

## 14

## ZASTOSOWANIE MIAR NIEZAWODNOŚCI DO ANALIZY AWARYJNOŚCI KLUCZOWYCH MASZYN W PRZEDSIĘBIORSTWIE PRODUKCYJNYM – STUDIUM PRZYPADKU

### 14.1 WPROWADZENIE

Awaryjność maszyn jest kluczowym problemem w przedsiębiorstwach przemysłowych. Awarie powodują przestoje w procesie produkcyjnym, a tym samym mogą przyczynić się do zmniejszenia produkcji oraz strat finansowych i utraty zaufania klientów. Większość organizacji coraz częściej i skuteczniej minimalizuje przestoje spowodowane uszkodzeniami maszyn i urządzeń. Najistotniejsze jest określenie rodzaju awarii. Wśród awarii rozróżniamy awarie funkcjonalne, czyli takie, które powodują niemożność funkcjonowania całej maszyny lub jej elementów składowych. Drugi rodzaj awarii to awaria potencjalna czyli możliwość fizycznej identyfikacji oznak tego, że jakaś część maszyny lub urządzenia ulegnie awarii [3]. Obok awaryjności bardzo ważnym czynnikiem mającym wpływ na prawidłowe funkcjonowanie całego procesu produkcyjnego i prawidłowe funkcjonowanie obiektów technicznych wchodzących w skład tego procesu jest dostępność czyli gotowość maszyn. Zgodnie z definicją dostępność to zdolność bycia zdatnym przez maszynę w momencie kiedy wystąpi potrzeba jej użycia.

Zarówno awaryjność jak i dostępność, a także bezpieczeństwo, nowoczesność oraz niezawodność są nieodłącznymi elementami za pomocą których dokonuje się oceny eksploatacji maszyn (rys. 14.1).

Wszystkie urządzenia techniczne są obiektami, które ulegają uszkodzeniom ale istotne jest, aby po uszkodzeniu nie tylko przywrócić maszynom stan zdatności ale także zwiększyć ich niezawodność [8].

Analiza awaryjności i ocena niezawodności urządzeń technicznych newralgicznych w procesie produkcji ma na celu [2]:

- wydłużenie efektywnej pracy urządzeń technicznych,
- zwiększenie trwałości i niezawodności maszyn i urządzeń,
- usprawnienie warunków użytkowania obiektów technicznych,
- skrócenie czasu awarii,
- monitoring i kontrolę newralgicznych elementów poszczególnych maszyn i urządzeń.

## ATRYBUTY OCENY EKSPLOATACYJNEJ MASZyny

### CECHY POZYTYWNE

Dyspozycyjność  
Niezawodność  
Bezpieczeństwo  
Nowoczesność

### CECHY NEGATYWNE

Defekty  
Niezdatności  
Błędy  
Awarie

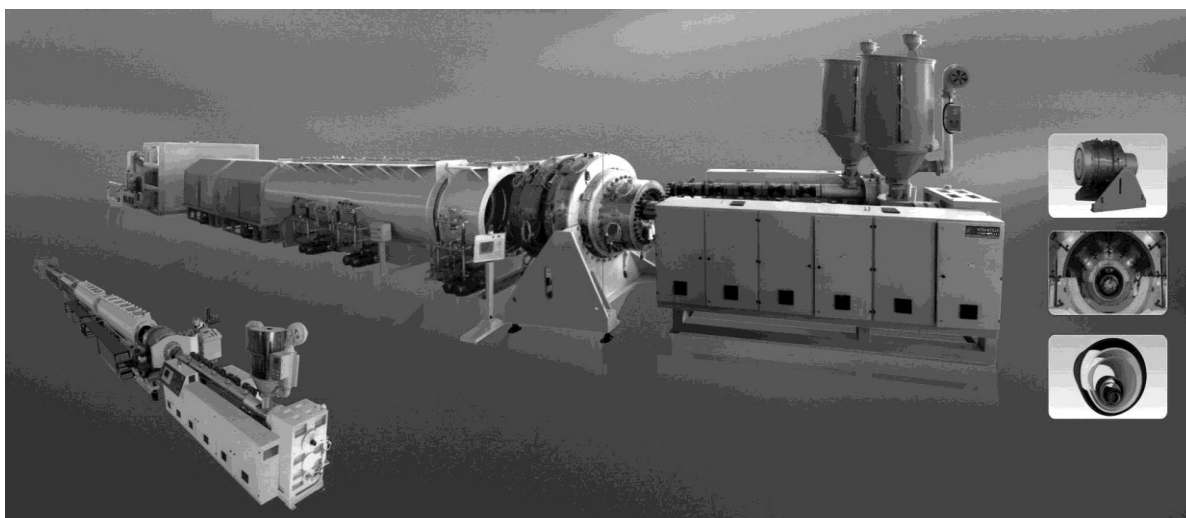
Rys. 14.1 Atrybuty oceny eksploatacyjnej maszyny [8]

Skrócenie przestoju spowodowanych awariami, a tym samym wydłużenie czasu bezawaryjnej pracy, nie jest możliwe bez identyfikacji maszyn kluczowych dla procesu produkcyjnego oraz najbardziej newralgicznych elementów i układów maszyn, które ulegają najczęstszym awariom lub ich usuwanie jest długotrwałe i kosztowne. Poznanie słabych punktów najważniejszych środków technicznych pozwoli lepiej gospodarować zasobami materialnymi i niematerialnymi oraz efektywniej przeciwdziałać awariom.

