

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Niezawodność maszyn produkcyjnych w branży piekarniczej – zagadnienia teoretyczne i praktyczne

RADOSŁAW DROZD

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ZARZĄDZANIA I EKONOMII

Słowa kluczowe: niezawodność maszyn produkcyjnych, modele probabilistyczne

STRESZCZENIE:

Celem artykułu jest przedstawienie modeli probabilistycznych, które następnie zostały wykorzystane do analizy niezawodności maszyn produkcyjnych w branży piekarniczej. Autor prowadził badania w okresie 2016.01.02-2018.12.31 dotyczące opomiarowania niezawodności systemu produkcyjnego tradycyjnego, bazującego na koncepcji probabilistycznej. Z uwagi na ograniczony zakres artykułu zostały przedstawione obliczenia niezawodności dla zespołu pieców termo-olejowych z wykresem intensywności uszkodzeń w latach 2006-2018 oraz przewidywanym rozkładem funkcji intensywności w latach 2019-2026.

Reliability of production machines in the bakery industry – theoretical and practical issues

Keywords: reliability of production machines, probabilistic models

ABSTRACT:

The aim of the article is to present probabilistic models, which were then used to analyze the reliability of production machines in the baking industry. The author conducted research in the period from January 2, 2016 to December 31, 2018 regarding the measurement of reliability of a traditional production system based on a probabilistic concept. Due to the limited scope of the article, reliability calculations for a set of thermo-oil furnaces with a graph of damage intensity in 2006-2018 and the predicted distribution of intensity functions in 2019-2026 have been presented.

1. WSTĘP

Mikro i małe przedsiębiorstwa branży piekarniczej (MiMPBP) mają w Polsce kluczowe znaczenie dla rozwoju gospodarczego. Stanowią ponad 95% (GUS 2019) wszystkich funkcjonujących piekarni w Polsce. Są niezbędne dla zrównoważonego funkcjonowania gospodarki i przyczyniają się do przyspieszenia wzrostu gospodarczego.

Czwarta rewolucja przemysłowa oraz zwiększona presja konkurencyjności ze strony rynku spowodowały, że istotnym kluczowym elementem mającym wpływ na kierunki rozwoju MiMPBP stał się niespotykany dotąd postęp jakościowy w technice i technologii – zarówno na poziomie maszyn technologicznych, urządzeń realizujących operacje pomocnicze, jak też systemów komunikacji i sterowania systemami wytwórczymi.

Rosnący poziom konkurencyjności w branży piekarniczej powoduje, że stale wzrasta zapotrzebowanie na rozwiązania zwiększające niezawodność wszystkich procesów produkcyjnych (maszyn i urządzeń) MiMPBP, co pozwala na podniesienie jakości produkowanych wyrobów.

Aby dokonać analizy niezawodności procesów produkcyjnych w branży piekarniczej dla MiMPBP, niezbędne było zastosowanie docelowych modeli probabilistycznych takich jak: rozkład wykładniczy, rozkład Weibulla, rozkład gamma, rozkład normalny standaryzowany, rozkład logarytmiczno-normalny.

2. TEORIA NIEZAWODNOŚCI. PODSTAWOWE MODELE PROBABILISTYCZNE WYKORZYSTYWANE W BRANŻY PIEKARNICZEJ

Definicja niezawodności może obejmować różne wymagania opisane charakterystykami technicznymi, ekonomicznymi i socjologicznymi obiektów. Wyróżnia się:

- niezawodność techniczną, która uwzględnia charakterystyki techniczne,
- niezawodność techniczno-ekonomiczną, która uwzględnia charakterystyki techniczne i ekonomiczne,
- niezawodność globalną, która uwzględnia charakterystyki techniczne, ekonomiczne i socjologiczne obiektów [4].

