

**Norbert ADAMKIEWICZ, Dariusz ZMARZŁY**POLITECHNIKA OPOLSKA,  
ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole**Analiza czasu działania pomp w wybranej sieci kanalizacji sanitarnej****Mgr inż. Norbert ADAMKIEWICZ**

Absolwent Politechniki Wrocławskiej, Wydziału Inżynierii Środowiska. Prowadzi prace badawcze z wykorzystaniem innowacyjnych metod diagnostycznych w zakresie analizy pracy, efektywności i optymalizacji systemów kanalizacji bytowo-gospodarczej, przemysłowej i deszczowej, a także w zakresie identyfikacji nieprawidłowości w funkcjonowaniu systemów wodociągowych. Autor kilkudziesięciu opracowań inżynierskich w zakresie inżynierii lądowej i gospodarki wodnościekowej.

e-mail: [norbert.adamkiewicz@gmail.com](mailto:norbert.adamkiewicz@gmail.com)**Dr hab. inż. Dariusz ZMARZŁY**

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Opolskiej. Stopnie doktora nauk technicznych oraz doktora habilitowanego uzyskał na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Zajmuje się zagadnieniami diagnostyki urządzeń elektroenergetycznych. Jest autorem ponad 200 publikacji. Jest stypendystą Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, laureatem nagrody Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Wybitnych Młodych Naukowców, laureatem nagrody badawczej Siemens.

e-mail: [d.zmarzly@gmail.com](mailto:d.zmarzly@gmail.com)**Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki analizy czasów działania pomp wykorzystywanych do pompowania ścieków w oczyszczalni ścieków. Wybrano kilka przykładowych tygodniowych przebiegów czasowych. Następnie wyznaczono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa oraz dystrybuanty. Rozkłady gęstości prawdopodobieństwa dopasowano do kilku standardowych funkcji asymetrycznych prawoskośnych. Stwierdzono, że najbardziej optymalny jest rozkład log-logistyczny Fiska. W większości przypadków uzyskiwał on najlepsze rezultaty dopasowania.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka pomp, sieć kanalizacyjna, kanalizacja sanitarna.

**Analysis of the pump working time in a selected sewerage system****Abstract**

The proper functioning of a sewage treatment system requires continuous monitoring of a number of elements that make up this system and rapid response in the case of emergency. The paper presents the analysis results of the pump working time. These pumps are used for pumping sewage in a sewerage system. A typical sewage pump station is described and shown in Fig. 1. Fig. 2 presents the block diagram of the measuring system. The measurement results for three cases of the typical pump working time are given in Section 3. In particular, these were the cases of normal, trouble-free operation and two cases of malfunctioning of various kinds. Then the probability density distributions were determined on the basis of the measurement data. Additionally, cumulative distributions for each pump in the all three situations were calculated. The probability density distributions were fitted to a few standard asymmetrical right-skewed function: Gaussian, gamma, Weibull, log-normal and Fisk one. It was found that the best fit is the log-logistic function (Fisk distribution). For this distribution there were obtained the best results in most signal representations. The obtained models can be used in the diagnostic systems of a pump in a sewerage network. For example, diagnostics can be accomplished through use of the threshold or fuzzy decision rules. These rules should take into account the characteristic values determined on the basis of a specific process model for a certain period of time, prior to a measurement.

