

Marek ZBOIŃSKI<sup>1</sup>  
Jarosław SPYCHAŁA<sup>2</sup>  
Jerzy LEWITOWICZ<sup>3</sup>

### **MODELOWANIE WPLYWU KONTAMINACJI CIECZY ROBOCZEJ NA TRWAŁOŚĆ ELEMENTÓW LOTNICZYCH INSTALACJI HYDRAULICZNYCH**

*Nowoczesna optymalizacja techniczno-ekonomiczna eksploatacji lotniczych instalacji hydraulicznych wymaga określenia trwałości elementów układu w zależności od warunków pracy. Takie podejście w eksploatacji statków powietrznych w szczególności dotyczy precyzyjnych par zespołów hydraulicznych wspomagających systemy sterowania statków powietrznych. Na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych, badań stanów awaryjnych i wniosków z analizy statystycznej, opracowano metodę określania granicznego poziomu zanieczyszczenia cieczy roboczej.*

### **MODELLING AND EVALUATION OF EFFECTS OF WORKING LIQUID'S CONTAMINATION UPON AIRCRAFT HYDRAULIC UNITS' LIFE**

*Modern technological and economical optimisation of processes of operating hydraulic systems requires life of the system's components to be defined, depending on operating conditions. Such approach in the field of operating the aircraft applies in particular to precision pairs of hydraulic units that assist control systems of aircraft.*

*On the grounds of operation-based experience, investigation into failure modes, and conclusions drawn from statistical analysis, a method of determining the boundary level of liquid contamination has been developed. Determination of contamination susceptibility of units of hydraulic intensifiers would prove helpful in designing and developing safe-guarding systems/devices to protect aircraft against failure modes. This, in turn, is supposed to provide aircraft with the highest flight safety levels possible.*

---

<sup>1</sup>Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 01-494 Warszawa, ul. Księcia Bolesława 6, tel./fax. (22) 685 1175.  
e-mail:marek.zboinski@itwl.pl)

<sup>2</sup>Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 01-494 Warszawa, ul. Księcia Bolesława 6, tel./fax. (22) 6851034.  
e-mail:jaroslaw.spychala@itwl.pl

<sup>3</sup>Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 01-494 Warszawa, ul. Księcia Bolesława 6, tel./fax. (22) 6851160.  
e-mail:jerzy.lewitowicz@itwl.pl

## 1. WSTĘP

Lotnicze instalacje hydrauliczne przeznaczone są do przekazywania energii w celu napędu i sterowania szeregiem zespołów konstrukcji płatowca. Funkcjonalnie można je podzielić na zasilające i układy odbioru energii. Ze względu na charakter odbioru energii są to układy wymagające ciągłego lub periodycznego zasilania. W układach płatowcowych zespoły instalacji hydraulicznej wymagające ciągłego odbioru energii są wykorzystywane przede wszystkim we wspomaganiu systemów sterowania statków powietrznych.

Zespoły hydrauliczne wspomagające systemy sterowania wykorzystywane są od kilkudziesięciu lat. Ze względu na ich charakterystyki są na chwile obecne podstawowym zespołem. Przy małej masie uzyskujemy duże siły i momenty. Płynność ruchu jest zdecydowanie lepsza w porównaniu z napędem elektrycznym czy pneumatycznym. Jednym z głównych mankamentów układów hydraulicznych jest zachowanie szczelności połączeń i wrażliwość na zanieczyszczenie cieczy roboczej. Systemy sterowania wymagają płynnego przekazania ruchu z drążka sterowego SP na powierzchnie sterowe.

Trwałość i niezawodność samych układów hydraulicznych zależy w decydującym stopniu od stanu technicznego cieczy roboczej, która jest czynnikiem przenoszącym energię w tych układach. Ciecz robocza w instalacji hydraulicznej musi spełnić wiele funkcji:

- nośnika energii;
- czynnika smarującego;
- czynnika odprowadzającego ciepło;
- czynnika ochrony przed utlenianiem powierzchni elementów zespołu;
- odprowadzenie produktów zużycia i cząstek zanieczyszczenia;
- uszczelniacza układu.

Jednocześnie wymaga się, aby posiadała szereg właściwości fizykochemicznych, jak i mechanicznych uwzględniając wyżej wymienione funkcje.