Niezawodność jest rozumiana jako niezawodność techniczna. Niezawodność obiektu jest to jego zdolność do spełnienia stawianych mu wymagań. Wielkością charakteryzującą zdolność do spełnie-

nia wymagań może być prawdopodobieństwo spełnienia wymagań. Stąd definicja: „niezawodność obiektu jest to prawdopodobieństwo spełnienia przez obiekt stawianych mu wymagań” [5]. Kiedy wymaganiem jest to, żeby obiekt był zdalny (sprawny) w przedziale $(0, t)$, którego miarą może być czas, ilość wykonanej pracy, liczba wykonanych czynności, długość przebytej drogi itp., wtedy: „niezawodność obiektu jest to prawdopodobieństwo, że obiekt jest zdalny (sprawny) w przedziale $(0, t)$ ” lub: „niezawodność obiektu jest to prawdopodobieństwo, że wartości parametrów określających istotne właściwości obiektu nie przekroczą w ciągu okresu $(0, t)$ dopuszczalnych granic w określonych warunkach eksploatacji obiektu” [1]. W sensie probabilistycznym niezawodność obiektu $R(t)$ w danej chwili t jest prawdopodobieństwem $P(T \geq t)$, że jego trwałość T jest większa od t , tj. $R(t) = P(T \geq t)$. Trwałość T może być wyrażona np. czasem w [s], długością w [km] itp. Z tego wynika, że za każdym razem $R(t)$ jest inna [10].

W dalszej części referatu zostaną opisane podstawowe modele probabilistyczne takie jak: rozkład wykładniczy, rozkład Weibulla, rozkład gamma, rozkład normalny standaryzowany, rozkład logarytmiczno-normalny.

2.1 Rozkład wykładniczy

Jednym z najprostszych modeli probabilistycznych czasu zdalności obiektu nieodnawialnego jest zmienna losowa T , której intensywność uszkodzeń jest stała, tzn. niezależna od czasu $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ [4].

Główne parametry niezawodnościowe w przypadku rozkładu wykładniczego to [12]:

1. Funkcja niezawodności $R(t)$; jest to prawdopodobieństwo działania obiektu zgodnie z jego przeznaczeniem w zakładanych ramach czasowych t . Funkcję tę wyznacza się za pomocą wzoru: $R(t) = \exp(-\lambda t)$, $R = 0$.

2. Funkcja zawodności $F(t)$; jest to prawdopodobieństwo pojawienia się nieprawidłowego działania, czyli uszkodzenia do momentu czasu t . Funkcję tę można wyrazić za pomocą następującego wzoru: $F(t) = 1 - R(t)$.

Inny zapis tej funkcji z wykorzystaniem wzoru funkcji z punktu a: $F(t) = e^{-\lambda(t)}$.

3. Średni czas działania zgodnego z przeznaczeniem poszczególnego elementu T_0 obiektu można wyznaczyć za pomocą podanego niżej wzoru:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda}$$

2.2 Rozkład Weibulla

Rozkład ten jest pewnego rodzaju uogólnieniem omawianego wcześniej rozkładu wykładniczego. Poszerzony jest on o parametr p , który jest dodatkowym elementem. Rozkład ten dla wartości dodatnich losowej zmiennej X charakteryzuje się przyjmowaniem wartości niezerowej. Jako główne parametry niezawodnościowe dla tego rozkładu przyjmuje się:

a) $R(t)$, czyli funkcję niezawodności, którą określa się za pomocą następującego wzoru [3]:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^p},$$

b) $F(t)$, czyli funkcja zawodności. Oblicza się ją, wykorzystując wzór:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^p}.$$

2.3 Rozkład gamma

Wartość oczekiwana tego rozkładu opisuje się stosunkiem dwóch parametrów tego rozkładu. Wartość tę oblicza się na podstawie następującego wzoru:

$$E(T) = \frac{p}{b} [2],$$

gdzie p i b to wartości wynikające z parametrów tego rozkładu.

U zmiennej losowej T występuje rozkład gamma w przypadku, gdy można dla niej przedstawić funkcję gęstości $f(t)$ dla wartości $t > 0$ w postaci następującego wzoru [12].

$$f(t) = \frac{b^p}{(p-1)!} t^{p-1} \exp(-bt).$$

Symbol b oraz p oznaczają w tym wzorze parametry rozkładu i wartość każdego z nich musi być większa od zera, czyli $b > 0$ i $p > 0$.

