

## Automatyczna detekcja elementów komutatora maszyny elektrycznej na podstawie pomiarów jego powierzchni

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono propozycję algorytmu detekcji działek i wcięć izolacyjnych w sygnale pomiarowym powierzchni komutatorów maszyn elektrycznych. Zaproponowana metoda służy do automatycznej detekcji elementów komutatora w sygnale pomiarowym uzyskanym z laserowego czujnika odległości podczas badań w czasie pracy maszyny. W artykule opisano zaproponowaną metodę oraz pokazano przykładowe wyniki jej działania na rzeczywistych sygnałach pomiarowych charakteryzujących się znacznym poziomem szumu i licznymi artefaktami.

### Abstract.

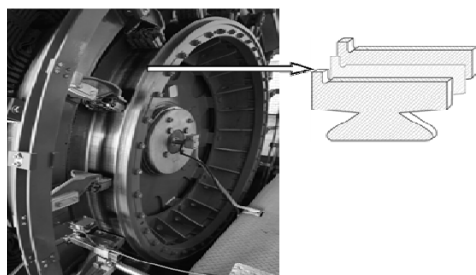
The paper presents a proposal of an algorithm for automatic detection of conductive segments and insulating spacers in the measurement signal of the surface of commutators of electric machines. The measurement signal is obtained from a laser distance sensor. The paper describes the proposed method and shows exemplary results of its operation on real measurement signals characterized by a significant level of noise and numerous artifacts. (**Automatic detection of commutator elements of an electric machine based on measurements of its surface.**)

**Słowa kluczowe:** automatyczna detekcja, komutator, pomiary, analiza sygnału.

**Keywords:** automatic detection, commutator, measurements, signal analysis.

### Wstęp

Do podstawowych zalet silników prądu stałego można zaliczyć możliwość płynnej regulacji prędkości obrotowej napędów w szerokich granicach oraz rozruch pod dużym obciążeniem. Między innymi z tego powodu są one powszechnie stosowane w przemyśle ciężkim i górnictwie, w napędach maszyn wyciągowych i maszyn walcowniczych. Ze względu na swoją budowę wymagają natomiast częstych przeglądów i konserwacji. Najbardziej złożonym podzespołem maszyn elektrycznych prądu stałego jest komutator o powierzchni walcowej składający się z wyprofilowanych sekcji (lamelek, działek miedzianych) odizolowanych od siebie przekładkami izolacyjnymi (rys. 1).



Rys. 1 Komutator maszyny wyciągowej

Komutator podczas pracy narażony jest na oddziaływanie dynamiczne, zmienne obciążenia, wibracje, zmianę temperatury i zapylenie. Ulega on zatem zużyciu i następuje stopniowe zmniejszenie powierzchni roboczej komutatora. Mogą także nastąpić uszkodzenia awaryjne. Do najczęstszych uszkodzeń komutatorów należą [1-3]:

- miejscowe przegrzewanie się powierzchni,
  - plamy, nadpalenia oraz wytopienia wskutek iskrzenia i łuku elektrycznego,
  - wysunięcie się promieniowe jednej lub kilku lametek komutatora na skutek usterek wewnętrznych i działania siły odśrodkowej,
  - utrata okrągłości lub walcowości powierzchni roboczej.
- W warunkach eksploatacyjnych w celu oceny powierzchni roboczej określa się następujące parametry wyznaczone na podstawie pomiaru profilu:
- wielkość maksymalnego odkształcenia od kształtu cylindrycznego,

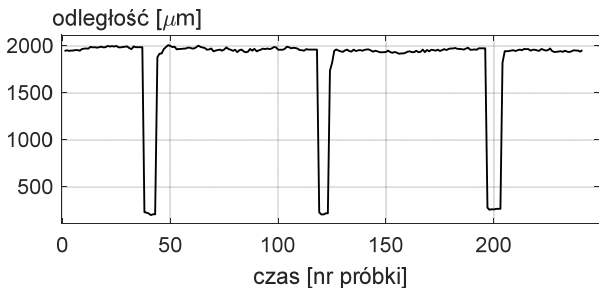
- wielkość wysunięcia się promieniowego sąsiednich wycinków komutatora,
- wielkość pofałdowania wzdłużnego wycinków komutatora.

Metody pomiarowe profilu komutatora w stanie statycznym bazują na czujnikach dotykowych mechanicznych, zegarowych lub czujnikach przemieszczeń, w których zmiana położenia końcówki trzpienia głowicy powoduje zmianę sygnału mierzonego. Istnieją także urządzenia pomiarowe pozwalające na pomiar profilu w trakcie pracy. Są to np. przyrządy firmy Profiler Tech Limited z obrotową głowicą [4]. Wadą takiego rozwiązania jest konieczność doboru rozmiaru głowicy do rozmiaru komutatora oraz ograniczony zakres pomiaru ( $\pm 400\mu\text{m}$ ) i kontakt głowicy z komutatorem. Wad tych nie posiada użyta metoda pomiaru z zastosowaniem laserowego czujnika LK-H152, który pozwala na pomiar z odległości 150mm w zakresie  $\pm 40\text{ mm}$  i rozdzielczością  $1\mu\text{m}$  [5,6]. Zastosowanie tej metody pomiaru pozwala na przeprowadzenie bezdotykowej (bezpiecznej dla ludzi i maszyn) rejestracji zmian geometrii powierzchni ślizgowej w czasie ruchu maszyny podczas pracy lub na wybiegu po wyłączeniu zasilania. Problem pojawia się natomiast podczas analizy zmierzonych sygnałów, które ze względu na czułość pomiaru, mierzony obiekt (bicie komutatora, odbicia światła od nierównej/porysowanej powierzchni działek oraz izolacji, itd.) oraz środowisko pracy (np. drgania) charakteryzują się dużym zaszumieniem oraz licznymi artefaktami. W celu diagnostyki badanego komutatora konieczne jest więc wstępne przetworzenie sygnału pomiarowego, którego efektem jest automatyczna detekcja elementów komutatora co z kolei pozwala na wyznaczenie jego parametrów.

