





Wpływ niesymetrii wewnętrznych silników indukcyjnych na sieć zasilającą

The impact of internal asymmetry of induction motors on the supply network

Janusz Petryna¹  ^{A-G}, Tomasz Kołacz¹  ^{A-G},
Grzegorz Aksamit¹  ^{A-G}, Dawid Kara¹  ^{A-G}

¹ Akademia Tarnowska, Wydział Nauk Technicznych, Katedra Automatyki, Robotyki i Inżynierii Elektrycznej, ul. Mickiewicza 8, 33-100 Tarnów, Polska

Studia przypadków

Abstrakt

W pracy przedstawiono wpływ niesymetrii wewnętrznych silników indukcyjnych w postaci zwarć, skrótów, czyli zmostkowanych części uzwojenia, różnic w impedancjach stojana i uszkodzeń wirnika na sieć zasilającą w postaci składowych: przeciwnej i zerowej prądów, ilustrując tezę przykładami z badań i pomiarów. Każdy defekt silnika pozostawia ślad w sieci. Zawartość tych składowych w relacji do składowej zgodnej, podobnie jak THD, określa jakość energii elektrycznej w danej sieci.

Abstract

This paper presents the impact of internal asymmetry in induction motors, such as short circuits, close circuits, stator impedance differences and rotor damage, on the supply network in the form of negative and zero-sequence currents, illustrating the thesis with examples from research and measurements. Every motor defect leaves a trace in the network. The content of these components relative to the positive sequence current, similarly to the THD, determines the quality of electricity in a given network.

Słowa kluczowe

- negative sequence current
- zero sequence current
- internal asymmetries
- winding defects
- network current distortion index
- THD

Udziały autorów

- A - przygotowanie badań
- B - gromadzenie danych
- C - analiza statystyczna uzyskanych wyników
- D - interpretacja uzyskanych wyników
- E - przygotowanie pierwotnej wersji tekstu
- F - przegląd literatury
- G - korekta i rewizja tekstu

Informacje o artykule

Historia artykułu (Article history)

- Otrzymano (Received): 2025-12-29
- Zaakceptowano (Accepted): 2026-05-19
- Opublikowano (Published): 2026-06-30

Wydawca (Publisher)

Akademia Tarnowska
University of Applied Sciences in Tarnow
ul. Mickiewicza 8, 33-100 Tarnow, Poland

Licencja (User license)

© by Authors. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License CC-BY-SA.

Finansowanie (Financing)

Publikacja naukowa dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Nauka dla Społeczeństwa II”, nr projektu: NdS-II/SP/0162/2024/01, kwota dofinansowania: 1 077 109 zł, całkowita wartość projektu: 1 077 109 zł.

Konflikt interesów (Conflict of interest)

Nie zadeklarowano konfliktu interesów.

Korespondencja

Grzegorz Aksamit

e-mail: aksamitg@atar.edu.pl

Akademia Tarnowska

Wydział Nauk Technicznych

Katedra Automatyki, Robotyki i Inżynierii

Elektrycznej

ul. Mickiewicza 8

33-100 Tarnów, Poland

Wprowadzenie

W ramach trzyletniego projektu naukowego *Opracowanie systemu bezinwazyjnej diagnostyki silników elektrycznych dużej mocy*, finansowanego z budżetu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, zespół pomiarowy Akademii Tarnowskiej przeprowadził w ośmiu obiektach w przemyśle i energetyce kompleksowe badania stanu technicznego wytypowanych silników indukcyjnych wysokiego napięcia.

W pierwszym roku projektu wykonano badania 24 maszyn. Przeprowadzono pomiary wyładowań niezupełnych w izolacji stojanów, stanu uzwojeń wirników, ekscentryczności, drgań mechanicznych, hałasu oraz badania termograficzne.

Każdy z badanych silników zostanie ponownie przebadany jeszcze dwukrotnie – w drugim i trzecim roku trwania projektu. Jednym z celów tych badań była obserwacja trendu zmian w czasie wybranych parametrów silników oraz wpływu warunków pracy i obciążenia na te zmiany.

Badania stanu technicznego silników indukcyjnych, zwłaszcza o napięciu 6 kV oraz 10 kV, mają na celu dać jednoznaczną odpowiedź dla służb utrzymania ruchu, czy maszyna może nadal być eksploatowana, jak długo i przy jakich ograniczeniach. Taką odpowiedź można dać w oparciu o współczesną technikę diagnostyczną, która obejmuje szerokie spektrum działań pomiarowych, przetwarzania sygnałów i informacji oraz opracowań szeroko pojętych diagnoz i rekomendacji.

W obszarze diagnostyki silników indukcyjnych rozwinięto szereg metod umożliwiających ocenę stanu uzwojeń stojana, klatki lub uzwojenia wirnika, ekscentryczności szczeliny powietrznej, stanu cieplnego maszyny, stanu łożysk oraz oddziaływania maszyny na sieć zasilającą i otoczenie mechaniczne. W niniejszej pracy wykorzystano wyniki pomiarów wykonanych w ramach projektu dotyczącego bezinwazyjnej diagnostyki silników elektrycznych dużej mocy [1]. Zagadnienia jakości energii elektrycznej, w tym interpretację wskaźników THD, omówiono w pracach [2, 3]. Podstawowe zagadnienia związane z eksploatacją, diagnostyką oraz

modelowaniem maszyn indukcyjnych przedstawiono w pracach [4–13]. Prace te wskazują, że skuteczna diagnostyka maszyn dużej mocy wymaga łączenia kilku sygnałów pomiarowych, ponieważ pojedynczy objaw, np. wzrost drgań, zmiana widma prądu lub wzrost temperatury, nie zawsze pozwala jednoznacznie wskazać rodzaj defektu.

Szczególne znaczenie w diagnostyce bezinwazyjnej ma analiza sygnałów elektrycznych, zwłaszcza analiza widmowa prądów stojana, strumienia poosiowego oraz strumienia rozproszenia. Pomiar strumienia poosiowego może być ponadto wykorzystywany nie tylko do identyfikacji defektów elektromagnetycznych, lecz także do oceny momentu elektromagnetycznego i momentu obciążenia maszyny podczas pracy w warunkach przemysłowych [14, 15]. Metody analizy widmowej pozwalają wykrywać defekty klatki wirnika, połączenia wysoko rezystancyjne prętów z pierścieniami zwierającymi, niesymetrię uzwojeń, a także ekscentryczność szczeliny powietrznej [11, 16–25]. W literaturze podkreśla się również przydatność składowych symetrycznych prądów stojana w ocenie niesymetrii elektromagnetycznej maszyny oraz identyfikacji uszkodzeń stojana i wirnika [26–30]. Diagnostyka uszkodzeń uzwojeń stojana, w tym zwarć zwojowych, może być także prowadzona z wykorzystaniem zewnętrznych czujników strumienia, obwiedni prądów fazowych oraz monitoringu prądów trójfazowych [31–33].

Z punktu widzenia sieci zasilającej istotne jest nie tylko samo wykrycie defektu maszyny, lecz także ocena jego skutków w postaci odkształcenia i niesymetrii prądów pobieranych z sieci. Dlatego w niniejszej pracy, obok klasycznej analizy widmowej, wykorzystano relacje składowej przeciwnej i zerowej do składowej zgodnej prądu, tj. I^2/I^1 oraz I^0/I^1 . Wskaźniki te traktowane są jako miary niesymetrii prądowej wywołanej przez wewnętrzne defekty silnika. Ich wzrost może świadczyć o uszkodzeniach uzwojeń, niesymetrii impedancji fazowych, zwarciach zwojowych, skrótach uzwojeń lub defektach wirnika. W tym sensie uzupełniają one klasyczne wskaźniki jakości energii, takie jak THD, opisujące zawartość harmonicznych w przebiegach prądów i napięć [2, 3].

W pracy zastosowano również wskaźnik RFI (Rotor Fault Index) wyznaczany na podstawie amplitud charakterystycznych składowych poślizgowych w widmie prądu stojana lub strumienia poosiowego. Wskaźnik ten umożliwia ocenę stopnia uszkodzenia klatki wirnika lub niesymetrii uzwojenia wirnika. Zestawienie wartości RFI z wartościami I_2/I_1 oraz I_0/I_1 pozwala powiązać diagnozę stanu technicznego maszyny z jej oddziaływaniem na sieć zasilającą. W działaniach zespołu projektowego wykorzystano wszelkie dostępne techniki badań, niektóre z nich oraz rezultaty przedstawiono w artykule.