2.4 Rozkład normalny

W przedziale określonym od $-\infty$ do ∞ zmienna losowa X posiada rozkład normalny i opisuje się to symbolicznie $N(m, \delta)$, gdzie m jest nadzieją matematyczną, zwaną inaczej średnią. Natomiast pod symbolem δ kryje się odchylenie standardowe. Obie te wielkości w ujęciu liczbowym są parametrami tego rozkładu. Funkcja gęstości tego rozkładu opisana jest takim oto wzorem [11]:

$$f(x) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\delta^2}\right] = \frac{\varphi(y)}{\delta}.$$

W przypadku posiadania takiego wzoru można wyznaczyć wzór na dystrybuantę zmiennej losowej. Opisuje się ją za pomocą przedstawionego

poniżej wzoru. Symbolem θ oznaczona jest wartość dla całki Laplace'a $F(x) = \Phi(y) + 0,5 \theta(y)$ [1].

2.5 Rozkład normalny standaryzowany

Rozkład ten jest odmianą rozkładu normalnego, gdzie zamiast ciągłej zmiennej losowej X używamy zmiennej standaryzowanej U . Zmienną tę wyznacza się za pomocą wzoru standaryzacji

$$U = \frac{(x-m)}{\delta} [7],$$

gdzie m oznacza średnią rozkładu, δ jest odchyleniem standardowym, natomiast x jest wartością liczbową zmiennej.

Normalny rozkład standaryzowany opisuje się za pomocą u równego zera oraz równego jedności. Symbolicznie rozkład ten zapisuje się następująco: $N(0,1)$.

Korzystając z funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla rozkładu normalnego oraz wartości parametrów średniej i odchylenia wynikającej z rozkładu normalnego standaryzowanego można wyznaczyć funkcję gęstości rozkładu normalnego standaryzowanego.

2.6 Rozkład logarytmiczno-normalny

Rozkład logarytmiczno-normalny można stosować w przypadku badania niezawodności obiektów, których uszkodzenia powodowane są zwiększającymi się stopniowo pęknięciami zmęczeniowymi.

Zmienna losowa T podlega rozkładowi logarytmiczno-normalnemu, jeśli zmienna losowa X wyrażona za pomocą logarytmu normalnego z T podlega rozkładowi normalnemu. Czyli $X = \lg T$ lub to samo w innym zapisie $X = \ln T$. Wyznaczenie funkcji niezawodności wymaga skorzystania z zależności, jakie występują pomiędzy zmienną X a zmienną T , czyli że $X = \ln T$. W takim przypadku mamy następujące równanie $R(t) = 1 - P(T < t) = 1 - P(X < x)$ [9].

3. ANALIZA NIEZAWODNOŚCI W BRANŻY PIEKARNICZEJ

W procesie produkcyjnym piekarni najistotniejszym produktem jest chleb. Stanowi on 75-80% codziennej produkcji w MiMPBP. Proces produkcyjny linii do produkcji chleba można podzielić na kilka etapów (Tab. 1).

Tabela 1 Tradycyjny schemat blokowy procesu produkcji chleba (badania własne)

Nr	Proces produkcyjny chleba
A1	Magazynowanie składników
A2	Dostarczenie składników na stanowisko mieszania
A3	Odmierzanie składników
A4	Mieszanie składników
A5	Transport dzieży
A6	Dzielenie ciasta na kęsy
A7	Zaokrąglanie kęsów
A8	Wstępne garowanie kęsów
A9	Wydłużanie kęsów
A10	Układanie kęsów na blachę + kontrola
A11	Nacinanie kęsów
A12	Transport blachy
A13	Garowanie
A14	Transport blachy
A15	Nawilżanie kęsów
A16	Pieczenie
A17	Kontrola
A18	Transport chleba
A19	Stygnięcie chleba
A20	Krojenie
A21	Pakowanie do koszy + kontrola
A22	Wysyłka

Źródło: Opracowanie własne na podstawie badań wykonanych w piekarni X

Każda piekarnia MiMPBP wykorzystuje specjalistyczne maszyny, które stanowią trzon procesu produkcyjnego linii do produkcji chleba. Przedmiotowe maszyny muszą zapewniać: bardzo dobrą stałą jakość chleba z dokładną masą ciasta, wysoki stopień powtarzalności procesów oraz wysoką niezawodność pracy związaną z ich wydajnością i bezawaryjnością.