### Charakterystyka mierzonych sygnałów

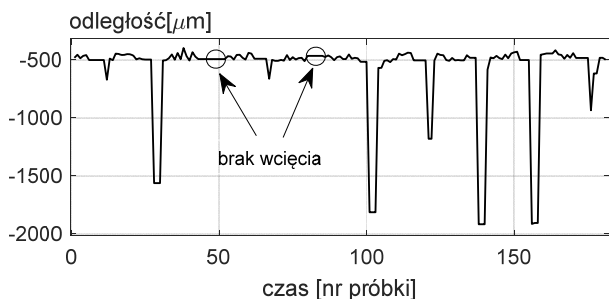
W pierwszej kolejności zostaną przeprowadzone rozważania odnośnie skali mikro, tj. w zakresie obejmującym pojedyncze działki komutatora oraz wcięcia izolacji. Przykład takiego sygnału uzyskanego podczas pomiaru przedstawiono na rysunku 2. Jest to fragment z dobrze zaznaczonymi działkami komutatora oraz wyraźnie widocznymi wcięciami na przekładki izolacyjne oraz dobrą rozdzielczością wzdłuż osi X. Sygnał jest również pozbawiony zakłóceń mogących utrudniać jego interpretację. W praktyce pomiarowej sygnał o jakości jak na rysunku 2 jest jednak przypadkiem modelowym i

zazwyczaj należy się liczyć ze znaczną ilością występujących w sygnale zakłóceń oraz ograniczeniem jego rozdzielczości.



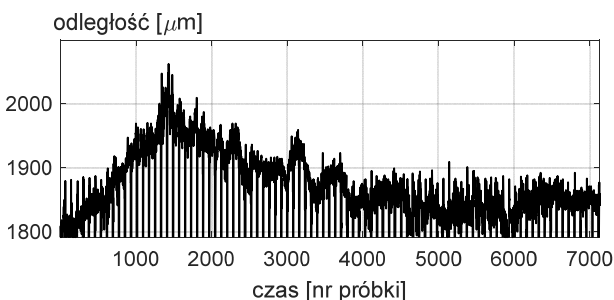
Rys.2 Przykład sygnału pomiarowego dobrej jakości

Na rysunku 3 przedstawiono sygnał o znacznie niższej rozdzielczości w osi X. Można zauważyć, że głębokość wcięć izolacji jest tutaj silnie zmienna. Miejscami wcięcia są tak wąskie i płytkie, że mogą być trudne do zauważenia lub odróżnienia od występujących w sygnale zakłóceń. W skrajnym przypadku wcięć może w ogóle nie być widać.



Rys.3 Przykład sygnału z artefaktami w postaci znacznej zmienności głębokości wcięć izolacji

Przedstawione na rysunku 3 zniekształcenia sygnału mogą znacznie utrudnić jego analizę i interpretację. Szczególnie, że podane przykłady dotyczą skali mikro, a diagnosta musi zinterpretować sygnał w skali makro, tj. składający się nie z pojedynczych elementów, a z ich znacznie większej liczby (np. dla maszyny wyciągowej o mocy 2000 kW średnica komutatora może wynosić 2,5 metra a liczba działek komutatora 1536). Przykład fragmentu sygnału pomiarowego w skali makro (około 1/3 obwodu komutatora) przedstawiono na rysunku 4. Można zauważyć, że w tej skali wszystkie zakłócenia zniekształcające sygnał przybierają formę szumu o charakterze impulsowym dobrze widocznego na czołach działek komutatora. Dodatkową trudność stanowi fakt, że z punktu widzenia diagnostyki istotne są nawet niewielkie odchylenia powierzchni komutatora od wartości znamionowej (często na poziomie dziesiątek  $\mu\text{m}$ ) na tle promienia komutatora nierzadko przekraczającego jeden metr.



Rys.4 Przykład sygnału pomiarowego w skali makro – widoczne zakłócenia o charakterze szumu

Przedstawione typowe rodzaje zakłóceń oraz duża zmienność parametrów mierzonych sygnałów, w znacznym stopniu utrudniają analizę i interpretację tych sygnałów oraz czynią ją żmudną i uciążliwą, co było powodem podjęcia próby częściowej automatyzacji procesu diagnostycznego.

### Zastosowana metoda przetwarzania sygnałów pomiarowych

Do przetwarzania sygnału pomiarowego zastosowano metodę składającą się z trzech etapów:

1. W pierwszej fazie jest przeprowadzana detekcja działek i wcięć izolacji. Zakłada się, że proces ten jest przeprowadzany w pełni automatycznie a jego kontrola jest sparаметryzowana w taki sposób, aby udostępnić użytkownikowi prosty w zastosowaniu pojedynczy parametr, jakim jest odpowiednio zdefiniowany względny próg czułość/detekcji. Po automatycznej detekcji użytkownik ma możliwość przejrzania uzyskanych wyników oraz, w razie potrzeby, dokonania ich ręcznej korekty.
2. W drugiej fazie wszystkie wcięcia izolacji są odrzucane a dla każdej działki jest wyznaczana wartość średnia reprezentująca odległość działki od punktu odniesienia, co pozwala na zmniejszenie wpływu zakłóceń i artefaktów na wynik diagnostyki.
3. W trzecim etapie diagnosta ma możliwość zastosowania filtracji wygładzającej uzyskanego sygnału ze średnimi wartościami działek, co pozwala na dalsze uśrednienie przebiegu powierzchni obwodu komutatora oraz dalsze zredukowanie zakłóceń o charakterze szumu w skali makro.

