepływu ogranicza się przepływ strumienia powrotnego przez filtr zlewowy, bocznikując go zwężką. Alternatywnym rozwiązaniem

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono rozważania dotyczące filtracji cieczy roboczej w układach hydraulicznych oparte na przyjętym modelu matematycznym zjawiska. Rozważano zależność liczby zanieczyszczeń w cieczy hydraulicznej (popularnie „klasy czystości medium”) od wybranych czynników. W szczególności wzięto pod uwagę: współczynnik filtracji  $\beta_x$ , natężenie przepływu przez filtr  $Q$ , objętość cieczy roboczej  $V$  zawartej w układzie hydraulicznym oraz strumień zanieczyszczeń  $\Theta$ . Wyniki analizy wskazują, że bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na czystość cieczy roboczej jest natężenie przepływu przez filtr.

**Abstract:** In paper is presented a model of the filtering phenomena in the hydraulic system. Was analyzed relationship between the cleanliness of hydraulic liquid and different variables. Into consideration were taken: the filter efficiency  $\beta_x$ , flowrate  $Q$  through the filter, the volume of hydraulic liquid  $V$  contained into system, stream of pollution solid particles  $\Theta$ . The results showed that the most effective way to improve the cleanliness of the hydraulic fluid is the increasing of the volume flow rate through the filter.

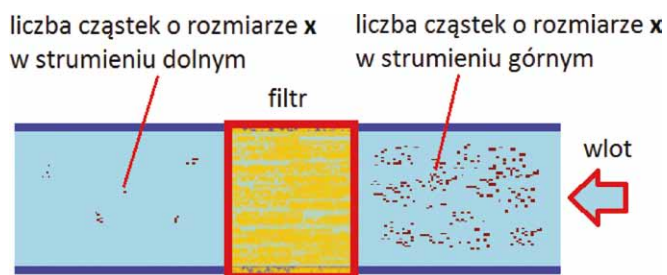
dla dużych zasilaczy hydraulicznych jest przyjęcie filtracji w układzie niezależnym.

Jeżeli układ hydrauliczny wymaga dużej czystości medium, to optymalnym rozwiązaniem jest przyjęcie dwóch filtrów, tłocznego i zlewowego.

Należy zauważyć, że w układach o dużych przepływach, ze wstępnie przyjętą filtracją w układzie niezależnym, jako drugie należałoby zastosować filtry tłoczne wysokociśnieniowe o bardzo dużych nominalnych przepływach lub bocznikować je analogicznie jak filtry zlewowe. Pierwsze będzie skutkowało wysokimi kosztami, drugie nie gwarantuje istotnego polepszenia czystości medium dostarczanego do odbiorników. Wydaje się, że najbardziej korzystne jest w takim przypadku przyjęcie koncepcji z filtrami ochronnymi w postaci dokładnych wgłębnych filtrów tłocznych wysokociśnieniowych na zasilaniu wrażliwych elementów.

## Parametry filtrów

Podstawowym parametrem opisującym filtr jest współczynnik dokładności filtracji  $\beta_x$  (tzw. *filter beta ratio*). Parametr  $\beta_x$



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie procedury multi-pass testing

filtra wyznaczany jest eksperymentalnie, na drodze procedury zwanej *multi-pass testing*. Polega ona na dodawaniu do cieczy stale i jednostajnie przetwarzanej przez filtr określonej ilości substancji zanieczyszczającej, zawierającej cząstki od znanej wielkości  $x$ . W pobieranych (rys. 1) próbkach cieczy sprzed filtra (strumień górny) i zza filtra (strumień dolny) wyznacza się liczby zanieczyszczeń  $N_g$  i  $N_d$  z użyciem automatycznego układu zliczającego, a następnie wyznacza się wartość  $\beta_x$  z zależności:

$$\beta_x = \frac{N_g}{N_d} \quad (1)$$

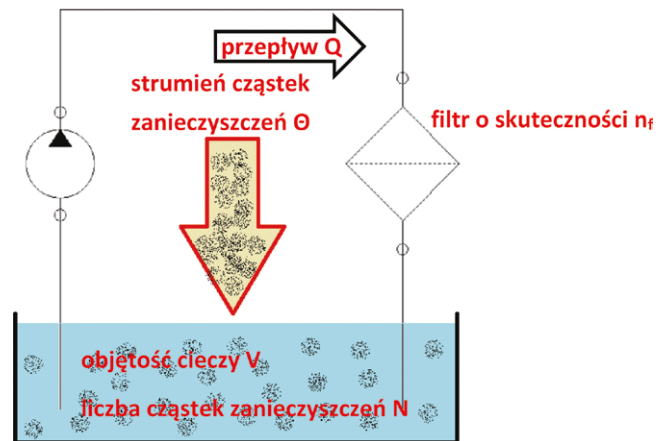
Należy zauważyć, że współczynnik dokładności filtracji podawany jest dla określonego rozkładu wielkości cząstek zanieczyszczeń, związanego z przyjętym materiałem zanieczyszczeń. Zależność pomiędzy rozmiarem cząstek zanieczyszczeń a bieżącą (dla tego rozmiaru) wartością współczynnika dokładności filtracji można znaleźć w materiałach producentów filtrów hydraulicznych [2].

Skuteczność filtracji  $n_f$ , wyrażona poniższą zależnością, mówi z kolei o tym, jaki procent cząstek zanieczyszczeń o wielkości co najmniej  $x$  jest wychwytywanych ze strumienia przepływającego przez filtr.

$$n_f = \left(1 - \frac{1}{\beta_x}\right) \cdot 100\% \quad (2)$$

Można również przyjąć, że parametr skuteczności filtracji odpowiada wartości prawdopodobieństwa wychwycenia cząstki o wielkości co najmniej  $x$ .

Poza parametrami właściwymi dla filtrów, każdy z nich jest również miejscowym oporem hydraulicznym, dla którego należy znać zależność pomiędzy spadkiem ciśnienia i natężeniem przepływu. Przy wyznaczaniu spadku ciśnienia sumuje się straty na obudowie i wkładzie filtracyjnym.



Rys. 2. Schematyczne przedstawienie analizowanego procesu filtracji

### Analiza wpływu wybranych parametrów na czystość cieczy hydraulicznej

Dla użytkowników układów hydraulicznych istotna jest odpowiedź na pytanie: „Co można zrobić, aby zmniejszyć liczbę zanieczyszczeń zawartych w cieczy hydraulicznej?”. W tym celu postanowiono utworzyć model procesu filtracji w układzie hydraulicznym, a następnie sprawdzić, który z parametrów, takich jak: współczynnik dokładności filtra, natężenie przepływu przez filtr lub objętość użyteczna zbiornika, ma największy wpływ na czystość medium hydraulicznego.

#### Model filtracji

Podstawą przyjętego modelu filtracji w układzie hydraulicznym (rys. 2) były następujące założenia:

- prawdopodobieństwo  $p$  wychwycenia cząstki zanieczyszczeń o wielkości  $x$  lub większej jest równe parametrowi skuteczności filtracji  $n_f$  i jest stałe (nie zależy od liczby wychwyconych cząstek);
- zanieczyszczenia w cieczy zawartej w zbiorniku układu hydraulicznego są rozmieszczone równomiernie;
- do cieczy dostają się zanieczyszczenia pochodzenia zewnętrznego i wewnętrznego o łącznym stałym strumieniu  $\Theta$ .

Liczba cząstek zanieczyszczeń w zbiorniku  $N$  może być opisana zależnością:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N + \Theta \quad (3)$$

Gdzie:

- $\Theta$  – strumień cząstek zanieczyszczeń dostających się do cieczy;
- $\lambda$  – prawdopodobieństwo wychwycenia cząstki w jednostce czasu.

Prawdopodobieństwo  $\lambda$  można przyjąć jako:

$$\lambda = p \frac{Q}{V}$$

$$p = \frac{n_f}{100\%}$$
(4)

Gdzie:

Q – natężenie przepływu przez filtr;

V – objętość cieczy w układzie hydraulicznym.