Podstawowy schemat funkcjonowania poszczególnych maszyn składa się z następujących pozycji: zespół silosów, systemy dozowania, zespół miesiarek spiralnych, zespół dzież wyjezdnych, zespół wywrotnic dzież, zespół dzielarek ssąco-tłoczących, zespół zaokrąglarek stożkowych, zespół międzygarowni, zespół wydłużarek do ciasta, procesy odkładania kęsów na tace i wózki, zespół garowni, zespół pieców termo-olejowych, proces wystygania, zespół krajalnic wraz z kłosownicami. Struktura systemu produkcyjnego może czasami być objęta tajemnicą technologiczną.

W badaniach ww. niezawodności zostały wykorzystane modele probabilistyczne takie jak: roz-

kład wykładniczy, rozkład Weibulla, rozkład gamma, rozkład normalny standaryzowany, rozkład logarytmiczno-normalny.

W Tabeli 2 zostały przedstawione wybrane informacje dotyczące funkcjonowania zespołu pieców termo-olejowych w piekarni X. Informacje te były niezbędne dla obliczenia niezawodności dla przedmiotowych pieców, jak również wykonania wykresu intensywności uszkodzeń.

Tabela 2 Informacje dotyczące funkcjonowania zespołu pieców termo-olejowych (badania własne)

Nazwa zespołu maszyn	Zespół pieców termo-olejowych
Czas pracy dzienny	7 godzin dziennie
Czas pracy roczny (2018 r.)	7 h × 312 dni = 2184 h rocznie
Lista zdiagnozowanych uszkodzeń zespołu	Ogólny czas niesprawności zespołu (lata)
– Brak parowania	2011 r. (1 dzień / 4 godziny), 2013 r. (1 dzień / 4 godziny), 2014 r. (1 dzień / 4 godziny), 2015 r. (1 dzień / 4 godziny), 2016 r. (1 dzień / 4 godziny), 2017 r. (1 dzień / 4 godziny), 2018 r. (1 dzień / 4 godziny),
– Pękające wewnątrz pieca kaloryfery (wycieki oleju)	2009 r. (obsługa 2-3 dni robocze), 2011 r. (obsługa 2-3 dni robocze), 2013 r. (obsługa 2-3 dni robocze), 2014 r. (obsługa 2-3 dni robocze), 2015 r. (obsługa 2-3 dni robocze), 2016 r. (obsługa 2-3 dni robocze), 2017 r. (obsługa 2-3 dni robocze), 2018 r. (obsługa 2-3 dni robocze),
– Awaria elektroniki sterującej	2009 r. (1 dzień / 3 godziny), 2011 r. (1 dzień / 3 godziny), 2013 r. (1 dzień / 3 godziny), 2014 r. (1 dzień / 3 godziny), 2015 r. (1 dzień / 3 godziny), 2016 r. (1 dzień / 3 godziny), 2017 r. (1 dzień / 3 godziny), 2018 r. (1 dzień / 3 godziny)
Rok produkcji	2006
Symbol w procesie	ZP 1-10 (10 szt.)
Przewidywany czas bezawaryjnej pracy	10 lat = 87 600 godzin

Źródło: Opracowanie własne na podstawie badań wykonanych w piekarni X

Poniżej zostały przedstawione przykładowe obliczenia niezawodności dla zespołu pieców termo-olejowych wykonane w okresie przedmiotowych badań.

