

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Wydział Mechaniczny Technologiczny

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

Rozprawa doktorska
Streszczenie

Mgr inż. Krzysztof Roczek

**Metoda diagnozowania układów napędowych
linii pras z zastosowaniem parametrów
elektrycznych**

Promotor
Dr hab. inż. Marek Fidali, Prof. Pol.Śl.

Promotor pomocniczy
Dr inż. Tomasz Rogala

Gliwice, 2024

Spis treści

1. Wprowadzenie	3
1.1 Prasa- podstawowe informacje	3
1.2 Systemy monitorowania	4
1.3 Motywacja	4
1.4 Podsumowanie	5
2. Charakterystyka problemu.....	6
3. Tezy	7
4. Koncepcja układu diagnostycznego	8
5. Zidentyfikowane stany techniczne maszyny.....	10
6. Analiza danych.....	12
6.1 Analiza sygnałów czasowych.....	12
6.2 Analiza EPVA- Extended Park's Vectors	12
6.3 Analiza hodografów Parke'a – część zewnętrzna konturu	13
6.3 Analiza hodografów Parke'a – analiza obrazu części wewnętrznej	14
6.5 Analiza za pomocą sieci neuronowych.....	15
7. Wnioski końcowe	18
8. Literatura	24

1. Wprowadzenie

Obecnie silniki indukcyjne znajdują zastosowanie niemal we wszystkich gałęziach przemysłu. Dzieje się tak ze względu na ich wydajność, prostą konstrukcję, cenę, a także dostępność układów sterowania zapewniających prawidłową pracę. Oznacza to również, że w przypadku ich powszechnego stosowania, działanie wielu urządzeń uzależnione jest od ich niezawodności [5]. Można tu wymienić wszystkie urządzenia dostarczane sterowane i napędzane silnikami elektrycznymi, jak np. pompy, wentylatory, przenośniki czy młyny [7]. Z tego powodu w celu zapewnienia stabilnej funkcjonalności maszyn konieczne jest wczesne wykrywanie usterek. Awarie maszyn indukcyjnych można podzielić na wewnętrzne i zewnętrzne. Pierwsze – wady spowodowane głównie siłami elektrycznymi lub mechanicznymi działającymi w maszynie. Zewnętrznym źródłem problemów mogą być uszkodzenia uzwojeń lub łożysk, pęknięte pręty wirnika i mimośrodowość [8, 9].

1.1 Prasa- podstawowe informacje

Tłoczenie wymaga zapewnienia ciągłości pracy pras. Obróbka plastyczna metalu jest pierwszą fazą procesu produkcyjnego w przemyśle motoryzacyjnym. Prasy stosowane do tłoczenia, wykorzystują matryce do produkcji różnego rodzaju komponentów. W większości przypadków proces formowania dzieli się na kilka faz, takich jak: głębokie tłoczenie, cięcie, gięcie i przekłuwanie. Oczywiście powyższą kolejność można modyfikować w zależności od aktualnego projektu procesu tłoczenia, jednakże w procesie formowania wykorzystuje się najczęściej pierwszą operację. Wspomniana kolejność określa także rodzaje pras instalowanych w liniach pras. Zgodnie z tym pierwszą prasą jest prasa do głębokiego tłoczenia zawierająca aparat ciągowy, inaczej poduszkę prasy. Druga operacja wyposażona jest, podobnie jak dalsze stacje, w zsypy złomu lub poduszkę suwaka. Uniwersalna konstrukcja prasy powoduje, że możliwe jest tłoczenie różnych elementów. Konsekwencją tego jest ryzyko wstrzymania produkcji w różnych zakładach produkcyjnych, gdyż jedna linia pras jest w stanie wyprodukować komponenty dla innych fabryk. Jest to spowodowane potencjalnym wstrzymaniem dostaw elementów tłoczonych w przypadku awarii. Można na to spojrzeć z punktu widzenia napędów. Wiele podsystemów pras napędzanych jest silnikami elektrycznymi. Można tu wymienić napęd główny prasy, układ regulacji suwaka, agregaty hydrauliczne czy układy transferowe służące do transportu części pomiędzy kolejnymi operacjami [10, 12].

Awaria jednego z nich powoduje zatrzymanie linii produkcyjnej. Z tego powodu bardzo ważne jest zapewnienie właściwej diagnostyki maszyn. W niektórych przypadkach możliwe jest otrzymanie wsparcia zdalnego, jednak poważne awarie mechaniczne wymagają naprawy na miejscu. Dlatego tak ważny jest monitoring maszyn.

1.2 Systemy monitorowania

Na rynku dostępne są rozwiązania systemów monitorowania [11]. Możliwe jest pozyskiwanie danych, sporządzanie ich wykresów, a nawet interpretacja. Mimo to naukowcy wciąż poszukują zaawansowanych i niezawodnych metod diagnostyki maszyn i silników elektrycznych. Można tu wymienić MCSA – Motor Current Signature Analysis, na którą składa się zestaw metod bazujących na analizie prądu elektrycznego, takich jak analiza prądu z wykorzystaniem transformaty Hilberta, transformacji Parka, szybkiej transformaty Fouriera czy analizy falkowej. Można zauważyć, że różnorodność metod jest bardzo duża. Autorzy w wielu analizach doszli do wniosku, że wymienione metody są przydatne w diagnostyce maszyn [13, 14, 15, 17].

1.3 Motywacja

Motywacją było znalezienie metody analizy napędu głównego, którą można zastosować w systemie zasilanym przez przemiennik częstotliwości. Analiza przedstawiona w tej rozprawie opiera się na danych zmierzonych w rzeczywistym systemie przemysłowym, w którym główny napęd prasy jest zasilany i sterowany przez falownik. Fakty te odróżniają te badania od innych publikacji, w których bardzo często prezentowane są metody diagnostyczne układów zasilanych z sieci energetycznej [18, 19]. Takie wyniki są również bardzo cenne, jednak bardzo trudno jest je zastosować w przemyśle, gdyż w rzeczywistości systemy sterowania napędami są zupełnie inne. W większości przypadków silniki układu napędowego prasy są sterowane i zasilane z przemienników częstotliwości [12]. Motywacją autora było zastosowanie w przemyśle najbardziej obiecujących metod opisanych w pracach naukowych i sprawdzenie, czy możliwe jest ich wykorzystanie w praktyce.

