POLITECHNIKA ZIELONOGÓRSKA • ZESZYTY NAUKOWE NR 124
Nr 10 INŻYNIERIA ŚRODOWISKA 2000

Ewa OGIOŁDA*

# STRUKTURA I WSKAŹNIKI NIEZAWODNOŚCI ELASTYCZNEGO SYSTEMU PNEUMATYCZNEGO ODWIÓROWANIA

*Streszczenie*

*W artykule przedstawiono problematykę związaną z instalacjami pneumatycznego odwiórowania w przemyśle drzewnym. Omówiono zagadnienia dotyczące niezawodności takich instalacji. Pokazano w jaki sposób zmienia się struktura systemu i wskaźniki niezawodności wraz ze zmianami wyposażenia i warunków pracy instalacji.*

## 1. WSTĘP

W trakcie procesów wytwarzania przy mechanicznej obróbce drewna powstają odpady w postaci pyłów i wiórów, do odprowadzania których stosowane są pneumatyczne instalacje wyciągowe, określane odpowiednio jako instalacje pneumatycznego odpylania i odwiórowania [S. Dolny, 1999]. Specyficzne właściwości transportowanych odpadów stwarzają zagrożenie pożarowe i wybuchowe. Zadaniem instalacji jest zapewnienie:

- odpowiednich warunków bezpieczeństwa i higieny na stanowisku pracy,
- bezpieczeństwa pożarowego wewnątrz hali,
- właściwych warunków eksploatacji maszyn.

Cechą charakterystyczną instalacji pneumatycznego odwiórowania jest jej wysoka energochłonność. Prowadzone są badania zmierzające do jej ograniczenia. Możliwość taką stwarza dostosowanie pracy instalacji pneumatycznego odwiórowania do zmiennych procesów pracy obrabiarek. Wykazano, że równoczesność pracy obrabiarek, wynikająca z procesu technologicznego, jest zmienna w czasie i waha się w dość szerokich granicach. Rzeczywiste zapotrzebowanie na odwiórowanie jest mniejsze od maksymalnego [Z. Szełemej, 1993]. W celu dostosowania pracy instalacji do procesów pracy obrabiarek stosuje się dodatkowe wyposażenie instalacji – zasuwy odcinające na przewodach odciągowych, przetwornice częstotliwości, doprowadzenie dodatkowego

Mgr inż. Ewa Ogiołda – Politechnika Zielonogórska

powietrza uzupełniającego do instalacji. Zapewnienie bezpieczeństwa pożarowego umożliwiają zaś instalacje gaszenia iskier, zasuwy przeciwpożarowe lub klapy dekompresyjne [S. Joński,1998]. Różnorodność wyposażenia i zmienność warunków pracy instalacji pneumatycznego odwiórowania wywierają wpływ na jej niezawodność.

## 2. POJĘCIE NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU

Niezawodność systemu określana jest jako własność zachowania zdolności do realizacji zadanych funkcji, w określonym przedziale czasu i w określonych warunkach. Ocena niezawodności systemu zależna jest od zadań, jakie są mu stawiane. Rozpatrywane może być więc w różnych aspektach i w zależności od przyjętych kryteriów prowadzi do odmiennych wniosków.

Według teorii niezawodności kryteriami oceny mogą być [K. Ważyńska - Fiok, 1990]:

- nieuszkadzalność,
- gotowość,
- trwałość,
- bezpieczeństwo,
- efektywność.

Stosownie do wymienionych we wstępie funkcji uznano, że najbardziej istotnymi cechami do oceny niezawodności systemu pneumatycznego odwiórowania są:

- skuteczność eksploatacyjna,
- bezpieczeństwo pracy,
- efektywność ekonomiczna.

Skuteczność odprowadzania odpadów zależna jest od parametrów eksploatacyjnych instalacji. Prędkości przepływu ulegają zmianie w zależności od ilości otwartych przewodów odciągowych. W miarę zamykania przewodów odciągowych prędkości przepływu w przewodach odciągowych wzrastają, a w przewodzie głównym prędkość obniża się [W. Uździcki, 1990]. Właściwe działanie instalacji zapewnione jest przez zachowanie minimalnych prędkości przepływu, określanych w zależności od rodzaju transportowanego materiału.

Wraz ze zmianą parametrów przepływu, zmianom ulega także panujące w instalacji podciśnienie. Powstanie nadmiernego podciśnienia wskutek zamknięcia zbyt dużej ilości przewodów odciągowych grozi zniszczeniem instalacji, stwarzając zagrożenie bezpieczeństwa [I. F. Zanevskij, 1985].

