

**Radosław CECHOWICZ**

**Paweł STĄCZEK**

Wydział Mechaniczny  
Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36, 20–816 Lublin  
e-mail: wm.ka@pollub.pl

## **KOMPUTEROWY SYSTEM NADZOROWANIA ZESPOŁU SPRĘŻAREK PRACUJĄCYCH W UKŁADZIE RÓWNOLEGLYM**

**Słowa kluczowe:** nadzorowanie, diagnostyka, eksploatacja sprężarek, statystyczne sterowanie procesem

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono własne, wdrożone rozwiązanie problemu automatyzacji sterowania i nadzorowania procesu wytwarzania sprężonego powietrza na potrzeby średniej wielkości systemu produkcyjnego. Opracowane rozwiązanie jest zgodne z podejściem Condition-Based Maintenance. Jego istotą było zintegrowanie funkcji sterowania bezpośredniego oraz nadzorowania przebiegu procesu w celu zapewnienia możliwie najlepszych warunków pracy maszyn i wydłużenia przez to okresu ich eksploatacji. Wdrożenie opisanego rozwiązania pozwoliło na: wyeliminowanie konieczności przebywania ludzi w środowisku o bardzo dużym poziomie hałasu, poprawę jakości procesu poprzez ustabilizowanie przebiegu jego podstawowych charakterystyk (zmiennych), zautomatyzowanie procedur obsługi sytuacji awaryjnych, zwiększenie niezawodności maszyn poprzez ich racjonalne wykorzystanie i zapewnienie prawidłowych warunków pracy, oraz dokumentowanie przebiegu procesu. Uwolnienie operatora od zadań sterowania i wyposażenie go w narzędzia wspomagające diagnostykę procesu spowodowały, że był on w stanie wcześniej wykryć zagrożenia dla przebiegu procesu (potencjalne awarie) i podjąć stosowne działania zaradcze.

### **1. Wstęp**

W artykule opisano system sterowania i nadzorowania pracy zespołu sprężarek realizujący ideę Condition-Based Maintenance (CBM), tj. podejmowania działań konserwacyjnych i naprawczych wtedy, gdy na taką potrzebę wskazuje stan maszyny, a nie narzucony z góry harmonogram. Idea CBM cieszy się rosnącą popularnością o czym świadczą prace [6] i [8] gdzie dokonano podsumowania stosowanych rozwiązań i metod diagnostycznych.

Aby prawidłowo wdrożyć strategię CBM należy uwzględnić trzy elementy: akwizycję danych zawierających informację o stanie monitorowanego urządzenia, przetwarzanie uzyskanej informacji, oraz mechanizm podejmowania decyzji. W systemach CBM niezbędna jest precyzyjna diagnoza stanu obserwowanego urządzenia gdyż to na jej podstawie podejmowane są decyzje o podjęciu działań konserwacyjnych (serwisowych) i naprawczych [11].

Potencjalne korzyści wynikające z zaimplementowania podejścia CBM są dwojakie: po pierwsze czynności serwisowe wykonywane są wtedy, gdy faktycznie występuje taka potrzeba (nie wymienia się dobrych podzespołów tylko z powodu zakończenia kolejnego okresu serwisowego), po drugie: wyeliminowane zostaje niebezpieczeństwo awarii maszyny z powodu przedwczesnego zużycia się części podlegających okresowej (planowej) wymianie. Prawidłowo zaimplementowany system CBM pozwala więc ograniczyć koszty serwisu maszyn

oraz zwiększyć wydajność systemu wytwórczego poprzez wyeliminowanie przestojów związanych z awariami urządzeń.

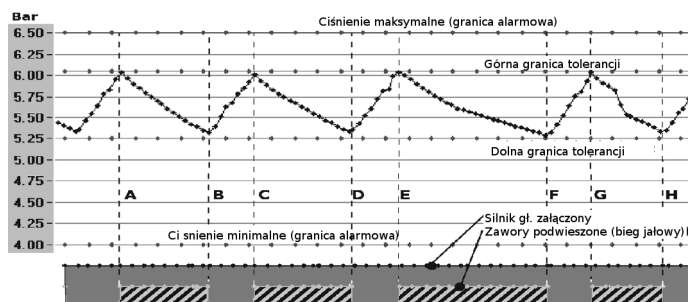
Jedną z metod monitorowania poprawności przebiegu procesu, która może być wykorzystana w strategii CBM, jest zastosowanie kart kontrolnych będących elementem szerszej strategii statystycznego sterowania procesem (SPC). Zadaniem kart jest wykrywanie i sygnalizowanie odstępstw od naturalnej zmienności procesu (wybranych charakterystyk jakości). Takie podejście wykorzystane zostało na przykład w pracy [5]. Karty kontrolne zaproponowane przez Shewharta [10] zastosowane były po raz pierwszy w przemyśle motoryzacyjnym do oceny jakości wyrobów w partii produkcyjnej.