3.1 Rozkład wykładniczy

t = liczba lat od startu pracy zespołów do końca 2018 roku × średnia liczba dni roboczych w roku × dzienna liczba przepracowanych godzin przez zespół pieców termo-olejowych

$$t = 13 \times 312 \times 7 = \mathbf{28\ 392}$$

E(t) = przewidywany czas bezawaryjnej pracy

$$E(t) = \frac{1}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{1}{87600} = 0,00001141552$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,00001141552 \cdot 28392} \approx \mathbf{0,7231}$$

E(t) = średni czas pracy do uszkodzenia z uzyskanych danych

E(t) = 6552 (2009 r.) + 10 920 (2011 r.) + 15 288 (2013 r.) + 17 472 (2014 r.) + 19 656 (2015 r.) + 21 840 (2016 r.) + 24 024 (2017 r.) + 26 208 (2018 r.) / 8 = 141 960 / 8 = **17 745 (rbh)**

$$\lambda = \frac{1}{17745} = 0,0000563539$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,0000563539 \cdot 28392} \approx \mathbf{0,2019}$$

Dla rozkładu wykładniczego funkcji niezawodności R(t) przewidywany czas bezawaryjnej pracy zespołu pieców termo-olejowych wynosi 72,31%. Prawdopodobieństwo sukcesu poprawnego funkcjonowania zespołu w przedmiotowej funkcji niezawodności E(t) wynosi 20,19%.

3.2 Rozkład Weibulla

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^p}$$

p	E(t) Przewidywany czas bezawaryjnej pracy	E(t) Średni czas pracy do uszkodzenia z uzyskanych danych
1	R(t) = e ⁻¹ ≈ 0,7232 R(t) = e ⁻² ≈ 0,9003	R(t) = e ⁻¹ ≈ 0,2019 R(t) = e ⁻² ≈ 0,0773
2	R(t) = e ⁻³ ≈ 0,9666	R(t) = e ⁻³ ≈ 0,0167

Dla rozkładu Weibulla funkcji niezawodności R(t) przewidywany czas bezawaryjnej pracy zespołu pieców termo-olejowych dla wskaźnika p-1 = 72,32%, p-2 = 90,03%, p-3 = 96,66%. Prawdopodobieństwo sukcesu poprawnego funkcjonowania zespołu w przedmiotowej funkcji niezawodności E(t) wynosi dla wskaźnika p-1 = 20,19%, p-2 = 7,73%, p-3 = 1,67%.

3.3 Rozkład gamma

E(t) Przewidywany czas bezawaryjnej pracy

$$E(T) = \frac{p}{b}$$

$$p = 1 \quad 87\ 600 = \frac{1}{b} \quad b = 0,00001141552$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp(-bt) \sum_{i=0}^{p-1} \frac{(bt)^i}{i!} = 1 - \exp(-bt) \sum_{i=p}^{\infty} \frac{(bt)^i}{i!}$$

$$R(t) = 1 - e^{-(0,00001141552 \cdot 28392)} \cdot \left[\frac{(0,00001141552 \cdot 28392)^1}{1} \right] \approx \mathbf{0,7656}$$

$$p = 2 \quad 87\ 600 = \frac{2}{b} \quad b = 0,00002283105$$

$$R(t) = 1 - e^{-(0,00002283104 \cdot 28392)} \cdot \left[\frac{(0,00002283104 \cdot 28392)^1}{1} + \frac{(0,00002283104 \cdot 28392)^2}{2} \right] \approx \mathbf{0,5511}$$

$$p = 3 \quad 87\ 600 = \frac{3}{b} \quad b = 0,00003424656$$

$$R(t) = 1 - e^{-(0,00003424656 \cdot 28392)} \cdot \left[\frac{(0,00003424656 \cdot 28392)^1}{1} + \frac{(0,00003424656 \cdot 28392)^2}{2} + \frac{(0,00003424656 \cdot 20280)^3}{6} \right] \approx \mathbf{0,3955}$$