W związku z wysoką energochłonnością instalacji pneumatycznego odwiórowania wśród stawianych systemowi zadań jest również osiągnięcie możliwie niskiego poziomu kosztów eksploatacji. Wskaźnikiem jest efektywność ekonomiczna, określona jako zależność między poniesionymi nakładami (inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi), a uzyskanymi efektami (skuteczność, bezpieczeństwo).

# 3. STRUKTURA SYSTEMU

## 1.1. Typy strukturalne systemu

Niezawodność systemu zależna jest od niezawodności jego elementów oraz od relacji między tymi elementami, czyli struktury systemu. Jest to ciąg relacji pomiędzy poszczególnymi elementami, jakie zachodzą w procesie realizacji zadania.
Istnieje kilka typów strukturalnych systemu. Rozważając system składający się z n elementów, który jest zdolny do realizacji swojej funkcji, gdy k elementów spełnia swoje zadania wyróżnia się [K. Ważyńska - Fiok, 1990]: system o strukturze szeregowej, gdy k = n,

- system o strukturze równoległej, gdy k = 1,
- system o tzw. strukturze „k z n"

Zależności pomiędzy elementami systemu mogą być różnego rodzaju. Można podzielić je ze względu na pełnioną funkcję w następujący sposób:

- elementy podstawowe – realizujące zadania systemu,
- elementy nadmiarowe – przystępujące do działania po uszkodzeniu
- odpowiednich elementów podstawowych.

Według powyższego podziału określa się strukturę systemu ze względu na kryterium nadmiarowości, jako:

- system nadmiarowy – jeżeli istnieją elementy, których uszkodzenie nie powoduje przejścia obiektu w stan niezdatności,
- system nienadmiarowy – jeżeli takie elementy nie istnieją.

## 3.1 System pneumatycznego odwiórowania o strukturze nienadmiarowej

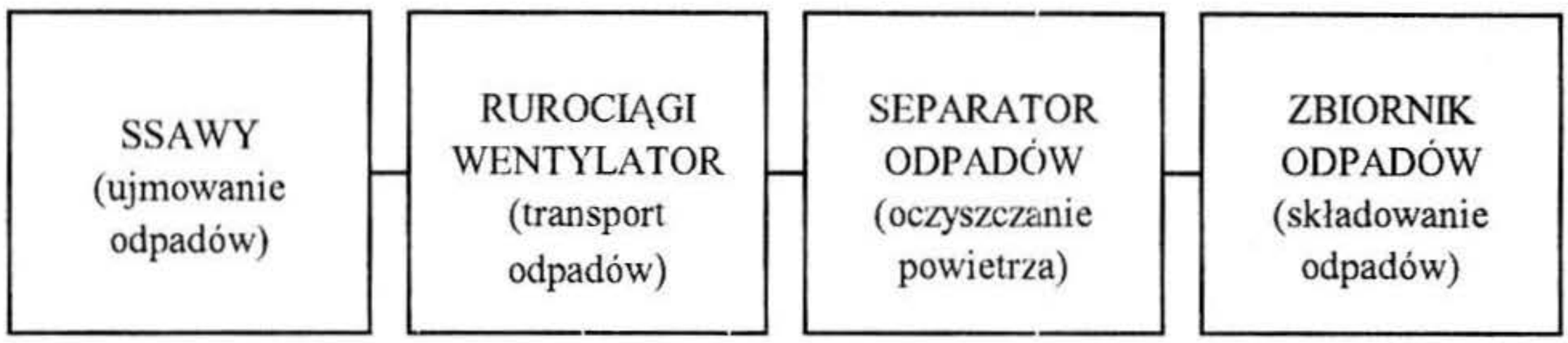
Proces skutecznego usuwania odpadów obejmuje:

- uchwycenie odpadów u źródła ich powstawania,
- przetransportowanie ich na zewnątrz hali,
- oddzielenie odpadów od transportowanego powietrza.

Stosownie do tego w skład instalacji wchodzą następujące elementy:

- ssawy,
- rurociągi,
- wentylator,
- separator odpadów,
- zbiornik odpadów.

Elementy te tworzą tzw. minimalną ścieżkę zdatności, czyli podzbiór elementów, które znajdując się w stanie zdatności, powodują zdatność całego systemu.
Tak skonstruowany system można opisać strukturą szeregową. Każdy z występujących w nim elementów musi być sprawny, aby system funkcjonował poprawnie. Strukturę omawianego systemu przedstawia rys. 1.