Zespoły wchodzące w skład układu hydraulicznego wspomagającego systemy sterowania to: wzmacniacze hydrauliczne (silniki hydrauliczne, serwomechanizmy), zawory, elektrozawory, rozdzielacze i filtry. Bezpośrednio na powierzchnie sterowe oddziałuje wzmacniacz. Wzmacniacz jest urządzeniem, w którym moc strumienia cieczy roboczej na wyjściu jest większa niż wykorzystywana do jego sterowania.

Pary suwakowe, obrotowe, elementy dławiące, kanały przepływowe tych zespołów wykonane są z bardzo dużą dokładnością i pasowane z bardzo małymi luzami, rzędu kilku mikrometrów oraz bardzo precyzyjnymi małymi przykryciami otworów przepływowych i kanałów. Przemieszczenie suwaka, trzona, obrót tarczy, odsłonięcie i przysłonięcie odpowiedniego otworu przepływowego powoduje w ostateczności odpowiednie wychylenie powierzchni sterowych, a w efekcie żądane przemieszczenie statku powietrznego w przestrzeni.

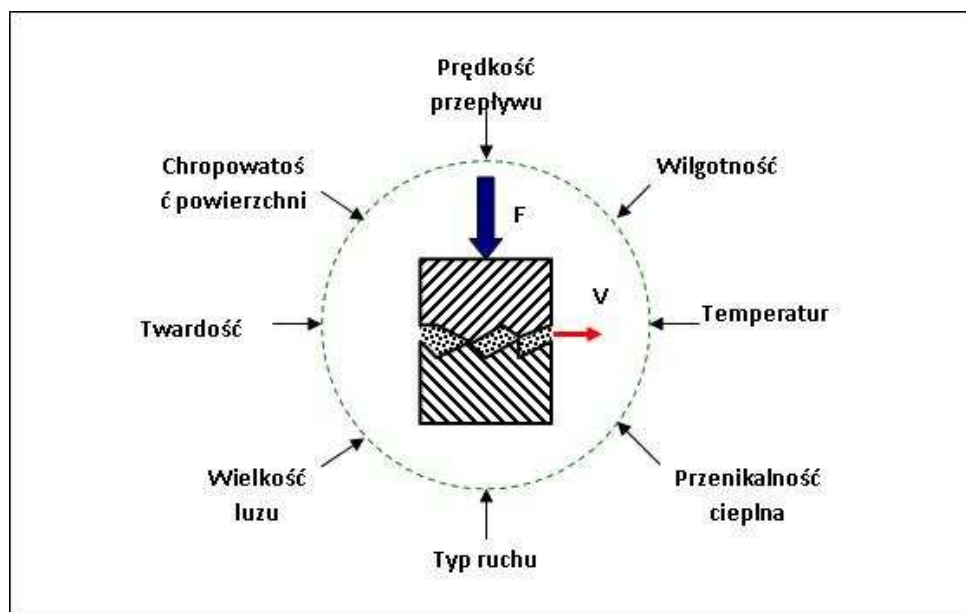
## 2. PROCESY ZUŻYCIA I POWSTAWANIA PRODUKTÓW ZUŻYWANIA W LOTNICZYCH INSTALACJACH HYDRAULICZNYCH

Rozwój konstrukcji lotniczych powoduje wzrost wymagań w stosunku do wchodzących w ich skład układów hydraulicznych. Następuje wzrost ciśnienia cieczy roboczej, przy jednoczesnym zmniejszających się gabarytach zespołów układów hydraulicznych statków powietrznych, co jest przyczyną wielu trudności produkcyjnych i eksploatacyjnych.

Problem są także minimalne odkształcenie części. Konieczne jest stosowanie bardzo małych luzów w celu zminimalizowania przecieków między współpracującymi parami. Uzyskiwanie dużych mocy zespołów o niewielkich rozmiarach prowadzi do podniesienia temperatury cieczy roboczej, a tym samym do spadku jej lepkości. Pogarsza to własności smarne cieczy roboczej i zwiększa się zużycie węzłów tribologicznych (rys. 1.).