Metoda analizy stanu ustalonego

Zastosowana metoda jest oparta na analizie widmowej prądu stojana i/lub strumienia poosiowego lub rozproszenia dla oceny stanu klatki wirnika i stopnia ekscentryczności wirnika [16, 17]. W oparciu o częstotliwości prądów lub poosiowego strumienia magnetycznego, charakterystyczne dla stanu uszkodzenia klatki (przedział głównie do 100 Hz, a w ogólności do kilkuset Hz) oraz dla zjawiska ekscentryczności wirnika (5–50 kHz) [18], była oceniana wielkość niesymetrii silnika: elektrycznej w uzwojeniu wirnika, charakteryzowanej za pomocą wskaźnika RFI oraz niesymetrii magnetycznej (ekscentryczność jako nierównomierność szczeliny powietrznej) [23]. Finalnie podawana była diagnoza stanu silnika wraz z przewidywanym czasookresem jego dalszej bezpiecznej eksploatacji.

W analizie przyjęto trzy zasadnicze grupy wskaźników diagnostycznych. Pierwszą z nich stanowi wskaźnik RFI, związany z obecnością składowych poślizgowych w widmie prądu stojana lub strumienia poosiowego, wykorzystywany do oceny stanu klatki wirnika. Drugą grupę stanowią względne wartości składowych symetrycznych prądu, tj. I_2/I_1 oraz I_0/I_1 . Składowa przeciwna I_2 jest miarą niesymetrii prądowej i elektromagnetycznej maszyny, natomiast składowa zerowa I_0 może wskazywać na obecność zjawisk powodujących pojawienie się prądów o jednakowej fazie w przewodach fazowych. Trzecią grupę stanowią klasyczne wskaźniki jakości energii, w szczególności THD, które opisują zawartość harmonicznym w przebiegach prądowych. Łączna interpretacja tych wskaźników pozwala odróżnić uszkodzenie lokalne w maszynie od jego skutków obserwowanych po stronie sieci zasilającej.

Wskaźnik uszkodzenia wirnika, określane w oparciu o widmo prądu fazy stojana lub strumienia poosiowego, wyraża się wzorem (1) [22]:

$$RFI = p \cdot [\max(A_1, A_2) - A_{\text{noise}}] \div (A_0 - A_{\text{noise}}) \quad (1)$$

gdzie:

p – liczba par biegunów silnika;

A_1, A_2 – amplitudy harmonicznym prądów lub strumienia w dB o częstotliwościach $f_0 \cdot (1 + k \cdot 2s)$, zwanych poślizgowymi;

A_0 – amplituda podstawowej harmonicznym prądu lub strumienia;

$k = 1, 2, 3, \dots$ – kolejny numer składowych poślizgowych;

A_{noise} – poziom szumów widma.

Przykładowo, jeżeli wskaźnik RFI zawiera się w przedziale od 0 do 0,3, klatkę lub uzwojenie wirnika można uznać za zdrowe (pozbawione istotnych defektów).

Dla $0,3 < RFI < 0,6$ przyjmuje się, że w wirniku występują wczesne oznaki pojawienia się połączeń wysokorezystancyjnych, głównie między prętami a pierścieniem/pierścieniami zwierającymi w klatce lub niewielka niesymetria uzwojenia wirnika silnika pierścieniowego (kilka procent różnicy wartości rezystancji faz wirnika).

Wartość $0,6 < RFI < 1$ oznacza obecność serii wysokorezystancyjnych połączeń w klatce lub pęknięcie pojedynczego pręta albo większą niesymetrię uzwojenia wirnika silnika pierścieniowego (kilkanaście lub więcej procent różnicy rezystancji faz wirnika).

$RFI > 1$ oznacza większą niż 1 liczbę pękniętych prętów wirnika i tym samym brak ciągłości klatki lub znaczną niesymetrię faz wirnika silnika pierścieniowego. Wartości $RFI \geq 3$ świadczą o pęknięciu pierścienia zwierającego klatki lub o przerwie w fazie wirnika silnika pierścieniowego, co wyłącza silnik z pracy.

Silniki z wykrytymi defektami

Każdy pomiar [1] obejmował rejestrację prądów fazowych silnika (podczas rozruchu i dalej w stanie ustalonym), przy użyciu cewek Rogowskiego zainstalowanych bezpośrednio przy silniku lub w rozdzielni 6 kV, rejestrację wyładowań niepełnych w izolacji poszczególnych faz oraz rejestrację przebiegu strumienia poosiowego, przy użyciu cewki pomiarowej umiejscowionej od strony przeciwnapędnej maszyny. W tym samym czasie mierzone były drgania mechaniczne i hałas. Analiza kształtu prądów podczas rozruchu i w stanie ustalonym (w szczególności modulacji amplitud ich przebiegów) oraz widma amplitudowo-częstotliwościowego prądów i strumienia, umożliwiły wykrycie defektów wirnika oraz niesymetrii wewnętrznych w uzwojeniu stojana w postaci zwarć, skrótów (zmostkowanych części uzwojeń), niedozwojeń, przerw w gałęziach równoległych itp. [16–18].

Spśród 24 zbadanych maszyn w pierwszym roku badań u 9 z nich wykryto defekty. Na wybranych przykładach zostanie pokazany wpływ uszkodzonych silników na sieć zasilającą.

W dalszej części dla każdego silnika zestawiono przebiegi prądów fazowych, wykresy wskazowe, widma diagnostyczne oraz przebiegi i wartości składowych symetrycznych. Taki układ prezentacji umożliwia powiązanie objawów defektu w samej maszynie z jego skutkami obserwowanymi po stronie sieci zasilającej.

Silnik S1

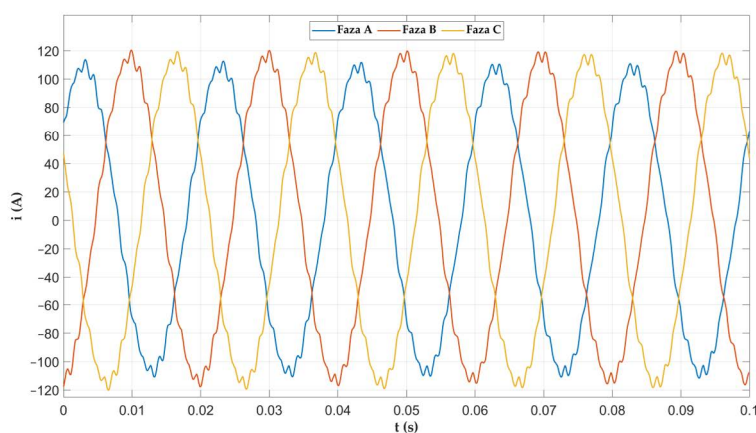
Silnik S1 pracuje jako napęd pompy wody obiegowej. Jego dane znamionowe to:

Moc: $P_N = 700$ kW

Napięcie: $U_N = 6000$ V(Y)

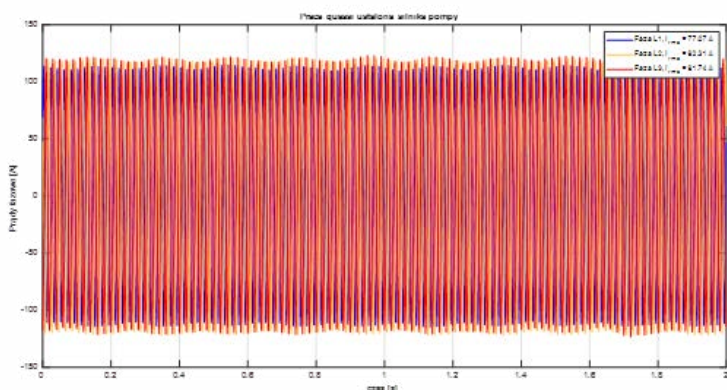
Prędkość obrotowa: $n_N = 991$ obr./min.

Pierwszym objawem niesymetrii silnika S1 są różnice amplitud prądów fazowych widoczne już w krótkim oknie czasowym, co pokazano na rysunku 1. W dłuższej rejestracji, przedstawionej na rysunku 2, widoczne są dodatkowo modulacje amplitudy, mogące świadczyć o defekcie wirnika. Interpretację tych różnic uzupełnia wykres wskazowy prądów fazowych (rysunek 3).