Dla tak uzyskanego sygnału wyjściowego z przedstawionej procedury postępowania diagnosta będzie mógł następnie wyznaczyć wszystkie interesujące go parametry.

Niniejsza praca dotyczy pierwszego etapu algorytmu tj. detekcji działek komutatora i wcięć izolacji. W dalszej części pracy zostanie zaprezentowana metoda umożliwiająca automatyczną detekcję elementów komutatora (działek i wcięć izolacji). Dzięki automatyzacji procesu detekcji, ograniczeniu dostępnych parametrów do niezbędnego minimum przy jednoczesnym zachowaniu pełnej kontroli na analizowanym sygnałem (możliwość ręcznej korekty wyników autodetekcji), diagnosta otrzyma możliwość znacznie łatwiejszej i szybszej interpretacji wyników pomiarów.

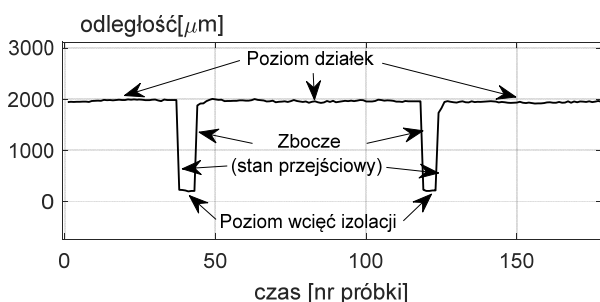
### Analiza problemu automatycznej detekcji elementów komutatora i przegląd dostępnych rozwiązań

Proces detekcji działek komutatora i wcięć izolacji sprawdza się do odróżnienia od siebie tych elementów w jednowymiarowym dyskretnym sygnale pomiarowym na podstawie analizy jego cech charakterystycznych, które przedstawiono na rysunku 5. Obserwując przebieg sygnału przedstawionego na rysunku 5, można zauważyć, że:

- Działkę komutatora od wcięcia izolacji odróżnia poziom sygnału, przy czym poziom wcięcia izolacji zajmuje znacznie krótszy odcinek wzdłuż osi czasu.
- Pomiędzy działką komutatora a wcięciem izolacji występuje skokowa zmiana poziomu sygnału (zbocze o dużym nachyleniu).

Detekcję działek i wcięć izolacji można więc oprzeć na wykryciu zmiany poziomu sygnału lub też na wykryciu zboczy oddzielających od siebie fragmenty sygnału. Istnieje wiele algorytmów detekcji zmiany poziomu jak i detekcji zboczy sygnałów. Obie grupy metod są szeroko stosowane i poświęcano im zarówno rozdziały w podręcznikach [7,9], prace przeglądowe [11,10], jak i wiele specjalistycznych publikacji z różnych dziedzin przetwarzania sygnałów, począwszy od przetwarzania obrazów [12], poprzez analizę

danych giełdowych [13], a kończąc na meteorologii [8]. Pomimo mnogości literatury wiele z prac wykorzystuje algorytmy oparte na podobnych zasadach, które zastaną tutaj krótko omówione.



Rys.5 Charakterystyczne elementy sygnału pomiarowego

W przypadku wykrywania zboczy/krawędzi w sygnale istnieją dwa główne podejścia [10] (praca [10] wyróżnia trzy, ale trzecie jest w zasadzie rozwinięciem drugiego):

Pierwsze podejście oparte na operatorze różniczkowania (gradientie), które wykorzystuje ten operator do wykrycia gwałtownych zmian w sygnale (np. operator Sobel'a, Prewitt'a czy Canny'ego). Do niewątpliwych zalet metod gradientowych można zaliczyć ich ogólność, rozumianą jako brak konieczności przyjmowania dodatkowych założeń odnośnie analizowanych sygnałów. Do wad natomiast można zaliczyć stosunkowo dużą czułość na zakłócenia o charakterze impulsowym. Metody te mogą więc być przydatne przy analizie sygnałów o znacznej zmienności parametrów, dla których problem zakłóceń impulsowych nie występuje, bądź został skutecznie wyeliminowany.

Drugie podejście to grupa metod określaną jako algorytmy dopasowania wzorca (ang. template matching algorithms), a w szczególności algorytmy pochodne od zaproponowanej w 1994 metody Rao. Współcześnie często stosuje się pewne uogólnienie tych metod, gdzie przyjmuje się analityczny model zbocza/krawędzi w postaci wybranej funkcji, jak np. w pracy [13]. Takie podejście umożliwia znacznie bardziej precyzyjne dopasowanie wzorca/funkcji do konkretnego sygnału, z reguły wymaga jednak przyjęcia szeregu założeń odnośnie samego wzorca/funkcji. Ta grupa metod sprawdzi się więc najlepiej w sytuacji, gdy wymagana jest duża precyzja detekcji dla sygnału o stosunkowo niewielkiej zmienności parametrów.

