

Maciej OLEKSIUK  
Przemysłowy Instytut  
Automatyki i Pomiarów PIAP  
Warszawa

## TERMODYNAMICZNE PODEJŚCIE DO WYKRYWANIA STANÓW PRZEDAWARYJNYCH I AWARYJNYCH ZAUTOMATYZOWANYCH URZĄDZEŃ I UKŁADÓW W PROCESACH DYSKRETNYCH

*Przedstawiono możliwości wykorzystania zasady zachowania energii i zasady zachowania masy w celu identyfikacji stanów awaryjnych i przedawaryjnych w zautomatyzowanych urządzeniach i układach w wytwórczych procesach dyskretnych.*

### 1. WSTĘP

Ostatnie lata przynoszą postępujący wzrost automatyzacji pracy. Człowiek coraz powszechniej jest zastępowany w procesie produkcji przez maszyny i zajmuje się raczej kontrolą i planowaniem wytwarzania.

Historycznie rzecz ujmując, pierwszym etapem, trwającym kilka tysiącleci, było zastąpienie narzędziem ręki ludzkiej. Drugim, trwającym kilkaset lat, było mechaniczne zapewnienie odpowiedniej trajektorii ruchu narzędzia lub detalu podczas obróbki. Od kilkudziesięciu lat trwa etap automatyzacji poszczególnych sekwencji produkcji. Proces ten przebiega stopniowo, przez łączenie coraz dłuższych fragmentów procesu w jeden segment. Oczywiście potrzeby rynku powodują konieczność zapewnienia elastyczności przebiegu procesu przez automatyczną zmianę jego parametrów lub całych fragmentów (np. w elastycznych systemach produkcyjnych). Zasadniczy trend pozostaje jednak ten sam - coraz większy fragment wytwórczości przebiega bez udziału człowieka i to niezależnie od tego, czy produkujemy samochody, nawozy czy też transportujemy morzem towary.

Od automatycznego systemu wytwórczego wymaga się przede wszystkim jednego - taniej, bezpieczniejszej i niezawodnej realizacji postawionego zadania technicznego. Pojęcie taniej produkcji to kwestia relacji pomiędzy kosztami produkcji a ceną wyrobu z uwzględnieniem wydajności procesu i dotyczy warunków nominalnej pracy zautomatyzowanego urządzenia lub instalacji. Natomiast zapewnienie bezpiecznej pracy dotyczy zarówno automatycznej pracy urządzenia, jak i stanów awaryjnych i to niezależnie od tego, czy jest to prom kosmiczny czy dolnopluk.

Jedną z najważniejszych cech automatu jest jego zachowanie w stanach awaryjnych, a w szczególności:

- bezpieczeństwo człowieka,
- bezpieczeństwo samego urządzenia,
- bezpieczeństwo urządzeń współpracujących,
- bezpieczeństwo produktów,
- bezpieczeństwo surowców i półfabrykatów (niedopuszczenie do produkcji braków).

Drugą cechą w tym względzie jest częstotliwość występowania awarii lub czas pomiędzy kolejnymi awariami.

W zautomatyzowanych układach i urządzeniach rozróżnia się zwykle co najmniej dwa typy awarii:

1. Awaria wymagająca natychmiastowego zatrzymania urządzenia.
2. Awaria nie wymagająca natychmiastowego zatrzymania urządzenia.

Pierwsza z nich polega na powstaniu takiego stanu, w którym kontynuacja cyklu może spowodować niebezpieczeństwo utraty zdrowia lub życia człowieka a także zniszczenie maszyny lub znaczne straty materialne. Druga występuje wtedy, gdy przerwanie procesu spowoduje większe straty niż jego kontynuacja. Wystąpienie takiego stanu pozwala na dokończenie cyklu produkcyjnego i zatrzymanie maszyny po jego zakończeniu, z powiadomieniem obsługi o przyczynie przerwania procesu.