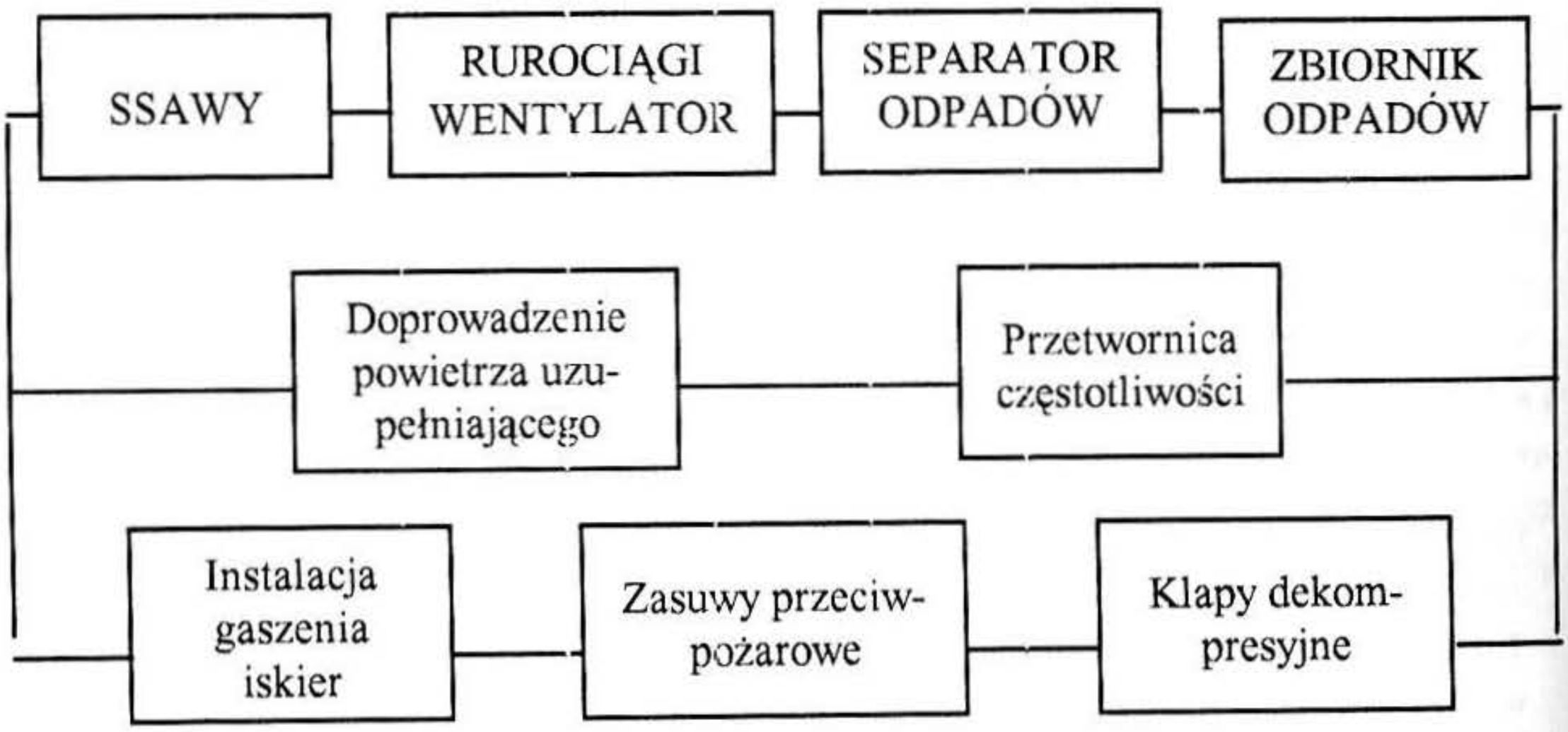

*Rys. 1. System pneumatycznego odwiórowania o strukturze szeregowej.*

## 3.2 System pneumatycznego odwiórowania o strukturze nadmiarowej

W skład instalacji pneumatycznego odwiórowania wchodzą różnego rodzaju elementy nadmiarowe, których zastosowanie w instalacji nie jest niezbędne dla przebiegu procesu odwiórowania. Wprowadzenie kolejnych elementów instalacji zmienia jej strukturę niezawodnościową. Część z nich stosowana jest z uwagi na zagrożenie pożarowe i wybuchowe, mając za zadanie zabezpieczenie przed niebezpieczeństwem lub ograniczenie skutków zaistniałego zdarzenia. Inne elementy stosowane są w instalacjach w celu zmniejszenia energochłonności i dostosowania pracy instalacji do zmiennych procesów pracy obrabiarek.