Rysunek 1. Prądy fazowe w stanie ustalonym, 5 okresów

Widoczne różnice amplitud poszczególnych faz oraz obecność wyższych harmonicznych, które powodują dodatkowe straty mocy i obciążają system.



Rysunek 2. Prądy fazowe w stanie ustalonym, 100 okresów

Widoczne modulacje, mogące świadczyć o defekcie wirnika.

Sygnał strumienia poosiowego, pokazany w dziedzinie czasu na rysunku 4, zawiera modulacje amplitudy wskazujące na niesymetrię wirnika. Dlatego dalszą ocenę prowadzono z wykorzystaniem widma strumienia poosiowego; fragment tego widma ze składowymi poślizgowymi przedstawiono na rysunku 5.

Aby dokonać analizy stanu klatki wirnika i/lub ekscentryczności szczeliny powietrznej w oparciu o widmo amplitudowo-częstotliwościowe prądu fazy stojana lub strumienia poosiowego bądź rozproszenia [11], należy wyznaczyć obroty silnika.

Wylczenie lub wyznaczenie obrotów silnika wymaga znajomości lub obliczenia charakterystycznych częstotliwości na podstawie harmonicznych pochodzących od:

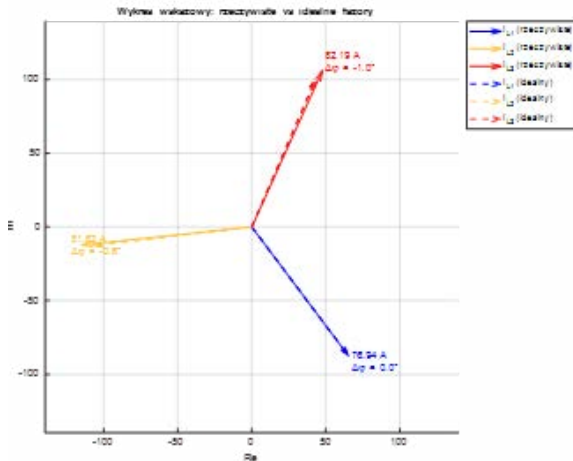
- widma prądu (podstawowych harmonicznych żłobkowych) lub
- widma drgań lub
- widma strumienia poosiowego bądź strumienia rozproszenia.

Obroty badanego silnika: 993,18 obr./min wyznaczono na podstawie widma strumienia poosiowego i zweryfikowano w oparciu o pomiar drgań mechanicznych.

Wskaźnik uszkodzenia wirnika:

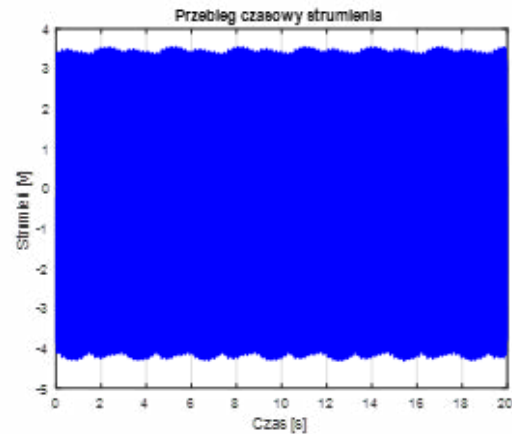
$$RFI_{50} = 3 \cdot (88,7 - 55) \div (137,9 - 55) = 1,2195 \quad (2)$$

Komentarz: $RFI > 1$ oznacza większą niż 1 liczbę pękniętych prętów i tym samym brak ciągłości klatki.



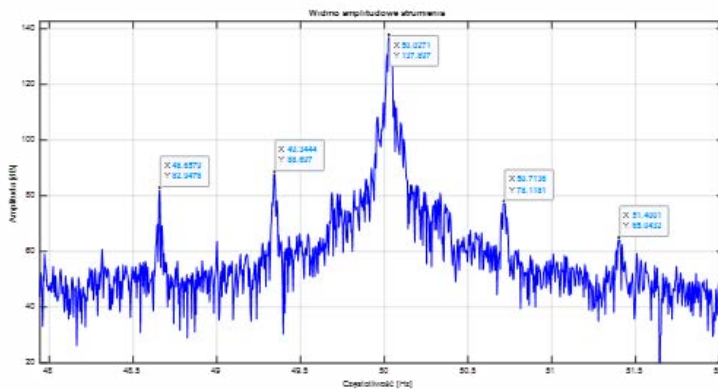
Rysunek 3. Wykres wskazowy prądów silnika: $I_{L1} = 77$ A, $I_{L2} = 82,24$ A, $I_{L3} = 81,69$ A

Niesymetria prądów może być interpretowana jako skutek różnic impedancji poszczególnych faz. $\Delta\phi$ to różnica pomiędzy rzeczywistym a spodziewanym kątem wektora prądu danej fazy na płaszczyźnie zespolonej.

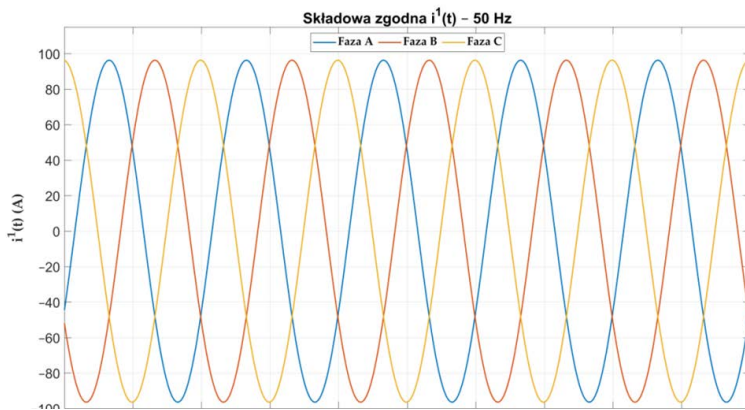


Rysunek 4. Przebieg czasowy strumienia poosiowego w czasie 20 sekund

Widoczne są modulacje amplitudy mogące świadczyć o defekcie wirnika.



Rysunek 5. Fragment widma strumienia poosiowego w zakresie 48–52 Hz z zaznaczonymi składowymi poślizgowymi



Rysunek 6. Przebieg czasowy składowej zgodnej prądów fazowych silnika

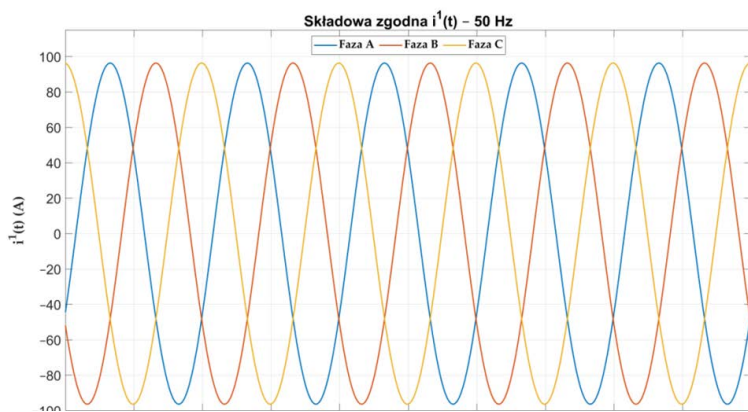
W wirniku silnika występuje niesymetria elektryczna spowodowana uszkodzeniem kilku prętów klatki oraz wysoko rezystancyjnymi połączeniami prętów z pierścieniami, a także niesymetria magnetyczna, spowodowana różnymi co do wartości skutecznej prądami w prętach klatki [24].

Transformacja wielkości fazowych do składowych symetrycznych [26] ujawnia obecność składowej przeciwnej, a także zerowej w prądach fazowych silnika [28, 30]. Wyniki tej transformacji pokazano w dziedzinie czasu na rysunki 6–8, odpowiednio dla składowej zgodnej, przeciwnej i zerowej. Zestawienie wartości skutecznych tych składowych przedstawiono na rysunek 9.

Na rysunek 9 wartości składowej przeciwnej przypisano symbolicznie częstotliwość ujemną na znak, że pole magnetyczne dla tej składowej wiruje w kierunku przeciwnym do pola składowej zgodnej.