**Uwaga:**

Zazwyczaj parametr  $\lambda$  wyrażony zależnością (4) jest znacznie mniejszy od 1. W przypadku ekstremalnie dużych natężeń przepływu może zdarzyć się, że wynik zależności (4) będzie zbliżony albo nawet większy od 1. Dla takiego przypadku zależność (3) nie jest właściwa, a tym samym nie będzie miało zastosowania poniższe rozumowanie.

Po podstawieniu (4) równanie (3) przyjmie postać:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{pQ}{V}N + \Theta$$
(5)

W ogólnym przypadku wielkości, od których zależy liczba cząstek zanieczyszczeń w zależności (5), nie są stałe. Przykładowo skuteczność filtracji może zależeć od stopnia zapełnienia filtra (a to z kolei od liczby wychwyconych cząstek). Również objętość cieczy w układzie może być zmienna, np. z powodu przecieków.

Wyznaczenie liczby zanieczyszczeń z uwzględnieniem zmienności parametrów  $p$ ,  $Q$ ,  $V$  i  $\Theta$  najprawdopodobniej wymagałoby zastosowania metod numerycznych celem rozwiązania zależności (5).

W dalszej analizie przyjęto, że zjawisko filtracji jest stacjonarne i można je opisać, przyjmując powyższe wielkości jako stałe. Dla takiego założenia rozwiązaniem równania (5) jest całka szczególna w postaci:

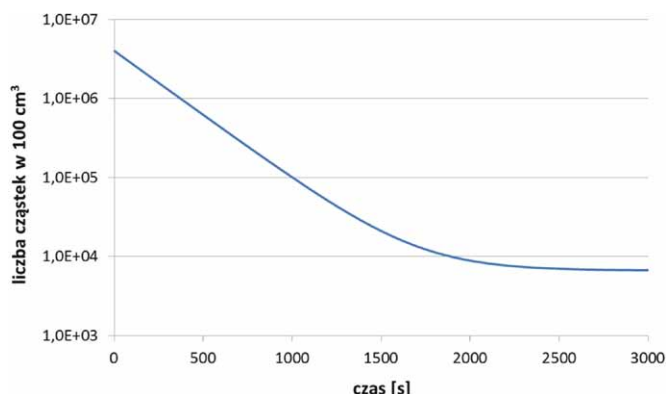
$$N = N_0 e^{-\frac{pQ}{V}t} + \Theta \frac{V}{pQ} \left( 1 - e^{-\frac{pQ}{V}t} \right)$$
(6)

Gdzie:

$N_0$  – początkowa liczba cząstek zanieczyszczeń w cieczy.

Ponieważ operowanie całkowitą liczbą cząstek zanieczyszczeń  $N$  może być kłopotliwe, lepiej przekształcić zależność (6) na postać, w której wyznaczane będzie stężenie liczbowe zanieczyszczeń w przyjętej jednostce objętości  $\rho_c$ . Jako jednostkową można przyjąć dowolną wartość objętości, na przykład 100 cm<sup>3</sup>. Dzięki temu będzie można odnieść się bezpośrednio np. do klas liczb zanieczyszczeń zgodnie z normą ISO 4406. Należy przy tym pamiętać, aby odpowiednio przeliczyć wartość natężenia przepływu  $Q$ .

$$\rho_c = \rho_{c0} e^{-\frac{pQ}{V}t} + \frac{\Theta}{pQ} \left( 1 - e^{-\frac{pQ}{V}t} \right)$$
(7)



**Rys. 3.** Przykładowy przebieg zmian liczby cząstek zanieczyszczeń zawartych w 100 cm<sup>3</sup> oleju hydraulicznego

Gdzie:

$\rho_{c0}$  – początkowe stężenie liczbowe cząstek zanieczyszczeń w cieczy.