**Keywords:** pump diagnostics, sewerage system, sewerage network.

**1. Wprowadzenie**

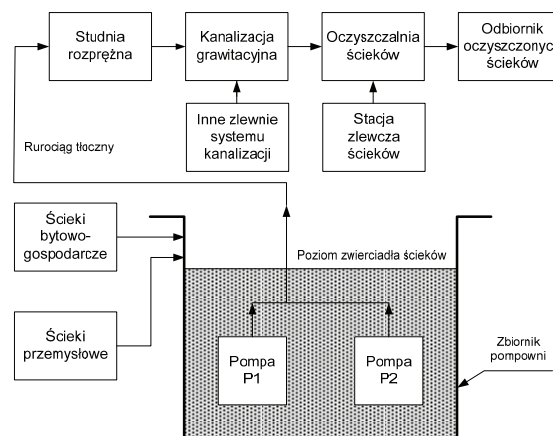
Prawidłowe funkcjonowanie systemu oczyszczania ścieków wymaga ciągłego monitorowania stanu szeregu elementów składających się na ten system oraz szybkiej reakcji w przypadku awarii. W latach ubiegłych znacząco przybywa cyfrowych systemów kontroli w układach dostarczania wody [1, 2] oraz odprowadzania ścieków. Współcześnie tworzona infrastruktura kanalizacji sanitarnej zawiera podstawowe elementy kontroli, sterowania i diagnostyki takie jak czujniki inteligentne, sterowniki PLC [3], układy komunikacji. Sposoby sterowania oraz diagnostyki są na obecnym etapie w fazie badań, są jednak systematycznie wdrażane do pracy w warunkach rzeczywistych [4, 5, 6, 7]. Badania przedstawione

w artykule mają na celu rozwój metod diagnostycznych w przepompowniach ścieków.

Pompownie kanalizacyjne należą do systemów, które pracują z reguły w sposób ciągły. Obciążenie systemu zależy od bardzo wielu czynników, z których część ma charakter stały lub wolno-zmienny np. rozmiaru sieci, ilość podłączonych użytkowników, parametrów zmiennych okresowo, np. pory dnia, pory roku, występowania dni świątecznych, prace ogrodowe oraz od czynników o stochastycznym rozkładzie występowania np. losowe skoki temperatury, susza, powódź, wycieki.

Prawidłowa diagnostyka funkcjonowania systemu wymaga dokonania analizy działania poszczególnych składowych systemu.

Podstawowym elementem systemu oczyszczania ścieków jest pompownia. Na rysunku 1 przedstawiono schemat typowej pompowni z pompami zatapialnymi zabudowanej na kanalizacji bytowo-gospodarczej.



Rys. 1. Schemat pompowni

Fig. 1. Schematic diagram of a sewerage pump station

Ścieki bytowo-gospodarcze i przemysłowe pochodzące z aglomeracji miejskich gromadzone są w zbiorniku podziemnym. Następnie za pomocą pomp zatapialnych tłoczone są przewodem tłocznym do studni rozprężnej i dalej do kanalizacji grawitacyjnej. Ostatecznie ścieki trafiają do oczyszczalni ścieków, gdzie są oczyszczane i odprowadzane do odbiornika, na przykład rzeki.

**2. Obiekt pomiarowy**

W niniejszym artykule skupiono się na analizie czasów działania pomp w jednej z polskich spółek wodno-kanalizacyjnych. Kanalizacja jest rozwiązana jako układ grawitacyjno-tłoczny. Łączna długość przewodów kanalizacyjnych wynosi ok. 250 km. Z większości zlewni istniejących na terenie obsługiwanym przez system, ścieki odprowadzane są bezpośrednio do miejskiej

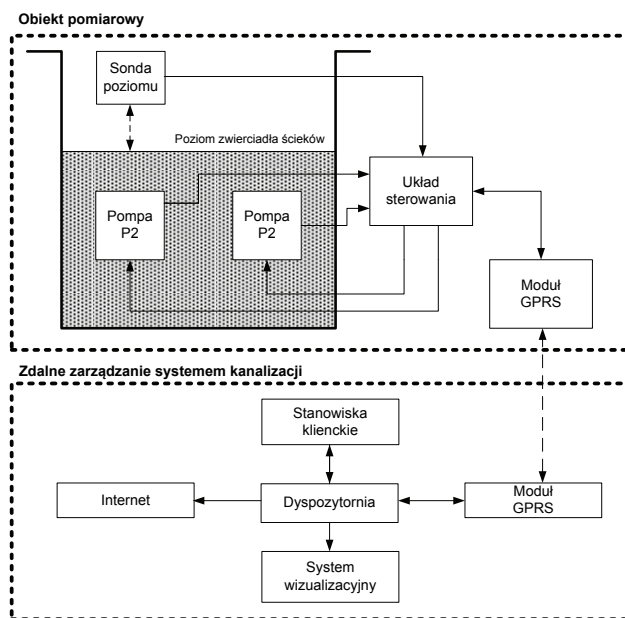
oczyszczalni ścieków. Sieć wodno-kanalizacyjna jest średniej wielkości. Zaopatruje w wodę ok. 60000 mieszkańców.