1.4 Podsumowanie

Główny układ napędowy analizowanej prasy sterowany jest za pomocą przetwornika częstotliwości i częściowo przez niego diagnozowany. Oprogramowanie konfiguracyjne umożliwia parametryzację niektórych alarmów i ostrzeżeń generowanych przez falownik. Celem kompleksowych badań jest podniesienie poziomu diagnostyki głównego układu napędowego, a w tym konkretnym przypadku, jego elementów krytycznych z punktu widzenia stabilności produkcji. Wdrażanie metod naukowych w środowisku przemysłowym daje ogromną szansę udowodnienia, że pomysły opracowane w laboratoriach można zastosować także w maszynach produkcyjnych. Dodatkowo wykorzystane sygnały z przetwornika częstotliwości mogą również wykazywać różnice pomiędzy standardowym sygnałem liniowym a pseudosinusoidą. Wiele eksperymentów opisanych w artykułach opiera się na zasilaniu sieciowym (o częstotliwości 50Hz). Dzięki temu całe badanie jest wyjątkowe, jako że konieczne było określenie metody analizy sygnałów oraz określenie cech charakterystycznych tych sygnałów, które można wykorzystać do diagnostyki maszyn elektrycznych silników indukcyjnych.

Całość rozprawy rozpoczyna się od wyjaśnienia zasady działania przemiennika częstotliwości. Z uwagi na fakt, że badania prowadzone są na głównym napędzie prasy, w kolejnym rozdziale opisano rodzaje tych układów napędowych. Mając wiedzę na temat istniejących typów pras, można analizować metody diagnostyki opartej zarówno na parametrach drganiowych, jak i elektrycznych. W celu wdrożenia systemu monitorowania konieczne było wykonanie analizy krytyczności w celu wskazania najbardziej krytycznych elementów maszyny. Jest to dobra praktyka szczególnie wtedy, gdy mamy do czynienia z dużymi maszynami, dla których z różnych powodów biznesowych, nie można przeprowadzić monitorowania wszystkich podzespołów. Opracowana metoda opiera się na analizie hodografów Parka z wykorzystaniem przetwarzania obrazu, zdefiniowaniu charakterystycznych fragmentów hodografów i obliczeniu ich różnych parametrów. Macierz korelacji Pearsona umożliwiła wyselekcjonowanie odpowiednich cech hodografów Parka i ich późniejsze wykorzystanie w klasyfikacji z wykorzystaniem sieci neuronowych.

2. Charakterystyka problemu

Podstawowym pytaniem, na jakie szukano odpowiedzi pisząc ten doktorat, dotyczyło możliwości zastosowania hodografów Parke'a do diagnostyki układu napędowego prasy oraz wyznaczenia ich cech charakterystycznych, które do takiej diagnostyki mogłyby posłużyć. Jak pokazano w teoretycznym tle rozprawy doktorskiej, większość wyników opisanych w artykułach naukowych opiera się albo na eksperymentach przeprowadzonych na napędach zasilanych z linii energetycznej, albo na symulacjach. Problem poruszony w tej pracy dyplomowej dotyczy analizy głównego systemu napędu przemysłowego linii pras tandemowych napędzanych przez falowniki. Pomysł autora polegał na zastosowaniu metody analizy hodografów Parka oraz znalezieniu cech tych hodografów, które można wykorzystać do identyfikacji systemu napędu prasy i falowników. W wielu artykułach autorzy [1, 2, 3, 4, 6] pokazują, że możliwe jest diagnozowanie maszyn i silników za pomocą hodografów Parka, ale system diagnostyczny działa bardziej efektywnie, gdy analiza opiera się na relewantnych sygnałach lub parametrach diagnostycznych. Problemem jest znalezienie parametrów hodografów Parka oraz metody klasyfikacji, które umożliwią diagnozowanie napędu prasy. Z uwagi na to, że całość badań opiera się na rzeczywistej, przemysłowej maszynie, planowane jest wdrożenie tych metod w systemie monitorowania zainstalowanym na prasie mechanicznej.

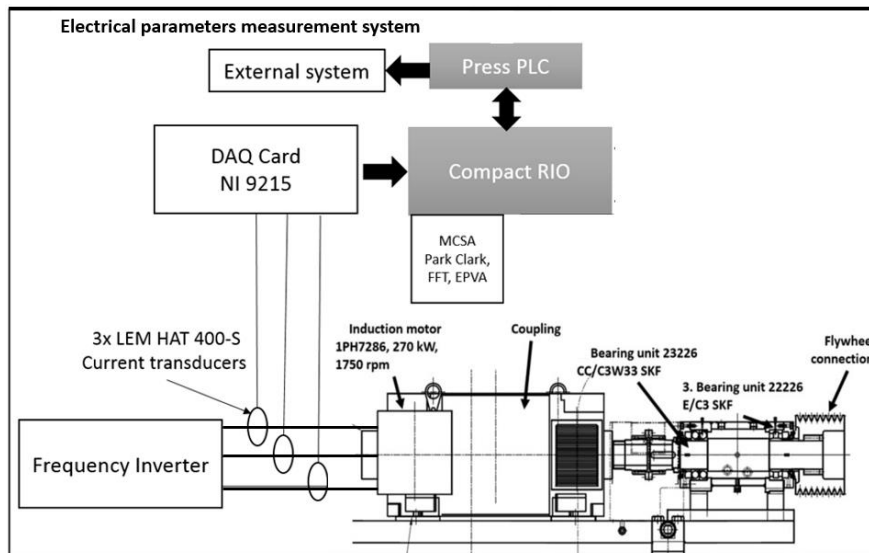
3. Tezy

Na tej podstawie sformułowano następujące tezy:

- Hodografy wektorów Parka mogą być wykorzystywane do monitorowania i diagnostyki stanu trójfazowych silników indukcyjnych prądu przemiennego zasilanych falownikami.
- Możliwa jest klasyfikacja stanu technicznego trójfazowego silnika indukcyjnego na podstawie hodografów wektora przestrzennego Parka przy użyciu metod przetwarzania obrazu, analizy i rozpoznawania wzorców.
- Możliwe jest wykorzystanie hodografów wektora Parka do diagnostyki trójfazowych silników indukcyjnych zasilanych przez falownik.
- Możliwe jest zastosowanie metod analizy obrazu do analizy hodografu wektora Parka w celu klasyfikacji stanu technicznego silnika indukcyjnego, a uzyskane cechy mogą być źródłem informacji diagnostycznej.
- Cechy obrazów hodografów Parka mogą być wykorzystywane do klasyfikacji stanu technicznego napędu prasy przy użyciu sztucznych sieci neuronowych (ANN).

4. Koncepcja układu diagnostycznego

Część sprzętową systemu monitoringu zbudowano w oparciu o modułowy system National Instruments Compact RIO, natomiast część programową zbudowano w oparciu o system National Instruments- LabView. Rysunek 4.1 przedstawia sprzęt stosowany w systemie diagnostycznym.