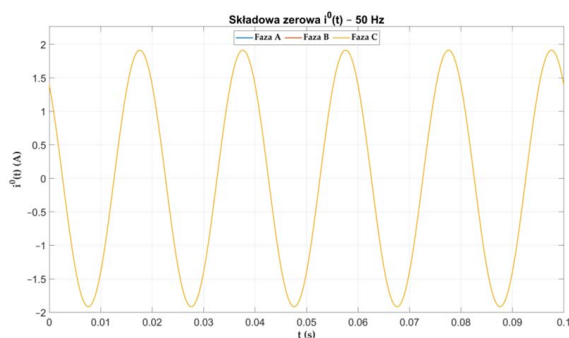
Wartości bezwzględne i relatywne poszczególnych składowych symetrycznych wynoszą:

- Składowa zerowa $I^0 = 1,354$ A, kąt fazowy $43,4^\circ$.

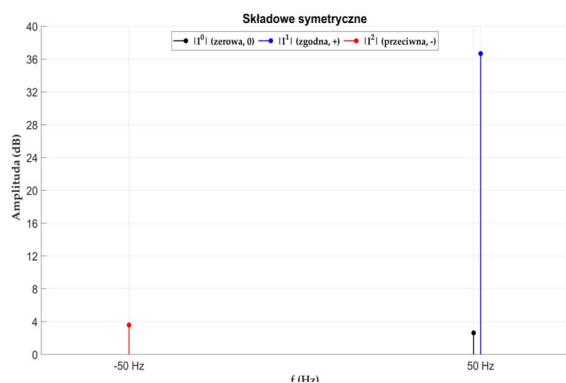


Rysunek 7. Przebieg czasowy składowej przeciwnej prądów fazowych silnika

Składowa zerowa prądu zamyka się wewnątrz jakiegoś obwodu w maszynie, np. wewnątrz skrótu lub pętli zwarciowej, i może płynąć tylko wtedy, gdy istnieje droga powrotna do źródła, np. przez doziemienie lub jako prąd upływu do przewodu ochronnego PE, co często ma miejsce w starych silnikach [2, 3].



Rysunek 8. Przebieg czasowy składowej zerowej w fazie C



Rysunek 9. Wartości skuteczne składowych symetrycznych prądów

- Składowa zgodna $I^1 = 68,13$ A, kąt fazowy $-117,4^\circ$.
- Składowa przeciwna $I^2 = 1,511$ A, kąt fazowy $55,4^\circ$.
- Wartość relatywna $I^2/I^1 = 2,22\%$.
- Wartość relatywna $I^0/I^1 = 1,99\%$.

Uwaga: Jeśli silnik jest zasilany w układzie 3-przewodowym (3P3W) i bez uziemienia punktu neutralnego, przepływ składowej zerowej prądów jest niemożliwy. Aby prąd składowej zerowej mógł płynąć w przewodach fazowych, co jest faktem pomiarowym, musi istnieć ścieżka powrotna dla tych prądów (np. upływ do ziemi).

Przyczyny powstawania składowej zerowej prądu to:

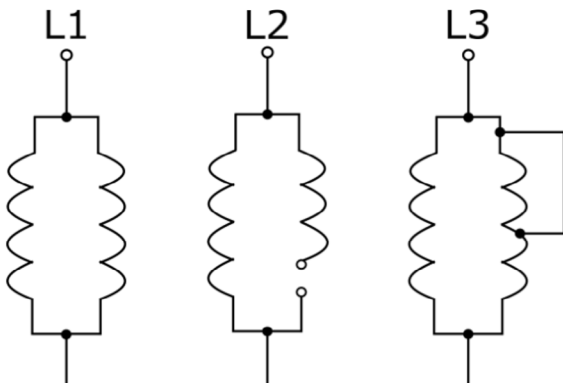
- niesymetryczne obciążenie sieci lub zasilanie silnika: niesymetryczne napięcia zasilające silnik lub niesymetryczne impedancje faz silnika powodują powstawanie prądów niesymetrycznych, które mogą mieć składową zerową;
- stany awaryjne: zwarcia doziemne (*ground faults*) lub przerwy w fazach generują dużą składową zerową, wykorzystywaną do diagnostyki uszkodzeń;
- zwarcia zwojowe (*inter-turn faults*): mogą generować składową zerową prądów i napięć. Analiza widma składowej zerowej prądów pozwala na wykrycie zwarć zwojowych, a nawet odróżnienie ich od skutków asymetrii napięcia zasilania;
- zasilanie z falownika (VFD): szybkie przełączanie tranzystorów w falowniku (napięcie wspólne) generuje składową zerową wysokoczęstotliwościową, która może płynąć przez łożyska silnika, powodując ich uszkodzenie;
- harmoniczne rzędu trzeciego (3, 9, 15, ...): nieliniowe obciążenia lub nasycenie rdzenia magnetycznego indukują prądy składowej zerowej o częstotliwościach będących wielokrotnością 3-krotności częstotliwości podstawowej.

Skutki występowania składowej zerowej prądów w silnikach:

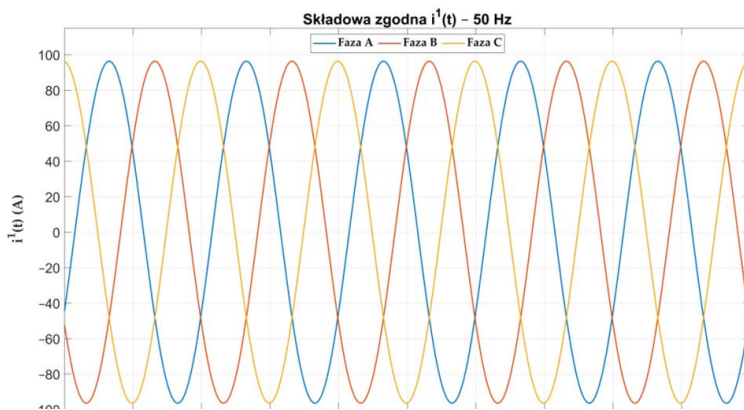
- dodatkowe nagrzewanie: składowa zerowa prądów nie wytwarza użytecznego momentu obrotowego, lecz generuje straty cieplne w uzwojeniach;
- uszkodzenia łożysk: wysokoczęstotliwościowe prądy składowej zerowej mogą przebijać film smarny w łożyskach i płynąc przez nie, prowadzić do ich szybkiego zużycia;
- wibracje i hałas: niesymetryczne prądy zwiększają wibracje silnika.

Możliwą interpretację wewnętrznych niesymetrii uzwojenia stojana, w tym niesymetrii w gałęziach

równoległych, przedstawiono schematycznie na rysunku 10.

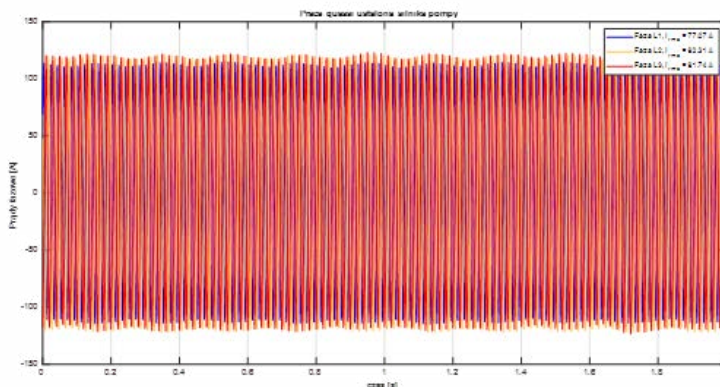


Rysunek 10. Przykładowe niesymetrie w fazach stojana z gałęziami równoległymi [20]



Rysunek 11. Prądy fazowe w stanie ustalonym

Widać znaczne różnice w amplitudach poszczególnych faza.



Rysunek 12. Prądy fazowe – 100 okresów

Widoczne modulacje – możliwe niesymetrie wewnętrzne.

Silnik S2

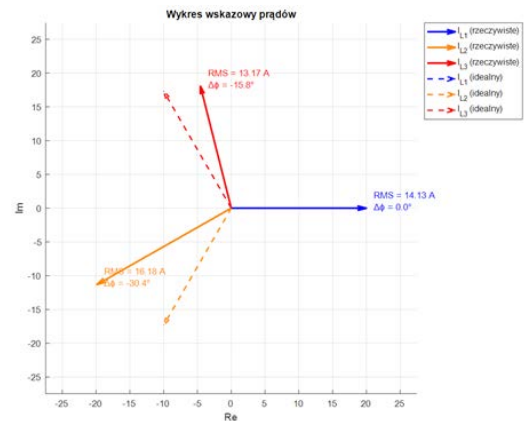
Silnik S2 pracuje jako napęd taśmociągu. Jego dane znamionowe to:

Moc: $P_N = 200$ kW

Napięcie: $U_N = 6000$ V(Y)

Prędkość obrotowa: $n_N = 1489$ obr./min.