### 14.2 PRZEDMIOT BADAŃ

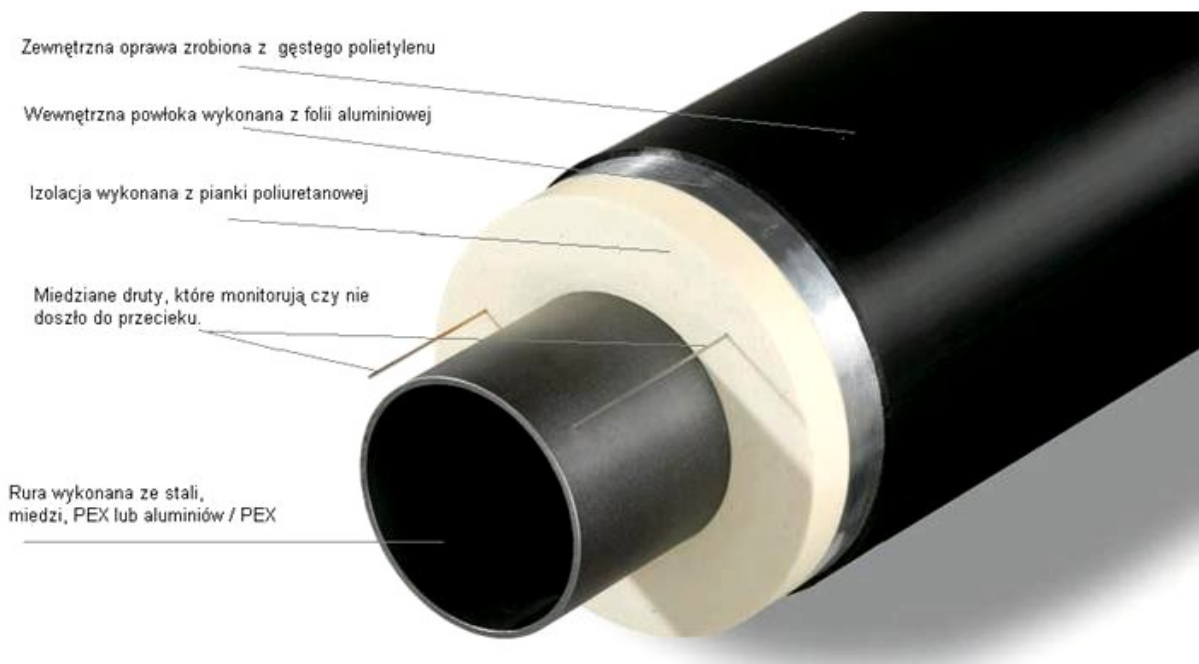
Badania przeprowadzono w przedsiębiorstwie produkcyjnym produkującym rury preizolowane na potrzeby branży ciepłowniczej.

Do analizy wybrano dwie kluczowe w procesie produkcyjnym maszyny, a mianowicie ekstrudery – wytłaczarki tworzyw sztucznych, służące do wytwarzania zewnętrznego płaszcza ochronnego z takich materiałów jak polipropylen niskiej gęstości (PE-LD) oraz polipropylen wysokiej gęstości (PE-HD). Przykładowy ekstruder zaprezentowano na rys. 14.2.



Rys. 14.2 Przykładowa linia do produkcji rur wytłaczania rur PE [1]

Typowy produkt przedsiębiorstwa, czyli rurę preizolowaną wraz z najważniejszymi elementami budowy prezentuje rys. 14.3.



**Rys. 14.3 Budowa rury preizolowanej [5]**

Dane do badań pochodziły z informatycznego systemu wspomagającego zarządzanie utrzymaniem ruchu i obejmują okres trzech ostatnich lat. Informację wykorzystane w poniższej analizie zawierały następujące dane:

- datę awarii,
- rodzaj awarii,
- czas przestoju maszyny,
- czas pracy pracowników utrzymania ruchu.