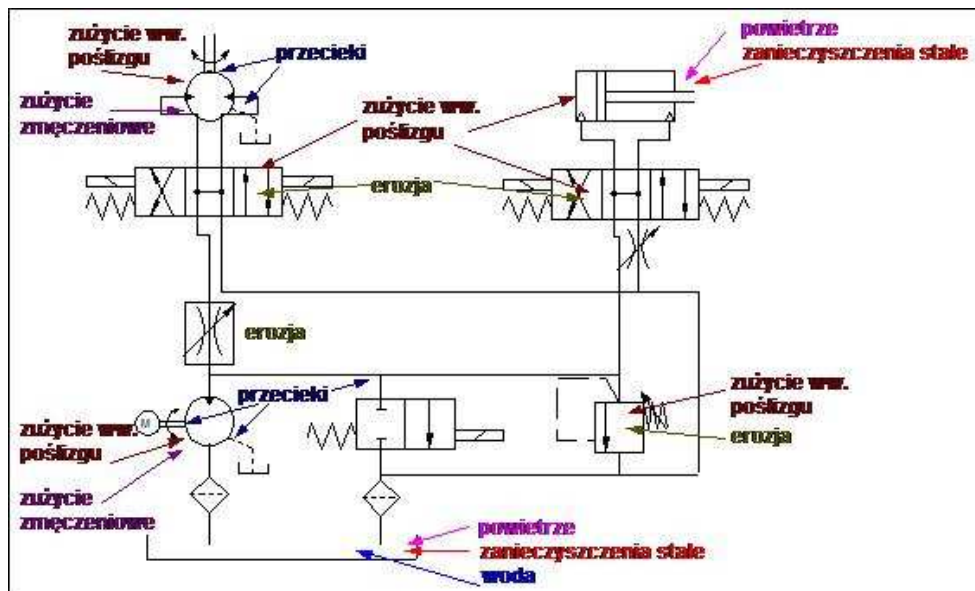
Dla układów hydraulicznych podobnie jak w układach smarowania łożysk i przekładniach zachodzą procesy zużywania, których typy szeroko zostały opisane w literaturze [1, 2, 3, 4, 5] dlatego poniżej wymieniono charakterystyczne procesy:

1. Zgrzewanie elementów stykających się powierzchni - **adhezja**.
2. Ścieranie - **abrazja**.
3. Zmęczenie – **pitting**
4. Rozwarstwienie - **delaminacja**
5. **Korozja**
6. Zużycie cieczy roboczej
7. rozkład chemiczny - oddziaływanie cieplne;
8. fizyczne - wymuszenia mechaniczne – ścinanie;
9. Blokowanie elementów układu - **silting**.



Rys. 1. Czynniki zwiększające siłę tarcia i proces zużywania pary tribologicznej

W układach rzeczywistych mamy do czynienia z występowaniem różnych typów zużywania jednocześnie i dlatego potrzebne jest ogromne doświadczenie w celu jednoznacznego określenia typu, przyczyny i źródła występowania zużywania.



Rys.2. Miejsca zanieczyszczenia i zużycia elementów w typowym układzie hydraulicznym [6]

Układy hydrauliczne były diagnozowane w przeszłości przez kontrolę ciśnienia niezmiernie rzadziej poprzez pomiar natężenia przepływu cieczy co nie zawsze dawało obraz u występujących zjawisk związanych ze zużyciem. Na rys. 2 przedstawione są punkty powstawania zużycia i zanieczyszczeń w typowym układzie hydraulicznym.