W przypadku silnika S2 niesymetria prądów jest bardziej wyraźna niż dla S1. Różnice amplitud w krótkim oknie czasowym pokazano na rysunku 11, natomiast na rysunku 12 przedstawiono dłuższą rejestrację, w której widoczne są modulacje prądów fazowych. Wykres wskazowy na rysunku 13 potwierdza zarówno różnice wartości skutecznych, jak i przesunięcia kątów fazowych wektorów prądów.

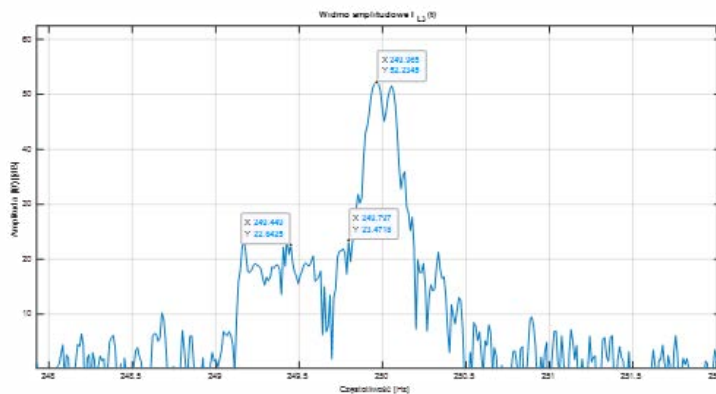


Rysunek 13. Wykres wskazowy prądów fazowych - niesymetrie prądów (jak na rys. 11 i 12)

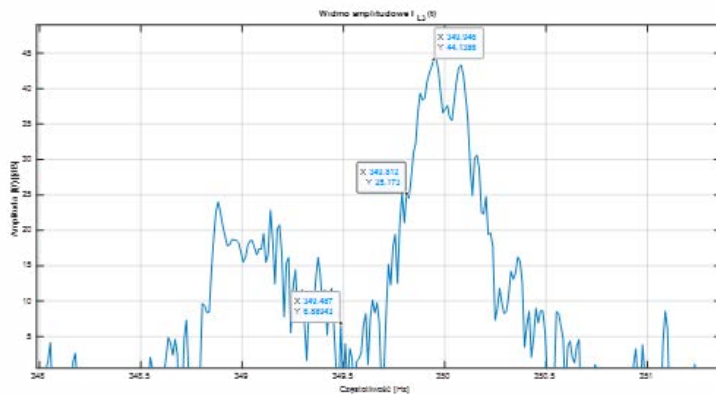
Widoczne znaczne przesunięcia kątów fazowych wektorów prądów poszczególnych faz.

Obroty silnika $n = 1495,7$ obr./min, wyznaczono na podstawie harmonicznych żłbkowych obecnych w widmie prądu fazy stojana i potwierdzone pomiarem drgań mechanicznych.

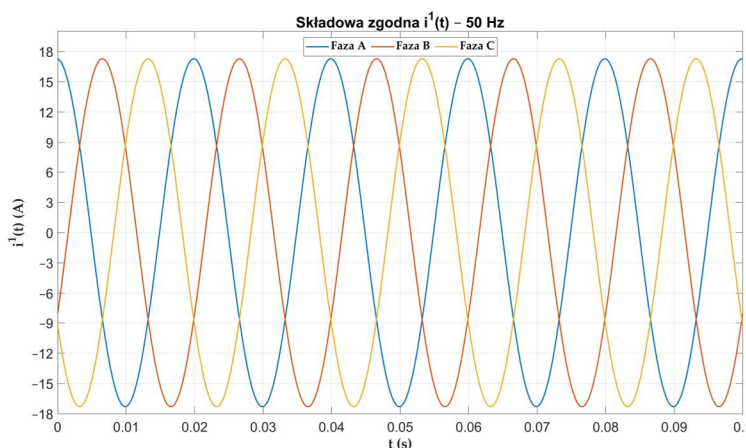
Do diagnozowania stanu uzwojeń wirnika najbardziej przydatne są składowe poślizgowe wokół harmonicznej podstawowej prądów, ale również wokół 5. oraz 7., ze względu na obecny tam znaczny sygnał diagnostyczny w stosunku do poziomu szumu widma [19]. Na rysunkach 14–15 przedstawiono odpowiednio fragmenty widma prądu fazy L3 wokół



Rysunek 14. Widmo prądu fazy L3 stojana wokół harmoniczej 250 Hz



Rysunek 15. Widmo prądu fazy L3 stojana wokół harmoniczej 350 Hz



Rysunek 16. Przebieg czasowy składowej zgodnej w prądach fazowych

250 Hz i 350 Hz, z których wyznaczono wartości wskaźników RFI_{250} oraz RFI_{350} .

$$RFI_{250} = 2 \cdot (23,47 - 8) \div (52,23 - 8) = 0,6995 \quad (3)$$

Uwaga: $0,6 < RFI < 1$ oznacza obecność serii wysokorezystancyjnych połączeń w klatce lub pęknięcie pojedynczego pręta albo większą niesymetrię faz uzwojenia wirnika silnika pierścieniowego.

$$RFI_{350} = 2 \cdot (25,17 - 5) \div (44,14 - 5) = 1,0307 \quad (4)$$

Uwaga: $RFI > 1$ oznacza większą niż 1 liczbę pękniętych prętów i tym samym brak ciągłości klatki wirnika silnika.

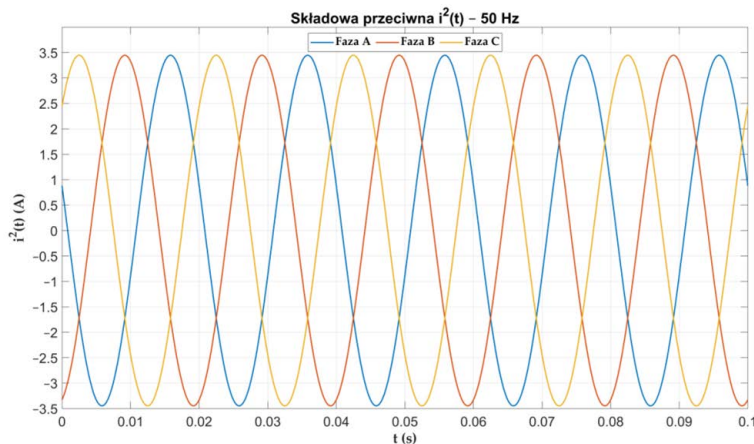
W wirniku tego silnika jest niesymetria elektryczna spowodowana uszkodzeniem kilku prętów klatki oraz wysoko rezystancyjnymi połączeniami prętów z pierścieniami wysoko rezystancyjnymi połączeniami prętów z pierścieniami, a także magnetyczna, spowodowana różnymi co do wartości prądami w prętach klatki.

Transformacja wielkości fazowych do składowych symetrycznych ujawnia obecność składowej przeciwnej, a także składowej zerowej w prądach fazowych silnika. Skutki tej niesymetrii po stronie sieci zasilającej ilustrują przebiegi czasowe składowej zgodnej, przeciwnej i zerowej pokazane na rysunkach 16–18. Ich wartości skuteczne zestawiono na rysunku 19, co pozwala bezpośrednio ocenić relacje I^2/I^1 oraz I^0/I^1 .

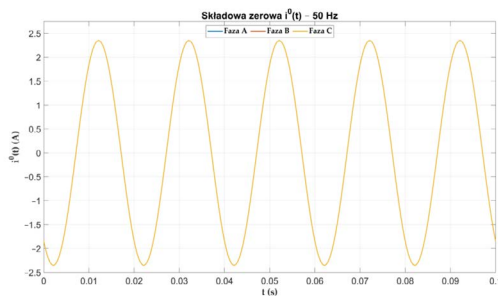
Podobnie jak na rysunku 9 wartości składowej przeciwnej widocznej na rysunku 19 przypisano symbolicznie częstotliwość ujemną na znak, że pole magnetyczne dla tej składowej wiruje w kierunku przeciwnym do pola składowej zgodnej.