Oprócz awarii w systemie informatycznym utrzymania ruchu rejestruje się także anomalie (drobne awarie nie wpływające bezpośrednio na prace maszyn) oraz błędy operatorów (przestoje spowodowane przez pomyłki operatorów, do usunięcia których wzywani byli pracownicy utrzymania ruchu). Powyższe dane nie były prane pod uwagę w dalszej analizie. Awarie w przedsiębiorstwie podzielone zostały na trzy rodzaje:

1. awarie mechaniczne – awarie układów mechaniki i hydrauliki, do usunięcia których potrzebni są mechanicy, np. awarie przekazania napędu, mechanizmu zasypowego itp.
2. awarie elektryczne – awarie związane z układami zasilania maszyn, do usunięcia których niezbędni są elektrycy z odpowiednimi uprawnieniami, np. awarie styczników, silników napędowych itp.
3. awarie automatyki – awarie związane z układami sterowania itp., których usunięcia dokonują automatycy.

Czas przestoju maszyny to czas, w którym maszyna była niedostępna z powodu występującej awarii. Na czas przestoju składa się czas pracy pracowników utrzymania ruchu, usuwających awarie oraz czas pomocniczy potrzebny do przygotowania zasobów niezbędnych do usunięcia awarii (części zamienne, materiały eksploatacyjne, specjaliści) oraz prac administracyjnych (wypełnianie dokumentacji, składanie zamówień itp.).

Łącznie przeanalizowano 289 awarii mechanicznych, elektrycznych i automatyki, z czego

117 awarii to awarie ekstrudera 1, a pozostałe 172 – ekstrudera 2. Awarii elektrycznych zgłoszono 151, mechanicznych – 135, automatyki – 3, anomalie i błędy operatorów to 9 zgłoszeń.

Zebrane dane przeanalizowano wykorzystując różne modele dostępności znane z literatury [4] zmodyfikowane na potrzeby przedsiębiorstwa uwzględniając rodzaju awarii – mechaniczne, elektryczne. Awarie automatyki, ze względu na ich niewielką liczbę, nie były przedmiotem dalszej analizy.

### 14.3 WYBÓR WSKAŹNIKÓW

#### 14.3.1 Dostępność

Najprostszy model dostępności maszyn wyrażony jest za pomocą miar niezawodności:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF+MDT} \quad (14.1)$$

gdzie:

MTBF – Mean Time Between Failure – średni czas pomiędzy uszkodzeniami [12],

MDT – Mean Down Time – średni czas przestoju [6].

Wyrażona w ten sposób dostępność może mieć największe **znaczenie dla planistów i wydziałów produkcji**, ponieważ uwzględnia jedynie czas całkowitego przestoju maszyn. Wskaźniki te informują ogólnie o pracy służb utrzymania ruchu, lecz są niewystarczające jeżeli chodzi o analizy dotyczące organizacji pracy wydziału utrzymania ruchu, a tym samym planowania działań doskonalących proces utrzymania ruchu w szczególności dotyczący usuwania awarii, gospodarki magazynowej czy zasobów ludzkich.

#### 14.3.2 Efektywność

Efektywność odzwierciedla w uproszczony sposób „szybkość reakcji” służb utrzymania ruchu na zaistniałą awarię, na którą składają się skuteczność procesów: decyzyjnego, administracyjnego oraz systemów informacyjnego i organizacyjnego [4].

Efektywność można wyrazić za pomocą miar niezawodności jako:

$$E = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (14.2)$$

gdzie:

MTTR – Mean Time to Repair – średni czas do naprawy [7].

Rozumiana w ten sposób efektywność może być pomocna przy analizowaniu pracy służb utrzymania ruchu w szczególności pod kątem ich przygotowania organizacyjnego na zaistniałe, nieoczekiwane awarie.

#### 14.3.3 Skuteczność

Poprzez skuteczność rozumie się sprawność pracowników utrzymania ruchu w usuwaniu zaistniałych awarii. Ma na to wpływ doświadczenie pracowników, ich umiejętności, wiedza oraz odpowiednio opracowana dokumentacja techniczna i dobra współpraca z operatorami maszyn. Wyrażana jest za pomocą miar niezawodności w następujący sposób:

$$S = \frac{MTBF}{MTBF+MTR} \quad (14.3)$$

gdzie:

MTR – Mean Time Repair – średni czas naprawy (wykonywania czynności naprawczych).

Skuteczność wyrażona powyższym wzorem jest bardzo ważnym wskaźnikiem przy analizowaniu pracy służb utrzymania ruchu w szczególności w aspekcie umiejętności i kompetencji pracowników.

#### 14.4 ANALIZA WYNIKÓW

Analizując poszczególne wskaźniki wzięto pod uwagę ogólną awaryjność wybranych maszyn oraz awaryjność poszczególnych układów – mechanicznego oraz elektrycznego [9].

Do analizy wybrano następujące miary:

- MTBF – średni czas między awariami,
- MTTR – średni czas od momentu zgłoszenia awarii do podjęcia działań naprawczych,
- MDT – średni czas przestoju spowodowany awariami,
- MTR – średni czas trwania naprawy.