E(t) Średni czas pracy uszkodzenia z uzyskanych danych

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp(-bt) \sum_{i=0}^{p-1} \frac{(bt)^i}{i!} = 1 - \exp(-bt) \sum_{i=p}^{\infty} \frac{(bt)^i}{i!}$$

$$p = 1 \quad 17\ 745 = \frac{1}{b} \quad b = 0,0000563539$$

$$R(t) = 1 - e^{-(0,0000563539 \cdot 28392)} \cdot \left[\frac{(0,0000563539 \cdot 28392)^1}{1} \right] \approx \mathbf{0,6769}$$

$$p = 2 \quad 17\ 745 = \frac{2}{b} \quad b = 0,0001127078$$

$$R(t) = 1 - e^{-(0,0001127078 \cdot 28392)} \cdot \left[\frac{0,0001127078 \cdot 28392^1}{1} + \frac{(0,0001127078 \cdot 28392)^2}{2} \right] \approx \mathbf{0,6614}$$

$$p = 3 \quad 17\ 745 = \frac{3}{b} \quad b = 0,0001690617$$

$$R(t) = 1 - e^{-(0,0001690617 \cdot 28392)} \cdot \left[\frac{(0,0001690617 \cdot 28392)^1}{1} + \frac{(0,0001690617 \cdot 28392)^2}{2} + \frac{(0,0001690617 \cdot 28392)^3}{6} \right] \approx \mathbf{0,7150}$$

Dla rozkładu gamma funkcji niezawodności R(t) przewidywany czas bezawaryjnej pracy zespołu pieców termo-olejowych dla wskaźnika p-1 = 76,56%, p-2 = 55,11%, p-3 = 39,55%. Prawdopodobieństwo sukcesu poprawnego funkcjonowania zespołu w przedmiotowej funkcji niezawodności E(t) wynosi dla p-1 = 67,69%, p-2 = 66,14%, p-3 = 71,50%.

3.4 Rozkład normalny

m = Przewidywany czas bezawaryjnej pracy

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum(x-m)^2}{n}} \approx \mathbf{74\ 131,30}$$

dla $n = 8$, $m = 87\ 600$

$x_1 = 6552$, $x_2 = 10\ 920$, $x_3 = 15\ 288$, $x_4 = 17\ 472$, $x_5 = 19\ 656$, $x_6 = 21\ 840$, $x_7 = 24\ 024$, $x_8 = 26\ 208$

$$yt = \frac{t-t_0}{\delta} = \frac{28392-87600}{74131,30} \approx -0,7987$$

$$y_0 = -\frac{t_0}{\delta} = -\frac{87600}{74131,30} \approx -1,1817$$

$$R(t) = \frac{1 - \phi(yt)}{1 - \phi(y_0)} = \frac{1 - (-0,7987)}{1 - (-1,1817)} \approx 0,8244$$

$m = \text{Średni czas pracy do uszkodzenia z uzyskanych danych}$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum(x-m)^2}{n}} \approx 6255,96$$

dla $n = 8$, $m = 17\ 745$

$x_1 = 6552$, $x_2 = 10\ 920$, $x_3 = 15\ 288$, $x_4 = 17\ 472$, $x_5 = 19\ 656$, $x_6 = 21\ 840$, $x_7 = 24\ 024$, $x_8 = 26\ 208$

$$yt = \frac{t-t_0}{\delta} = \frac{28392-17745}{6255,96} \approx 1,7019$$

$$y_0 = -\frac{t_0}{\delta} = -\frac{17745}{6255,96} \approx -2,8364$$

$$R(t) = \frac{1 - \phi(yt)}{1 - \phi(y_0)} = \frac{1 - (-1,7019)}{1 - (-2,8364)} \approx 0,7043$$

Dla rozkładu normalnego funkcji niezawodności $R(t)$ przewidywany czas bezawaryjnej pracy zespołu pieców termo-olejowych wynosi 82,44%. Prawdopodobieństwo sukcesu poprawnego funkcjonowania zespołu w przedmiotowej funkcji niezawodności $E(t)$ wynosi 70,43%.