Wartości bezwzględne i relatywne poszczególnych składowych symetrycznych wynoszą:

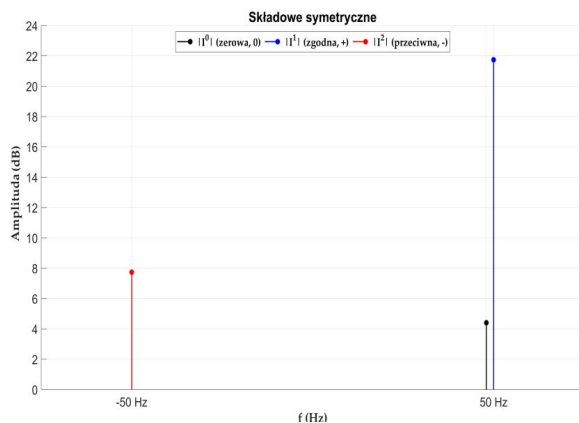
- Składowa zerowa $I^0 = 1,66$ A, kąt fazowy $141,8^\circ$ - zamyka się wewnątrz jakiegoś obwodu w maszynie, np. wewnątrz skrótu lub pętli zwarciowej.



Rysunek 17. Przebieg czasowy składowej przeciwnej w prądach fazowych



Rysunek 18. Przebieg czasowy składowej zerowej w fazie C



Rysunek 19. Wartości skuteczne składowych symetrycznych prądów

- Składowa zgodna $I^1 = 12,22$ A, kąt fazowy $2,3^\circ$.
 - Składowa przeciwna $I^2 = 2,437$ A, kąt fazowy $75,2^\circ$.
 - Wartość relatywna $I^2/I^1 = 19,94\%$
 - Wartość relatywna $I^0/I^1 = 13,59\%$.
- Silnik ten został odstawiony i poddany remontowi. Podczas remontu stwierdzono pęknięcie 4 prętów wirnika oraz zwarcia w fazach stojana [21].

Silnik S3

Silnik S3 pracuje jako napęd pompy wody sieciowej. Jego dane znamionowe to:

Moc: $P_N = 740$ kW

Napięcie: $U_N = 6000$ V (Y)

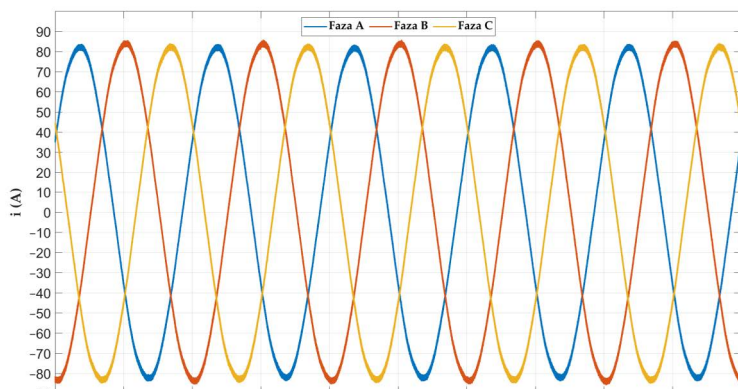
Prędkość obrotowa: $n_N = 987$ obr./min.

Dla silnika S3 przebiegi prądów fazowych przedstawiono na rysunkach 20–21. W porównaniu z silnikiem S2 niesymetria prądów jest mniej wyraźna, co potwierdza również wykres wskazowy pokazany na rysunku 22.

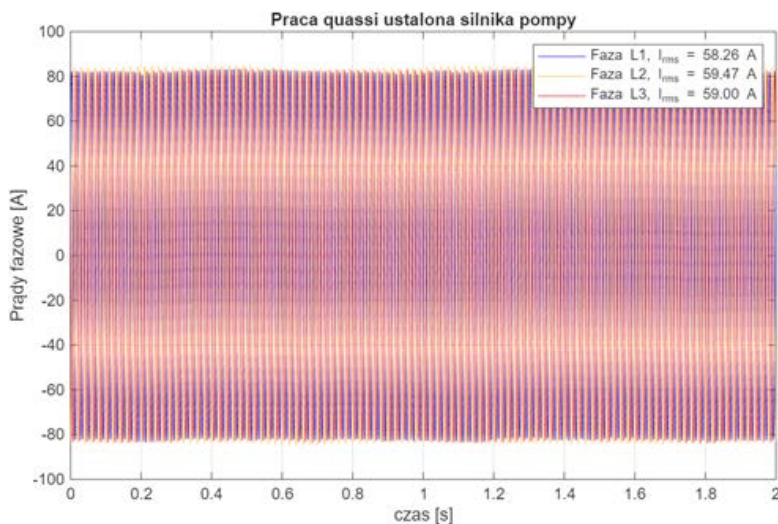
Wyznaczone obroty silnika: 992 obr./min na podstawie widma amplitudowo-częstotliwościowego strumienia rozproszenia i zweryfikowane w oparciu o pomiar drgań mechanicznych. Ponieważ w przebiegach prądów objawy defektu są słabiej widoczne, istotne znaczenie ma analiza strumienia poosiowego. Jego przebieg czasowy przedstawiono na rysunku 23.

W przebiegu strumienia poosiowego pokazanym na rysunku 23 występują modulacje o częstotliwości 0,4 Hz, praktycznie równej częstotliwości poślizgowej 0,399974 Hz. Oznacza to uszkodzenie klatki wirnika.

Obecność składowej częstotliwościowej 49,5968 Hz widocznej w widmie strumienia poosiowego maszyny (rysunek 24) potwierdza wartość jej prędkości obrotowej: $60 \div 3 \cdot 49,6 = 992$ obr./min.



Rysunek 20. Prądy fazowe w stanie ustalonym



Rysunek 21. Prądy fazowe silnika w stanie ustalonym, 100 okresów

Widoczne niewielkie modulacje, mogące świadczyć o defekcie wirnika.



Rysunek 22. Wykres wskazowy prądów fazowych silnika

Widmo strumienia poosiowego w paśmie wokół częstotliwości podstawowej pokazano na rysunku 24. Widoczne składowe poślizgowe stanowią podstawę do obliczenia wskaźnika RFI_{50} .

Wskaźnik uszkodzenia wirnika wynosi:

$$RFI_{50} = 3 \cdot (79,4 - 30) \div (97,66 - 30) = 2,1904 \quad (5)$$

Tak wysoka wartość oznacza ryzyko poważnego uszkodzenia klatki wirnika.

Potwierdzeniem diagnozy jest analiza pasma wokół piątej harmonicznej napięcia zasilania, przedstawiona na rysunku 25. Uzyskana z tego widma wartość RFI_{250} potwierdza występowanie defektu klatki wirnika.

$$RFI_{250} = 3 \cdot (44,6 - 25) \div (74 - 25) = 1,200 \quad (6)$$

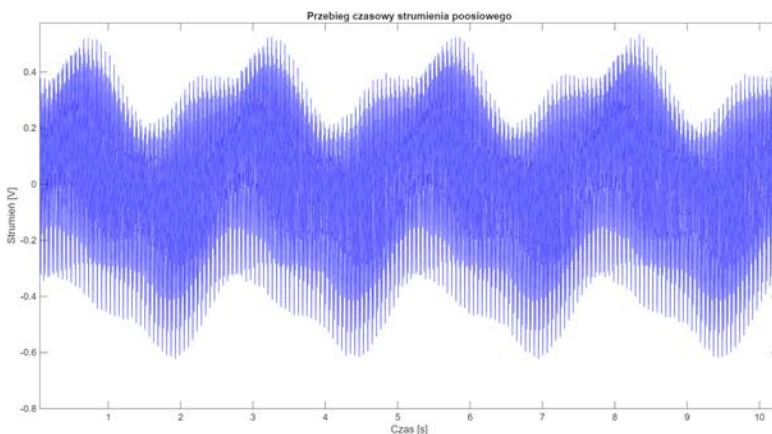
Komentarz: $RFI > 1$ oznacza większą niż 1 liczbę pękniętych prętów i tym samym brak ciągłości klatki. Widmo strumienia wokół 5. harmonicznej zasilania potwierdza defekt klatki pracy w postaci pęknięcia nawet kilku prętów oraz serii wysokorezystancyjnych połączeń – głównie spawów (lutowań) między prętami a pierścieniem/pierścieniami zwierającymi. Silnik powinien zostać poddany oględzinom, a wirnik oddany do naprawy.