Dla zależności (6) i (7) można wprowadzić stałą czasową filtracji  $T_f$ , jako:

$$T_f = \frac{V}{pQ}$$
(8)

Należy zauważyć, że dla czasów filtracji  $t \gg T_f$  stężenie liczbowe cząstek zanieczyszczeń zbliża się do wartości:

$$\rho_c = \frac{\Theta}{pQ}$$
(9)

**Przykład 1:**

Jak zmienia się liczba zanieczyszczeń w 100 cm<sup>3</sup> oleju hydraulicznego znajdującego się w układzie hydraulicznym zawierającym go 40 dm<sup>3</sup>. Natężenie przepływu przez filtr 10 dm<sup>3</sup>/min, współczynnik filtracji  $\beta_{5\mu m} = 300$ . Początkowa klasa czystości oleju to 22/20/17 wg ISO 4406, strumień zanieczyszczeń o wielkości od ok 4–5  $\mu m$  przyjęto jako 10 000 l/s.

**Rozwiązanie:**

Dla klasy 22/20/17 można przyjąć początkową liczbę wszystkich zliczanych cząstek w przedziale od 2E+6 do 4E+6 w 100 cm<sup>3</sup> oleju hydraulicznego. Przebieg zawartości cząstek w czasie pokazano na rys. 3 dla  $\rho_{c0} = 4E+6$ .

Można zauważyć, że po ok. 30 minutach (1800 s) liczba cząstek zanieczyszczeń ustala się w wartości ok. 6100 szt/100 cm<sup>3</sup>. Odpowiada to 13 klasie czystości wg ISO 4406. Stała czasowa filtracji w przyjętych warunkach wyniosła  $T_f = 241$  s.

**Analiza wrażliwości dla przyjętego modelu filtracji**

Zależność (7) odpowiada użytkownikowi na postawione na początku pytanie. Nie mówi jednak, zmiana którego parametru

przyniesie największy skutek. Aby odpowiedzieć, który parametr należy zmienić w pierwszej kolejności, wyznaczono funkcję wrażliwości względnej dla przyjętego modelu filtracji.

Funkcja wrażliwości względnej wskazuje, jak silnie zmiany poszczególnych parametrów wpływają na właściwości układu lub wartości wielkości opisujących zjawiska. Funkcja wrażliwości względnej zjawiska opisanego funkcją  $F$  na zmiany parametru  $y$  jest definiowana jako:

$$S_y^F = \frac{\partial \ln F(y)}{\partial \ln y} = \frac{y}{F(y)} \cdot \frac{\partial F(y)}{\partial y} \quad (10)$$

Postać funkcji wrażliwości względnej wyznaczono dla dwóch przypadków:

- nieustalonego stanu stężenia liczbowego cząstek zanieczyszczeń ( $t < 3T_f$ );
- ustalonego stanu stężenia liczbowego cząstek zanieczyszczeń ( $t \gg 3T_f$ ).

Przyjęto przy tym, że zbadana zostanie wrażliwość liczby zanieczyszczeń na zmiany:

- skuteczności filtracji filtra (czyli zmiany filtra na inny);
- natężenia przepływu medium hydraulicznego przez filtr (dla stanu ustalonego);
- stosunku natężenia przepływu medium hydraulicznego przez filtr do objętości cieczy hydraulicznej w układzie (dla stanu nieustalonego);
- strumienia cząstek zanieczyszczeń.

Wydaje się, że analiza wrażliwości czystości medium hydraulicznego na zmiany strumienia cząstek zanieczyszczeń jest zagadnieniem czysto teoretycznym dla użytkownika konkretnego układu; przecież najczęściej nie ma on na ten parametr wpływu. Nie jest to do końca prawdą. Przykładowo w warunkach silnego zanieczyszczenia otoczenia można przyjąć specjalne rozwiązania konstrukcyjne, np. siłowników, zwiększające efektywność usuwania zanieczyszczeń przywartych do gładzi tłoczków. Poza tym taka analiza może pokazać, jak zmiana warunków pracy wpływa na czystość medium hydraulicznego.