Układ wytwarzania sprężonego powietrza, dla którego opracowano opisane rozwiązanie, składał się z czterech sprężarek tłokowych pracujących w układzie równoległym, zasilających zakładową sieć dystrybucyjną. Do sieci dystrybucji sprężonego powietrza podłączone były odbiorniki o różnym przeznaczeniu, posiadające różne charakterystyki zapotrzebowania (urządzenia przeładunkowe, transportowe, pomocnicze, narzędzia ręczne). Zapotrzebowanie na powietrze w czasie pracy systemu wytwórczego charakteryzowało się dużą zmiennością. Z tych względów, opracowanie statycznego planu pracy sprężarek było zadaniem trudnym. Proces musiał być sterowany i nadzorowany w sposób ciągły przez operatora, który posiadając dostęp jedynie do bieżących wskazań urządzeń pomiarowych, musiał podejmować decyzje o załączeniu lub wyłączeniu sprężarek i przeprowadzać czynności serwisowe według opracowanego planu. Ze względu na czasochłonność wykonywanych operacji oraz licznosc punktów pomiarowych, ocena stanu technicznego sprężarek odbywała się okresowo, kilka razy w ciągu doby. Maszyny mogły więc czasowo pracować w niekorzystnych warunkach (np. przeciążenia) co było jedną z przyczyn awarii i przestojów sprężarek. To z kolei prowadziło do zakłóceń pracy urządzeń technologicznych podłączonych do sieci dystrybucyjnej.

Aby zaradzić tej sytuacji, podjęto decyzję o zautomatyzowaniu sterowania oraz diagnozowania procesu wytwarzania sprężonego powietrza. Dodatkowymi przesłankami do automatyzacji procesu były: konieczność poprawy warunków pracy operatora, konieczność ustabilizowania ciśnienia w sieci sprężonego powietrza, wymóg automatycznego dokumentowania przebiegu procesów w systemie wytwórczym [9].

## 2. Sterowanie zespołem sprężarek

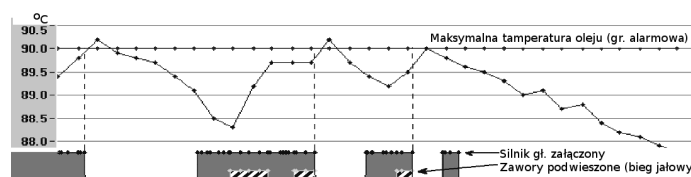
Opracowano i wdrożono system automatycznego sterowania i nadzorowania pracy zespołu sprężarek. Wartości podstawowych zmiennych procesu były monitorowane w sposób ciągły a algorytmy sterowania gwarantowały zachowanie prawidłowych warunków pracy każdej z maszyn oraz pozwalały na uzyskanie równomiernego obciążenia wszystkich sprężarek. Szczegółowy opis algorytmów sterowania indywidualnymi maszynami oraz całym zespołem sprężarek opisano w pracach [2] i [3].



Rys. 1. Przebiegi czasowe ciśnienia w sieci oraz stanu sprężarki przy małym zapotrzebowaniu na sprężone powietrze

Na rys.1 przedstawiono zarejestrowany przebieg ciśnienia w sieci dystrybucyjnej w czasie gdy występowało małe zapotrzebowanie na sprężone powietrze. Aby zaspokoić zapotrzebowanie wystarczyła praca jednej sprężarki. Silnik sprężarki tłokowej pracował przez cały czas, natomiast powietrze było tłoczone tylko w wybranych okresach B-C, D-E i F-G. W pozostałym czasie pracy (przedziały A-B, C-D, E-F i G-H) zawory dolotowe sprężarki były celowo otwierane (tryb pracy jałowej).