Kryterium powyższego podziału stanowią więc skutki wykrytej nieprawidłowości a nie jej przyczyny czy miejsce wystąpienia. Wynika to z faktu, że dla użytkownika automatu nie są istotne przyczyny, lecz skutki awarii dla przebiegu całości procesu wytwórczego.

Twórcy automatu, który zastępuje przecież funkcje kontrolne, sprawowane przez człowieka, muszą mieć na uwadze znaczenie niezawodnej pracy zautomatyzowanych urządzeń i układów. Ilość i rodzaj zabezpieczeń zależy od możliwych skutków awarii. Innych zabezpieczeń używa się w przypadku niebezpieczeństwa utraty zdrowia lub życia oraz strat o wielkiej wartości (przerwanie procesu ciągłego w walcowni, zakładach chemicznych itp.), innych w przypadku awarii powodujących ograniczone straty.

## **2. KONTROLA NIEZAWODNEJ PRACY URZĄDZENIA NA PODSTAWIE OCENY STANU PODSTAWOWYCH WĘZŁÓW**

Ocena stanu urządzenia następuje na podstawie stanu czujników. Prawidłowy projekt automatyki wymaga takiego doboru i rozmieszczenia czujników, aby można było wykryć i prawidłowo zinterpretować awaryjny stan obiektu. Często wystarczą do tego celu proste, dwustanowe czujniki indukcyjne, pojemnościowe lub fotoelektryczne. Czasem jednak identyfikacja awarii następuje poważne trudności. Człowiek, mimo swych ograniczeń, ze względu na jednoczesne postrzeganie pięcioma zmysłami oraz zdolności do uczenia się, jest w niektórych przypadkach trudny do zastąpienia.

Oprócz monitorowania obiektu układ sterowania powinien być wyposażony w funkcje samokontroli oraz kontroli oprogramowania. Dalsze rozważania ograniczone zostaną do wykrywania stanów awaryjnych obiektu, ponieważ występują one znacznie częściej od awarii sterowania.

Jednym z przykładów trudności wykrycia awarii jest próba automatyzacji pracy szlifierki szkła. Automatyzację linii takich szlifierek opisano w [2]. Zadaniem maszyny jest precyzyjne oszlifowanie krawędzi złączowej szklanego podzespołu. Szlifowanie odbywa się za pomocą czterech szybko wirujących tarcz szlifierskich, z jednoczesnym obrotem obrabianego detalu, w przestrzeni zamkniętej, przy intensywnym chłodzeniu wodą. Występujące naprężenia własne w szkłe powodują dosyć często pęknięcie szkła w trakcie szlifowania. Dzięki obudowie, rozpryskujące się szkło nie jest groźne dla otoczenia, ale kawałki szkła, odbijające się od osłon, uderzają w wirujące tarcze. Szkło może spowodować ich uszkodzenie na tyle groźne, że nastąpić może uszkodzenie szlifierki spowodowane biciem promieniowym szybko wirujących, nie wyrównoważonych tarcz. Konieczne jest zatrzymanie maszyny natychmiast po pęknięciu szklanego detalu, bez względu na stadium procesu szlifowania.

Niezawodne wykrycie momentu pęknięcia jest niezwykle trudne ze względu na nieprzyjazne środowisko wewnątrz maszyny: bryzgi wody, zawiesiny szkła we mgłę wodnej oraz latające ostre kawałki szkła o dużej energii kinetycznej. Jednym z rozwiązań może być analiza widma hałasu występującego podczas szlifowania - pęknięcie szkła połączone jest z charakterystycznym hukiem, którego parametry można określić i zidentyfikować, analizując rzeczywisty hałas występujący podczas szlifowania. Powyższy przykład pokazuje, że wykrycie awarii wymaga niekiedy subtelnych metod pomiaru oraz przetwarzania danych o stanie maszyny i procesu.