W przypadku wykrywania zmian poziomu sygnału, zazwyczaj stosuje się metody oparte o badanie zmiany pewnych statystycznych metryk sygnału (np. wartość średnia, wariancja), odróżniających jego poszczególne fragmenty lub też metody oparte na aproksymacji sygnału pewną funkcją (na przykład funkcją odcinkowo-liniową). Szeroki przegląd metod z tej grupy przedstawiono w [11]. Przegląd jest bardzo obszerny, dlatego w niniejszej pracy ograniczono się jedynie do przedstawienia ogólnych wniosków mających bezpośrednie odniesienie do analizowanego problemu:

- W przypadku sygnałów odcinkowo-liniowych o stromych zboczach próba ograniczenia zakłóceń impulsowych lub szumu filtrami liniowymi jest nieefektywna, gdyż zarówno zakłócenia jak i sygnał zajmują to samo szerokie pasmo w dziedzinie częstotliwości.
- W zależności od zastosowanej metody czułość detekcji krótkich skoków wartości sygnału (takich jak np. wcięcia izolacji) może być różna, co może skutkować ich pominięciem. Zazwyczaj im większa czułość detekcji krótkich zmian wartości sygnału (jak np. wcięcia izolacji), tym większa czułość na wszelkiego rodzaju zakłócenia impulsowe i szumy.

Z przedstawionych w pracy [11] rozważań można więc wysnuć ogólny wniosek, że zwiększenie czułości danej metody na krótkie zmiany sygnału (takie jak wcięcia izolacji), spowoduje jednocześnie zwiększenie wpływu zakłóceń na wyniki detekcji (np. rozpoznanie zakłócenia jako wcięcia izolacji).

Na podstawie przeprowadzonego rozpoznania literaturowego oraz dostępnych bibliotek obliczeniowych zdecydowano się przeprowadzić wstępne testy kilku wybranych algorytmów detekcji krawędzi (metoda Sobel'a i metoda Prewitt'a [7,9]) oraz detekcji zmiany poziomu (metody: średniej bieżącej, total variation denoising oraz jump penalty [11]). Testy przeprowadzono na kilkunastu sygnałach pomiarowych uznanych za szczególnie trudne do analizy przez diagnostę (duża zmienność parametrów, występowanie zakłóceń). Uzyskane wyniki detekcji były poddane ocenie eksperckiej i na tej podstawie określono przydatność każdej z przebadanych metod. Okazało się, że żadna z nich nie spełniała wszystkich wymagań eksperta z następujących powodów:

- Wykrywanie artefaktów jako wcięć izolacji lub też pomijanie wcięć izolacji. W zależności od wybranej metody i ustawienia jej parametrów, żaden z wybranych algorytmów nie zapewnił wystarczającego szerokiego zakresu detekcji wcięć izolacji dla wszystkich przebadanych sygnałów testowych. Problemem była wysoka zmienność parametrów (stromość zboczy, szerokość wcięć izolacji, rozdzielczość w osi X, zakłócenia impulsowe i szumy), z którą algorytmy musiały się zmierzyć.
- Żadna z przebadanych metod nie pozwalała na oznaczenie w sygnale miejsc, w których wcięcia izolacji były niewidoczne (rys. 3). Tą cechą trudno uznać za wadę przebadanych algorytmów, gdyż z definicji nie gwarantują one takiej funkcjonalności. Jest ona jednak istotna w przypadku analizy omawianych sygnałów, więc konieczna byłaby rozbudowa każdego wybranego algorytmu o taką funkcję.

Z przedstawionych względów, zamiast poszukiwać gotowego rozwiązania wśród dostępnych powszechnie metod, zdecydowano się zaprojektować nową metodę będącą złożeniem najbardziej pożądanых cech, które określono na podstawie przeprowadzonych testów.

### Proponowana metoda automatycznej detekcji działek komutatora i wcięć izolacji

Przeprowadzone wstępne testy wybranych algorytmów detekcji krawędzi oraz zmiany poziomu sygnału pokazały, że idealna metoda detekcji działek komutatora i wcięć izolacji powinna zapewniać:

- Wykrywanie działek komutatora i wcięć izolacji w bardzo szerokim zakresie parametrów sygnału pomiarowego (zmienna stromość zboczy, różna rozdzielczość w osi X, różne proporcje długości działki do wcięcia izolacji).
- Odporność na zakłócenia w postaci szumu i pojedynczych impulsów.
- Prognozowanie (predykcję) miejsc, w których wcięcia izolacji jest w sygnale niewidoczne.
- Stosunkowo dużą wydajność obliczeniową, ze względu na mogące występować znaczne ilości działek komutatora i wcięć izolacji (dochodzące do kilku tysięcy).
- Prostotę sterowania algorytmem w postaci pojedynczego parametru umownie nazwanego „względny prognozą detekcji”.

Aby spełnić wszystkie wymienione wymagania, przyjęto następujące założenia:

- W pierwszej kolejności odrzucono wszelkiego rodzaju metody iteracyjne, ze względu na ich zazwyczaj znaczne zapotrzebowanie na moc obliczeniową.
- Podstawą projektowanego algorytmu będzie kombinacja metody wykrywania krawędzi (zboczy) oparta na pochodnej i detekcji progowej oraz metoda wykrywania zmiany poziomu oparta na zmianie wartości średniej próbek sygnału. Obie wymienione metody będą stosowane równolegle. Taka kombinacja ma z jednej strony zapewnić znaczną czułość wykrywania zboczy w sygnale (pochodna), a z drugiej pozwolić na eliminację pojedynczych zakłóceń impulsowych (wykorzystanie średniej bieżącej).
- W celu prognozowania miejsc występowania wcięć izolacji niewidocznych w sygnale zostaną wykorzystane statystyczne parametry sygnału, na podstawie których zostanie określona najbardziej prawdopodobna szerokość zarówno działek komutatora jak i wcięć izolacji. Przyjmuje się tutaj, że wymienione parametry są w przybliżeniu stałe w czasie okresu obserwacji stanowiącego zazwyczaj jeden pełny obrót komutatora.
- Dodatkowo wykorzystana zostanie charakterystyczna cecha analizowanego sygnału jaką jest naprzemienne występowanie działek komutatora i wcięć izolacji, a co za tym idzie również zboczy narastających i opadających.