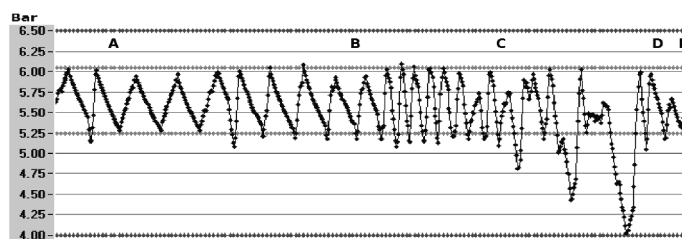
Czasy poszczególnych interwałów wynikały z szybkości narastania lub opadania ciśnienia, a więc od natężenia przepływu sprężonego powietrza do urządzeń odbiorczych. Zadaniem automatycznego systemu sterowania było utrzymywanie ciśnienia w sieci dystrybucyjnej w polu tolerancji 5,25..6,05bar (LSL..LSL). Na rys.1 zaznaczono także wartości ciśnień granicznych, po przekroczeniu których generowany był alarm. W obszarze G-H widoczny jest nagły spadek wartości ciśnienia spowodowany chwilowym wzrostem poboru sprężonego powietrza i związane z tym skrócenie czasu pracy jałowej sprężarki.



Rys. 2. Chwilowe wyłączenia sprężarki spowodowane przekroczeniem maksymalnej wartości temperatury oleju

Na rys.2 przedstawiono zapis przebiegu procesu, kiedy sprężarka została wyłączona na skutek przekroczenia dopuszczalnej temperatury oleju. Sytuacje takie miały miejsce w czasie długotrwałego obciążenia sprężarki lub w czasie letnich upałów. Wyłączenie sprężarki (jej silnika) nastąpiło we wszystkich trzech zaznaczonych na rysunku momentach gdy prognoza wzrostu temperatury oleju przekroczyła wartość dopuszczalną 90<sup>o</sup>C. Sprężarka była ponownie włączana do pracy (automatycznie, przez system sterowania) gdy temperatura oleju spadła poniżej wartości dopuszczalnej.

Na rys.3 pokazano skutki przeciążenia termicznego jednej ze sprężarek widoczne w przebiegu ciśnienia w sieci sprężonego powietrza. W przedziale ozn. A-B maszyna pracowała prawidłowo. W okresie B-C nastąpiło zwiększone zapotrzebowanie na sprężone powietrze, co skutkowało wzrostem częstotliwości załączeń sprężarki. Pod koniec tego okresu (chwila ozn. C) temperatura oleju w sprężarce przekroczyła wartość dopuszczalną. Sprężarka została automatycznie wyłączona a następnie, po obniżeniu się temperatury oleju, ponownie załączona. Ponieważ zwiększone zapotrzebowanie na sprężone powietrze utrzymywało się nadal, przez cały okres C-D kolejne awaryjne wyłączenia sprężarki powodowały, że ciśnienie w sieci spadało okresowo do coraz niższego poziomu, aż w końcu osiągnęło dolną wartość graniczną, powodując wygenerowanie alarmu i zawiadomienie personelu technicznego. Po zasygnalizowaniu stanu alarmowego użytkownikom sprężonego powietrza, pobór powietrza został zmniejszony przez wyłączenie wybranych odbiorników (pod koniec przedziału C-D). Od tej chwili ciśnienie powietrza pozostawało w polu tolerancji. W okresie pokazanym na rys.3 pracowała tylko jedna sprężarka (pozostałe były wyłączone z ruchu).



Rys. 3. Wahania ciśnienia spowodowane przeciążeniem termicznym jednej ze sprężarek

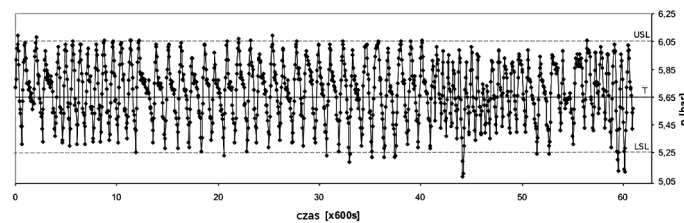
### 3. Monitorowanie i diagnostyka

Wartości podstawowych zmiennych procesu wytwarzania sprężonego powietrza były rejestrowane i prezentowane w postaci wartości chwilowych oraz w formie wykresów czasowych (podobnych do pokazanych na rys.1-3). Dla celów diagnostyki stanu sprężarek monitorowane były następujące wielkości ciągle:

- α) temperatura powietrza na wyjściu każdej sprężarki,
- β) temperatura oleju w misce olejowej,
- χ) ciśnienie oleju w układzie smarowania sprężarki,
- δ) ciśnienie powietrza w sieci dystrybucyjnej.