Znacznie trudniejszym zadaniem jest wykrycie stanu przedawaryjnego. Zadanie takie często stawiane jest twórcom urządzeń, których zatrzymanie może być związane z zagrożeniem zdrowia lub życia człowieka, a także wystąpienia strat o wielkiej wartości. Podstawową metodą postępowania w takich przypadkach jest wymiana elementów po określonym okresie pracy, niezależnie od ich faktycznego stanu. Postępowanie takie, choć obiektywnie drogie, jest opłacalne w porównaniu z możliwymi skutkami awarii. Standardowo rozwiązania takie stosowane są w lotnictwie, gdzie podczas rutynowych przeglądów wymieniane są poszczególne elementy po określonym (dla każdego z nich) czasie pracy, z silnikami i poszyciem kadłuba włącznie.

Jako przykład innego podejścia, stosowany też w lotnictwie, jest umieszczenie kolorowego płynu w zaślepionym otworze odpowiedzialnego elementu konstrukcji nośnej. W przypadku wystąpienia mikropęknięć, spowodowanych jego nadmiernym wyężeniem, nastąpi wyciek płynu na zewnątrz, jeszcze przed zniszczeniem elementu.

Powszechnie stosowaną metodą jest także pomiar temperatury łożysk wirnika. W przypadku maszyny walcowniczej metoda ta oznacza rozciągnięcie całej "pajęczyny" przewodów i czujników. Dlatego poszukuje się metod prostej oceny stanu maszyny.

Duże, przestrzenne maszyny i linie produkcyjne wymagają zastosowania całego systemu czujników oraz układu interpretującego ich stany. Powoduje to niekiedy znaczny koszt i podnosi awaryjność instalacji ze względu na jej dalsze komplikowanie. Dlatego może być atrakcyjne stworzenie zagregowanych informacji, wskazujących na możliwość wystąpienia awarii.

### 3. NIEKTÓRE ZASADY ZACHOWANIA ORAZ RÓWNOWAGI JAKO PODSTAWA POSZUKIWANIA ZAGREGOWANYCH WSPÓLCZYNNIKÓW STANU OBIEKTU

Bazą prezentowanej koncepcji są podstawowe zasady fizyki, takie jak:

- zasada zachowania energii,
- zasada zachowania masy.

Każde urządzenie wraz z systemem zasilania oraz odbiorów stanowi obiekt termodynamiczny, w którym zmiany mogą wskazywać na pojawienie się stanów przedawaryjnych.

#### 3.1. Metoda energetyczna

Zgodnie z zasadą zachowania energii bilans energetyczny dowolnego obiektu i procesu odniesiony do warunków otoczenia jest następujący:

$$E_1 = L + E_2 + Q + \delta U + \sum \delta S T_0 \quad (1)$$

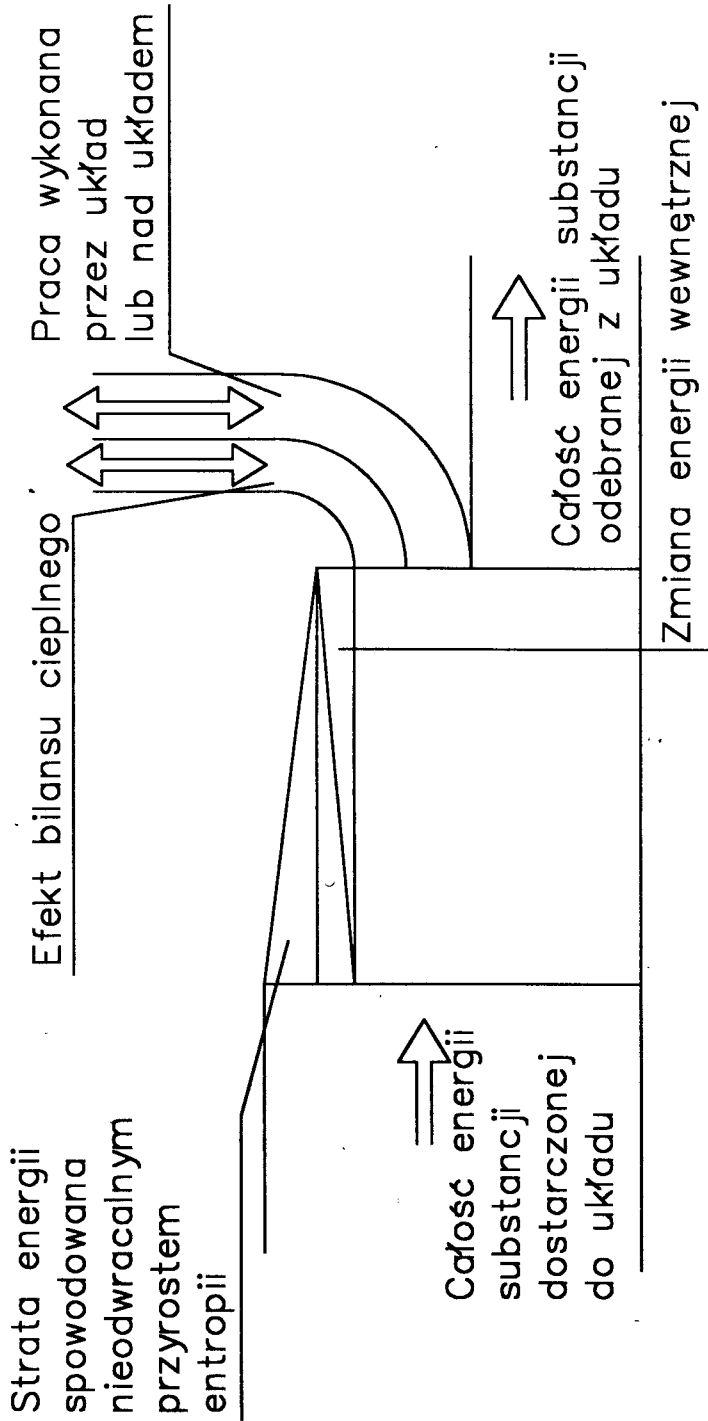
gdzie:

- $E_1$  - całość energii substancji dostarczonej do układu,
- $L$  - praca wykonana przez układ lub nad układem,
- $E_2$  - całość energii substancji odebranej z układu,
- $Q$  - bilans wymiany ciepła z otoczeniem,
- $\delta U$  - przyrost energii wewnętrznej,
- $\sum \delta S T_0$  - strata energii spowodowana nieodwrotnym przyrostem entropii,
- $S$  - entropia,
- $T_0$  - temperatura otoczenia.

Ilustrację graficzną równania (1) przedstawia wykres 1.

W stanach ustalonych, w procesach dyskretnych w stałych warunkach otoczenia, patrząc z punktu widzenia użytkownika - wygodniej jest stosować poniższą zależność:

$$E_1 = E_0 + \sum E_{str}$$



Wykr 1. Bilans energetyczny

gdzie:

- $E_1$  - całość energii substancji dostarczonej do układu,
- $E_u$  - praca użyteczna wraz z energią substancji odebraną z układu,
- $\Sigma E_{str}$  - suma strat energii i ciepła.

Zależność powyższa oznacza, że przy ww. warunkach całość dostarczonej energii przemieniana jest w część użyteczną i straty. W przypadku utrzymywania stałego poziomu odbioru energii użytecznej każda zmiana energii dostarczonej wynika z pojawienia się dodatkowych strat w układzie. Straty takie mogą mieć zarówno charakter dysypacji energii spowodowanej dodatkowym tarcie (wzrostem oporów ruchu, zużycia się elementów współpracujących itp.), zmiany energii wewnętrznej przez straty energii potencjalnej różnych obiektów układu (nieszczelności zbiorników, mas wirujących, napięcia sprężyn), jak i zwiększonej wymiany ciepła z otoczeniem. Wystąpienie każdego z powyższych przypadków spowoduje wzrost strat, czyli wzrost zapotrzebowania na energię dostarczaną do układu. Dokładny pomiar ilości dostarczanej energii stanowi istotny parametr oceny stanu układu. Wzrost zapotrzebowania na energię oznacza występowanie stanów przedawaryjnych, wymagających bliższego przyjrzenia się kluczowym węzłom urządzenia.