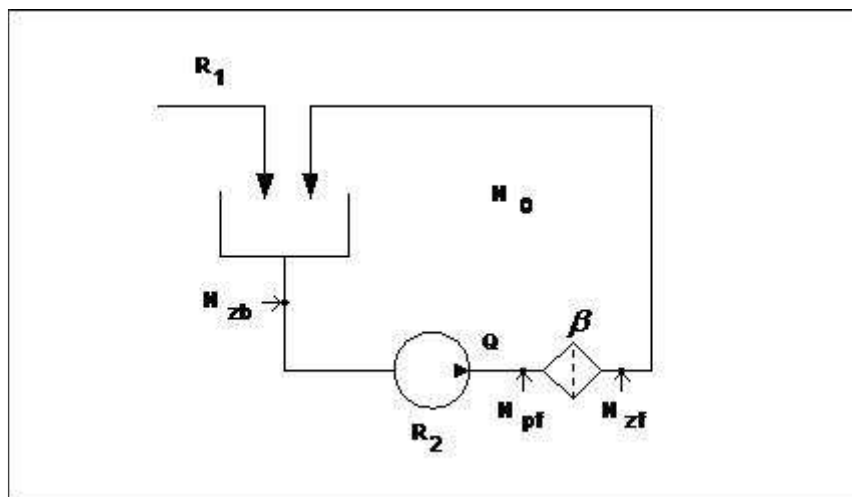
### 3. MODELOWANIE PROCESÓW TRIBOLOGICZNYCH ZACHODZĄCYCH W LOTNICZYCH INSTALACJACH HYDRAULICZNYCH

Z punktu widzenia diagnostyki układu hydraulicznego, ciecz robocza może być traktowana z jednej strony jako element (w sensie ogólnym), z drugiej zaś jako nośnik informacji diagnostycznej o stanie układu (produkty zużycia, degradacja właściwości w procesie eksploatacji, itd.). W tym podejściu, diagnozowanie kontaminacji cieczy roboczej jest niezbędne do oceny stanu układu jak i samej cieczy.

Konieczność poznania wpływu kontaminacji na funkcjonowanie i niezawodność układu hydraulicznego wspomagania system sterowania samolotu wymaga opracowania modelu, który umożliwi określenie dopuszczalnego poziomu kontaminacji tolerowanej przez wzmacniacz hydrauliczny układu. Matematyczny opis zjawiska pozwoli na określenie źródeł generujących cząsteczki zużycia oraz wejść, przez które następuje ingresja obcych ciał stałych do układu, a także uzyskanie wiedzy o efektywności umieszczonych w układzie filtrów i prawidłowości ich rozmieszczenia. Na tej podstawie możliwe będzie opracowanie koncepcji systemu diagnostycznego kontaminacji w procesie eksploatacji układu hydraulicznego wspomagania system sterowania samolotu.

Do rozważań przyjęto trzy znane modele wychodzące z bilansu równowagi koncentracji zanieczyszczeń w układzie.

### 3.1. Model OSU (Oklahoma State University Model)



Rys.3. Schemat modelu OSU[8]:

$N_0$  - początkowa koncentracja zanieczyszczeń w układzie;  $N_{zb}$  - koncentracja zanieczyszczeń w zbiorniku;  $N_{pf}$  - koncentracja zanieczyszczeń przed filtrem;  $N_{zf}$  - koncentracja zanieczyszczeń za filtrem;  $R_1$  - intensywności wprowadzania zanieczyszczeń z otoczenia;  $R_2$  - intensywność generowania zanieczyszczeń w układzie;  $Q$  - natężenie przepływu cieczy roboczej;  $\beta$  - stosunek  $N_{pf}$  do  $N_{zf}$

W modelu OSU [2] założono stałe wartości intensywności wprowadzania zanieczyszczeń z otoczenia ( $R_1$ ) oraz w wyniku procesów zużycia ( $R_2$ ), a także jednolity rozkład wielkości cząstek w układzie.

Koncentracja zanieczyszczeń przed filtrem (rys.3) jest opisana zależnością:

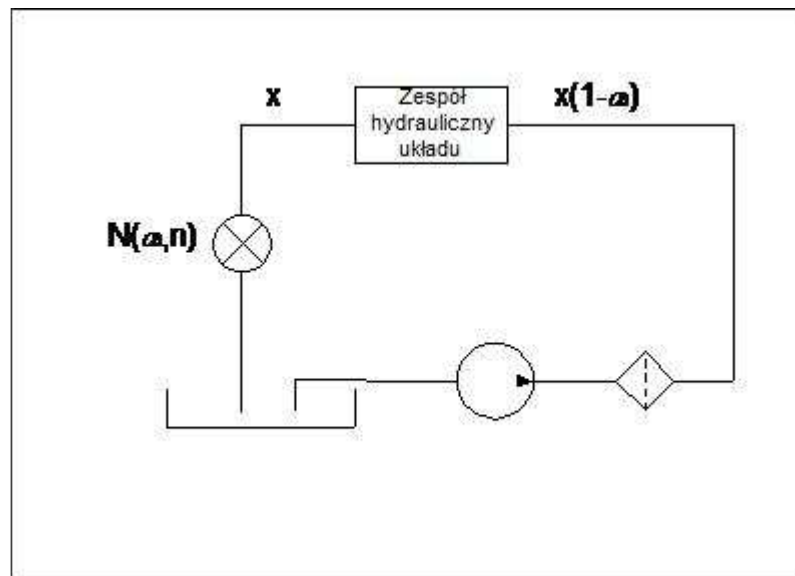
$$N_{pf} = \frac{\beta}{\beta - 1} \frac{(R_1 + R_2)}{Q} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (1)$$