Przedmiotem analizy są dwie pompy tłoczne o mocy 10 kW każda. Pompy pracują w sposób naprzemienny. Cykl działania układu sterowania polega na przełączaniu kolejnej pompy po przekroczeniu krytycznego poziomu ścieków.

### 3. Układ pomiarowy

Pomiary wykonano przy użyciu dostępnego systemu pomiarowego zainstalowanego w pompowni ścieków. Uproszczony schemat blokowy przedstawiono na rysunku 2.

Podstawowymi elementami systemu są obiekt pomiarowy oraz zdalny system zarządzania. W obiekcie pomiarowym mierzony jest poziom zwierciadła ścieków przy użyciu sondy ultradźwiękowej. Sygnał ten jest przekazywany do układu sterowania. Układ ten na podstawie wysokości zwierciadła steruje załączaniem oraz wyłączaniem poszczególnych pomp. Sygnałem zwrotnym z pomp jest stan czujników informujących o prawidłowym funkcjonowaniu pompy.



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego  
Fig. 2. Block diagram of the measuring system

Sygnały o stanie pracy obiektu są przekazywane do zdalnego systemu zarządzania przy użyciu sieci GPRS. Dane są wizualizowane na monitorach w dyspozytorni, na stanowiskach klienckich oraz publikowane w sieci internet. W niniejszym artykule w analizie nie uwzględniano poziomu zwierciadła ścieków. Badano wyłącznie czasy pracy poszczególnych pomp.

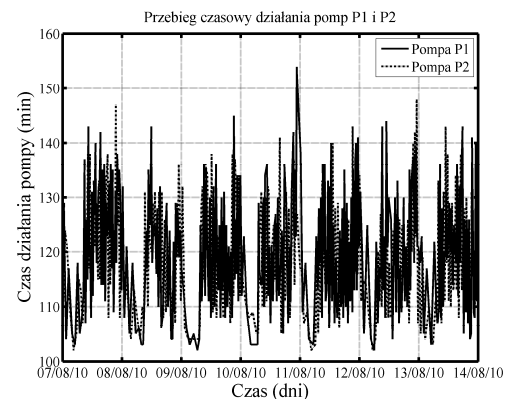
### 4. Wyniki pomiarów

Pomiar polegał na wyznaczeniu różnicy czasów między włączeniami danej pompy. Pompy powinny włączać się naprzemiennie. Czas między przełączeniami powinien być zbliżony. Znaczące odchyłki od normy mogą wskazywać na awarię np. uszkodzenie pompy lub sondy poziomu, który wpływała na działanie układu sterującego.

Pomiary testowe wykonywano przez trzy miesiące w okresie lipiec-wrzesień 2010 r. Częstotliwość próbkowania wynosiła 1/60 s (pomiar co 1 minutę). W ciągu jednego dnia wykonywano 1440 pomiary dla każdej z pomp. Do analizy wykorzystano okres 7 dni tzn. 10080 pomiarów w każdym przypadku. W tym czasie wystąpiło kilka sytuacji ostrzegawczych oraz awaryjnych.

Do analizy wybrano trzy charakterystyczne reprezentacje procesu ilustrujące różne cechy mierzonego sygnału.