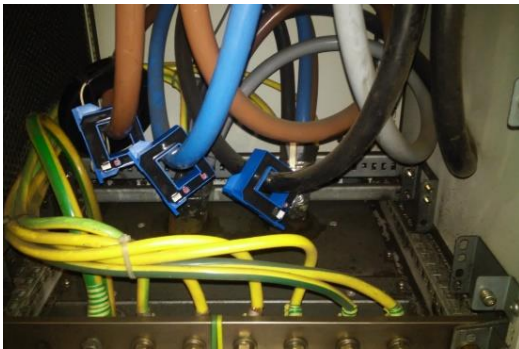
Rys. 4.1 Schemat układu monitorowania napędu głównego prasy



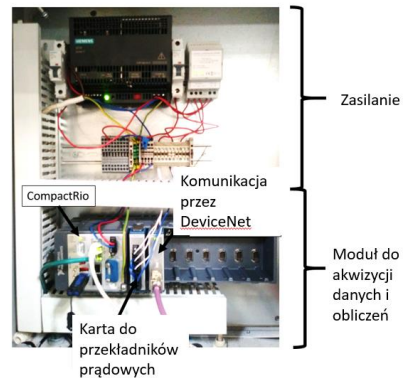
Rys. 4.2 Elementy wykorzystywane do celów systemu diagnostycznego

Rysunek 4.2 przedstawia komponenty sprzętowe zainstalowane na linii prasy. Część sprzętową systemu akwizycji uzupełniono o oprogramowanie opracowane w oparciu o

LabView. Oprogramowanie składa się z kilku modułów. Pierwszym krokiem akwizycji danych jest odczytanie wartości przez moduł FPGA. Odczyt został wykonany za pomocą standardowego oprogramowania NI, które wymagało parametryzacji w odniesieniu do wejść i szybkości. Oprogramowanie komunikuje się z komponentami NI za pomocą protokołu Ethernet IP. Następnie dane zapisywane są w folderze utworzonym na pamięci Flash. W ten sposób zapisywane są pliki *.tdms z kolejnymi pomiarami prądu. Wyzwolenie pomiaru wysyłane jest za pośrednictwem sieci DeviceNet. Możliwe jest także aktywowanie wyzwalacza ręcznego.



Rys. 4.3 Przekładniki prądowe zainstalowane w układzie zasilania silnika głównego prasy

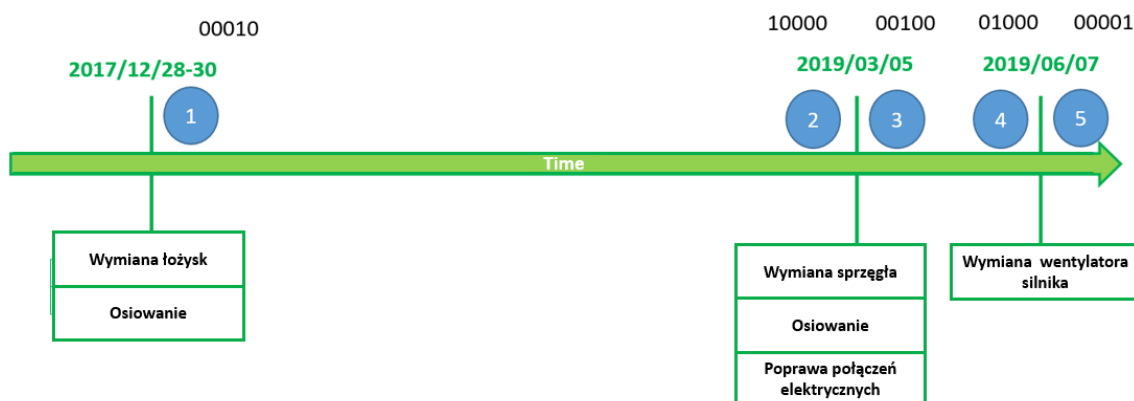


Rys. 4.4 Compact Rio w systemie monitorowania

Rys. 4.3 oraz Rys. 4.4 prezentuje zainstalowane przekładniki prądowe oraz układ NI Compact RIO.

5. Zidentyfikowane stany techniczne maszyny

Dane zebrano w okresie od 28.01.2017 r. do 22.01.2020 r. podczas typowej eksploatacji linii pras do tłoczenia. W procesie produkcyjnym i eksploatacji maszyny miały miejsce awarie i naprawy. Na podstawie czynności obsługowych i raportów zidentyfikowano charakterystyczne stany maszyn. Na Rys. 5.1 pokazano oś czasu z zaznaczonymi zidentyfikowanymi zdarzeniami konserwacyjnymi. Założono, że po każdej naprawie system nie reprezentował tego samego stanu technicznego. Biorąc to pod uwagę, przyjęto, że znaki uzyskane przed i po każdym zdarzeniu obsługowym powinny reprezentować inny stan maszyny, co sklasyfikowano w następujący sposób. Każdy stan został opisany liczbą, która jest następnie wykorzystywana jako sygnał wejściowy do analizy sieci neuronowej.



Rys. 5.1 Pierwszy zestaw analizowanych stanów maszyny

Rys. 5.2 Prezentuje drugie podejście do zagadnienia- wyróżniające stany niesprawności i stan po naprawie jako stan sprawny. Odzwierciedla to klasyfikację stanów w trakcie rzeczywistej eksploatacji obiektu, gdzie po każdej naprawie stan obiektu został określony jako zdolny do dalszej eksploatacji.

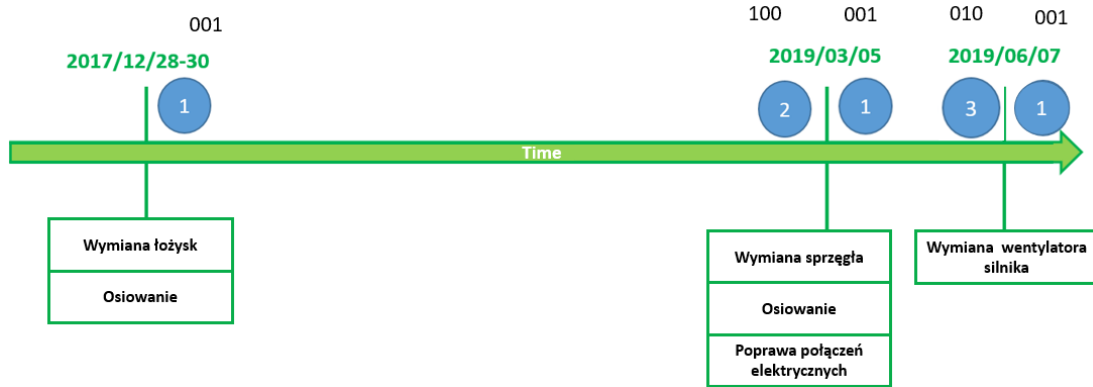


Fig. 5.2 Drugi zestaw analizowanych stanów maszyny

Tabela 5.1 Hodografy Parke'a przyporządkowane do poszczególnych stanów prasy

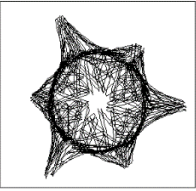
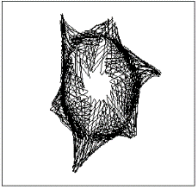
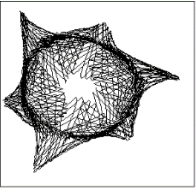
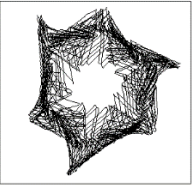
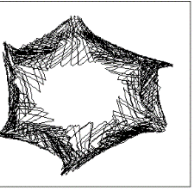
				