Otrzymane dane przedstawione zostały w tabelach 14.1-14.3.

W tabeli 14.1 zaprezentowano ogólne wartości miar niezawodności dla analizowanych ekstruderów dla wszystkich trzech lat.

**Tabela 14.1 Miary niezawodności dla badanych ekstruderów**

	MTBF [min]	MTTR [min]	MDT [min]	MTR [min]
<b>Ekstruder 1</b>	10360	133	205	101
<b>Ekstruder 2</b>	6903	185	289	140

Jak widać z obliczonych wskaźników (tabela 14.1), ekstruder 2 jest urządzeniem zdecydowanie bardziej awaryjnym. Jego MTBF wynosi ponad 6000 minut, przy 10000 minut ekstrudera 1. Co bardziej niepokojące, pozostałe wskaźniki również wypadają na niekorzyść ekstrudera 2 – dłuższe są czasy napraw, oczekiwania na naprawy, a co za tym idzie – czasy przestoju.

Tabela 14.2 prezentuje miary niezawodności dla układów mechanicznych analizowanych ekstruderów.

**Tabela 14.2 Miary niezawodności dla układu mechanicznego ekstruderów**

	MTBF <sub>m</sub> [min]	MTTR <sub>m</sub> [min]	MDT <sub>m</sub> [min]	MTR <sub>m</sub> [min]
<b>Ekstruder 1</b>	26984	94	181	121
<b>Ekstruder 2</b>	13179	104	182	114

W przypadku układów mechanicznych (tabela 14.2), różnice w wartościach wskaźników MTBF są jeszcze większe. Czas bezawaryjnej pracy ekstrudera 2 jest ok. dwa razy krótszy niż ekstrudera 1. Pozostałe wskaźniki jednak są na porównywalnym poziomie.

W tabeli 14.3 przedstawiono wartości miar niezawodności dla układów elektrycznych badanych maszyn.

Niezawodność układów elektrycznych w obu analizowanych ekstruderach jest na porównywalnym poziomie – wartość MTBF wynosi od 14,5 tys. minut (ekstruder 2) do 16,5 tys. minut dla ekstrudera 1. Jednak pozostałe miary świadczące o pracy utrzymania ruchu,

czyli MTTR, MTR oraz MDT różnią się między sobą i dla ekstrudera 2 są znacznie bardziej niekorzystne.

**Tabela 14.3 Miary niezawodności dla układu elektrycznego ekstruderów**

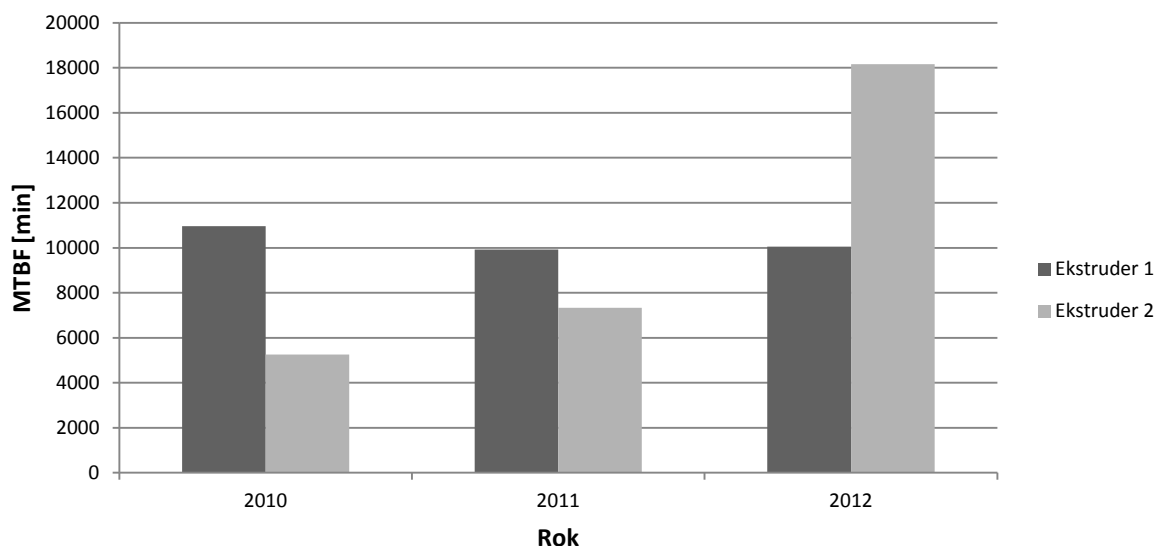
	MTBF <sub>e</sub> [min]	MTTR <sub>e</sub> [min]	MDT <sub>e</sub> [min]	MTR <sub>e</sub> [min]
<b>Ekstruder 1</b>	16447	155	223	93
<b>Ekstruder 2</b>	14586	225	356	169