### 3.2. Model Andersona

Dokładniejsza analiza kontaminacji układu hydraulicznego została przeprowadzona przez Andersona według schematu przedstawionego na na rys.4. Model Andersona [7, 8] został opracowany przy następujących założeniach:

- podczas jednego cyklu cała ilość cieczy roboczej przepływa przez zespół hydrauliczny;
- czas trwania cyklu stanowi iloraz ilości cieczy w układzie i wydatku pompy;
- podczas jednego cyklu zespół hydrauliczny generuje  $x$  cząsteczek zanieczyszczeń;

- skuteczność usuwania cząstek  $i$ -tego rozmiaru (gdzie  $d_i$  odnosi się do charakterystycznego rozmiaru cząstek) wynosi  $a_i$ , gdzie:  $0 \leq a_i \leq 1$ ;
- podczas każdego cyklu jest usuwane  $a_i x$  cząstek z cieczy roboczej w wyniku:
  - niszczenia podczas przejścia przez zespół hydrauliczny układu,
  - wytrącania w zbiorniku,
  - zatrzymania przez filtr.



Rys.4. Model Andersona[1]:

$x$  - liczba cząstek generowanych przez zespół hydrauliczny;  $a_i$  - skuteczność usuwania cząstek z układu;  $N(a_i, n)$  - koncentracja cząstek zanieczyszczeń;  $n$  - liczba cykli - przejście całej objętości cieczy roboczej przez układ liczone jako jeden cykl

Po  $n$  cyklach koncentracja cząstek wynosi:

$$N(a_i, n) = x + x \cdot (1 - a_i) + x \cdot (1 - a_i)^2 + \dots + x \cdot (1 - a_i)^{n-1} \quad (2)$$

Gdy liczba cykli dąży do nieskończoności ( $n \rightarrow \infty$ ) koncentracja osiąga wartość graniczną:

$$N(a_i, \infty) \rightarrow \frac{x}{a_i} \quad (3)$$

Zależność koncentracji cząstek zanieczyszczeń od skuteczności filtrowania (wyrażonej współczynnikiem  $\beta$ ) może być opisana następująco:

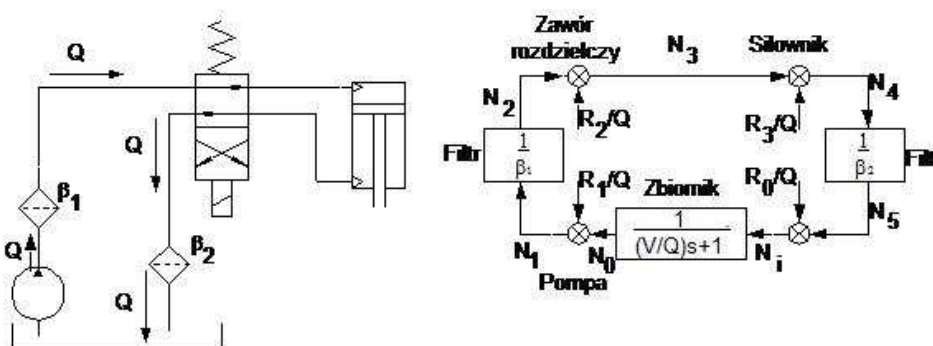
$$N(a_i, n) = x \frac{\beta_i^n - 1}{\beta_i - 1} \beta_i^{(1-n)} \quad (4)$$