Innym wariantem pojawienia się stanu przedawaryjnego, przy energetycznej ocenie stanu urządzenia, jest zmniejszenie się wydajności (prędkości ruchu) przy nie zmienionym poziomie zasilania. Zjawisko to zachodzi najczęściej w efekcie dysypacji energii spowodowanej zużyciem węzłów współpracujących.

Podstawową trudność w praktycznym stosowaniu metody stanowi określenie ilościowej granicy sprawności urządzenia, przy której nastąpić może awaria. Jedyną metodą jest określenie rozplywu energii przez poszczególne węzły konstrukcyjne. Awaria danego węzła nastąpi wówczas, gdy ilość energii przepływająca przez dany węzeł jest większa od jego wytrzymałości energetycznej. Przekroczenie to może dotyczyć zmian cieplnych (przekroczenia temperatury, prądu itp.) jak i zmian naprężeń (czyli energii własnej, odniesionej do jednostki objętości).

W przypadku dużej liczby równolegle podłączonych odbiorników energii metoda ta może być nieefektywna, gdyż nawet znaczny wzrost strat w jednym węźle, powodujący jego uszkodzenie, może nie zostać "zauważony". W przypadku, gdy mamy do czynienia z szeregowym układem odbiorników, metoda ta może być niezwykle przydatna.

Ilustrację powyższego przedstawiono na wykresie 2. Zaprezentowano tam rozplyw energii w manipulatorze o pięciu osiach roboczych napędzanych niezależnie. Założono:

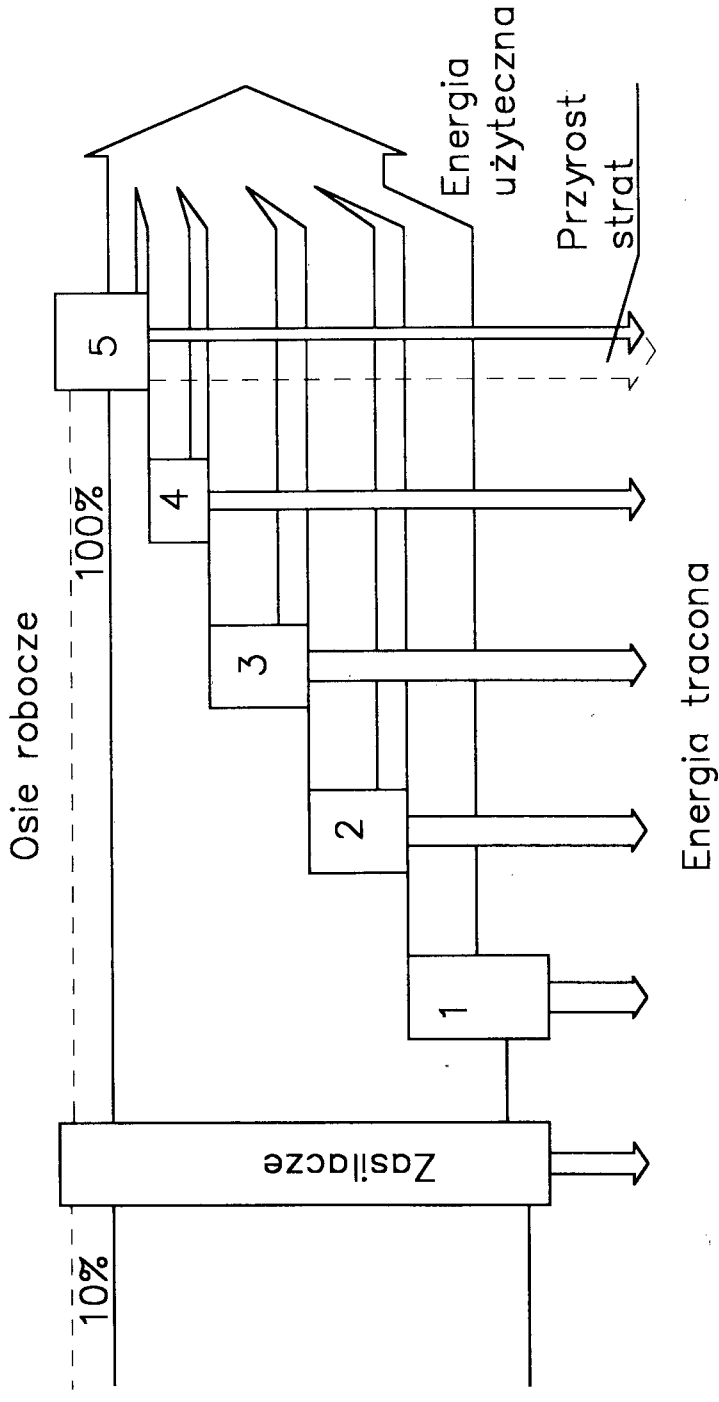
a) podział energii na poszczególne osie:

- 1. 25%,      2. 25%,      3. 25%,      4. 15%,      5. 10%;

b) całkowitą sprawność każdej z osi obejmującą sprawność napędu, przekładni mechanicznych, mechanizmów itp 70%;

c) sprawność zasilaczy 95%;

d) współczynnik bezpieczeństwa każdego węzła 200%.



Wykr 2. Przykładowy rozpyw energii w manipulatorze o pięciu osiach roboczych

Jako przykład rozpatrzeć można pojawienie się nadmiernego zużycia osi 5. przy wyższych założeniach. Zużycie to powoduje pojawienie się dodatkowych strat i wzrost zapotrzebowania na dodatkową energię przy wykonywaniu tej samej pracy użytecznej. W momencie przekraczania współczynnika bezpieczeństwa (dwukrotny wzrost energii w osi 5., równoznaczny z powstaniem awarii) zapotrzebowanie na energię całego układu wzrośnie jedynie o 10%. W celu zapewnienia prawidłowej diagnozy, nie dopuszczającej do pojawienia się stanu awaryjnego, należałoby założyć, że zapotrzebowanie na energię całego manipulatora nie może wzrosnąć o więcej niż 10%. Wobec zmiennych zwykle warunków otoczenia zmiana zasilania o 10% może nastąpić z różnych przyczyn, niekoniecznie związanych z niebezpieczeństwem awarii, np. może być wynikiem wysumowania się niewielkich zmian we wszystkich osiach. Dlatego, przy równoległym umieszczeniu odbiorników, metoda ta może nie być użyteczna w diagnostyce. Przy analizie zapotrzebowania każdej z osi (szeregowe rozmieszczenie przetworników energii) wystąpienie awarii oznacza wzrost zapotrzebowania na energię aż o 100 %, co jest łatwe do identyfikacji.

### 3.2. Metoda zachowania ilości masy

Metoda ta stanowi szczególny przypadek wyżej opisanej metody energetycznej i odnosi się do fragmentu urządzenia. Wykorzystano ją w praktyce do kontroli stanu stanowisk badawczych opisanych w [1].