**Tabela 14.4 Miary niezawodności dla badanych ekstruderów w poszczególnych latach pracy**

Rok	Ekstruder 1	Ekstruder 2	Ekstruder 1	Ekstruder 2	Ekstruder 1	Ekstruder 2
	MTBF [min]	MTBF [min]	MTBF <sub>m</sub> [min]	MTBF <sub>m</sub> [min]	MTBF <sub>e</sub> [min]	MTBF <sub>e</sub> [min]
<b>2010</b>	10967	5251	32169	10737	16016	9906
<b>2011</b>	9924	7336	23689	12559	16652	17923
<b>2012</b>	10051	18155	25136	35317	16942	38688

Wyniki dotyczące niezawodności analizowanych ekstruderów w poszczególnych latach pracy dla układów: mechanicznego i elektrycznego zaprezentowane zostały w tabeli 14.4 oraz na rys. 14.4-14.6.

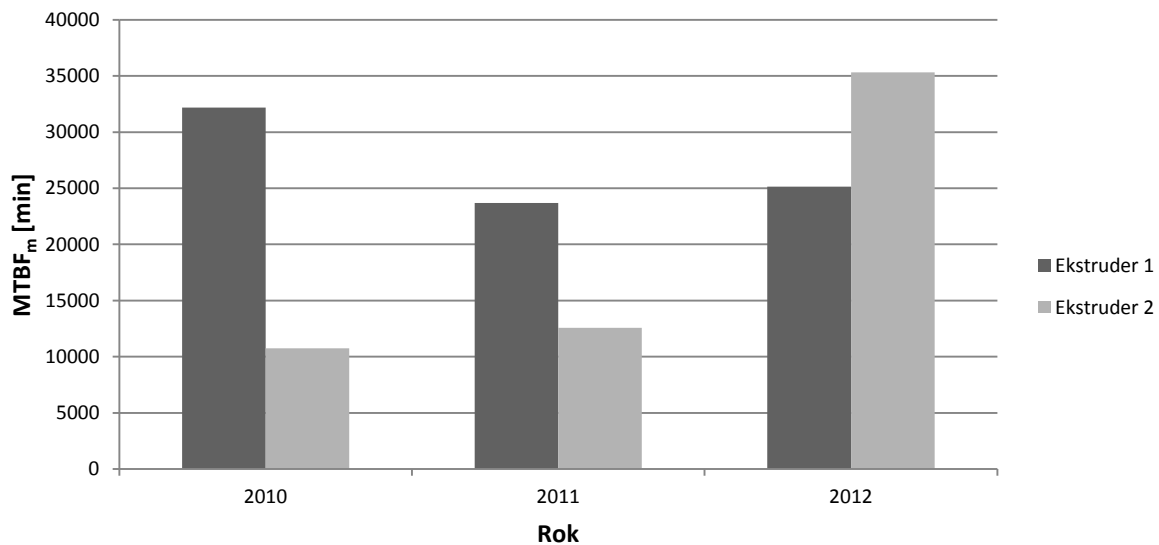
Na rys. 14.4 zaprezentowano wykres zmian wskaźnika MTBF dla poszczególnych ekstruderów w każdym z trzech analizowanych okresów.



**Rys. 14.4 Ogólny MTBF dla badanych ekstruderów (1660zn)**

Wartość MTBF dla ekstrudera 1 nie zmienia się znacząco w okresie analizowanych trzech lat i pozostaje na poziomie ok. 10000 minut. Średni czas pomiędzy uszkodzeniami ekstrudera 2 w każdym następnym roku wzrasta z poziomu ok. 5000 minut w 2010 roku do 18000 minut w roku 2012.

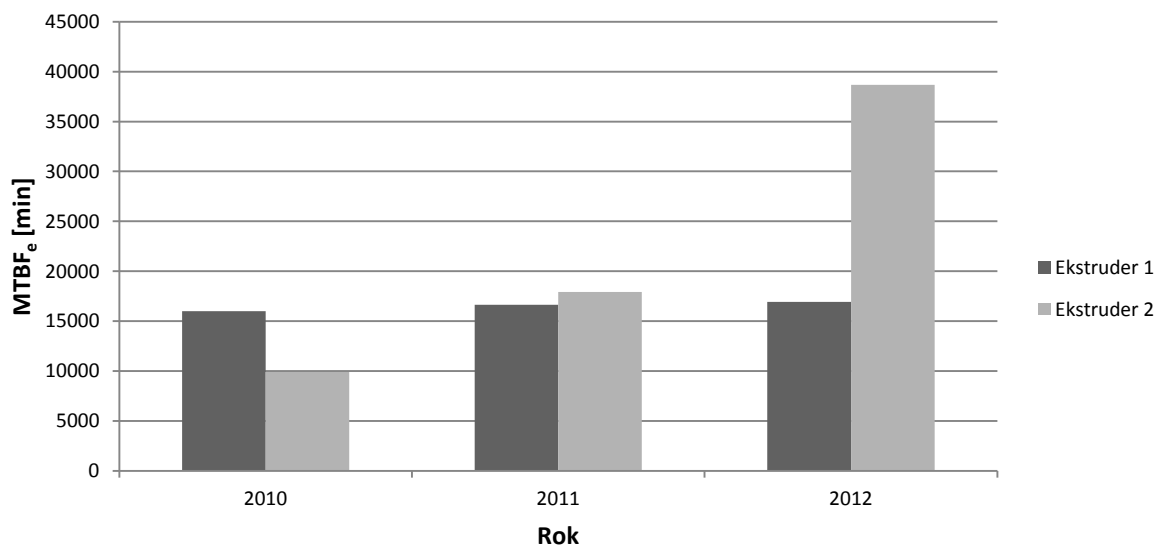
Na rys. 14.5 przedstawiono wartość MTBF dla układów mechanicznych badanych ekstruderów w okresie trzech ostatnich lat.