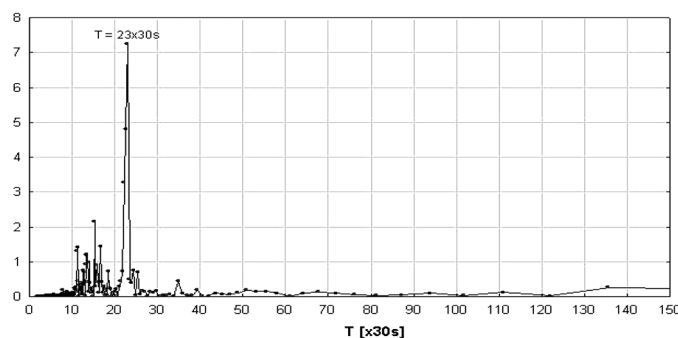
Rejestrowane były również sygnały z sygnalizatorów granicznych temperatury oraz ciśnienia oleju.

W pracy [2] opisano metodę oraz rezultaty oceny jakości procesu wytwarzania sprężonego powietrza. Wskaźnik zdolności rzeczywistej procesu [7], obliczony dla charakterystyki jakości – ciśnienia powietrza  $p$  w sieci dystrybucyjnej, wyniósł  $C_{pk}=0,578$  w trakcie typowego zapotrzebowania na sprężone powietrze. Stosunkowo niska wartość współczynnika zdolności, oznaczająca że statystycznie przez ok. 7% czasu pracy zespołu ciśnienie  $p$  było poza polem tolerancji, wynika z właściwości zastosowanego algorytmu sterowania oraz urządzeń wykonawczych – sprężarek. Chwilowa wydajność pracujących sprężarek miała charakter sygnału dyskretnego (każda z czterech maszyn mogła być w jednym z trzech stanów: aktywna, „odstawiona” lub pozostawać w gotowości). Ponadto, na układ sterowania nałożone były ograniczenia eksploatacyjne i ekonomiczne określające dopuszczalną liczbę rozruchów w jednostce czasu oraz limit czasu pracy ciągłej. Uwarunkowania te sprawiały, że charakter zmian ciśnienia powietrza na wyjściu zespołu (w sieci dystrybucji) był quasi-okresowy a wartości ekstremalne ciśnienia  $p$  w cyklu wykrczały często poza pole tolerancji – rys.4.



Rys. 4. Przebieg ciśnienia powietrza w sieci dystrybucyjnej w trakcie poprawnej pracy zespołu sprężarek (typowe zapotrzebowanie na powietrze)

Monitorowanie na bieżąco poprawności przebiegu procesu tylko na podstawie wartości chwilowej ciśnienia w sieci  $p$  skutkowałoby częstym generowaniem nieuzasadnionych alarmów spowodowanym typowym dla procesu charakterem zmienności ciśnienia w czasie. Dlatego zdecydowano się na monitorowanie wartości średniej ciśnienia w sieci  $p$  obliczanej w odpowiednio dobranym przedziale (oknie) czasu.

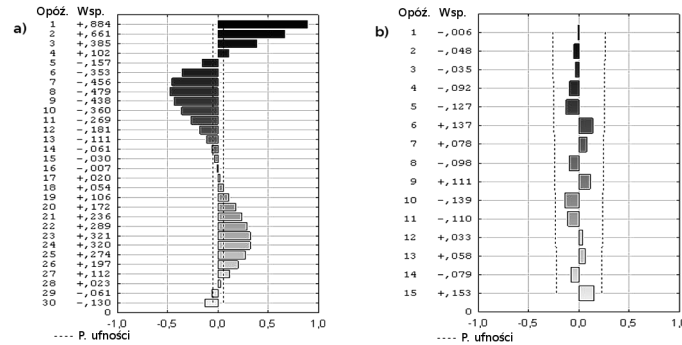


Rys. 5. Widmo częstotliwości dla sygnału ciśnienia powietrza w sieci dystrybucyjnej