Oddziaływanie defektu S3 na sieć zasilającą oceniono następnie na podstawie składowych symetrycznych prądów. Przebiegi czasowe składowej zgodnej, przeciwnej i zerowej pokazano na rysunkach 26–28, natomiast ich wartości skuteczne zestawiono na rysunku 29.

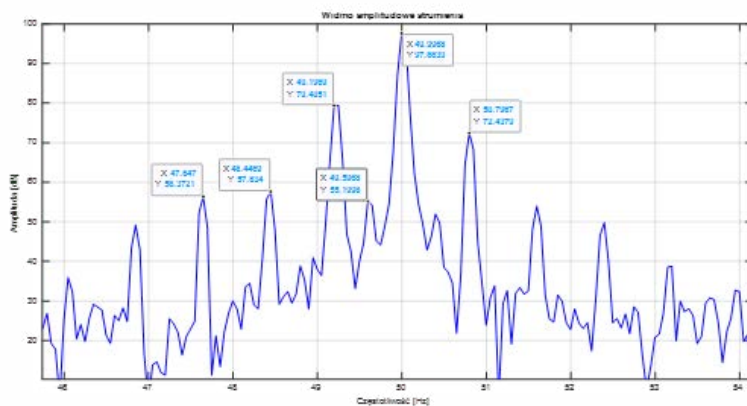
I w tym przypadku, (podobnie jak na rysunkach 9 i 19) na rysunku 29 wartości składowej przeciwnej przypisano symbolicznie częstotliwość ujemną na znak, że pole magnetyczne dla tej składowej wiruje w kierunku przeciwnym do pola składowej zgodnej.

Wartości bezwzględne i relatywne poszczególnych składowych symetrycznych wynoszą:

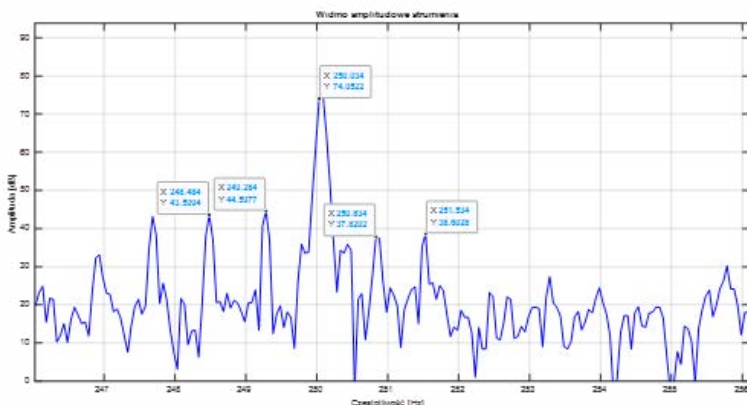
- Składowa zerowa $I^0 = 0,8876 \text{ A}$, kąt fazowy $151,4^\circ$ – zamyka się wewnątrz jakiegoś obwodu



Rysunek 23. Przebieg czasowy strumienia poosiowego



Rysunek 24. Widmo amplitudowe strumienia poosiowego w zakresie 46–54 Hz, z zaznaczonymi harmonicznymi diagnostycznymi o częstotliwościach poślizgowych oraz drugą częstotliwością obrotową wokół podstawowej harmonicznej



Rysunek 25. Widmo strumienia poosiowego w zakresie częstotliwości 246–256 Hz, tj. wokół 5. harmonicznej napięcia zasilania silnika

w maszynie, np. wewnątrz skrótu lub pętli zwarciowej.

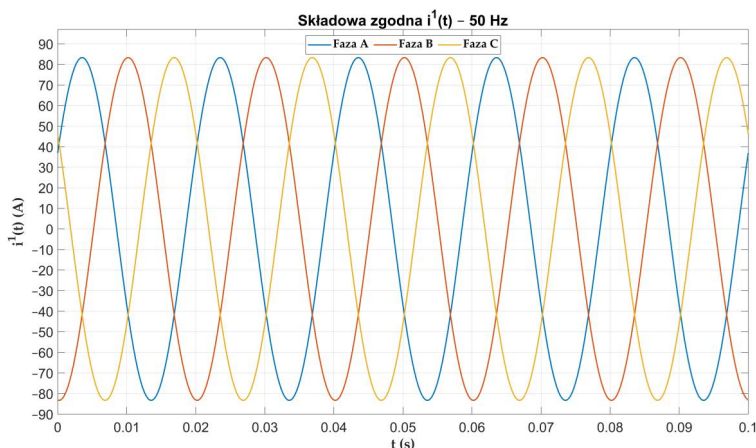
- Składowa zgodna $I^1 = 58,9$ A, kąta fazowy $-63,7^\circ$.
- Składowa przeciwna $I^2 = 0,3223$ A, kąta fazowy $-72,9^\circ$.
- Wartość relatywna $I^2/I^1 = 0,55\%$.
- Wartość relatywna $I^0/I^1 = 1,51\%$.

Podsumowanie

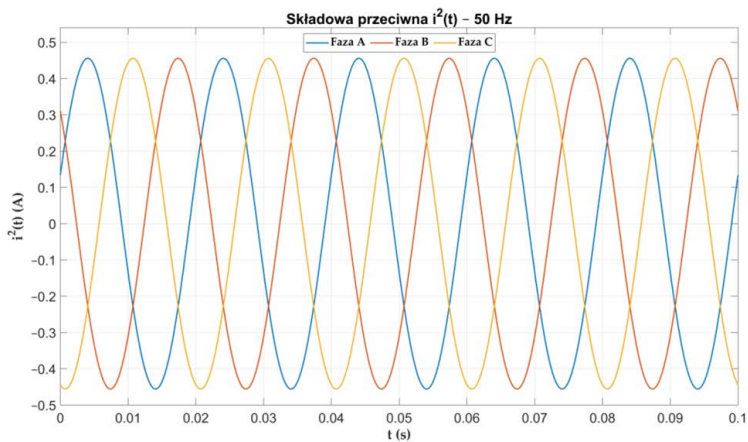
Spośród 24 przebadanych silników w 9 stwierdzono występowanie uszkodzeń. Większość z nich to maszyny kilkudziesięcioletnie, które nie były poddawane systematycznym, kompleksowym badaniom diagnostycznym. Część z tych dziewięciu jednostek może być nadal eksploatowana, pod warunkiem okresowej kontroli ich stanu technicznego. Co najmniej dwie wymagają jednak oddania do remontu.

W niektórych przypadkach składowe przeciwna i zerowa prądu osiągają znaczne wartości w stosunku do składowej zgodnej (dla przykładu w silniku S2, gdzie $I^1 = 12,22$ A, $I^2 = 2,437$ A, $I^0 = 1,66$ A, zaś $I^2/I^1 = 19,94\%$ i $I^0/I^1 = 13,59\%$). Nastawy progów zabezpieczeń ziemnozwarciowych takich maszyn są dobierane indywidualnie na podstawie doświadczeń z ich eksploatacji, niekoniecznie według typowych standardów.

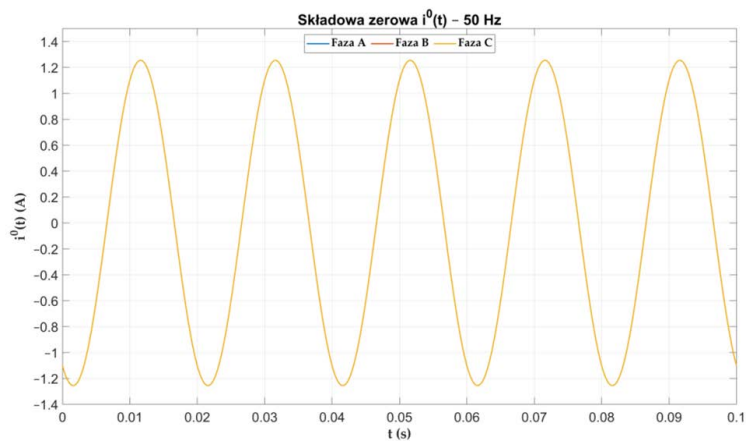
Gdyby nie program badań w ramach projektu *Opracowanie systemu bezinwazyjnej diagnostyki silników elektrycznych dużej mocy*, w wymienionych silnikach mogłoby dojść prędzej czy później do dalszego rozwoju wykrytych defektów i trwałych, nieodwracalnych uszkodzeń, jak również zagrożeń dla procesów produkcyjnych.