Urządzenia zabezpieczające: klapy dekompresyjne, zasuwy przeciwpożarowe, odpowiednia konstrukcja zbiornika, doprowadzenie powietrza uzupełniającego lub instalacja gaszenia iskier stanowią w strukturze niezawodnościowej elementy nadmiarowe. Ich działanie nie decyduje o wykonaniu zadania. Uruchamiane są wtedy, gdy zawiedzie funkcjonowanie elementów podstawowych.

Instalacje wyposażone w jakiekolwiek elementy zabezpieczające mają strukturę niezawodnościową typu „k z n". Liczbę k określają elementy instalacji standardowej, stanowiące minimalną ścieżkę zdatności, a pozostałe elementy w ilości równej n – k to zabezpieczenia. Strukturę systemu wyposażonego w elementy nadmiarowe przedstawia rys. 2.




*Rys. 2. System pneumatycznego odwiórowania o strukturze typu k z n.*

# 4. FUNKCYJNE WSKAŹNIKI NIEZAWODNOŚCI ELASTYCZNEGO SYSTEMU PNEUMATYCZNEGO ODWIÓROWANIA

## 4.1 Stany bezpieczeństwa systemu

W teorii niezawodności wyróżnia się różne stany, w jakich system może się znajdować. Są to [J. Jaźwiński, 1993]:

- stan bezpiecznej pracy (zdatności funkcjonalnej),
- stan zagrożenia bezpieczeństwa,
- stan zawodności bezpieczeństwa,
- stan zawodności sprawności.

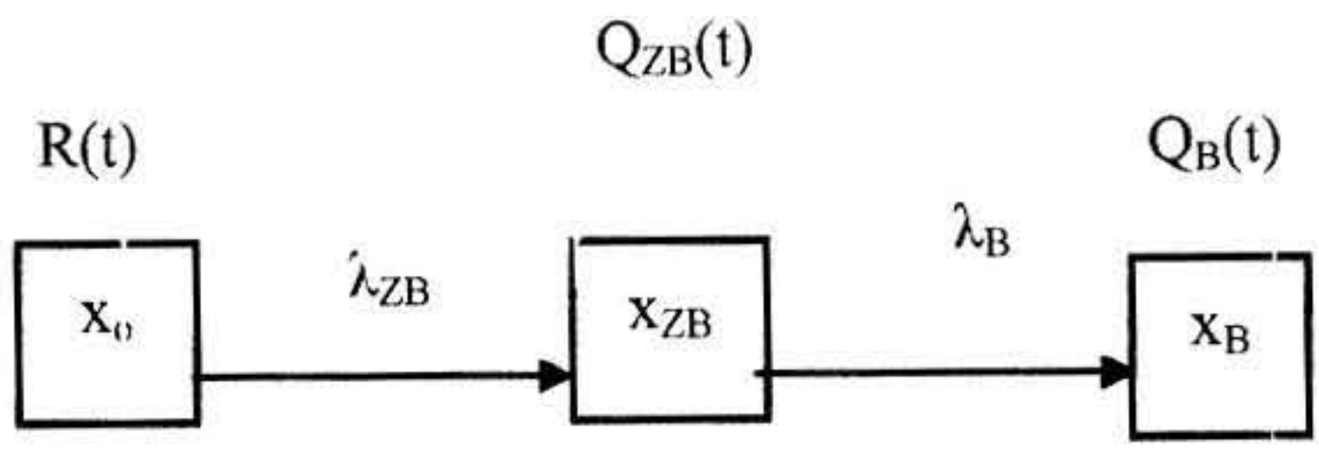
Przejście systemu ze stanu bezpieczeństwa do stanu zagrożenia bezpieczeństwa może nastąpić wskutek pojawienia się czynników porażających (źródło zapłonu, obecność palnego pyłu, nadmierne podciśnienie). Możliwość powrotu systemu sytemu do stanu zdatności funkcjonalnej daje wyposażenie instalacji w urządzenia zabezpieczające, w przeciwnym wypadku występuje stan zawodności sprawności lub stan zawodności bezpieczeństwa.

Zależnie od wyposażenia i zmiennych warunków pracy instalacji pneumatycznego odwiórowania, różne są grafy przejść systemu między poszczególnymi stanami.