Analiza częstotliwościowa monitorowanej charakterystyki jakości  $p$  (rys.5.) w typowych warunkach produkcji (rys.4.) wskazała na istnienie dominującej częstotliwości równej:

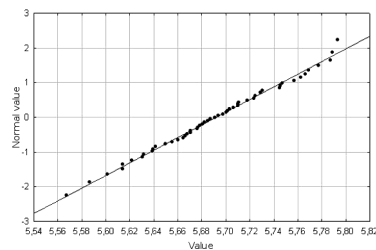
$$f_1 = \frac{1}{23 \cdot 30s} = 0.0014Hz \quad (1)$$

gdzie okres 30s jest stałym interwałem pomiędzy kolejnymi pomiarami wartości zmiennej  $p$ . Quasi-okresowy charakter zmian ciśnienia  $p$  potwierdzają także rezultaty analizy autokorelacyjnej (rys.6a), gdzie współczynnik funkcji autokorelacji dla przesunięcia o  $N_1 = 23$  obserwacji osiąga lokalne ekstremum.

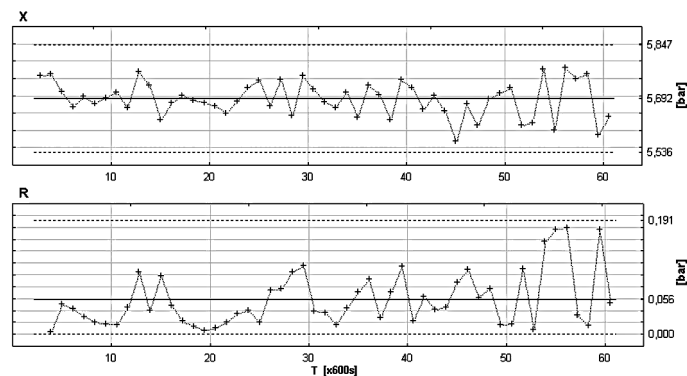


Rys. 6. Współczynniki funkcji autokorelacji szeregu czasowego ciśnienia powietrza w sieci dystrybucyjnej; a) dla danych surowych (zmienna  $p$ , interwał między kolejnymi pomiarami 30s); b) dla wartości średnich z kolejnych 23 pomiarów (zmienna  $p_{23}$ )

Dla potrzeb wykrywania nieprawidłowości w przebiegu procesu wytwarzania sprężonego powietrza utworzono nową zmienną  $p_{23}$  obliczaną jako średnia arytmetyczna z 23 kolejnych pomiarów zmiennej  $p$ . Zmienna  $p_{23}$  obliczona dla niezakłóconego procesu wytwarzania sprężonego powietrza (dane źródłowe z rys.4.) nie wykazuje odstępstw od rozkładu normalnego (rys.7). Także szereg czasowy nowo utworzonej zmiennej nie wykazuje istnienia autokorelacji, co zweryfikowano przeprowadzając zasadne testy statystyczne [1] (rys.6b). Uprawnione było zatem zastosowanie standardowych kart kontrolnych  $X/R$  [7] do monitorowania poprawności przebiegu procesu wytwarzania sprężonego powietrza z wykorzystaniem charakterystyki jakości  $p_{23}$ .



Rys. 7. Wykres normalności zmiennej  $p_{23}$  będącej średnią arytmetyczną z 23 kolejnych obserwacji zmiennej  $p$



Rys. 8. Karty kontrolne  $X/R$  dla zmiennej  $p_{23}$  w trakcie niezakłóconego procesu wytwarzania sprężonego powietrza (dane źródłowe z rys. 4.), licznosc próbek  $n=1$

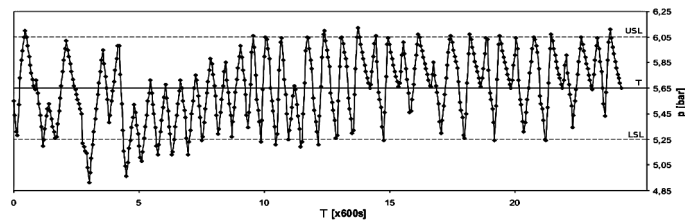
Na rys.8. pokazano karty kontrolne  $X/R$  dla zmiennej  $p_{23}$  utworzone w trakcie niezakłóconego procesu wytwarzania sprężonego powietrza (okres odpowiadający obserwacjom z wykresu przedstawionego na rys.4.) Przyjęto licznosc próbek dla kart  $n=1$  aby skrócić czas wykrycia i zasygnalizowania rozregulowania procesu, który może wynosić nawet:  $N_1 * n * 30s = 11,5$  minuty.