Na rysunkach 3 i 7 przedstawiono wyniki pomiarów w okresie, w którym nie wystąpiły anomalie w działaniu pompowni ścieków. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg czasowy czasów działania pomp. Występuje charakterystyczna okresowość dobowa. Najkrótszy czas działania występuje w okresach nocnych. Rysunki 4 i 5 przedstawiają rozkłady gęstości prawdopodobieństwa. Do aproksymacji rozkładów użyto kilka typowych funkcji asymetrycznych prawoskośnych. Współczynnik determinacji jest wyższy dla modeli wyznaczonych dla pompy P2 (rzędu 0,8) w porównaniu z modelami dla pompy P1 (od 0,6 do 0,7).



Rys. 3. Przebieg czasowy czasów działania pomp P1 i P2 podczas normalnej, bezawaryjnej pracy

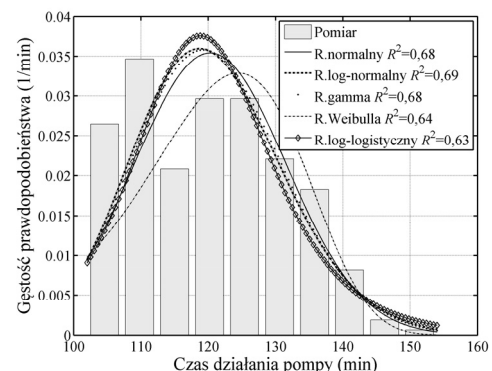
Fig. 3. Working time of pump P1 and P2 during normal, trouble-free operation

Na rysunku 6 przedstawiono skumulowane rozkłady gęstości prawdopodobieństwa dla obu pomp. Użyto w tym przypadku modelu log-logistycznego (Fiska), z gęstością prawdopodobieństwa:

$$f(x) = \frac{ax^{a-1}}{b^a \left[1 + (x/b)^a\right]^2}, (x > 0), \quad (1)$$

gdzie  $a$  i  $b$  są parametrami. Dystrybucja rozkładu log-logistycznego ma postać:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{x}{b}\right)^a\right]^{-1}, (x > 0), \quad (2)$$

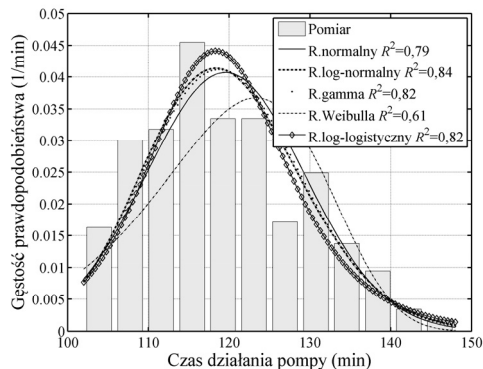


Rys. 4. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa czasu działania pompy P1 wraz z typowymi asymetrycznymi modelami rozkładu

Fig. 4. Probability density function of pump P1 working time with a few common asymmetric fits to data

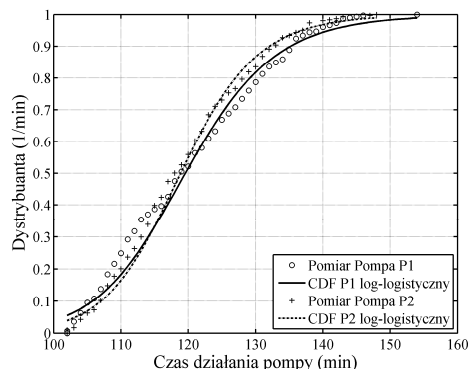
Użyto tego rozkładu pomimo, że dla bezawaryjnego czasu pracy, uzyskano nieznacznie lepszy współczynnik dopasowania dla rozkład log-normalnego. Z kolei w sytuacjach, w których występowały nieprawidłowości rozkład log-logistyczny był lepiej dopa-

sowane (rys. 8, rys. 9, rys. 12, rys. 13). Dystrybuanty nie wskazują na występowanie istotnych różnic pomiędzy pracą obu pomp.