00010 Po naprawie	10000 Przed naprawą	00100 Po naprawie	01000 Przed naprawą	00001 Po naprawie

Tabela 5.1 pokazuje przykładowe hodografy Parke'a policzone dla poszczególnych stanów maszyny. Same hodografy zostały policzone wg. poniższych wzorów:

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}}i_a - \sqrt{\frac{1}{6}}i_b - \sqrt{\frac{1}{6}}i_c, \quad \text{wzór 5.1}$$

$$i_q = \sqrt{\frac{1}{2}}i_b - \sqrt{\frac{1}{2}}i_c \quad \text{wzór 5.2}$$

i_a, i_b, i_c - fazowe prądy chwilowe

6. Analiza danych

Przed rozpoczęciem analizy dane zostały podzielone na dane trenujące, testujące i walidacyjne. Dane trenujące zostały poddane analizie korelacyjnej Pearsona, na podstawie której zredukowano liczbę obserwowanych cech sygnałów czasowych, konturu zewnętrznego i konturu wewnętrznego hodografów. Analizę sygnałów czasowych przeprowadzono w celu porównania skuteczności ich działania z cechami hodografów. Analiza sygnałów została podzielona na kilka części:

6.1 Analiza sygnałów czasowych

Pierwszym etapem analizy było obliczenie cech prądowych przebiegów czasowych. Głównym celem tego wyliczenia i dalszej analizy tych parametrów było porównanie możliwości ich zastosowania w systemie diagnostycznym z możliwością wykorzystania cech hodografów. Ze względu na ilość posiadanych danych pomiarowych, konieczne było wyselekcjonowanie spośród wszystkich policzonych parametrów, tych relewantnych:

- Iw przeregulowanie przed przejściem
- Iw niedoregulowanie po przejściu
- Iv mediana
- Iu średnia (składowa stała)
- Iv średnia cyklu
- Iu przeregulowanie przed przejściem
- Iu niedoregulowanie po przejściu
- Iw mediana
- Iw średnia cyklu
- Iw średnia (składowa stała)
- Iv przeregulowanie przed przejściem
- Iv niedoregulowanie po przejściu

6.2 Analiza EPVA- Extended Park's Vectors

Autor dodatkowo przeprowadził analizę EPVA z wykorzystaniem standardu ISO20958. Dokument ten opisuje sposób na obliczenia cech charakterystycznych dla poszczególnych

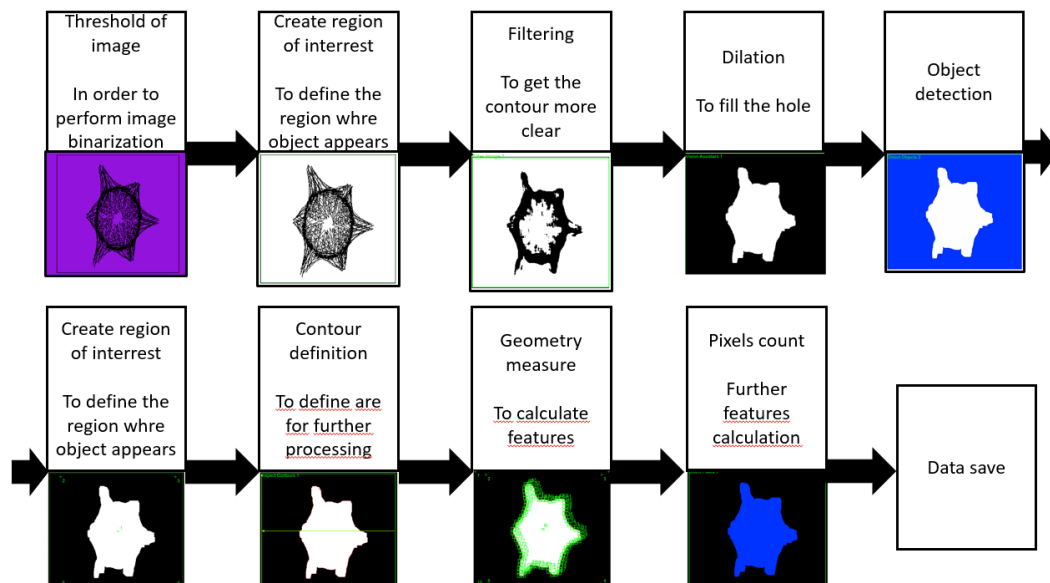
uszkodzeń w układach napędowych. Korzystając z tej możliwości sprawdzono następujące symptomy:

- Niezbalansowane obciążenie
- Ekscentryczność
- Uszkodzony pręt klatki
- Asymetria układu zasilania

Analiza tych symptomów została zaimplementowana w systemie diagnostycznym układu napędowego jako podstawowa metoda analizy stanu technicznego.

6.3 Analiza hodografów Parke'a – część zewnętrzna konturu

Dane w postaci wygenerowanych hodografów zostały zaimportowane do oprogramowania NI Vision Builder. Rys. 1.7 pokazuje algorytm pozwalający na wygenerowanie poszczególnych cech konturu obrazów.



Rys. 1.7 Analiza konturu

Analiza konturu została przeprowadzona w identyczny sposób dla wszystkich hodografów. Rezultatem jest obliczenie 33 cech, z których zostało wybranych 6 cech relewantnych:

- Minimalna krzywizna. Pozycja X (piksel)
- Minimalna krzywizna. Pozycja Y (piksel)

- Maksymalna krzywizna
- Maksymalna krzywizna. Pozycja X (piksel)
- Maksymalna krzywizna. Pozycja Y (piksel)
- Krawędź[1]. Pozycja Y (piksel))

6.3 Analiza hodografów Parke'a – analiza obrazu części wewnętrznej

Rysunek 1.8 prezentuje sekwencję obróbki hodografów jako obrazów. Działanie to ma na celu, podobnie jak w przypadku analizy kontury, ekstrakcję cech zdefiniowanego kształtu.