Linia centralna karty  $X$  dla ciśnienia jest równa wartości średniej z procesu uznanego za będący pod kontrolą (rys.4.). Niewielka niecentryczność procesu:

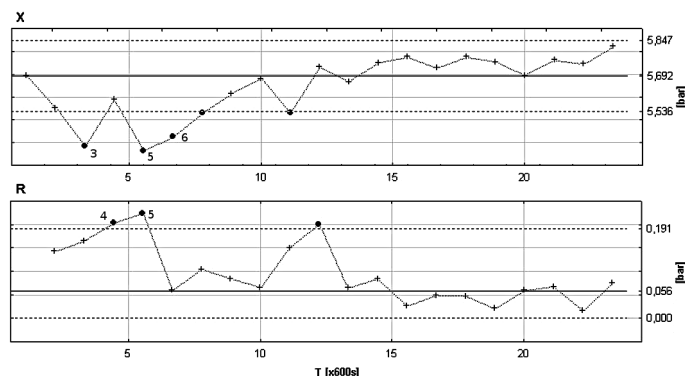
$$\hat{p}_{23} - T = 5.692 - 5.650 = 0.042 = 0.05(USL - LSL) \quad (2)$$

wynika ze specyfiki algorytmu sterowania pracą sprężarek i została zaakceptowana z punktu widzenia wymagań technologicznych. Granice kontrolne  $LCL$ ,  $UCL$  obliczono na podstawie odchylenia standardowego  $\sigma_{23} = 0,052\text{bar}$  zmiennej  $p_{23}$  z tego samego okresu. Statystyki  $X/R$  przedstawione na rys.8. potwierdzają brak istotnych odstępstw od typowej zmienności charakterystyki jakości  $p_{23}$ .

Na rys.9. przedstawiono przebieg zmian ciśnienia powietrza  $p$  w sieci dystrybucji w okresie gdy zapotrzebowanie na sprężone powietrze charakteryzowało się dużą amplitudą oraz częstością zmian. Na początku tego okresu, w czasie niewielkiego obciążenia systemu (przez ok. 30 minut), pracowała jedna sprężarka. Pod koniec tego okresu (ok. 30. minuty) wzrosło gwałtownie zapotrzebowanie na sprężone powietrze, co widać na wykresie jako stromy spadek krzywej ciśnienia. Wzrost obciążenia sieci był na tyle duży, że jedna sprężarka nie mogła zaspokoić potrzeb, stąd układ sterowania automatycznie włączył drugą maszynę. Od 35. minuty widoczny jest wzrost wartości średniej ciśnienia w sieci przebiegający jednak w warunkach zakłóceń o dużej dynamice i losowym charakterze (typowych dla poboru powietrza przez urządzenia realizujące operacje przeładunkowe). Dopiero od 80. minuty ciśnienie w sieci  $p$  utrzymywało się w polu tolerancji.



Rys. 9. Przebieg ciśnienia powietrza w sieci dystrybucyjnej podczas zakłóconej pracy zespołu sprężarek



Rys. 10. Karty kontrolne  $X/R$  dla zmiennej  $p_{23}$  w trakcie zakłóconego procesu wytwarzania sprężonego powietrza (dane źródłowe z rys.10.), licznosc próbek  $n=1$

Na rys.10. przedstawione zostały karty kontrolne  $X/R$  ( $n=1$ ) dla zmiennej  $p_{23}$  utworzonej z obserwacji z rys.9. Układ punktów na karcie  $X$  (próbki nr 3, 5, 6) oraz próbek nr 4, 5 karty  $R$  sygnalizują wyraźnie zakłócenia w przebiegu procesu wytwarzania sprężonego powietrza (niewydolny zespół sprężarek). W tej sytuacji komputerowy system nadzorowania procesu generuje alarm powiadamiając operatora o niemożności zaspokojenia zapotrzebowania przez dwie pracujące sprężarki (dwie kolejne nie miały zezwolenie na pracę). Utrzymywanie się takiej sytuacji przez dłuższy czas mogłoby skutkować przeciążeniem termicznym i całkowitym wyłączeniem pracujących sprężarek, jak to pokazano na rys. 3. Dzięki alarmowi wygenerowanemu przez kartę kontrolną  $X$  operator może zareagować odpowiednio wcześniej dopuszczając kolejną sprężarkę do pracy albo ograniczając zapotrzebowanie na sprężone powietrze.