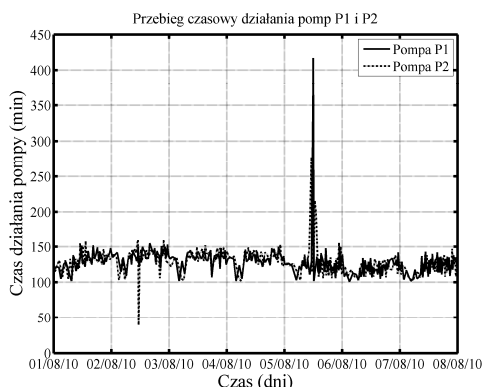
Rys. 5. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa czasu działania pompy P2 wraz z typowymi asymetrycznymi modelami rozkładu

Fig. 5. Probability density function of pump P2 working time with a few common asymmetric fits to data



Rys. 6. Dystrybuanty rozkładu czasu działania pomp P1 i P2

Fig. 6. Cumulative distributions of P1 and P2 pump working times



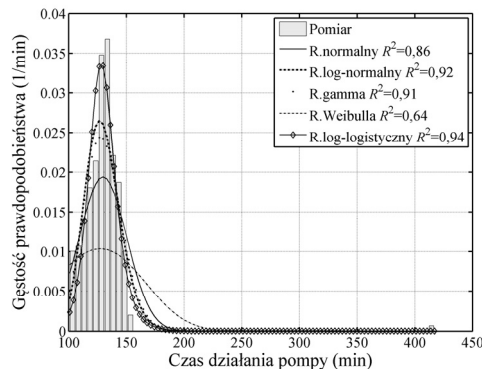
Rys. 7. Przebieg czasowy działania pomp P1 i P2 z krótkotrwałą awarią

Fig. 7. Working time of pump P1 and P2 with the observed short-term failure

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki pomiarów w pierwszym tygodniu sierpnia 2010 roku. Charakterystyczne jest, że w tym czasie wystąpiła sytuacja awaryjna polegająca na tym, że czas działania obu pomp znacznie przekraczał średni czas pracy w poprzednim okresie. Zbyt długi czas działania pomp mógł być efektem zwiększonego niekontrolowanego napływu ścieków lub awarią automatyki sterującej poziomem – w szczególności awarii sondy wysokości zwierciadła ścieków.

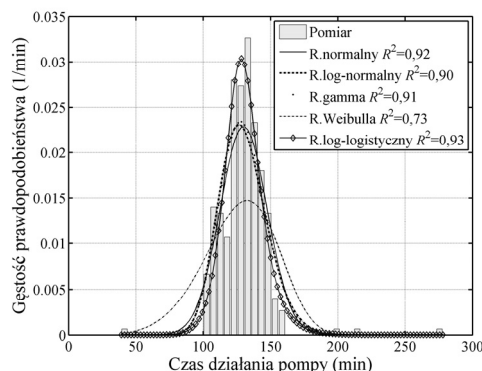
Na rysunkach 8 oraz 9 przedstawiono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa czasów działania odpowiednio pompy 1 i 2 wraz

z aproksymacjami. W tym przypadku najlepsze dopasowanie uzyskał rozkład log-logistyczny.



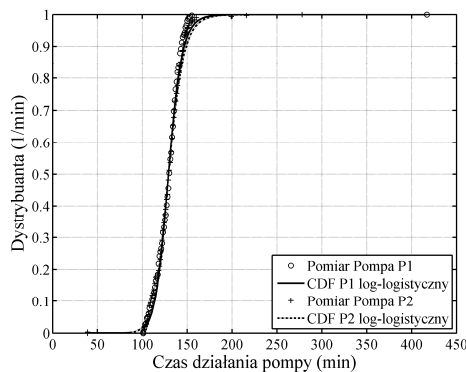
Rys. 8. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa czasu działania pompy P1

Fig. 8. Probability density function of pump P1 working time



Rys. 9. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa czasu działania pompy P2