**Rys. 14.5 MTBF dla układu mechanicznego badanych ekstruderów**

Zmiana wartości MTBF dla układu mechanicznego ekstrudera 1 nie ma charakteru jednostajnego i waha się w przedziale od ok. 32 tyś. minut do ok. 25 tyś. min. MTBF ekstrudera 2 rośnie z roku na rok od ok. 10 tyś. minut do ok. 35 tyś. minut.

Rys. 14.6 przedstawia wartości MTBF w poszczególnych latach mierzoną dla układów elektrycznych ekstruderów.



**Rys. 14.6 MTBF dla układu elektrycznego badanych ekstruderów**

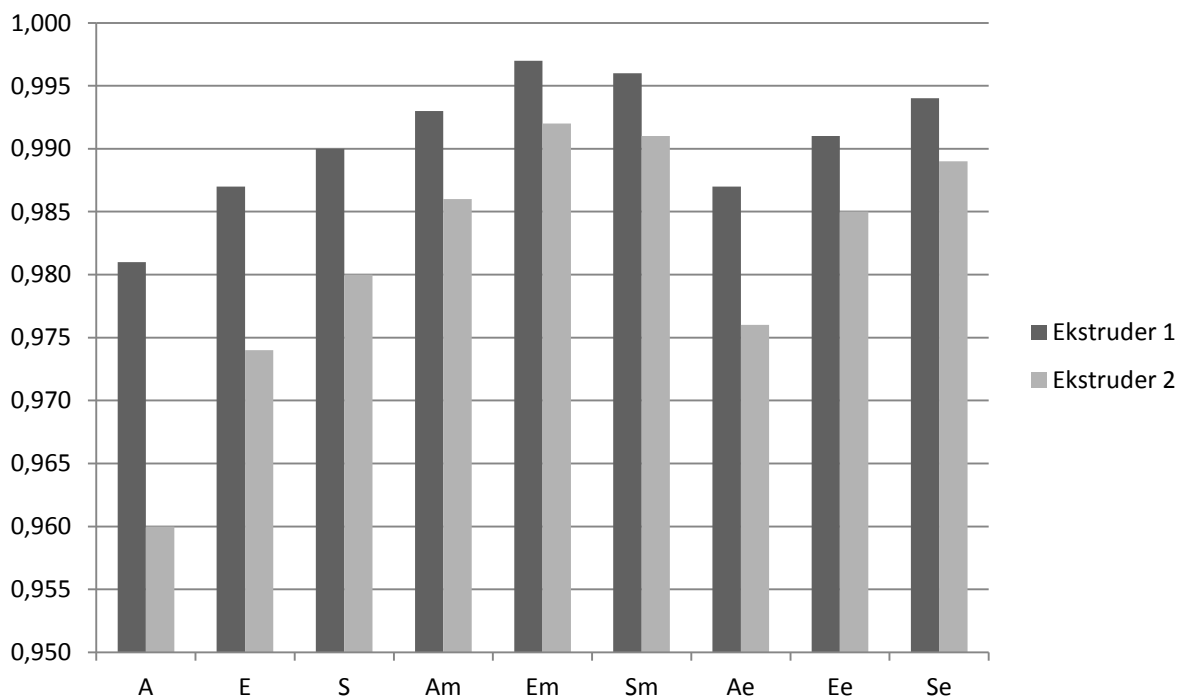
Wartość MTBF dla układów elektrycznych ekstrudera 1 jest stała w okresie trzech ostatnich lat i wynosi ok. 16000 minut. Wartość MTBF dla ekstrudera 2 wzrasta z ok. 10000 minut w roku 2010 do 38000 minut w 2012 roku.