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie doświadczeń oraz analizy danych z blisko dwuletniej eksploatacji zespołu sprężarek ze zmodernizowanym systemem sterowania i nadzorowania określono trzy najczęstsze przyczyny awaryjnych wyłączeń sprężarek:

- a) zbyt wysoka temperatura oleju i powietrza wylotowego,
- b) duża wilgotność powietrza,
- c) przerwanie obwodu elektrycznego przetwornika pomiarowego lub sygnalizatora granicznego.

Liczba zakłóceń w pracy maszyn, spowodowanych czynnikami a) i b), została znacząco zmniejszona dzięki zastosowaniu kart kontrolnych, których zadaniem było wczesne wykrywanie odstępstw od naturalnej zmienności procesu. Dzięki szybkiej diagnozie i podjętym środkom zaradczym nie dopuszczano do przeciążania i awaryjnego wyłączania sprężarek.

Zakłócenia spowodowane czynnikami z grupy c) miały charakter losowy i występowały sporadycznie. Ze względu na brak możliwości diagnostyki stanu monitorowanych obwodów (lub urządzeń) system monitorowania nie sygnalizował zagrożenia możliwości wystąpienia awarii z tej grupy. Podobne podejście do oceny stanu pojedynczej sprężarki w czasie pracy zaprezentowano w pracy [4].

Wymiernym efektem wdrożenia informatycznego systemu nadzorowania było znaczne zmniejszenie awaryjności procesu produkcji sprężonego powietrza. Operator systemu, wyposażony w narzędzia diagnostyczne (karty kontrolne), mógł trafniej przewidywać możliwość wystąpienia większości awarii zanim się one pojawiły.

Znaczącym efektem wdrożenia systemu była również możliwość zarządzania poborem sprężonego powietrza przez służby odpowiedzialne za przebieg produkcji. Dzięki informacjom z systemu monitorowania, można było tak planować operacje produkcyjne, aby nie powodować długotrwałego obciążania zespołu sprężarek, które było najczęstszą przyczyną awaryjnego zatrzymania produkcji.

#### Literatura

- [1] Box G.E.P, Jenkins G.M. Analiza szeregów czasowych. PWN, Warszawa, 1971
- [2] Cechowicz R, Stączek P. Autonomous Control of Compressed Air Plant. *Advances in Manufacturing Science and Technology* 2010, 2 (34), 71-81, Rzeszów
- [3] Cechowicz R, Stączek P. Automatyzacja Procesu Produkcji Sprężonego Powietrza. *IM Inżynieria Maszyn R.* 11, z. 1 (2006), 112-119
- [4] Chen R, Yao W. Experimental Investigation on Reciprocating Air Compressor Performance. *Advanced Materials Research*, Vol. 230-232, 2012, 1269-1273
- [5] Gupta S, Maiti J, Kumar R, Kumar U. A control chart guided maintenance policy selection, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 2009; 23(3):216-226.

- [6] Jardine A, Lin D, Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, Iss.7, 2006, 1483-1510
- [7] Montgomery D.C. *Introduction to Statistical Quality Control*. Wiley, 1997
- [8] Prajapati A, Bechtel J, Ganesan S. Condition based maintenance: a survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 18 Iss: 4, 2012, 384-400
- [9] Rembold U, Nnaji B.O, Storr A. *Computer Integrated Manufacturing and Engineering*, Addison-Weseley, 1993
- [10] Shewhart W.A. *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. Macmillan And Co. Ltd, London, 1931.
- [11] Zhang Z, Zhou Y, Sun Y, Ma L. Condition-based maintenance optimisation without a predetermined strategy structure for a two-component series system. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 14 (2): 120-129.

Radosław Cechowicz  
Katedra Automatyzacji  
Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Polska  
E-mail: r.cechowicz@pollub.pl

Paweł Stączek  
Katedra Automatyzacji  
Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Polska  
E-mail: p.staczek@pollub.pl