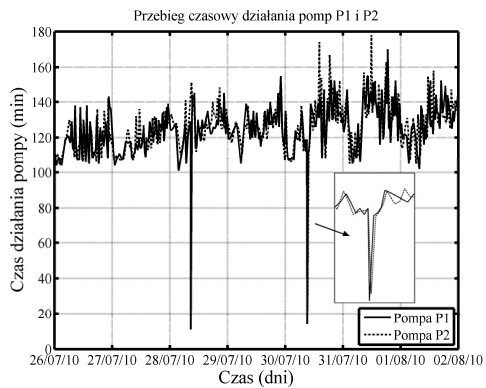
Fig. 9. Probability density function of pump P2 working time



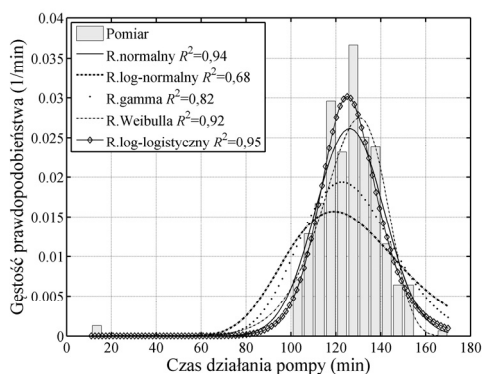
Rys. 10. Dystrybuanty rozkładu czasu działania pomp P1 i P2

Fig. 10. Cumulative distributions of P1 and P2 pump working time

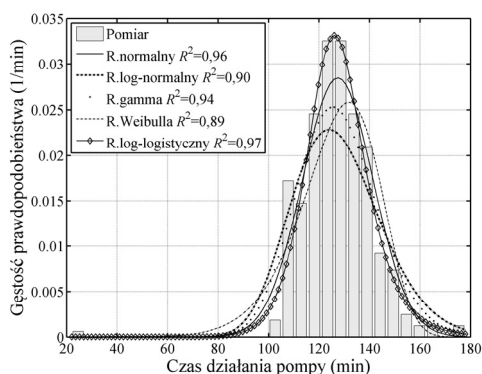
Na rysunku 11 przedstawiono inny typowy przypadek przebiegu czasowego działania pomp P1 i P2. W szczególności wystąpiło zatrzymanie pompy P1. Mogło to być spowodowane chwilowym brakiem zrzuć ścieków lub sytuacją awaryjną wymuszającą częściowe wyłączenie systemu kanalizacji sanitarnej obejmującego badaną pompownię. Inną przyczyną mogą być również: awaria sondy hydrostatycznej lub chwilowy brak zasilania. Dwa dni później wystąpił podobny przypadek. Tym razem obie pompy mają czas działania znacznie krótszy od standardowego. Również w tym przypadku przyczyną mogły być awaria zasilania lub układu sterującego.



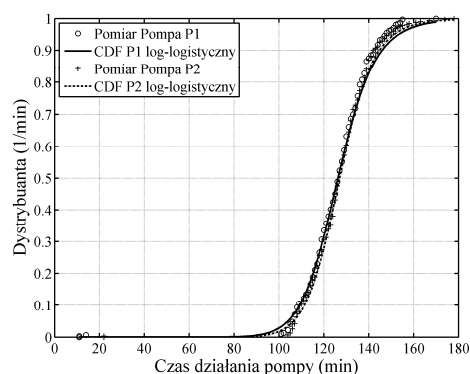
Rys. 11. Przebieg czasów działania pomp P1 i P2 z krótkotrwałą awarią  
Fig. 11. Working time of pump P1 and P2 with observed short-term failures



Rys. 12. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa czasu działania pompy P1  
Fig. 12. Probability density function of pump P1 working time



Rys. 13. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa czasu działania pompy P2  
Fig. 13. Probability density function of pump P2 working time



Rys. 14. Dystrybuanty rozkładu czasu działania pomp P1 i P2  
Fig. 14. Cumulative distributions of pump P1 and P2 working time

Podobnie jak dla poprzedniej awarii, funkcje gęstości prawdopodobieństwa dokładniej modeluje funkcja log-logistyczna (rys. 12 oraz rys. 13). W przypadku pompy P1 współczynnik determinacji wynosił 0,97, z kolei w przypadku pompy P2 wynosił 0,95. Jest to bardzo wysoki współczynnik dopasowania. Przebiegi dystrybuant wykazują również stosunkowo dużą zgodność (rys. 14).