## 4.2 Charakterystyka różnych wariantów instalacji

### *4.2.1. Instalacja standardowa*

Jest to instalacja pracująca w sposób ciągły, ze stałą wydajnością i niezmiennymi prędkościami przepływu. Dla prawidłowo zaprojektowanej instalacji prędkość przepływu większa od wartości minimalnej powinna uniemożliwiać osiadanie pyłów w rurociągu. Stan bezpiecznej pracy może przejść do stanu zagrożenia bezpieczeństwa w momencie pojawienia się źródła zapłonu, a do stanu zawodności bezpieczeństwa, jeśli stanie się to w warunkach sprzyjających wystąpieniu pożaru lub wybuchu.



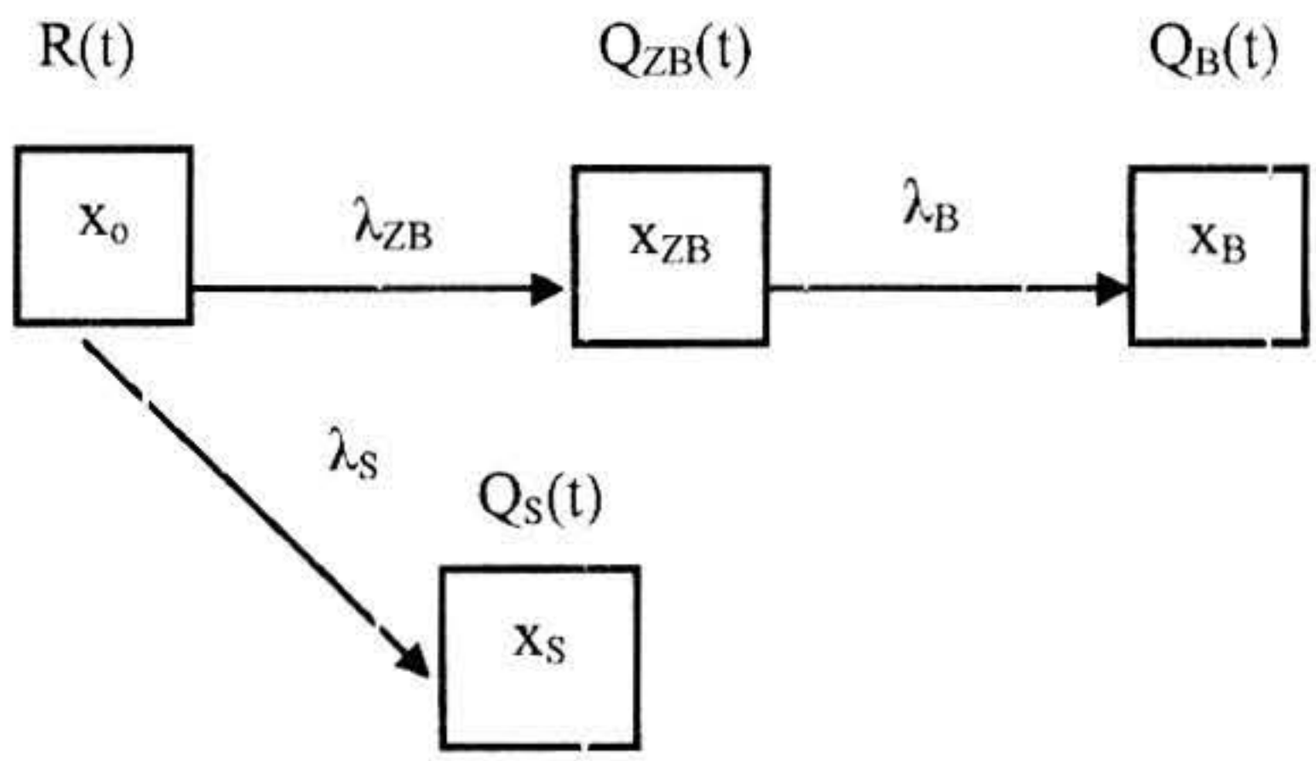

*Rys. 3. Graf instalacji standardowej*

*Oznaczenia: $x_0$ – stan zdatności funkcjonalnej, $x_{ZB}$ – stan zagrożenia bezpieczeństwa, $x_B$ – stan zawodności bezpieczeństwa, $R(t)$ – niezawodność systemu, $Q_{ZB}(t)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia bezpieczeństwa, $Q_B(t)$ – zawodność bezpieczeństwa, $\lambda_{ZB}$ – intensywność przejść ze stanu zdatności do stanu zagrożenia bezpieczeństwa, $\lambda_B$ – intensywność przejść ze stanu zagrożenia do stanu zawodności bezpieczeństwa.*