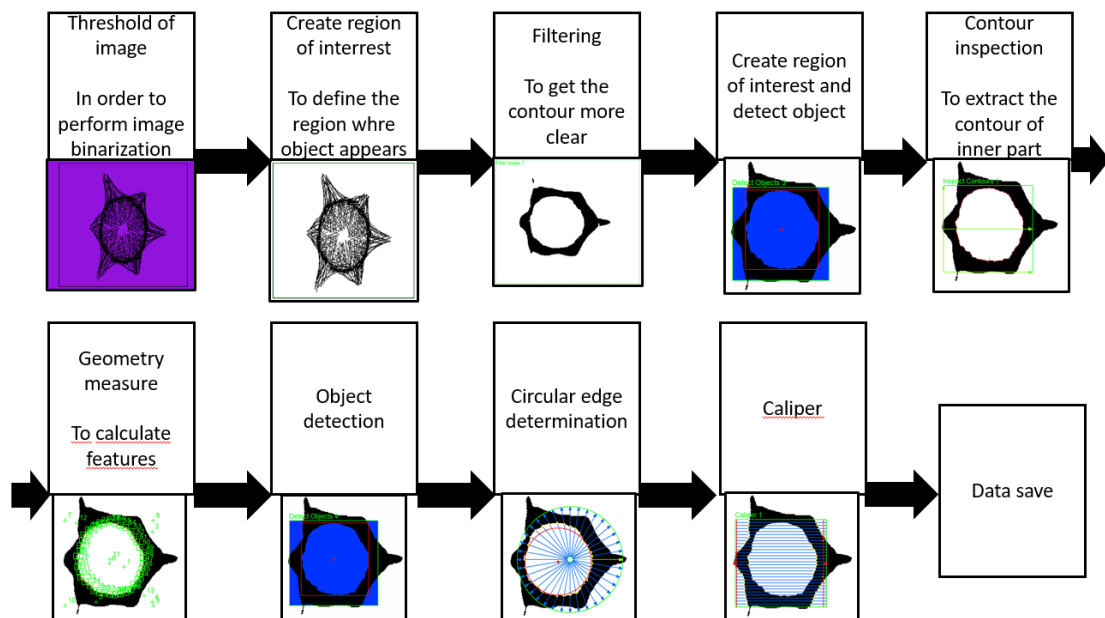


Fig. 1.8 Inner part processing algorithm

W kolejnym etapie zostały wytypowane cechy relewantne na podstawie macierzy korelacyjnej Pearsona. W wyniku tej analizy następujące cechy zostały wytypowane:

- Centrum. Pozycja Y (piksel)
- Średni SNR (stosunek sygnału do szumu)
- Odległość (piksel)
- Punkt 1. Pozycja X (piksel)
- Punkt 1. Pozycja Y (piksel)
- Punkt 2. Pozycja X (piksel)
- Punkt 2. Pozycja Y (piksel))

6.5 Analiza za pomocą sieci neuronowych

Do przeprowadzenia klasyfikacji danych została wykorzystana sieć neuronowa. Dane wejściowe stanowiły obliczone wcześniej cechy obrazów oraz sygnałów czasowych, a także stany maszyny. Klasyfikację przeprowadzono dla 5 jak i dla 3 stanów cech relewantnych.

W celu określenia wielkości sieci, zastosowano następujący wzór:

$$N_h = \sqrt{N_i + N_o}, \quad \text{Równanie 1.1}$$

gdzie

N_h - liczba warstw ukrytych

N_i - liczba wejść

N_o - liczba wyjść

Aby ocenić potencjał diagnostyczny proponowanej metody analizy hodografu Parka, wykorzystano zbinaryzowane hodografy Parka oraz cechy wyznaczone na podstawie analizy zewnętrznych i wewnętrznych konturów tych hodografów do opracowania klasyfikatora stanu technicznego. Zdecydowano się na opracowanie klasyfikatora opartego na sztucznej sieci neuronowej (ANN). Sieci ANN można stosować do złożonych zestawów danych, które na pierwszy rzut oka nie wykazują zależności w odniesieniu do stanu maszyny. Sieci ANN mogą uwidocznic te ukryte zależności, co czyni je odpowiednim wyborem w tym przypadku.

Przeprowadzono wstępne badania przy użyciu oprogramowania Matlab, aby określić optymalną strukturę ANN oraz odpowiedni algorytm szkoleniowy dla następujących zestawów danych:

- Zestaw wybranych istotnych cech zewnętrznego konturu obrazu hodografu
- Zestaw wybranych istotnych cech wewnętrznego konturu obrazu hodografu
- Zestaw wybranych istotnych cech sygnału prądu elektrycznego w dziedzinie czasu

Każdy z zestawów danych został zorganizowany w dwie grupy klas stanów (patrz rozdział 10).

Pierwsza grupa obejmowała następujące pięć klas stanów:

- Stan 00010: po wymianie łożysk (klasa 4)
- Stan 10000: przed wymianą sprzęgła elastycznego (klasa 1)

- Stan 00100: po wymianie sprzęgła elastycznego (klasa 3)
- Stan 01000: przed wymianą wentylatora (klasa 2)
- Stan 00001: po wymianie wentylatora (klasa 5)

Druga grupa obejmowała następujące trzy klasy stanów:

- Stan 001: Maszyna po naprawie - zdrowa (klasa 3)
- Stan 100: Zużyte sprzęgło elastyczne, poluzowane połączenia elektryczne (klasa 1)
- Stan 001: Maszyna po naprawie - zdrowa (klasa 3)
- Stan 010: Przegrzewanie silnika, wibracje wentylatora (klasa 2)
- Stan 001: Maszyna po naprawie - zdrowa (klasa 3)

Łączna liczba przykładów uczących zarejestrowanych podczas pomiarów wynosi 621. W wyniku analizy liczba cech określonych dla każdego zestawu danych została przedstawiona w tabeli 12.1. Do celów trenowania sieci zastosowano klasyczny podział każdego zestawu danych: 70% danych wykorzystano do treningu, 15% do walidacji i 15% do testowania. Tabela 6.5.1 przedstawia liczbę danych użytych do celów klasyfikacji.

Tabela 6.5.1 Zestaw danych do uczenia klasyfikatora

Dane do analizy	Ilość dostępnych danych	Ilość wejść	Ilość danych trenujących	Ilość danych testujących	Ilość danych walidujących
Zewnętrzny kontur - istotne cechy	621	6	435	93	93
Wewnętrzny kontur - istotne cechy		7	435	93	93
Sygnał prądu w dziedzinie czasu - istotne cechy		12	435	93	93

Użyto klasycznych sieci neuronowych opartych na algorytmie wstecznej propagacji błędów. W trakcie badań z wykorzystaniem tych sieci testowano różne algorytmy uczenia dostępne w oprogramowaniu Matlab.

Podczas wstępnych testów zweryfikowano różne topologie sieci, co ostatecznie pozwoliło na wybranie sieci z jedną warstwą ukrytą dla każdego zestawu danych. Końcowe wyniki klasyfikacji oceniono metodą resubstytucji.