3.5 Rozkład logarytmiczno-normalny

$m = \text{Przewidywany czas bezawaryjnej pracy}$

dla $n = 8$, $m = \ln 87\ 600$ **11,38**, $x = \ln 28\ 392$ **10,25**

$x_1 = \ln 6552$ 8,7875; $x_2 = \ln 10\ 920$ 9,2984;
 $x_3 = \ln 15\ 288$ 9,6348, $x_4 = \ln 17\ 472$ 9,7684;
 $x_5 = \ln 19\ 656$ 9,8861; $x_6 = \ln 21\ 840$ 9,9915;
 $x_7 = \ln 24\ 024$ 10,0868; $x_8 = \ln 26\ 208$ 10,1738;

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum(x-m)^2}{n}} \approx 1,7315$$

$$yt = \frac{t-t_0}{\delta} = \frac{10,25-11,38}{1,7315} \approx -0,6526$$

$$y_0 = -\frac{t_0}{\delta} = -\frac{11,38}{1,7315} \approx -6,5723$$

$$R(t) = \frac{1 - \phi(yt)}{1 - \phi(y_0)} = \frac{1 - (-0,6526)}{1 - (-6,5723)} \approx 0,2182$$

$m = \text{Średni czas pracy do uszkodzenia z uzyskanych danych}$

dla $n = 5$ $m = \ln 17\ 745 \approx$ **9,78** $x = \ln 28\ 392$ **10,25**

$x_1 = \ln 6552$ 8,7875; $x_2 = \ln 10\ 920$ 9,2984;
 $x_3 = \ln 15\ 288$ 9,6348, $x_4 = \ln 17\ 472$ 9,7684;
 $x_5 = \ln 19\ 656$ 9,8861; $x_6 = \ln 21\ 840$ 9,9915;
 $x_7 = \ln 24\ 024$ 10,0868; $x_8 = \ln 26\ 208$ 10,1738;

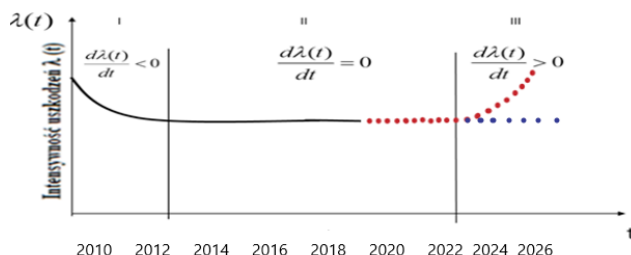
$$\delta = \sqrt{\frac{\sum(x-m)^2}{n}} \approx 0,3940$$

$$yt = \frac{t-t_0}{\delta} = \frac{10,25-9,78}{0,3940} \approx 1,1929$$

$$y_0 = -\frac{t_0}{\delta} = -\frac{9,78}{0,3940} \approx -24,8223$$

$$R(t) = \frac{1 - \phi(yt)}{1 - \phi(y_0)} = \frac{1 - (-1,1929)}{1 - (-24,8223)} \approx 0,0849$$

Dla rozkładu logarytmiczno-normalnego funkcji niezawodności $R(t)$ przewidywany czas bezawaryjnej pracy zespołu pieców termo-olejowych wynosi 21,82%. Prawdopodobieństwo sukcesu poprawnego funkcjonowania zespołu w przedmiotowej funkcji niezawodności $E(t)$ wynosi 8,49%. Powyższe obliczenia niezawodności zostały wykorzystane do sporządzenia wykresu intensywności uszkodzeń dla zespołu pieców termo-olejowych w latach 2006-2018 oraz przewidywanego rozkładu funkcji intensywności uszkodzeń w latach 2019-2026.



Rysunek 1 Wykres intensywności uszkodzeń dla zespołu pieców termo-olejowych (badania własne).