Kontrola szczelności rozbudowanej instalacji hydraulicznej, bez udziału człowieka, jest łatwa w przypadku zastosowania zasady zachowania masy. Istotą metody jest pomiar poziomu oleju w zbiorniku. Na zmiany poziomu oleju wpływ mają:

- praca cylindrów tłoczyskowych,
- zmiana temperatury,
- parowanie medium,
- odpowietrzanie/zapowietrzanie medium,
- przeciek zewnętrzny.

Praca cylindrów tłoczyskowych nie zmienia ilości oleju w układzie, ale ma wpływ na poziom oleju w zbiorniku. W momencie zasysania oleju do komór beztłoczyskowych poziom spada o wartość  $\Delta h$ , zgodnie z zależnością:

$$\Delta h = \pi \sum d_i^2 [H_i/2 - x_i(\tau)]/4ab$$

gdzie

- $d_i$  - średnica tłoczyska i-tego silownika,
- $H_i$  - skok nominalny i-tego silownika,
- $x_i$  - bieżące położenie tłoka i-tego silownika,
- $ab$  - pole powierzchni zbiornika.

Powyższa zależność wynika z równowagi statycznej i nie uwzględnia dynamicznych zmian, a w szczególności falowania oleju. W przypadku niewielkiej objętości zbiornika,



w stosunku do objętości komór roboczych silowników i równoczesnej pracy wszystkich silowników, falowania te mogą być znaczne. O ile w trakcie cyklu roboczego następuje wyraźna powtarzalność, można to wykorzystać i kontrolować poziom oleju jedynie w określonym momencie cyklu. Jeżeli nie udaje się znaleźć takiego momentu, należy falowanie to zmniejszyć. Stosuje się tu dwa zasadnicze rozwiązania:

- podział zbiornika na komory o ograniczonej możliwości mieszania się oleju,
- pomiar poziomu w naczyniu połączonym ze zbiornikiem przez element dławiący, powodujący przesunięcie fazowe bliskie  $180^\circ$ , co znacznie wystabilizuje drgania.

Zmiana temperatury i parowanie medium mają pomijalnie mały wpływ na zmianę poziomu medium i tylko w szczególnych przypadkach należy je uwzględnić. Natomiast zapowietrzenie i parowanie mogą mieć istotny wpływ na objętość medium w niektórych, zwłaszcza nieprawidłowo zaprojektowanych instalacjach hydraulicznych.

Pozostałe zmiany poziomu wynikają z pojawienia się przecieku zewnętrznego. Doświadczenie wielu prób długotrwałych, realizowanych w praktyce laboratoryjnej wykazało, że pozostawienie instalacji bez dozoru człowieka, z układem kontrolującym poziom oleju w zbiorniku w pełni zabezpiecza instalację przed pracą z niebezpiecznym przeciekami zewnętrznym.

#### 4. ZAKOŃCZENIE

pozytywne doświadczenia ze stosowania kontroli stanu układu na podstawie aktualnego poziomu oleju wskazują na przydatność prezentowanych metod do identyfikacji awarii. Ich wdrożenie pozwoliło też na oszczędności polegające na wyeliminowaniu całego zestawu drogich czujników. Oczywiście, przedstawione wyżej termodynamiczne metody kontroli stanu układu mają pewne ograniczenia i nie zapewnią identyfikacji przyczyny awarii w wszystkich przypadkach. Przy zastosowaniu wielu odbiorników energii, pracujących równolegle, należy obserwować każdy z nich niezależnie. Nie jest to konieczne, jeżeli cykle pracy tych odbiorników nie pokrywają się. Jeżeli okresy samodzielnej pracy każdego z odbiorników są na tyle długie, iż można przyjąć, że ustalą się w tym czasie warunki pracy, możliwa jest identyfikacja stanu przedawaryjnego każdego z tych odbiorników.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Oleksiuk M.: Stanowiska do badania pomp i silników hydraulicznych. Biuletyn PIAP 6/80, s. 21.
- [2] Oleksiuk M.: Automatyczny przenośnik szklanych stożków. Biuletyn PIAP 5/95 s. 37-49.