### 3.3. Model DCC (Dynamic Contamination Control)

Dynamiczny model sterowania kontaminacją (DCC) cieczy roboczej układu hydraulicznego uwzględnia (rys. 5):

- wielowymiarowy model ingresji zanieczyszczeń z otoczenia;
- wielowymiarowy model generowania zanieczyszczeń w rozpatrywanym układzie hydraulicznym;

Na rys. 5 przedstawiono przykład układu hydraulicznego oraz jego model dynamiczny odwzorowany w przestrzeni zmiennej zespolonej  $s$  (z wykorzystaniem przekształcenia Laplace'a) umożliwiające przeprowadzenie badań symulacyjnych z zastosowaniem odpowiednich pakietów programowych (np. MATLAB-Simulink).



Rys. 5. Model DCC[8]:

$N_0...N_5$  - koncentracja kontaminacji w poszczególnych liniach;  $R_0...R_3$  - intensywność wnikania kontaminacji w danej linii układu odniesione do  $Q$ ;  $Q$  - natężenie przepływu;  $\beta_1, \beta_2$  - współczynniki dokładności filtrowania

Przedstawiony model stanowi uogólnienie przeprowadzonych dotychczas rozważań i umożliwia zastosowanie dostępnych narzędzi programistycznych w celu przeprowadzenia analizy wpływu wybranych czynników na niezawodność i trwałość układów hydraulicznych.

Przy uwzględnieniu wielu linii wysokiego ciśnienia, które wchodzą w skład układu hydraulicznego złożonego obiektu technicznego (np. statku powietrznego), poziom kontaminacji dla całego układu  $N_{uz}$  opisany jest zależnością:

$$N_{uz} = N_{lz} + N_{li} + N_{zb} = \sum_{i=1}^k \frac{R_{rij}}{Q} F_{uz} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l \frac{R_{rij}}{\prod_n \beta_{mn}} + \frac{R_0}{Q} \quad (5)$$

gdzie :

$N_{lz}$  - koncentracja kontaminacji w linii zasilającej;

$N_{li}$  - koncentracja kontaminacji w  $i$ -tej ( $i=1,2,...m$ ) linii układu;

- $N_{zb}$  - koncentracja kontaminacji w linii niskiego ciśnienia (na wejściu do zbiornika);  
 $R_{rij}$  -  $j$ -ty ( $j=1,2,\dots,l$ ) wskaźnik wnikania kontaminacji do  $i$ -tej ( $i=1,2,\dots,m$ ) linii układu;  
 $R_0$  - intensywności wprowadzania zanieczyszczeń z otoczenia  
 $n$  - liczba filtrów w  $i$ -tej linii między źródłem  $R_{rij}$  i linią niskiego ciśnienia (na wejściu do zbiornika);  
 $k$  - liczba źródeł kontaminacji w linii wysokiego ciśnienia;  
 $\beta_{mn}$  - współczynnik dokładności filtracji zależny od wymiaru cząstek;  
 $m$  - liczba linii układu;  
 $l$  - liczba źródeł kontaminacji w liniach układu.

#### 4. DYSKUSJA PRZEDSTAWIONYCH MODELI

Modele OSU i Andersona opisują układ składający się z jednej linii, który jest pewnym uproszczeniem w stosunku do rzeczywistych układów. Wadami tych modeli są:

- przyjęcie stałego poziomu zużycia, co jest spełnione tylko dla normalnego zużycia;
- przyjęcie stałego wskaźnika usuwania zanieczyszczeń z układu;
- przyjęcie jednego źródła zanieczyszczeń w układzie (zbiornik) – w prawdziwym układzie jest ich więcej; to praktycznie każda para tribologiczna i uszczelnienie;
- rozpatrywana jest tylko jedna linia układu;
- nie są uwzględniane czynniki związane z właściwościami chemicznymi cieczy i ich dodatkami;
- przyjęte modele dostarczają informację o poziomie kontaminacji w zbiorniku, który reprezentuje cały układ.