Tabela 6.5.2 i 6.5.3 przedstawiają porównanie wyników klasyfikacji z zastosowaniem odpowiednio uśrednionych wyników wrażliwości (recall) oraz uśrednionych wyników precyzji (precision). Można w nich zobaczyć wyniki wszystkich przeprowadzonych analiz. Wyniki są uporządkowane dla 5 oraz 3 klas stanu maszyny.

Table 6.5.2 Zrównoważona czułość- wyniki

Analizowany przypadek	Kontur zewnętrzny- cechy relewantne	Kontur wewnętrzny- cechy relewantne	Sygnały prądowe- cechy relewantne
5 stanów maszyny	31.2%	74.2%	71.3%
3 stany maszyny	45.2%	78.2%	74.8%

Table 6.5.3 Zrównoważona precyzja- wyniki

Analizowany przypadek	Kontur zewnętrzny- cechy relewantne	Kontur wewnętrzny- cechy relewantne	Sygnały prądowe- cechy relewantne
5 stanów maszyny	42.6%	83.8%	78.6%
3 stany maszyny	87.0%	84.1%	83.1%

Ogólne wyniki wyraźnie pokazują, że istotne cechy zewnętrznego konturu nie przynoszą dobrych rezultatów. Najlepsze wyniki przypisano istotnym cechom wewnętrznej części

hodografów. Są one na poziomie porównywalnym z istotnymi cechami analizy sygnału czasowego (prądu). Wariant oparty na zastosowaniu klasyfikatora trójklasowego wykazuje większą sprawność klasyfikacji uwzględniając zbalansowaną miarę czułości oraz precyzji. Dla wszystkich analizowanych przypadków wyniki są lepsze. W odniesieniu do wskaźnika precyzji również rozsądne jest zmniejszenie liczby parametrów w procesie klasyfikacji. Należy podkreślić, że precyzja dla zewnętrznego konturu i trzech klas jest najwyższa. Pomimo tego dwa inne analizowane przypadki: wewnętrzny kontur i sygnały czasowe również charakteryzują się wysokim parametrem precyzji.

7. Wnioski końcowe

Badania przeprowadzone zostały na tandemowej linii pras mechanicznych, która jest wykorzystywana do celów produkcyjnych w przemyśle motoryzacyjnym. Linia ta służy do produkcji elementów samochodowych, takich jak zewnętrzne panele boczne, drzwi zewnętrzne, drzwi wewnętrzne, maski, pokrywy bagażników, dachy itd. Pierwszym krokiem badania była analiza krytyczności, której celem było określenie najbardziej krytycznego systemu prasy z punktu widzenia stabilności produkcji. Na podstawie metody MFMEA do dalszych badań wybrano główny układ napędowy prasy. Następny krok wymagał doboru odpowiedniego sprzętu do akwizycji i przetwarzania danych. W tej fazie całego projektu dokładna metoda nie była jeszcze znana, dlatego system uwzględniał możliwość zastosowania różnych algorytmów, które miały zostać określone w kolejnych etapach badań. W związku z tym zakupiono i zainstalowano system NI Compact RIO wraz ze środowiskiem LabView do celów programistycznych. Aby rozpocząć proces akwizycji danych, konieczne było zainstalowanie odpowiedniego sprzętu na linii oraz znalezienie odpowiedniego okna czasowego w harmonogramie produkcji. Ponieważ zdecydowano się na pomiar i analizę prądu elektrycznego, zainstalowano przetworniki prądu. Każda czynność na linii pras, która wymagała zatrzymania produkcji, była uzgadniana z działem planowania produkcji, ponieważ całe badanie było przeprowadzane w zakładzie produkcyjnym. Czyni to badanie unikalnym i innowacyjnym, ponieważ zaawansowane metody naukowe były wdrażane i analizowane z wykorzystaniem danych mierzonych w środowisku produkcyjnym.

Osobnym etapem przygotowania systemu była integracja ze sterownikiem PLC prasy. Konieczne było otrzymanie sygnału wyzwalającego z systemu sterowania prasą, wskazującego Górne Martwe Położenie prasy. W podanym punkcie pracy silnik układu napędowego

wykonywał pracę, ale nie było ruchu suwaka. Takie warunki zbierania danych zapewniały możliwość uniezależnienia się od zmiennych warunków obciążenia prasy i tym samym porównywalne warunki pomiarowe.

Następnie zebrano dane o prądzie elektrycznym i rozpoczęto analizę danych. Badanie opierało się na rzeczywistych, przemysłowych danych pochodzących z maszyny produkcyjnej. Przygotowano program w LabView do analizy sygnałów, co stanowiło podstawę do dalszych badań. Analiza sygnałów prądowych metodą EPVA była pierwszym krokiem, aby sprawdzić, czy kolejne wartości obliczonych cech zmieniają się w zależności od stanu maszyny. Podczas analizy literatury motywujące było znalezienie nowej metody analizy hodografów Parka, ponieważ w literaturze potwierdzono, że kształt hodografów zmienia się w zależności od różnych awarii. Było to również obserwowane podczas zbierania obrazów hodografów. W wielu publikacjach można było zaobserwować różne kształty hodografów w zależności od stanu maszyny. Autorzy tych publikacji nie określili jednak cech hodografów, które mogłyby zmieniać się w zależności od stanu maszyny. Zdecydowano się więc obliczyć cechy hodografów, które mogą opisywać wrażliwość na zmianę kształtu. Na tej podstawie przygotowano tezy do celów całego badania. Innowacyjne podejście w tym badaniu polegało na traktowaniu hodografów jak obrazów i ekstrakcji ich cech. Autor zauważył, że zmiana stanu maszyny skutkuje zmianą zewnętrznej części hodografu (konturu) lub jego części wewnętrznej (wewnętrznego otworu). Dodatkowo autor przeprowadził selekcję istotnych cech, czego nie znaleziono w literaturze w kontekście selekcji cech hodografów Parka. Do tego celu wykorzystano macierz korelacji Pearsona. Ostatecznym krokiem było sklasyfikowanie obliczonych cech hodografów Parka z wykorzystaniem sztucznych sieci. Zastosowana metoda oparta na analizie cech hodografów Parka ma charakter innowacyjny. Przedstawione wyniki klasyfikacji z zastosowaniem sieci neuronowych wskazują na skuteczność zastosowanego podejścia.

Metoda MFMEA daje bardzo dobre wyniki i może być stosowana w rzeczywistych procesach przemysłowych, które wymagają identyfikacji systemów maszynowych oraz priorytetyzacji działań konserwacyjnych. Badania te wykazały również, że wdrożenie systemu monitoringu wymaga takiej analizy, szczególnie gdy niemożliwe jest objęcie monitorowaniem całej maszyny.