Tego typu instalacja może być opisana trójstanowym modelem systemu ze stanem zagrożenia bezpieczeństwa, co przedstawiono na rys. 3.
Stany bezpiecznej pracy i zagrożenia bezpieczeństwa traktowane są jako odwracalne, a stan zawodności bezpieczeństwa jest stanem pochłaniającym. Instalacja wyposażona jest tylko w zasuwy przeciwpożarowe i otwory dekompresyjne, co pozwala jedynie na minimalizację skutków zaistniałego zdarzenia, ale odparowanie sytuacji niebezpiecznej jest niemożliwe.

### *4.2.2. Instalacja pracująca w warunkach zmiennych*

Instalacja taka wyposażona jest w zasuwy znajdujące się na przewodach odciągowych. W czasie, gdy obrabiarka nie pracuje zasuwa jest zamykana. Ilość odprowadzanego powietrza jest odpowiednio mniejsza. W konsekwencji prędkości w przewodach odciągowych rosną, a w przewodzie głównym prędkość przepływu maleje.
Instalacja tego typu ze stanu bezpiecznej pracy przejść może zarówno do stanu zagrożenia bezpieczeństwa, jak i do stanu zawodności sprawności. Zaistnienie stanu zagrożenia bezpieczeństwa wywołać może wystąpienie źródła zapłonu, a także przepływ z prędkością o wartości mniejszej od minimalnej, co stwarza większe prawdopodobieństwo osiadania transportowanego materiału. Jeżeli instalacja wyposażona jest tylko w zasuwy przeciwpożarowe i otwory dekompresyjne, pozwala to jedynie na minimalizację skutków zaistniałego zdarzenia, ale odparowanie sytuacji niebezpiecznej jest niemożliwe.




*Rys. 4. Graf instalacji pracującej w warunkach zmiennych.*
*Oznaczenia: $x_S$ – stan zawodności sprawności, $Q_S(t)$ – zawodność sprawności, $\lambda_S$ –intensywność przejść ze stanu zdatności do stanu zawodności sprawności. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 3.*

W przypadku zamykania zasuw istnieje również ograniczenie określane przez maksymalną wartość podciśnienia, jakie może panować w instalacji. Jeśli zbyt duża liczba zasuw zostanie zamknięta, konsekwencją może być zniszczenie instalacji, a zatem system przejdzie do stanu zawodności sprawności.
W instalacji wyposażonej w zasuwy odcinające można dodatkowo zastosować przetwornicę częstotliwości. Zmiana prędkości obrotowej silnika spowoduje wówczas

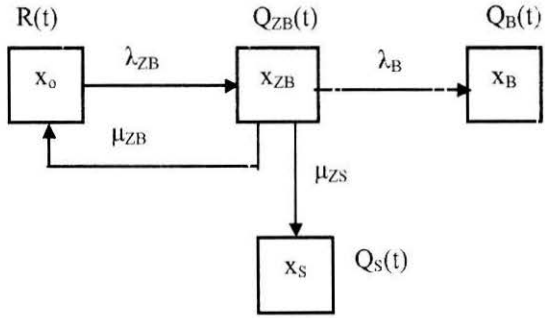
zmianę parametrów pracy instalacji – sprężu i natężenia przepływu. Omawiana instalacja może być traktowana jako system czterostanowy z nieodwracalnym stanem zagrożenia bezpieczeństwa, jak na rys.4.

### *4.2.3. Instalacja wyposażona w systemy bezpieczeństwa*

W instalacji wyposażonej w instalację do gaszenia iskier obecność źródła zapłonu jest wykrywana przez czujnik, skąd informacja trafia do centralki i następuje gaszenie przy użyciu rozpylonej za pośrednictwem dysz wody. Jeżeli urządzenie zadziała i iskry zostaną ugaszone przed wystąpieniem zapłonu, niebezpieczeństwo zostaje odparowane i praca przebiega dalej bez zakłóceń i przerw. System ze stanu zagrożenia bezpieczeństwa powraca do stanu zdatności funkcjonalnej.