Przyjęte założenia pozwoliły na zaproponowanie metody składającej się z dwóch etapów:

1. Wykrycie zboczy sygnału i określenie najbardziej prawdopodobnych szerokości działek komutatora i wcięć izolacji.
2. Określenie szerokości pojedynczych działek komutatora i wcięć izolacji wraz z predykcją miejsc występowania niewidocznych wcięć izolacji.

Etap pierwszy rozpoczyna się od detekcji zboczy. W pierwszej kolejności wyznaczany jest wektor różnic  $X_d$  z wektora pomiarowego  $X[i]$ :

$$(1) X_d = [X[2] - X[1], X[3] - X[2], \dots, X[M] - X[M-1]].$$

Wektor różnic  $X_d$  reprezentuje szybkość i kierunek zmian sygnału  $X$ . Na podstawie sygnału pomiarowego  $X$ , wektora  $X_d$  oraz względnego progu detekcji  $k_r$ , określany jest wektor zboczy  $Z$ . W sygnale wykryto zbocze na pozycji  $i$ , jeżeli spełnione są jednocześnie dwa warunki:

1. Wartość  $X_d[i]$  przekracza względny próg detekcji  $k_r$ , pomnożony przez wartość średnią z wartości bezwzględnej z wektora  $X_d$  z uwzględnieniem kierunku zmian:

$$(2) \begin{aligned} X_d[i] > k_r E(|X_d|) &\rightarrow \text{zbocze narastające} \\ X_d[i] < -k_r E(|X_d|) &\rightarrow \text{zbocze opadające} \end{aligned}$$

gdzie:  $k_r$  jest względnym progiem detekcji,  $E(\cdot)$  jest operatorem wartości średniej,  $|\cdot|$  - jest operatorem wartości bezwzględnej.

2. Spełniony jest warunek dotyczący porównywania średniej kroczącej z dwóch próbek przed i dwóch po potencjalnym miejscu występowania zbocza określonym przez warunek nr 1:

$$(3) \begin{aligned} \frac{X[i-1] + X[i]}{2} < \frac{X[i+1] + X[i+2]}{2} &\rightarrow \text{zbocze narastające} \\ \frac{X[i-1] + X[i]}{2} > \frac{X[i+1] + X[i+2]}{2} &\rightarrow \text{zbocze opadające} \end{aligned}$$

gdzie:  $i$  - jest potencjalnym miejscem występowania zbocza spełniającym warunek nr 1.

Przedstawiona metoda wykrywania zboczy sygnału jest złożeniem metody wykrywania krawędzi opartej na

pochodnej (warunek 1) oraz metody wykrywania zmiany poziomu opartej na średniej kroczącej (warunek 2). W drodze eksperymentów na zgromadzonych sygnałach testowych ustalono, że najlepsze rezultaty otrzymuje się dla współczynnika  $k_r$  w przedziale  $\langle 2, 10 \rangle$ . Podobne eksperymenty odnośnie liczby próbek branych do wyznaczania średniej bieżącej wykazały, że najlepsze wyniki dawało zastosowanie dwóch próbek (jak w warunku nr 2). Większa liczba próbek powodowała pomijanie wąskich wcięć izolacji (szerokość wcięcia nierzadko wynosi zaledwie jedną próbkę sygnału).

W kolejnym kroku z wyznaczonego wektora  $Z$  usuwane są zbocza o powtarzającym się kierunku tak, aby wektor  $Z'$  zawierał naprzemiennie występujące zbocza opadające i narastające. Algorytm działa w ten sposób, że wyszukuje serie zboczy o tym samym kierunku i zastępuje je pojedynczym zboczem leżącym w połowie szerokości serii. Następnie, na podstawie wyznaczonego wektora  $Z'$  są konstruowane dwa wektory: wektor potencjalnych szerokości działek  $S_D$  oraz wektor potencjalnych szerokości izolacji  $S_I$ . Wektory są konstruowane w taki sposób, że dla każdego elementu wektora  $Z'$  począwszy od  $j=1$  i  $k=1$ :

$$(4) \begin{aligned} S_I[j] &= i_n - i_o \text{ dla } i_n > i_o, j = j+1 \\ S_D[k] &= i_o - i_n \text{ dla } i_o > i_n, k = k+1 \end{aligned}$$

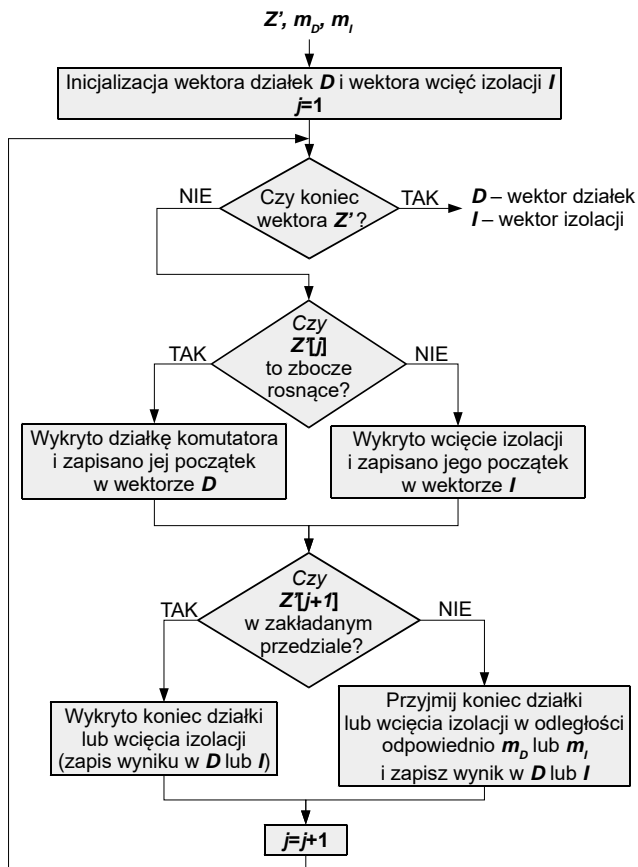
gdzie:  $S_D$  - wektor potencjalnych szerokości działek,  $S_I$  - wektor potencjalnych szerokości izolacji,  $i_n$  - indeks próbki w wektorze  $X$  zbocza narastającego z wektora  $Z'$ ,  $i_o$  - indeks próbki w wektorze  $X$  zbocza opadającego z wektora  $Z'$ .