Mimo pewnych ograniczeń modele dają pogląd na przebieg zjawisk związanych z kontaminacją cieczy roboczej układu hydraulicznego. Dostarczają wiedzy na temat rozkładu cząstek w układzie i uzyskiwanej koncentracji zanieczyszczeń w zależności od cech konstrukcyjnych poszczególnych elementów (filtry, zbiornik) oraz czasu, w jakim powinna odbywać się kontrola poziomu kontaminacji z uwzględnieniem miejsca poboru próbki.

Model DCC dostarcza natomiast informacji o poziomie kontaminacji w wybranym miejscu układu przez co pozwala na badanie skutków rozmieszczenia filtrów i ich dokładności. Umożliwiła rozwiązanie problemu kontroli kontaminacji układu przy użyciu technik cyfrowych, generując wiedzę o układzie w czasie rzeczywistym. Ponadto daje możliwość stosowania czujników, które zainstalowane w układzie w odpowiednim miejscu będą – w połączeniu z technologią „inteligentnych filtrów” – stanowiły system czynnego monitorowania kontaminacji układu hydraulicznego.

#### 5. WNIOSKI

Cząstki zużycia tribologicznego przemieszczają się w cieczy roboczej występując w całym obiegu - układzie. Analiza próbki pobranej z dostępnego miejsca i ze względu na jego charakter dostarcza informacji diagnostycznej o stanie technicznym układu a zwłaszcza jego węzłów tribologicznych. Do oceny cząstek służą ww. metody, które stosowane są w zależności od przyjętych założeń formy pozyskiwania informacji. Proces diagnozowania zużycia w układzie determinuje krzywa Lorentza.



Informacje diagnostyczne uzyskiwane za pomocą monitorowania cząstek generowanych w układzie przez pary tribologiczne jest zależne od zastosowanych narzędzi pomiarowych i warunków eksploatacji. W zależności od rodzaju zastosowanych metod można uzyskać informację zarówno o ilości jak i jakości uzyskiwanych produktów zużycia i na tej podstawie sądzić o stanie technicznym układu.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Anderson D.P.: *Developments in Analytical Ferrography*. Wear Particles Atlas, Predict Technologies, June 1992.
- [2] Baczewski K.: *Zanieczyszczenia płynów eksploatacyjnych*. Paliwa, Oleje i Smary w eksploatacji nr 33, s. 8-11, Warszawa 1997.
- [3] Bieńczak K., Lewitowicz J., Wolski J.: *System ewidencji, oceny i prognozowania stanu technicznego układów łożyskowania silników lotniczych i pokładowych instalacji hydraulicznych*. 4<sup>th</sup> International Conference Aircraft and Helicopters Diagnostics AIRDIAG '95, Warszawa 1995.
- [4] Borowik S.: *Wprowadzenie do inżynierii kontaminacji cieczy roboczych i precyzyjnych urządzeń płynowych*. Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy czystości lotniczych cieczy roboczych”, s. 23-39, Wrocław 1989.
- [5] Lewitowicz J., Zboiński M.: *Monitorowanie kontaminacji w procesie eksploatacji układów hydraulicznych statków powietrznych*. XIV Konferencja Naukowa Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Zakopane 2001.
- [6] Girtler J.: *Prawdopodobieństwo podjęcia prawidłowej decyzji diagnostycznej jako miara wiarygodności diagnozy*. Wybrane Problemy Eksploatacji Siłowni Okrętowych, Środowiskowe Zebranie Naukowe 25-26 kwietnia 1996 w Szczecinie, Szczecin 1996.
- [7] Borowczyk H., Zboiński M.: *Analiza wybranych modeli kontaminacji cieczy roboczej układu hydraulicznego*. Prace Naukowe ITWL. Zeszyt nr 11 s.5-16, Warszawa 2000.
- [8] Stecki S. J.: *Modeling of contamination control system*. First Annual Workshop on Total Contamination Control, Monash University, Fluid Power Net Publications, s. 117-133, Melbourne 1998.
- [9] Zboiński M.: *Program badań pracy nt.: „Badanie wrażliwości wzmacniaczy hydraulicznych statków powietrznych na produkty zużycia węzłów tribologicznych pkt. 3 harmonogramu - metodyka prowadzenia badań opracowania wyników”* nr bibl. 12642. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa 2000.
- [10] Żółtowski B., Ćwik Z.: *Leksykon diagnostyki technicznej*. Wyd. Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1996.