Jeżeli iskry są rejestrowane nadal, uruchomione zostają urządzenia odcinające przepływ lub zmieniające jego kierunek, ewentualnie wyłączane są obrabiarki i wentylatory znajdujące się w zagrożonej części instalacji. W takiej sytuacji zagrożenie bezpieczeństwa związane z pojawieniem się źródła zapłonu lub palnego pyłu może być odparowane przez przejście do stanu zawodności sprawności. W przeciwnym wypadku występuje stan zawodności bezpieczeństwa.

Instalację taką można opisać jako system 4 - stanowy z odwracalnym stanem zagrożenia bezpieczeństwa do stanu zdatności funkcjonalnej lub zawodności sprawności, jak na rys. 5.




*Rys. 5. Graf instalacji wyposażonej w urządzenia zabezpieczające*
*Oznaczenia: $\mu_{ZB}$ – intensywność przejść ze stanu zagrożenia bezpieczeństwa do stanu zdatności, $\mu_S$ – intensywność przejść ze stanu zagrożenia bezpieczeństwa do zawodności sprawności. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 3 i 4.*

## 4.3 Wyznaczenie wskaźników niezawodności dla różnych wariantów instalacji

Wskaźniki niezawodności systemu to charakterystyki funkcyjne lub liczbowe określające stan systemu. Każdy ze stanów systemu może zaistnieć z określonym prawdopodobieństwem, a przejścia między nimi opisywane są przez intensywność.

Procesy zachodzące w instalacji pneumatycznego odwiórowania mają charakter losowy. Możliwe jest więc opisanie ich przy użyciu procesów Markowa.

Pochodna prawdopodobieństwa przebywania w i-tym stanie określona jest wzorem [J. Jaźwiński, 1993]:

$$\begin{aligned} &\frac{dP_i(t)}{dt} = -P_i(t)\sum_{i=1}^{n}\lambda_{ij}(t) + \sum_{j=1}^{n}P_j(t)\lambda_{ji}(t) \\ &\sum_{i=1}^{n}P_i(t) = 1 \\ &P_i(0) = P_i \end{aligned} \tag{1}$$

gdzie:

$P_i(t)$ – prawdopodobieństwo przebywania w i-tym stanie,

$\lambda_{ij}$ – intensywność przejść łuków wychodzących z i-tego stanu,

$P_j(t)$ – prawdopodobieństwo przebywania w stanach, do których system ze stanu $x_i$ przechodzi,

$\lambda_{ji}$ – intensywność przejść ze stanów $x_j$ do $x_i$

System można opisać równaniem:

$$R(t) + Q_{ZB}(t) + Q_B(t) + Q_S(t) = 1 \tag{2}$$

Układ równań Kołmogorowa – Chapmana ma postać:

$$\begin{cases} R'(t) = -\lambda_{ZB}R(t) + \mu_{ZB}Q_{ZB}(t) \\ Q'_{ZB}(t) = -(\lambda_B + \mu_{ZS} + \mu_{ZB})Q_{ZB}(t) + \lambda_{ZB}R(t) \\ Q'_S(t) = \mu_{ZS}Q_{ZB}(t) \\ Q'_B(t) = \lambda_B Q_{ZB}(t) \end{cases} \tag{3}$$

$$R(0) = 1,\ Q_{ZB}(0) = Q_S(0) = Q_B(0) = 0$$

Stosując transformację Laplace'a do powyższego układu równań otrzymuje się:

$$\begin{cases} s\tilde{R}(s) - R(0) = -\lambda_{ZB}\tilde{R}(s) + \mu_{ZB}\tilde{Q}_{ZB}(s) \\ s\tilde{Q}_{ZB}(s) - Q_{ZB}(0) = -(\lambda_B + \mu_{ZS} + \mu_{ZB})\tilde{Q}_{ZB}(s) + \lambda_{ZB}\tilde{R}(s) \\ s\tilde{Q}_S(s) - Q_S(0) = \mu_{ZS}\tilde{Q}_{ZB}(s) \\ s\tilde{Q}_B(s) - Q_B(0) = \lambda_{ZB}\tilde{Q}_{ZB}(s) \end{cases} \tag{4}$$