Na podstawie wyznaczonych wektorów  $S_I$  i  $S_D$  są następnie wyznaczane najbardziej prawdopodobne wartości szerokości działek i wcięć izolacji jako dominanty (wartości modalne) z wymienionych wektorów:

$$(5) \begin{aligned} s_I &= M_D(S_I), \\ s_D &= M_D(S_D), \end{aligned}$$

gdzie:  $s_I$  - dominanta wektora  $S_I$ ,  $s_D$  - dominanta wektora  $S_D$ ,  $M_D(\cdot)$  - operator wyznaczania dominanty.

Wyznaczenie najbardziej prawdopodobnej szerokości działek komutatora i wcięć izolacji kończy pierwszy etap algorytmu. Na rysunku 6 przedstawiono schemat blokowy drugiego etapu proponowanego algorytmu. Jako dane wejściowe jest wykorzystywany wektor zboczy  $Z'$  oraz wyznaczone w pierwszym etapie: szerokość pojedynczej działki  $s_D$  oraz szerokość pojedynczego wcięcia izolacji  $s_I$ . W pierwszym kroku wyznaczane są dwa wektory zawierające informacje o początkach i końcach każdej działki komutatora (wektor  $D$ ) oraz każdego wcięcia izolacji (wektor  $I$ ). Algorytm działa w ten sposób, że ponownie są przeglądane wszystkie zbocza znajdujące się w wektorze  $Z'$ , przy czym tym razem dodatkowo sprawdzane jest, czy kolejne rozpatrywane zbocze znajduje się w określonej odległości od poprzedniego. Dla działek komutatora jest to odległość  $s_D$  a dla wcięć izolacji odległość  $s_I$ . Zakładany przedział, w którym musi się znaleźć kolejne zbocze, ustalono eksperymentalnie z tolerancją równą 50%, to jest dla działki wynosi on  $s_D \pm 0,5s_D$  a dla wcięcia izolacji  $s_I \pm 0,5s_I$ . Dla takiej wartości osiągnięto średnio najlepsze efekty w przypadku wszystkich przebadanych sygnałów. Jeżeli kolejne zbocze nie występuje w zakładanym przedziale, to wówczas algorytm zakłada, że należy uzupełnić brakujące zbocze w odległości  $s_D$  lub  $s_I$  w zależności od tego czy jest to koniec działki, czy wcięcia izolacji. Ten etap algorytmu rozwiązuje problem predykcji niewidocznych w sygnale wcięć izolacji (rys.3).



Rys.6 Schemat blokowy drugiego etapu algorytmu - określenie szerokości pojedynczych działek komutatora i wcięć izolacji

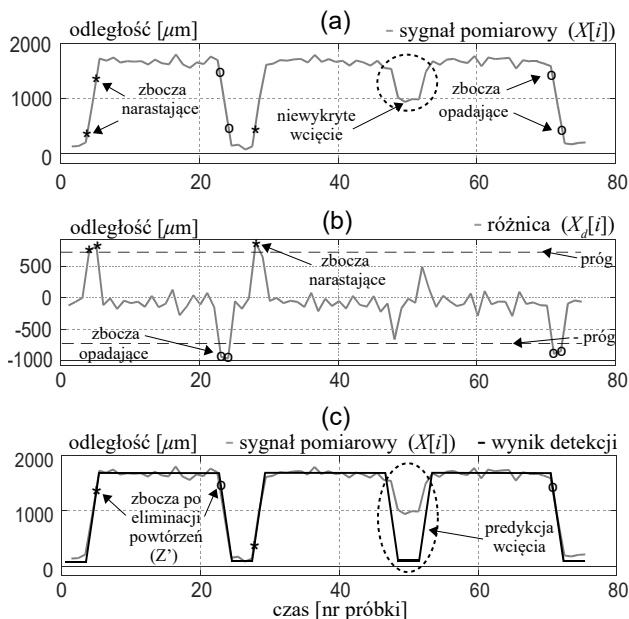
Po wyznaczeniu wektora działek komutatora  $D$  oraz wektora wcięć izolacji  $I$ , etap automatycznej detekcji zostaje zakończony. Na rysunku 7 zilustrowano poszczególne fazy działania zaproponowanej metody. Na rysunku 7a przedstawiono sygnał pomiarowy  $X$  z naniesionymi zboczami wykrytymi zgodnie z zależnością (2). Można zauważyć, że jedno z wcięć izolacji nie zostało wykryte, ponieważ ustawiony próg detekcji na rysunku 7b jest zbyt wysoki w stosunku do wyznaczonego sygnału różnicowego dla tego konkretnego wcięcia. (rys.7b) przedstawia wyznaczoną różnicę sygnału ( $X_d$ ) oraz zbocza wykryte zgodnie z zależnością (3), przy czym zastosowany próg detekcji zaznaczono linią przerywaną. Można zauważyć, że dla analizowanego sygnału w niektórych miejscach algorytm wykrył po dwa zbocza danego typu przypadające na jedno zbocze widoczne w sygnale, co wynika wprost z ilości próbek przypadających na każde ze zboczy (w tym przypadku są to dwie próbki powyżej progu detekcji). Im więc mniejsze jest nachylenie zboczy, tym wykrytych kolejno zboczy może być więcej. Problem wielokrotnych zboczy występujących w serii rozwiązuje eliminacja kolejnych zboczy o tym samym kierunku, której wynik zaprezentowano na rysunku 7c. Na tym rysunku przedstawiono również schematycznie końcowy wynik detekcji działek komutatora i wcięć izolacji. Można zauważyć, że niewykryte wcięcia zostało dodane przez zastosowaną metodę predykcji.