Wykazano i udowodniono, że wdrożenie falowników do zasilania i systemu sterowania silnikiem znacznie komplikuje i utrudnia analizę prądu elektrycznego. Większość aplikacji przemysłowych z silnikami elektrycznymi jest wyposażona w przemienniki częstotliwości.

Niestety, w wielu publikacjach prezentowane wyniki opierają się na symulacjach lub na systemach laboratoryjnych zasilanych z sieci 50 Hz, co utrudnia zastosowanie tych wyników w przemyśle.

Analizowany układ napędowy jest częścią mechanicznej prasy tłoczącej o nacisku 1800 t. Analiza danych zebranych na linii produkcyjnej pokazuje, że bardzo trudno jest zdefiniować stan odniesienia po remoncie. Nawet po naprawie nie można być pewnym, że system został zamontowany prawidłowo i dokładnie tak samo jak po poprzednim remoncie. Dodatkowo, niezwykle trudno jest określić moment, do którego powinien zostać przypisany kolejny stan. Niemożliwe jest również uzyskanie wartości referencyjnej sygnału, ponieważ na początku badań stan maszyny nie jest znany. Z tego powodu dobrą praktyką jest określenie istniejącego stanu maszyny jako odniesienia i jego aktualizowanie w trakcie eksploatacji maszyny oraz dalszej analizy danych. Należy pamiętać, że niemożliwe jest wprowadzenie awarii do rzeczywistej aplikacji przemysłowej i sprawdzenie odpowiedzi systemu. Dlatego dobra współpraca z zespołem utrzymania ruchu oraz analiza innych parametrów może być bardzo pomocna w definiowaniu stanu maszyny i problemu. Na tej podstawie można przygotować wartość docelową, np. do celów analizy z użyciem sieci neuronowych.

Innowacją w całym badaniu było zdefiniowanie dokładnych parametrów hodografów. Możliwe jest traktowanie hodografów jak obrazów i przeprowadzanie analizy obrazów w celu określenia ich parametrów. Metoda zaproponowana w tym badaniu, oparta na podziale całej analizy na sprawdzenie konturu i części wewnętrznej, pozwala na określenie wielu charakterystycznych cech hodografów, co nie było dotychczas opisane w literaturze. Dodatkowo, macierz korelacji Pearsona jest dobrą metodą do znajdowania istotnych cech hodografów. Jest to bardzo ważne z przemysłowego punktu widzenia. Duża liczba cech może powodować trudności w dalszej analizie. Ich redukcja upraszcza interpretację danych i podejmowanie decyzji dotyczących dalszych działań na maszynie. Dodatkowo, złożoność systemu sprawia, że w niektórych przypadkach zmiany wartości niektórych parametrów są trudne do zaobserwowania w prostej analizie sygnału czasowego i konieczne jest wdrożenie bardziej zaawansowanych metod.

Wdrożenie sieci neuronowych do klasyfikacji danych jest odpowiednią metodą dla analizowanego przypadku, aby poprawnie klasyfikować dane. Ostateczne wyniki opierały się na analizie parametrów sygnałów czasowych oraz cech hodografów (konturu i części wewnętrznej). Celem było wdrożenie efektywnego systemu rozpoznawania stanu w rzeczywistym obiekcie przemysłowym. Dzięki przeprowadzonym analizom można

zaobserwować, że wartości zrównoważonej czułości dla trzech stanów istotnych cech wewnętrznej części hodografów oraz sygnałów prądowych wynoszą odpowiednio ponad 78% i 74%. Całe badanie pokazuje również, że dobrą praktyką jest zmniejszenie liczby stanów maszyny i przypisanie jednego stanu po remoncie. Co więcej, eksperyment pokazuje, że warto wybrać istotne cechy w celu zmniejszenia liczby parametrów do analizy. W większości analizowanych przypadków wartości zrównoważonej precyzji oraz zrównoważonej czułości były na zadowalającym poziomie. Badania wykazały również, że analiza zewnętrznej części hodografu nie dała zadowalających wyników. Z przemysłowego punktu widzenia rozsądne jest zmniejszenie liczby parametrów poprzez wyznaczenie cech relewantnych, a także zakwalifikowanie stanów maszyny po naprawach jako tego samego stanu technicznego.

Na tej podstawie można stwierdzić, że analiza hodografów jest wartościową metodą do diagnostyki układu napędowego prasy głównej. Na podstawie przedstawionych wyników wszystkie tezy zostały potwierdzone:

- Hodografy wektora Parka mogą być stosowane do monitorowania i diagnostyki stanu trójfazowych silników indukcyjnych zasilanych przez falowniki.
- Możliwe jest klasyfikowanie stanu technicznego trójfazowego silnika indukcyjnego na podstawie hodografów przestrzennych wektorów Parka przy użyciu metod przetwarzania obrazów, analizy i rozpoznawania.
- Możliwe jest wykorzystanie hodografów wektora Parka do diagnozowania trójfazowych silników indukcyjnych zasilanych przez falownik.
- Możliwe jest zastosowanie metod analizy obrazów do analizy hodografów wektora Parka w celu klasyfikacji stanu trójfazowego silnika indukcyjnego, a uzyskane cechy mogą być źródłem informacji diagnostycznej.
- Cechy obrazów hodografów Parka mogą być wykorzystywane do klasyfikacji stanu technicznego układu napędowego prasy przy użyciu sztucznych sieci neuronowych.

Całe badanie mogłoby również uwzględniać klasyfikację wszystkich obliczonych cech i parametrów sygnałów prądowych. Niestety, z powodu małej liczby pomiarów duża liczba wejść powodowałaby, że liczba parametrów sieci neuronowej stosunku do liczby przykładów uczących byłaby znacząca. Z tego samego powodu nie sklasyfikowano całych hodografów z wykorzystaniem sieci neuronowych.