Na podstawie otrzymanych danych obliczono również, wg wzorów (14.1), (14.2) oraz

(14.3), wskaźniki dostępności (A), efektywności (E) i skuteczności (S), dla poszczególnych ekstruderów oraz ich układów: mechanicznego i elektrycznego, co prezentuje tabela 14.5 oraz rys. 14.7.

**Tabela 14.5 Wskaźniki dostępności, efektywności i skuteczności dla ekstruderów**

	A	E	S	A <sub>m</sub>	E <sub>m</sub>	S <sub>m</sub>	A <sub>e</sub>	E <sub>e</sub>	S <sub>e</sub>
<b>Ekstruder 1</b>	0,981	0,987	0,990	0,993	0,997	0,996	0,987	0,991	0,994
<b>Ekstruder 2</b>	0,960	0,974	0,980	0,986	0,992	0,991	0,976	0,985	0,989



**Rys. 14.7 Wartości obliczonych wskaźników dla analizowanych ekstruderów (2000zn)**

Jak widać z wykresu przedstawionego na rys. 14.7 i danych zawartych w tabeli 14.5 największe wskaźniki dostępności, efektywności i skuteczności zaobserwowano dla ekstrudera 1 – wszystkie obliczone wskaźniki są wyższe od wskaźników wyznaczonych dla ekstrudera 2. W przypadku ekstrudera 1 awarie występują rzadziej, przestoje spowodowane nimi trwają krócej. Awarie układów mechanicznych charakteryzują się wyższym wskaźnikiem dostępności – występują rzadziej, podobnie jest w przypadku pozostałych wskaźników, czyli skuteczności i efektywności – usuwanie awarii przebiega sprawniej zarówno w trakcie przygotowań jak i samych prac. W przypadku awarii układów elektrycznych czynności związane z przygotowaniem do usunięcia awarii zajmują więcej czasu, niż same czynności naprawcze.

## PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Wskaźniki dostępności, efektywności i skuteczności wyznaczone w oparciu o miary niezawodności są dobrym narzędziem do analizy pracy służb utrzymania ruchu, a ich



- wyznaczenie nie powinno sprawić trudności w przedsiębiorstwie ze sprawnie działającymi systemami wspomaganie utrzymanie ruchu.
2. W analizowanym przypadku można stwierdzić, że ekstruder 1 jest urządzeniem mniej awaryjnym ( $MTBF = 10360$  min. dla ekstrudera 1 i  $6900$  min. dla ekstrudera 2), a przestoje nimi spowodowane są krótsze – mniej czasu pochłaniają przygotowania do usunięcia awarii oraz samo ich usuwanie, na co wskazują wartości MTTR, MDT oraz MTR (tabela 14.1).
  3. Układ mechaniczny ekstrudera 1 jest mniej awaryjny niż w przypadku ekstrudera 2 ( $MTBF_m$  wynosi odpowiednio  $26$  tys. min. i  $13$  tys. min.) jednak czas trwania przestojów i czynności naprawczych w obu przypadkach jest porównywalny (tabela 14.2).
  4. Awaryjność układów elektrycznych obu badanych maszyn jest zbliżona ( $MTBF_e = 16$  i  $14$  tys. min.) jednak wartości MTTR, MDT i MTR (tabela 14.3) są zdecydowanie wyższe w przypadku ekstrudera 2 – przestoje spowodowane awariami są znacząco dłuższe.
  5. Analizując poszczególne lata pracy maszyn można zauważyć, że awaryjność ekstrudera 1 jako całości obiektu oraz jego poszczególnych układów jest w przybliżeniu stała, o czym świadczą wartości MTBF (tabela 14.4, rys. 14.4-14.6). Wartość MTBF dla ekstrudera 2 wykazuje natomiast tendencję wzrostową.
  6. Wskaźniki dostępności obliczone na podstawie miar niezawodności są wyższe w przypadku ekstrudera 1 jako całości oraz jego poszczególnych układów (rys. 14.7).
  7. Wskaźniki dostępności, skuteczności oraz efektywności dla układów mechanicznych badanych maszyn są wyższe od analogicznych wskaźników dla układów elektrycznych.
  8. Otrzymane wyniki badań pozwalają na sformułowania następujących uwag i propozycji działań doskonalących dla badanego przedsiębiorstwa, z których najważniejsze to:
    - należy systematycznie monitorować wartości miar niezawodności dla wszystkich kluczowych maszyn w przedsiębiorstwie,
    - stosując popularne narzędzia, takie jak 5 why, diagram przyczyn i skutków Ishikawy lub diagram zależności [10] zidentyfikować przyczyny częstszych awarii układu mechanicznego ekstrudera 2 oraz zastosować działania doskonalące,
    - zidentyfikować przyczyny dłuższych przestojów spowodowanych awariami układu elektrycznego, szczególnie ekstrudera 2 oraz wprowadzić działania korygujące i zaradcze, np. zmiany w gospodarce magazynowej części zamiennych, narzędzi wspomagających diagnostykę i naprawy maszyn oraz lepszą współpracę z operatorami maszyn.