Funkcje wrażliwości względnej dla stanu nieustalonego opisanego zależnością (7) mają postać:

Dla wpływu skuteczności filtracji (przyjętej parametrem  $p$ ):

$$S_p^{\rho_c} = - \frac{p \left[ \frac{\Theta}{p^2 Q} + e^{-\frac{pQ}{V}t} \left( \rho_{c0} \frac{Qt}{V} + \frac{\Theta}{p^2 Q} + \frac{\Theta t}{pV} \right) \right]}{\rho_{c0} e^{-\frac{pQ}{V}t} + \frac{\Theta}{pQ} \left( 1 - e^{-\frac{pQ}{V}t} \right)} \quad (11)$$

Dla wpływu  $Q/V$ :

$$S_{Q/V}^{\rho_c} = - \frac{Qpte^{-\frac{pQ}{V}t} \cdot \left( \rho_{c0} - \frac{\Theta}{pQ} \right)}{V \left( \rho_{c0} e^{-\frac{pQ}{V}t} + \frac{\Theta}{pQ} \left( 1 - e^{-\frac{pQ}{V}t} \right) \right)} \quad (12)$$

Dla wpływu strumienia cząstek zanieczyszczeń  $\Theta$ :

$$S_{\Theta}^{\rho_c} = \frac{\Theta \left( 1 - e^{-\frac{pQ}{V}t} \right)}{pQ \left( \rho_{c0} e^{-\frac{pQ}{V}t} + \frac{\Theta}{pQ} \left( 1 - e^{-\frac{pQ}{V}t} \right) \right)} \quad (13)$$

Jak łatwo zauważyć, wartości funkcji wrażliwości względnej dla pierwszych dwóch parametrów będą ujemne (w przypadku wartość funkcji wrażliwości względnej dla  $Q/V$  w pewnych warunkach może być dodatnia, co oznacza wzrost liczby zanieczyszczeń w trakcie filtracji. Wystąpi to wówczas, gdy w bardzo brudnym otoczeniu uruchomi się układ hydrauliczny zalany cieczą o wysokiej czystości), co oznacza, że zwiększanie skuteczności filtra oraz zwiększanie stosunku  $Q/V$  będzie skutkowało zmniejszaniem się liczby zanieczyszczeń w cieczy hydraulicznej. W przypadku strumienia zanieczyszczeń otrzyma się wartość dodatnią, oznaczającą, że większy strumień zanieczyszczeń będzie skutkował większą liczbą cząstek stałych w cieczy hydraulicznej.

Powyższe można spuentować stwierdzeniem, że niczego innego czytelnik się nie spodziewał.

Postać zależności (9) jest bardzo prosta do interpretacji: im strumień zanieczyszczeń jest większy, tym większe jest stężenie liczbowe cząstek zanieczyszczeń w cieczy hydraulicznej. Na zmniejszenie stężenia liczbowego cząstek zanieczyszczeń wpływają tak samo skuteczność filtracji przyjętego filtra i natężenie przepływu cieczy hydraulicznej przez filtr.

Pomimo prostoty zależności (9) wyznaczono dla stanu ustalonego funkcje wrażliwości względnej, które mają postać:

Dla wpływu skuteczności filtracji (przyjętej parametrem  $p$ ):

$$S_p^{\rho_c} = \frac{p}{\Theta} \left( - \frac{\Theta}{p^2 Q} \right) = -1 \quad (14)$$

Dla wpływu natężenia przepływu przez filtr:

$$S_{Q/V}^{\rho_c} = \frac{Q}{\Theta} \left( - \frac{\Theta}{pQ^2} \right) = -1 \quad (15)$$

Dla wpływu strumienia cząstek zanieczyszczeń  $\Theta$ :

$$S_{\Theta}^{\rho_c} = \frac{\Theta}{\Theta} \left( \frac{1}{pQ} \right) = 1 \quad (16)$$

Warto zauważyć, że zmiana skuteczności filtracji, wynikająca z zamiany filtra o niskim współczynniku  $\beta$  na filtr o znacznie wyższym  $\beta$ , jest niewielka. Przykładowo minimalna wartość  $\beta_x$



powinna wynosić 75, a filtry realizujące filtrację absolutną cechują się  $\beta_x \geq 1000$ ; natomiast skuteczności wynoszą dla nich odpowiednio 0,986(6) i 0,999. Tak więc prawdopodobieństwa wychwycenia cząstek zanieczyszczeń przez filtry o dużej różnicy współczynników dokładności filtracji  $\beta_x$  są bardzo do siebie zbliżone.

Powyższe rozważania najlepiej zilustrować wybranym przykładem.