Rozprawa doktorska powstała w ramach programu doktoratów dualnych na podstawie porozumienia o współpracy nr 175/RMTO/RR8/2016. W trakcie pisania rozprawy doktorskiej autor dokonywał publikacji wyników częściowych w czasopismach naukowych, a także publikował artykuły w czasopismach branżowych:

	Tytuł	Autorzy	Czasopismo
1	Clutch-brake unit - principle of operation and basic diagnostic methods	Krzysztof Roczek, Adrian Krol	Diagnostyka 2018;19(1):33–39
2	Induction motor diagnosis with use of electric parameters	Krzysztof Roczek, Tomasz Rogala	Diagnostyka 2019;20(4):65–74
3	A hybrid diagnostic system of main drive of industrial press line	Krzysztof Roczek, Marek Fidali, Tomasz Rogala, Adrian Krol	Diagnostyka 2021;22(1):85–92
4	Diagnostyka Profibus. Podstawowe symptomy uszkodzenia sieci	Krzysztof Roczek	Utrzymanie Ruchu 2020; Nr 2: 44-47
5	Ocena stanu silników indukcyjnych na podstawie analizy składowych harmonicznych prądowych	Krzysztof Roczek	Utrzymanie Ruchu 2020; Nr 1: 28-31
6	Drgania silników elektrycznych	Roczek Krzysztof , Krol Adrian	Utrzymanie Ruchu 2019; Nr 2: 65-68
7	Osprzęt szaf elektrycznych i sterowniczych – wygodne i sprytne rozwiązania	Krzysztof Roczek	Utrzymanie Ruchu 2018; Nr 3: 20-22
8	Diagnostyka Profibus	Krzysztof Roczek	Utrzymanie Ruchu 2018; Nr 2: 52-56
9	Łuk elektryczny - jak go unikać i się przed nim chronić	Krzysztof Roczek	Utrzymanie Ruchu 2017; Nr 3: 64-66

10	Hybrydowy system diagnostyczny napędu głównego przemysłowej linii pras.	Krzysztof Roczek, Adrian Krol, Marek Fidali, Tomasz Rogala	VibDiag. Konferencja naukowa. Conference, Poznań, Polska, 17 październik 2019. Red. Roman Barczewski, Maciej Tabaszewski. Poznań : [b.w.], 2019, s. 54
11	Zastosowanie sygnałów drganiowych i prądowych do diagnostyki napędu głównego przemysłowej linii pras.	Krzysztof Roczek, Adrian Krol, Marek Fidali, Tomasz Rogala	VibDiag. Konferencja naukowa. Conference, Poznań, Polska, 17 październik 2019. Red. Roman Barczewski, Maciej Tabaszewski. Poznań : [b.w.], 2019, s. 55
12	Zastosowanie transformat Parka i Clarka w ocenie stanu silników elektrycznych	Marek Fidali, K. Roczek	Zastosowania metod sztucznej inteligencji. AI-METH 2017. Politechnika Śląska. Wydział Mechaniczny Technologiczny. Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn. Gliwice : Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn. Wydział Mechaniczny Technologiczny. Politechnika Śląska, 2017, s. 63-70, bibliogr. 7 poz.

Autor brał również udział w konferencjach lokalnych i międzynarodowych:

1. ICTD CMMNO 2016 Congress, Gliwice
2. Konferencja edual 2018, Politechnika Śląska w Gliwicach
3. VibDiag 2019, Poznań
4. ICTD CMMNO 2022 Congress, Gliwice

Autor rozprawy doktorskiej od 15 lat związany jest z przemysłem motoryzacyjnym. 14 lat pracował na tłoczni w dziale inżynierii. Oprócz pracy etatowej od 2019 roku prowadzi

szkolenia techniczne dla przemysłu z zakresu tłocznictwa i obsługi pras. Dodatkowo asystował w zajęciach z zakresu diagnostyki technicznej. Aktualnie prowadzi serwis pras.

8. Literatura

1. Abadi M. B., Cruz S., Mendes A. M. S., Three-level NPC inverter fault diagnosis by the Average Current Park's Vector approach, September 2012 DOI: 10.1109/ICEIMach.2012.6350140
2. Abitha M. W., Rajini V., Park's Vector Approach for Online Fault Diagnosis of Induction Motor, Conference Paper · February 2013 DOI: 10.1109/ICICES.2013.6508332
3. Bouslimani S., Drid S., Chrifi-Alaoui L., Bussy P., Ouriagli M., Delahoche L., An Extended Park's Vector Approach to Detect Broken Bars Faults in Induction Motor, 978-1-4799-5906-8/14/\$31.00 ©2014 IEEE
4. Cardoso A.J.M., Cruz S.M.A., Fonseca D.S.B., Inter-Turn Stator Winding Fault Diagnosis in Three-phase Induction Motors, by Park's Vector Approach, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, September 1999, pp. 595- 598
5. Glinka T., Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle, 1998, ISBN 83-9910585-0-6
6. Gyftakis K. N., Cardoso A. J. M., Antonio- Daviu J. A., Introducing the Filtered Park's and Filtered Extended Park's Vector Approach to detect broken rotor bars in induction motors independently from the rotor slots number, Mechanical Systems and Signal Processing Volume 93, 1 September 2017, pp. 30-50
7. Fidali M., Metody Diagnostyki Maszyn i Urządzeń w Predykcijnym Utrzymaniu Ruchu, Bielsko- Biała 2020, ISBN 978-83-65883-09-4
8. Penrose H W., Motor Circuit Analysis Concept and Principle, MCA Concept and Principle, ©2008, SUCCESS by DESIGN
9. Penrose H. W., Electrical Signature Analysis, Electric Motor System Maintenance and Management Workshop, T- Solutions, Inc., 2005
10. Roczek K., Rogala T., Fidali M., Krol A., A hybrid diagnostic system of main drive of industrial press line, 2020, ISSN 1641-6414, e-ISSN 2449-5220
11. Schuler, SMART PRESS SHOP Machine Monitoring System, 102ENG-102018-WSP-1000-Copyright by Schuler

12. Schuler, Adam K., et al, METAL FORMING HANDBOOK, ISBN 3-540-61185-1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998
13. Mihet-Popa L., Current Signature Analysis as Diagnosis Media for Incipient Fault Detection, November 2007 *Advances in Electrical and Computer Engineering* 7(2), DOI: 10.4316/aece.2007.02003
14. Miljković D., Brief Review of Motor Current Signature Analysis, June 2015, https://www.researchgate.net/publication/304094187_Brief_Review_of_Motor_Current_Signature_Analysis
15. Niu F. L., Huang J., Yang J. Q., Chen L. Y., Jin H., Rotor broken-bar fault diagnosis of induction motor based on HHT of the startup electromagnetic torque, *Front. Electr. Electron. Eng. China* (2006) 2: 188–193 DOI 10.1007/s 11460-006-0022-3
16. Onel I.Y., Benbouzid M.E.H., Induction Motors Bearing Failures Detection and Diagnosis: Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study, 1 -4244-0743-5/07/\$20.OO ©2007 I EEE
17. Szabó L., Dobai B. J., Biró K A., discrete wavelet transform based rotor faults detection method for induction machines, https://www.researchgate.net/publication/272481794_discrete_wavelet_transform_based_rotor_faults_detection_method_for_induction_machines
18. Mehala N., Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motor using Motor Current Signature Analysis, Electrical Engineering Department, National Institute of Technology, October 2010
19. Mehala N., Short Winding Fault Detection Using Park's Vector, *International Journal of Enterprise Computing and Business Systems*, Vol. 2 Issue 2 July 2012, ISSN: 2230-8849