*Artykuł powstał w ramach pracy statutowej pt. „Innowacyjność w Inżynierii Produkcji”  
 o symbolu BK 249/ROZ3/2012 realizowanej w Instytucie Inżynierii Produkcji  
 na Wydziale Organizacji i Zarządzania Politechniki Śląskiej.*

## LITERATURA

1. <http://kebeln.en.made-in-china.com/productimage/hkxEcqmVsnNH-2f0j00ckTEbCQqOtFh/China-HDPE-Pipe-Extrusion-Line-PE-Pipe-Production-Line.html>

2. Krauze K., Kotwica K.: Selection and underground tests of the rotary tangential cutting picks used in cutting heads of the longwall and roadway miners. Archives of Mining Sciences vol 52. No 2, 2007
3. Legutko S.: Trendy rozwoju utrzymania ruchu urządzeń i maszyn. Eksploatacja i niezawodność – Maintenance and Reliability nr 2/2009.
4. Loska A.: Przegląd modeli ocen eksploatacyjnych systemów technicznych [w:] Knosala R. (red.): Komputerowo zintegrowane zarządzanie. Oficyna Wydawnicza PTZP, Opole 2011. s. 37-46.
5. Materiały badanego przedsiębiorstwa
6. Mishra R.C., Pathak K.: Maintenance Engineering And Management. PHI Learning Pvt. Ltd. 2004.
7. Mishra R.C.: Reliability And Maintenance Engineering. New Age International. 2007.
8. Słowiński B.: Inżynieria eksploatacji maszyn. Politechnika Koszalińska. Koszalin 2011.
9. Skotnicka-Zasadzień B.: Reliability assessment of cutter-loader's components. Sborník mezinárodní odborné conference. Údržba 2012. Česká společnost pro údržbu. Praha 2012. s. 165-169.
10. Tague N.R.: The Quality Toolbox. ASQ Quality Press. Milwaukee, Wisconsin 2005.
11. Venkataraman V.: Maintenance Engineering and Management. PHI Learning Pvt. Ltd, 2007.

## ZASTOSOWANIE MIAR NIEZAWODNOŚCI DO ANALIZY AWARYJNOŚCI KLUCZOWYCH MASZYN W PRZEDSIĘBIORSTWIE PRODUKCYJNYM – STUDIUM PRZYPADKU

**Streszczenie:** *W rozdziale przedstawiono wyniki badań dotyczących awaryjności kluczowych maszyn w wybranym przedsiębiorstwie produkującym rury preizolowane na potrzeby przemysłu ciepłowniczego. Analizy awaryjności dokonano przy pomocy wskaźników dostępności, efektywności i skuteczności w oparciu o miary niezawodności, takie jak MTTR, MTBF, MDT. Analizie poddano dwie maszyny oraz ich układy: mechaniczny i elektryczny na przestrzeni ostatnich trzech lat. Badania pozwoliły określić, które maszyny najczęściej ulegają awarii, jakie układy są najbardziej awaryjne i jaki jest czas usuwania uszkodzeń. Wyniki badań pozwoliły zidentyfikować słabe strony w procesie utrzymania ruchu oraz sformułować zalecenia działań doskonalących ten proces.*

**Słowa kluczowe:** *eksploatacja, maszyny, niezawodność, wskaźnik, utrzymanie ruchu, dostępność, efektywność, skuteczność, awaria, MTBF*

## APPLICATION OF RELIABILITY MEASURES FOR AN ANALYSIS OF FAILURE RATE OF CRUCIAL MACHINES IN A PRODUCTION ENTERPRISE – CASE STUDY

**Abstract:** *In this chapter, the results of investigations into the failure rate of crucial machines in a selected enterprise manufacturing pre-insulated pipes for the needs of the heat generating industry have been presented. The failure rate analysis has been conducted using the indices of availability, effectiveness and efficacy, on the basis of reliability measures, such as MTTR, MTBF, MDT. The functioning of two machines and their systems: mechanical and electrical over a period of three last years was subjected to analysis. The investigations allowed determining in which machines failures occur the most frequently, which systems are the most likely to break down and what the time of failure removal is. The research results enabled identifying weak points in the maintenance process and made it possible to formulate some recommendations for this process improvement.*

**Key words:** *operation, machines, reliability, index, maintenance, availability, effectiveness, efficacy, failure, MTBF*

dr inż. Michał ZASADZIEN, dr inż. Bożena SKOTNICKA-ZASADZIEN  
Politechnika Śląska, Wydział Organizacji i Zarządzania  
Instytut Inżynierii Produkcji  
ul. Roosevelta 26, 41-800 Zabrze  
e-mail: Michal.Zasadzien@polsl.pl