**Przykład 2:**

Porównać dwa rozwiązania filtracji dla układu hydraulicznego wypełnionego 1000 dm<sup>3</sup> oleju hydraulicznego o czystości 22/20/18 wg ISO 4406. Natężenie przepływu głównej pompy to 200 dm<sup>3</sup>/min, wymagana klasa czystości wg ISO 4406 to 18/16/13. Sumaryczny strumień zanieczyszczeń o cząstkach od 4 μm wynosi  $\Theta = 10E+6$  1/s. Możliwe jest zastosowanie filtra zlewowego  $\beta_{10\mu m} = 300$  lub filtracji w układzie niezależnym z filtrem  $\beta_{3\mu m} = 75$  (taki filtr ma dla cząstek o rozmiarze 10 μm współczynnik  $\beta$  większy od 3E+6), przy czym wydajność pompy pomocniczej w układzie niezależnym wynosi 50 dm<sup>3</sup>/min.

Na podstawie informacji zawartych w poz. [2] wyznaczono współczynniki dokładności filtracji dla cząstek o rozmiarze od 4 μm. W przypadku filtra 10 μm wynosi on 10, a dla filtra 3 μm ma wartość 200. Tak więc prawdopodobieństwa wychwycenia cząstek 4 μm wynoszą odpowiednio:

- p10 μm = 0,9;
- p3 μm = 0,995.

Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci graficznej na rys. 4.

Okazuje się, że mniejszą liczbę zanieczyszczeń w cieczy hydraulicznej zapewni filtracja na splywie, pomimo przyjętego „gorszego filtra” o  $\beta_{10\mu m} = 300$ . Jest to efekt czterokrotnie większego natężenia przepływu dla filtra zlewowego w porównaniu z przyjętymi parametrami dla filtracji w układzie niezależnym ze znacznie dokładniejszym filtrem  $\beta_{3\mu m} = 75$ .

Wartości stężenia cząstek w stanie ustalonym wynoszą odpowiednio:

- dla filtracji w linii splywowej z filtrem  $\beta_{10\mu m} = 300$  –  $\rho = 3,33 \cdot 10^5$  cząstek/100 ml;
- dla filtracji w układzie niezależnym z filtrem  $\beta_{3\mu m} = 75$  –  $\rho = 1,21 \cdot 10^6$  cząstek/100 ml.

Tak więc można oczekiwać, że klasa czystości dla filtracji w linii wyniesie 19/.../... (dla 19 klasy liczba cząstek w 100 ml mieści się w przedziale 250 000–500 000).

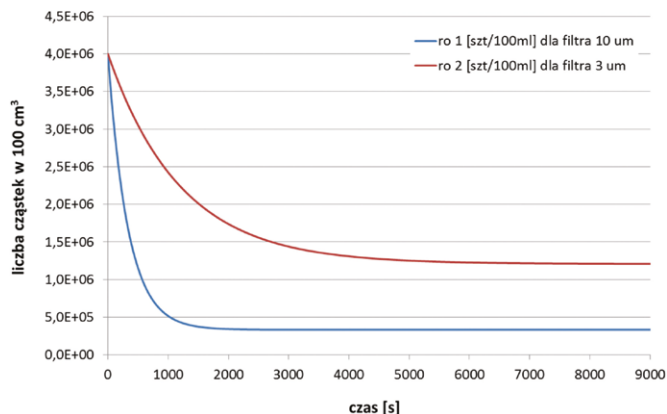
W przypadku filtracji w układzie niezależnym należy spodziewać się klasy czystości 21/.../... .

Należy zauważyć, że w obydwu przypadkach nie zostanie spełniony warunek zapewnienia klasy 18/16/13.

Otrzymane wyniki sugerują, że otrzymanie żądanej klasy czystości może wymagać zastosowania dwóch filtrów w analizowanym układzie.