Źródło: Opracowanie własne na podstawie badań wykonanych w piekarni X

W przedziale pierwszym intensywność uszkodzeń jest funkcją malejącą. Jest to tzw. wstępny okres eksploatacji, zwany też okresem adaptacji i docierania, w czasie którego uszkodzają się elementy o niskiej niezawodności. W okresie tym ujawniają się ukryte wady materiałów, błędy konstrukcji, montażu, niedopatrzona kontroli, usterki powstałe w czasie transportu i przechowywania oraz inne tego typu usterki obiektu. Na uszkodze-

nia mają też wpływ umiejętności użytkownika, który uczy się obsługiwać urządzenie (adaptacja). W przedziale drugim intensywność uszkodzeń jest stała. Jest to tzw. *okres normalnej eksploatacji*, w którym dominują uszkodzenia spowodowane przez czynniki losowe, np. nagłe przeciążenie w trudnych warunkach pracy. Uszkodzenia takie można by wykluczyć, biorąc pod uwagę w obliczeniach i projektowaniu granicznie ciężkie warunki eksploatacji. Prowadziłoby to jednak do zbyt dużych ciężarów własnych maszyn. Długość tego okresu zależy od warunków eksploatacji i konserwacji urządzeń.

W przedziale trzecim intensywność uszkodzeń jest funkcją rosnącą. Spowodowane jest to głównie procesami zużycia i starzeniem się urządzeń. W elementach urządzeń długo eksploatowanych zachodzą nieodwracalne zmiany fizyczne i chemiczne, zmniejszające ich wytrzymałość. Na skutek zużycia warstwy wierzchniej elementów współpracujących powiększają się luzy, a osłabione elementy ulegają deformacjom. Jest to więc okres zwiększania się prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzeń.

4. WNIOSKI

W niniejszym artykule autor na bazie własnych badań (wykonanych w okresie 2016.01.02-2018.12.31 w mikro i małych przedsiębiorstwach branży piekarniczej) przedstawił metody opomiarowania niezawodności systemu produkcyjnego tradycyjnego, bazującego na koncepcji probabilistycznej, takie jak: rozkład wykładniczy, rozkład Weibulla, rozkład gamma, rozkład normalny standaryzowany, rozkład logarytmiczno-normalny. Został przedstawiony schemat procesu produkcyjnego chleba, a także park maszyn stosowany na linii produkcyjnej. Na bazie ww. modeli probabilistycznych autor przedstawił przykładowe obliczenia dla zespołu pieców termo-olejowych z wykresem intensywności uszkodzeń w latach 2006-2018 oraz przewidywanym rozkładem funkcji intensywności uszkodzeń w latach 2019-2026.

LITERATURA

- [1] Bobrowski D., Probabilistyka w zastosowaniach technicznych, WNT, Warszawa 1986.
- [2] Fidelis E., Firkowicz S., Grzesiak K., Kołodziejcki J., Wiśniewski K., Matematyczne podstawy oceny niezawodności, PWN, Warszawa 1996.
- [3] Kryszczyński W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M., Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019.
- [4] Macha E., Niezawodność maszyn, Politechnika Opolska, Skrypt nr 237, 2001.
- [5] Migdalski J., Inżynieria niezawodności, Wyd. ATR Bydgoszcz i ZETOM Warszawa, 2018.
- [6] Nadolny K. (red.), Podstawy modelowania niezawodności materiałów eksploatacyjnych, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Poznań–Radom 1999.
- [7] Plucińska A., Pluciński E., Probabilistyka. Rachunek prawdopodobieństwa. Statystyka matematyczna. Procesy stochastyczne, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.
- [8] Salamonowicz T. (red.), Metody badań przyczyn i skutków uszkodzeń. XXXIII Zimowa Szkoła Niezawodności, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2005.
- [9] Słowiński B., Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2002.
- [10] Warszzyński M., Niezawodność w obliczeniach konstrukcyjnych, PWN, Warszawa 1996.
- [11] Ważyńska-Fiok K., Jaźwiński J., Niezawodność systemów technicznych, PWN, Warszawa 1990.
- [12] Zdanowicz R., Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania, Wydanie II, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.