## 5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych rezultatów stwierdzono, że do modelowania czasu pracy pomp w pompowni ścieków można wykorzystać model log-logistyczny. Model ten sprawdza się zarówno podczas poprawnej pracy jak i podczas występowania krótkotrwałych sytuacji awaryjnych. Jest stosunkowo prosty i zawiera dwa parametry. Może zostać wykorzystany do automatycznego wykrywania nieprawidłowości w pracy pomp w oczyszczalniach ścieków. Wadą modelu log-logistycznego jest to, że parametry uzyskane z dopasowania nie odzwierciedlają wprost fizycznych cech rozkładu prawdopodobieństwa. Z tego punktu widzenia lepszy jest model normalny, w którym parametry odwzorowują wartość średnią oraz odchylenie standardowe. W każdym przypadku parametry można wykorzystać bezpośrednio w diagnostyce. W najprostszym przypadku system diagnostyczny można zrealizować poprzez ciągłe wyznaczanie rozkładu z ostatniego przedziału czasowego np. tygodnia, na podstawie którego wyznaczany jest model. Reguły decyzyjne mogą mieć następującą postać progową: Jeśli bieżąca wartość czasu działania pompy P1 mieści się w przedziale 99% wartości rozkładu modelowego to stan pracy danej pompy można uznać za normalny. Jeśli wartość funkcji dystrybuanty dla wartości pomiarowej przekracza 0,99 to czas jest zbyt długi w porównaniu z czasem normalnym w ostatnim przedziale czasowym. Odpowiednio jeśli jest mniejszy niż 0,01 to jest to zbyt krótki czas w porównaniu z typowym. Oczywiście wartości progowe mogą stanowić parametr czułości detekcji awarii (nieprawidłowej pracy) danej pompy. Istnieje również możliwość opracowania rozmytej reguły decyzyjnej.

## 6. Literatura

- [1] Borkowski D., Wetula A., Bień A.: Design, optimization, and deployment of a waterworks pumping station control system. *ISA Transactions* 51, Vol. 51, s. 539-549, 2012.
- [2] Ahonen T., Tamminen J., Ahola J., Vilhola J., Aranto N., Kestila J.: Estimation of pump operational state with model-based methods. *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, s. 1319-1325, 2010.
- [3] Johansson J., Intelligent drives on the rise again. *World Pumps*, Is. 10, s. 40-42, 2009.
- [4] Seleik I., Bene J.G., Hos C.: Optimal (short-term) pump scheduling detection for water distribution systems by neutral evolutionary search. *Applied Soft Computing*, Vol. 12, s. 2336-2351, 2012.
- [5] Wang J.Y., Chang T.P., Chen J.S.: An enhanced algorithm for b-objective pump scheduling in water supply. *Expert Systems and Applications*, Vol. 36, s. 10249-10259, 2009.
- [6] Rajakarunakaran S., Venkumar P., Devaraj D., Surya Prakasa Rao K., Artificial neural network approach for fault detection in rotary system, *Applied Soft Computing*, Vol. 8, pp. 740-748, 2008.
- [7] Zmarzły M., Zmarzły D., Szmechta M.: Data analysis and processing algorithms in efficiency coefficient optimization system of inverter driven water-supply pump-set, *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 16, No. 4A, s. 405-408, 2007.

otrzymano / received: 08.10.2012

przyjęto do druku / accepted: 03.12.2012

artykuł recenzowany / revised paper