**Filtracja z wykorzystaniem filtra w linii i w układzie filtracji niezależnej**

W przypadku zastosowania dwóch filtrów: w linii oraz w układzie filtracji niezależnej, można przyjąć, że rozpatruje



**Rys. 4.** Przebieg liczby zanieczyszczeń w 100 cm<sup>3</sup> oleju w układzie z przykładu 2

się proces opisany zależnością (3), przy czym parametr  $\lambda$  jest wówczas prawdopodobieństwem sumy zdarzeń A i B. Zdarzenie A polega na wychwyceniu cząstki zanieczyszczeń przez filtr A, zdarzenie B na wychwyceniu cząstki przez filtr B.

Prawdopodobieństwo sumy zdarzeń opisane jest zależnością:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (17)$$

Gdzie:

$P(A \cap B)$  – iloczyn zdarzeń A i B.

Ponieważ prawdopodobieństwo iloczynu zdarzeń polegających na jednoczesnym wychwyceniu cząstki (tej samej) przez filtry A i B jest zerowe, można zapisać, że parametr  $\lambda$  wyniesie:

$$\lambda_{A \cup B} = \frac{p_A Q_A + p_B Q_B}{V} \quad (18)$$

Tak więc wpływ zastosowania dwóch filtrów na stężenie cząstek zanieczyszczeń opisać można następująco:

$$\rho_c = \rho_{c0} e^{-\frac{p_A Q_A + p_B Q_B t}{V}} + \frac{\Theta}{p_A Q_A + p_B Q_B} \left( 1 - e^{-\frac{p_A Q_A + p_B Q_B t}{V}} \right) \quad (19)$$

Gdzie:

- $p_A$  – skuteczność filtra A;
- $Q_A$  – natężenie przepływu przez filtr A;
- $p_B$  – skuteczność filtra B;
- $Q_B$  – natężenie przepływu przez filtr B.

Wracając do przykładu 2, przyjęcie jednoczesnej filtracji na splywie i w układzie niezależnym pozwoli uzyskać w stanie

ustalonym 261 000 cząstek  $\geq 4 \mu\text{m}$  w  $100 \text{ cm}^3$  oleju. Niestety stanowi to wciąż 19 klasę liczby zanieczyszczeń. Dopiero po zwiększeniu wydajności pompy pomocniczej powyżej  $60 \text{ dm}^3/\text{min}$  będzie możliwe uzyskanie liczby cząstek poniżej 250 000, co odpowiada 18 klasie.

### Szacowanie strumienia zanieczyszczeń $\Theta$

Jak wynika z powyższych rozważań, na czystość medium hydraulicznego bardzo istotnie wpływa wielkość strumienia zanieczyszczeń  $\Theta$ . Użytkownicy układów hydraulicznych najczęściej nie znają jego wartości. Do pewnego stopnia można uwzględnić wpływ zanieczyszczeń zewnętrznych, posługując się wskazówkami publikowanymi przez producentów filtrów hydraulicznych. Producenci filtrów podają wartości zanieczyszczeń (np. w  $\mu\text{g}$  na jednostkę objętości medium) dla typowych rodzajów napędów hydraulicznych i miejsc ich aplikacji. Należy jednak zauważyć, że przyporządkowanie konkretnemu układowi hydraulicznemu odpowiedniej wielkości zanieczyszczeń ma zawsze charakter arbitralny i z tego powodu może być obarczonym dużym błędem.

Ponadto taka procedura nie uwzględnia strumienia zanieczyszczeń wewnętrznych, generowanych w samym układzie hydraulicznym.

Całkowity strumień zanieczyszczeń  $\Theta$  można bardzo łatwo określić w oparciu o zależności:

- a) (7) w nieustalonym stanie czystości medium;
- b) (9) po dłuższym czasie pracy układu (po ok.  $10T_f$ ).

W przypadku a) celem określenia strumienia zanieczyszczeń należy dokonać dwukrotnie pomiaru czystości medium: pierwszy raz przed uruchomieniem układu hydraulicznego, drugi raz po określonym czasie jego pracy w stałych, powtarzalnych warunkach. Odstęp czasowy pomiędzy pomiarami I i II nie powinien być zbyt krótki, najlepiej aby był nie mniejszy od  $T_f$ . Na podstawie pomiaru I zostanie określona wartość  $\rho_{c0}$ , a z pomiaru II wartość  $\rho_c$  po czasie  $t$ . Po podstawieniu powyższych do przekształconej zależności (7) otrzyma się wartość całkowitego strumienia zanieczyszczeń.