Po zakończeniu autodetekcji działek i wcięć izolacji diagnosta ma pełną kontrolę nad jej wynikami w postaci możliwości edycji następujących parametrów:

- Dla wszystkich działek jednocześnie istnieje możliwość zmiany ich szerokości, początków oraz końców o podaną liczbę próbek sygnału, co pozwala na globalną

korektę wyników detekcji dla wszystkich działek/wcięć izolacji jednocześnie.

- Dla każdej działki z osobna istnieje możliwość zmiany jej początku oraz końca, co pozwala na ręczną korektę wyznaczonych przez algorytm wartości w tych pojedynczych miejscach, gdzie automatyczna detekcja mogła nie przynieść pożądanych rezultatów.

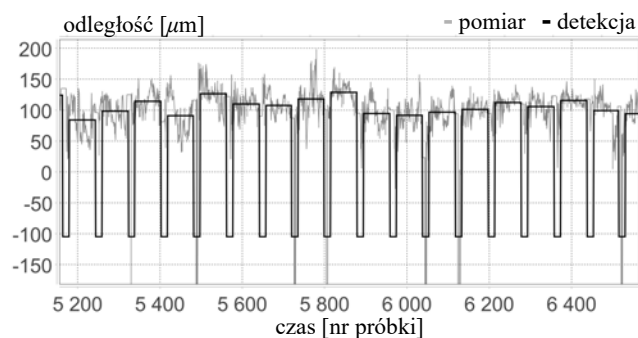


Rys.7 Ilustracja poszczególnych faz działania zaproponowanej metody: a) sygnał pomiarowy  $X$  oraz wykryte zbocza zgodnie z warunkiem nr 2; b) wyznaczona różnica ( $X_d$ ) oraz wykryte zbocza zgodnie z warunkiem nr 1; c) efekt końcowy detekcji oraz eliminacji powtarzających się zboczy o tym samym kierunku ( $Z'$ )

### Przykładowe wyniki autodetekcji

Zaproponowana metoda była poddana szerokim testom na kilkudziesięciu rzeczywistych sygnałach testowych o dużej zmienności parametrów. Poniżej zaprezentowano fragmenty wybranych sygnałów prezentujące możliwości opracowanej metody detekcji.

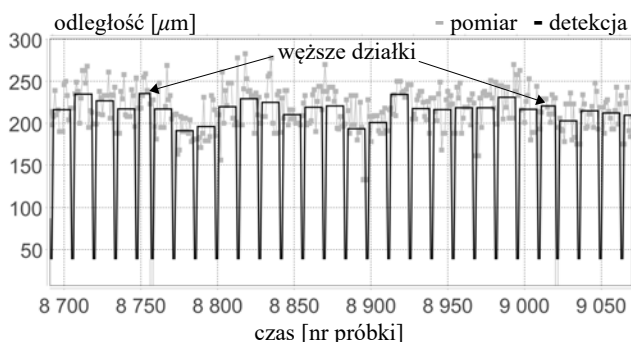
Na rysunku 8 przedstawiono fragment sygnału charakteryzujący znaczną zmiennością głębokości wcięć izolacji oraz miejscami, gdzie te wcięcia są trudne do rozpoznania. Aby poprawić czytelność wykresu zwiększono symetrycznie szerokość wcięć izolacji o 8 próbek (wzrost  $s_l$  z 2 do 10 próbek). Pozwala to łatwiej ocenić kształt sygnału pomiarowego w miejscach występowania wcięć izolacji. Mimo znacznej zmienności głębokości wcięć można zauważyć, że algorytm umożliwił ich poprawną identyfikację nawet w miejscach, gdzie nie są one jednoznacznie widoczne.



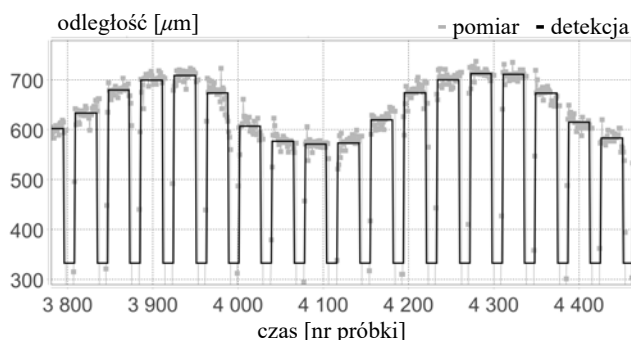
Rys.8 Efekt detekcji dla fragmentu sygnału testowego o znacznej zmienności głębokości wcięć izolacji (względny próg detekcji  $k_r=5$ )