Po przekształceniach:

$$\begin{cases} \tilde{R}(s) = \dfrac{s + \mu_{ZS} + \mu_{ZB} + \lambda_B}{s^2 + s(\lambda_B + \mu_{ZB} + \lambda_{ZB} + \mu_{ZS}) + \lambda_{ZB}(\lambda_B + \mu_{ZS})} \\ \tilde{Q}_{ZB}(s) = \dfrac{\lambda_{ZB}}{s^2 + s(\lambda_B + \mu_{ZB} + \lambda_{ZB} + \mu_{ZS}) + \lambda_{ZB}(\lambda_B + \mu_{ZS})} \\ \tilde{Q}_S(s) = \dfrac{\mu_{ZS}\lambda_{ZB}}{s^2 + s(\lambda_B + \mu_{ZB} + \lambda_{ZB} + \mu_{ZS}) + \lambda_{ZB}(\lambda_B + \mu_{ZS})} \\ \tilde{Q}_B(s) = \dfrac{\lambda_{ZB}\lambda_B}{s\left[s^2 + s(\lambda_B + \mu_{ZB} + \lambda_{ZB} + \mu_{ZS}) + \lambda_{ZB}(\lambda_B + \mu_{ZS})\right]} \end{cases} \tag{5}$$

Stacjonarne wskaźniki zawodności sprawności i zawodności bezpieczeństwa wyznacza się następująco [J. Jaźwński, 1993]:

$$\begin{aligned} Q_S &= \lim_{s\to 0} s\tilde{Q}_S(s) = \frac{\mu_{ZS}}{\lambda_B + \mu_{ZS}} \\ Q_B &= \lim_{s\to 0} s\tilde{Q}_B(s) = \frac{\lambda_B}{\lambda_B + \mu_{ZS}} \end{aligned} \tag{6}$$

Niezawodność bezpieczeństwa systemu jest określona:

$$R_B = 1 - Q_B = 1 - \frac{\lambda_B}{\lambda_B + \mu_{ZS}} = \frac{\mu_{ZS}}{\lambda_B + \mu_{ZS}} \tag{7}$$

Średni czas pracy systemu do osiągnięcia stanu pochłaniającego (stanu zawodności sprawności lub zawodności bezpieczeństwa) oblicza się:

$$\overline{T} = -\lim_{s\to 0}\frac{d}{ds}\left[s\left(\tilde{Q}_S(s) + \tilde{Q}_B(s)\right)\right] = \frac{\lambda_B + \lambda_{ZB} + \mu_{ZB} + \mu_{ZS}}{\lambda_{ZB}(\lambda_B + \mu_{ZS})} \tag{8}$$

Średni czas przebywania systemu w podzbiorze niezawodnościowych stanów eksploatacyjnych do chwili przejścia do stanu zawodności bezpieczeństwa:

$$\overline{T}_B = \frac{\overline{T}}{Q_B} = \frac{\lambda_{ZB} + \lambda_B + \mu_{ZB} + \mu_{ZS}}{\lambda_{ZB}\lambda_B} \tag{9}$$

Średni czas przebywania systemu w podzbiorze niezawodnościowych stanów eksploatacyjnych do chwili przejścia do stanu zawodności sprawności:

$$\overline{T}_S = \frac{\overline{T}}{Q_S} = \frac{\lambda_{ZB} + \lambda_B + \mu_{ZB} + \mu_{ZS}}{\lambda_{ZB}\mu_{ZS}} \tag{10}$$

Wskaźniki dla pozostałych wariantów instalacji zamieszczono w tabeli 1.

[5] KARDOS J., Lorenz K.,Schuster H., Popov B. G., Noack J.: *Zuverlässigkeit und Sicherheit in der Luft- und Kältetechnik*. VEB Verlag Technik, Berlin (1986).

[6] OGIOŁDA E., Uździcki W.: *Zapobieganie pożarom i wybuchom w instalacjach odpylających przemysłu drzewnego*. Przemysł Drzewny nr 10 (1998).

[7] SKUPIŃSKI R.: *Problematyka zabezpieczeń przeciwpożarowych w przemyśle drzewnym*. Przemysł Drzewny nr 10 (1989).

[8] SZEŁEMEJ Z.: *Wpływ organizacji czasu pracy instalacji na energochłonność procesu odwiórowywania obrabiarek*. Przemysł Drzewny nr 3 (1993).

[9] UŹDZICKI W.: *Parametry pracy instalacji pneumatycznej odwiórowania pracujących w warunkach zmiennych*. Przemysł Drzewny nr 12 (1990).

[10] WAŻYŃSKA-FIOK K., Jaźwiński J.: *Niezawodność systemów technicznych*. PWN, Warszawa (1990).

[11] ZANEVSKIJ I. F., Kozoriz G. F.: *Vybor racionalnoj tolščiny stenki vozduchopro vodov pnevmotransportnych sistem*. Iż. Vysš. Uc. Zav. Les. Żurnal nr 3 (1985).