Oszacowanie całkowitego strumienia zanieczyszczeń  $\Theta$  jest jeszcze prostsze dla przypadku b). Wówczas wystarczy jeden pomiar czystości medium, którego wynik należy podstawić do zależności (9).

W każdym przypadku należy zadbać o właściwe przeprowadzenie pomiarów czystości medium. Ciecz hydrauliczna powinna być odpowietrzona, o jak najmniejszej wilgotności. Pomiar powinien być wykonany dla kilku próbek (wskazane jest pobranie min. pięciu), jeżeli jest to możliwe, pobranych z linii tłocznej.

Powyższe działania przyniosą użytkownikowi układu hydraulicznego podwójną korzyść: po pierwsze – powinno się znać czystość medium hydraulicznego, a jej pomiar jest jedynym miarodajnym sposobem jej poznania; po drugie – umożliwi to weryfikację i ewentualną korektę przyjętego w układzie rozwiązania filtracji medium. Znajomość wartości  $\Theta$  jest przecież niezbędna, by można było skorzystać z powyższych rozważań podczas projektowania i weryfikowania układów hydrauliki siłowej.

### Podsumowanie

W artykule rozważano zagadnienia związane z filtracją w układach hydraulicznych na podstawie modelu opartego na kilku założeniach upraszczających, dzięki którym można było uzyskać jego analityczne rozwiązanie. Bardziej dokładne badanie procesów filtracji prawdopodobnie będzie wymagało przyjęcia modeli numerycznych oraz przeprowadzenia szeregu badań eksperymentalnych.

Istotnym wynikiem analizy przedstawionego modelu filtracji w układach hydraulicznych jest stwierdzenie, że łatwiejszym, a czasem jedynie możliwym, sposobem polepszenia czystości cieczy hydraulicznej jest zwiększenie natężenia przepływu strumienia płynącego przez filtr. Zwiększanie współczynnika dokładności filtracji dla tej samej wielkości cząstek prawie nie zmienia stanu czystości medium.


Innym sposobem poprawy czystości medium jest zastosowanie większej liczby filtrów. Jak wykazano, przynosi to efekt równoważny zwiększaniu strumienia.

Przedstawione w artykule zależności mogą pomóc praktykom we właściwym doborze rozwiązania filtracji w układach hydraulicznych. Jedynym ograniczeniem jest to, że jest to metoda *a posteriori*. Wynika to z tego, iż niezbędna wartość całkowitego strumienia zanieczyszczeń  $\Theta$ , na które jest narażony układ hydrauliczny, nie może być znana z góry.

Otrzymanych wyników nie należy nadinterpretować. Czytelnik po lekturze przykładu 2 może dojść do wniosku, że jest możliwe zastępowanie filtrów dokładniejszych (o wysokim  $\beta_x$  dla cząstek zanieczyszczeń o mniejszym rozmiarze  $x$ ) filtrami mniej dokładnymi – chociażby zastępując filtry 5-mikronowe filtrami 10-, a nawet 20-mikronowymi. Jest to całkowicie błędna koncepcja. Stosowanie mało dokładnych filtrów uniemożliwi wychwytywanie bardzo drobnych zanieczyszczeń (o rozmiarach poniżej  $4 \mu\text{m}$ ), co może doprowadzić do „zamulenia” cieczy hydraulicznej. Duża ilość drobnych zanieczyszczeń nie tylko jest przyczyną „zawieszania się” zaworów i przyspieszonego zużycia ściernego współpracujących elementów. Prowadzi również do przyspieszonej degradacji cieczy hydraulicznej oraz może sprzyjać powstawaniu kawitacji.

### Literatura

- [1] TOMASIAK E.: *Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
- [2] HYDAC Filtration Handbook no E70.000.0/02.08 [www.hydac.com.au](http://www.hydac.com.au)

 dr inż. Klaudiusz Klarecki – Politechnika Śląska, Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, e-mail: [klaudiusz.klarecki@polsl.pl](mailto:klaudiusz.klarecki@polsl.pl)