Na rysunku 9 pokazano sygnał o stosunkowo niewielkiej rozdzielczości w osi X, dla którego występują bardzo duże odległości pomiędzy widocznymi wcięciami izolacji (dochodzące do kilkudziesięciu działek). W takim przypadku należy się liczyć z sytuacją, w której ostatnia działka wstawiona przez algorytm predykcji przed wystąpieniem kolejnego widocznego wcięcia będzie węższa lub szersza od pozostałych. Wynika to z faktu, że algorytm predykcji wstawia wcięcia izolacji posługując się parametrami  $s_1$  i  $s_D$ . Parametry te są wyznaczone z pewną skończoną dokładnością (przybliżeniem) a dodatkowo ich wartość jest skwantowana do odległości pomiędzy poszczególnymi próbkami sygnału wzdłuż osi X. Jeżeli więc nastąpi sytuacja, w której kolejne wcięcia są kolejno wielokrotnie wyznaczane przez predykcję, to wspomniana ograniczona dokładność wyznaczenia parametrów i ich kwantyzacja kumulują się z każdym kolejnym miejscem predykcji wcięcia izolacji. Dla przedstawionego sygnału spowodowało to zmniejszenie szerokości ostatniej działki w prognozowanej serii, czyli tej występującej przed kolejnym wykrytym zboczem. Należy więc być szczególnie ostrożnym przy analizie sygnałów, dla których serie niewidocznych wcięć izolacji są wyjątkowo długie. Warto również zaznaczyć, że błędy predykcji będą dotyczyć nie tylko ostatniej działki w serii, ale również pozostałych (w tym wypadku pozostałe działki w serii będą szersze niż powinny) i będą proporcjonalne do odległości od ostatniego wykrytego zbrocza. Również w tym przypadku występujący szum nie zakłócił procesu detekcji.

Na rysunku 10 pokazano przykład fragmentu sygnału, dla którego można zaobserwować wyraźne oscylacje, które są wynikiem drgań bądź to analizowanego komutatora, bądź też samego układu pomiarowego. Można zauważyć, że również w tym przypadku algorytm detekcji zapewnia poprawne wyniki detekcji.



Rys.9 Efekt autodetekcji fragmentu sygnału testowego o bardzo dużej odległości pomiędzy widocznymi wcięciami izolacji (względny próg detekcji  $k_f=4$ )



Rys 10 Efekt autodetekcji fragmentu sygnału testowego z oscylacjami (względny próg detekcji  $k_f=5$ )

## Podsumowanie

Przedstawione przykłady pokazują, że proponowana metoda detekcji zapewnia poprawną identyfikację działek komutatora i wcięć izolacji dla sygnałów o dużej zmienności parametrów (różna szerokość wcięć izolacji, rozdzielczość w osi X, poziom szumów), sygnałów zawierających pewną liczbę niewidocznych wcięć izolacji (algorytm predykcji) oraz dodatkowe zakłócenia, takie jak np. pasożytnicze oscylacje. Złożenie kilku popularnych i stosunkowo prostych metod (detekcja zbroczy, detekcja poziomu, predyktor bazujący na statystycznych parametrach sygnału) doprowadziło do powstania wydajnej obliczeniowo metody detekcji działek i wcięć izolacji komutatora spełniającej wszystkie narzucone wymagania.

Opracowany algorytm został zaimplementowany we wdrożonym przez OPA S.A. oprogramowaniu do diagnostyki komutatorów maszyn elektrycznych.

**Autorzy:** dr. inż. Michał Lewandowski, Politechnika Śląska, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: [michal.lewandowski@pols.pl](mailto:michal.lewandowski@pols.pl); dr. inż. Dawid Buła, Politechnika Śląska, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: [dawid.bula@pols.pl](mailto:dawid.bula@pols.pl).

## LITERATURA

- [1] Tavner P. J., Review of condition monitoring of rotating electrical machines, *IET Electr. Power Appl.*, vol. 2 (2008), no. 4, 215-247.
- [2] Prasad, H., Maity, T., Babu, V.R., Recent developments in mine hoists drives, *J Min Sci*, 51 (2015), 1157-1164.
- [3] Łaba J., Diagnostyka komutatorów maszyn elektrycznych, *Bezp. Pr. Ochr. Śr. Gór.*, nr 5 (2020), 25-32.
- [4] <http://www.profilertech.com/mms7000-profiler>
- [5] Jakubowska-Ciszek A., Wąs P., Urządzenie do monitorowania komutatora i pierścieni ślizgowych maszyn elektrycznych, *Napędy i sterowanie*, vol. R. 21 (2019), nr 1, 58-65.
- [6] Urzędniczok H., Monitorowanie wybranych parametrów komutatorów i pierścieni ślizgowych maszyn elektrycznych bez wyłączania ich z ruchu, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 98 (2022), nr 12, 64-67
- [7] Acharya T., Ray A. K., Image Processing: Principles and Applications, *Wiley*, September 2005.
- [8] Dim J., R., Takamura T.: Alternative Approach for Satellite Cloud Classification: Edge Gradient Application, *Advances in Meteorology*, 2013, pp. 1-8.
- [9] Jain R., Kasturi R., Schunck B. G., Machine vision, *McGraw-Hill, Inc.*, 1995.
- [10] Katiyar S.K., Arun P.V., Comparative analysis of common edge detection techniques in context of object extraction, *IEEE TGRS*, Vol. 50 (2014), 11b, 68-79.
- [11] Little M. A., Jones N.S., Generalized methods and solvers for noise removal from piecewise constant signals. Part I and II, *The Royal Society Publishing*, Vol. 467 (2011), Issue 2135, 3088-3140.
- [12] Zhang R., Zhao G., Su L., A new edge detection method in image processing, *IEEE International Symposium on Communications and Information Technology*, 2005, 445-448.
- [13] Zhang X., Liu Ch., A one-dimensional slope detection approach, *SpringerPlus* 2, 474 (2013).