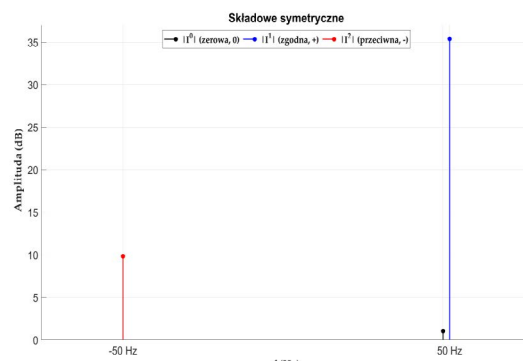
Rysunek 26. Przebiegi czasowe składowej zgodnej prądów fazowych



Rysunek 27. Przebiegi czasowe składowej przeciwnej prądów fazowych



Rysunek 28. Przebieg czasowy składowej zerowej w fazie C



Rysunek 29. Wartości skuteczne składowych symetrycznych prądów fazowych

Zaprezentowano wpływ niesymetrii wewnętrznych silników indukcyjnych w postaci zwarc i skrótów w uzwojeniach stojana i uszkodzeń wirnika na sieć zasilającą w postaci składowych przeciwnej i zerowej prądów silników. Zawartość tych składowych w relacji do składowej zgodnej, podobnie jak znany współczynnik THD, określają jakość energii elektrycznej w danej sieci, jednocześnie stanowiąc swego rodzaju ostrzeżenie przed skutkami ich występowania. Zestawienie przypadków S1-S3 pokazuje, że przebiegi prądów fazowych i wykresy wskazowe (rysunki 1-3, 11-13, 20-22), widma diagnostyczne prądu lub strumienia (rysunki 5, 14-15, 24-25) oraz składowe symetryczne prądów (rysunki 6-9, 16-19, 26-29) tworzą spójną ścieżkę diagnostyczną: od identyfikacji defektu maszyny do oceny jego wpływu na sieć zasilającą.

Bibliografia

- [1] Dokumentacja pomiarów prowadzonych w ramach projektu: „Opracowanie systemu bezinwazyjnej diagnostyki silników elektrycznych dużej mocy”. Tarnów: Akademia Tarnowska; 2024-2025. [Niepublikowane materiały wewnętrzne].

- [2] Hóldyński G, Skibka Z. Parametry opisujące jakość energii elektrycznej. *Elektro Info* [Internet]. 5 stycznia 2015 [cytowane 5 grudnia 2025] 2014;12. Dostępne na: <https://www.elektro.info.pl/arttykul/jakosc-energii-elektrycznej/58819,parametry-opisujace-jakosc-energii-elektrycznej>.
- [3] Książkiewicz A. Współczynnik całkowitego odkształcenia krzywej prądu THDI jako jeden ze wskaźników oceny Jakości Energii Elektrycznej. *Elektro Info* [Internet]. 8 lipca 2022 [cytowane 5 grudnia 2025] 2022;6. Dostępne na: <https://www.elektro.info.pl/arttykul/jakosc-energii-elektrycznej/181976,wspolczynnik-calkowitego-odkształcenia-krzywej-pradu-thdi-jako-jeden-ze-wskaznikow-oceny-jakosci-energii-elektrycznej>.
- [4] Glinka T. *Maszyny elektryczne i transformatory: podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka*. Katowice: Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych Komel; 2015.
- [5] Petryna J, Ławrowski Z, Sułowicz M, Guziec K. Diagnostowanie i weryfikacja termowizyjna silników indukcyjnych z asymetrią elektromagnetyczną. *Napędy i Sterowanie*. 2017;19(7–8):144–153.
- [6] Petryna J. Diagnostyczna baza danych napędów elektrycznych w energetyce dla potrzeb remontowych. W: *Problemy i innowacje w remontach energetycznych: PIRE 2001: IV konferencja naukowo-techniczna, Łądek Zdrój, 28–30 XI 2001*. Wrocław: Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Gospodarki Remontowej Energetyki; 2001.
- [7] Petryna J, Sułowicz M, Guziec K. Nowe doświadczenia w diagnostyce izolacji silników i generatorów metodą wyładowań niezupełnych. *Napędy i Sterowanie*. 2013;10.
- [8] Weinreb K. Modele matematyczne maszyn indukcyjnych z nierównomierną szczeliną powietrzną, *Monografie Politechniki Krakowskiej*, No.169, 1994, pp 57-87
- [9] Nandi S, Toliyat HA, Li X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors: A review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2005;20(4):719–729. <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.847955>.
- [10] El Hachemi Benbouzid M. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2000;47(5):984–993. <https://doi.org/10.1109/41.873206>.
- [11] Thomson WT, Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2001;7(4):26–34. <https://doi.org/10.1109/2943.930988>.
- [12] Bellini A, Filippetti F, Tassoni C, Capolino G-A. Advances in diagnostic techniques for induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55(12):4109–4126. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2007527>.
- [13] Szymaniec S. Eksploatacja i diagnostyka silników indukcyjnych trójfazowych klatkowych w przemyśle. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*. 2009;84:127–132.
- [14] Petryna J, Tulicki J, Sułowicz M. Calculating the electro-mechanical torque of the squirrel cage motor based on the axial flux obtained by the FEM. *ITM Web of Conferences CMES'17*. 2017;15:05004. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20171505004>.
- [15] Petryna J, Sułowicz M, Duda A, Ławrowski Z, Guziec K. Bezkontaktowe wyznaczanie momentu obciążenia silnika indukcyjnego na stanowisku pracy w energetyce w oparciu o pomiar strumienia poosiowego. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*. 2019;2(122): 87–90.
- [16] Weinreb K, Sułowicz M, Petryna J. Kompleksowa analiza uszkodzeń wirnika w maszynach indukcyjnych metodą rozdziału widma prądu stojana, *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*. 2000;61:233–238.
- [17] Weinreb K, Węgiel T, Sułowicz M. Wpływ wewnętrznych niesymetrii w silniku asynchronicznym klatkowym na własności widma prądu stojana. W: *Rams W, redaktor. XLII International Symposium on Electrical Machines SME 2006, Cracow, Poland, July 3–6, 2006: Conference proceedings*. Cracow: Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Electronic Press; 2006:307–310.
- [18] Weinreb K, Duda A, Petryna J, Sułowicz M. Diagnostyka ekscentryczności silnika indukcyjnego w oparciu o pomiar strumienia poosiowego. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*. 2015;2(106):13–20.
- [19] Sułowicz M, Petryna J, Weinreb K, Duda A, Tulicki J. Ocena wiarygodności i przydatności sygnałów diagnostycznych do bezinwazyjnej oceny stanu maszyn elektrycznych. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*. 2016;3(111):139–146.
- [20] Weinreb K, Sułowicz M, Petryna J. Faults detection in cage induction motor with parallel branches. *Czasopismo Techniczne: Elektrotechnika*. 2016;2-E:53–64. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.6046>.
- [21] Petryna J, Sułowicz M, Puzio Ł, Dziechciarz A. Wykrywanie zwarc zwojowych w maszynach elektrycznych na stacji prób z wykorzystaniem cewki do pomiaru strumienia poosiowego. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*. 2015;2:185–190.
- [22] Sułowicz M, Petryna J, Weinreb K, Guziec K. Porównawcze pomiary defektów klatek rozruchowych silników indukcyjnych pod kątem wykorzystania w diagnostyce. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe*. 2013;2(99):77–83.
- [23] Petryna J, Duda A, Sułowicz M. Eccentricity in induction machines: A useful tool for assessing its level. *Energies*. 2021;14:1976. <https://doi.org/10.3390/en14071976>.
- [24] Petryna J. How the axial flux of an induction motor can be used? *Science, Technology and Innovation*. 2019;5(2):34–43. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.2874>.
- [25] Hassan OE, Amer M, Abdelsalam AK, Williams BW. Induction motor broken rotor bar fault detection techniques based on fault signature analysis: A review. *IET Electric Power Applications*. 2018;12(7):895–907. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.0054>.

- [26] Sobczyk TJ, Weinreb K, Sułowicz M. Diagnostyka silników klatkowych oparta na składowych symetrycznych prądów stojana. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*. 2000;49(21):28–36.
- [27] Bouzid M, Champenois G. New expressions of symmetrical components of the induction motor under stator faults. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013;60(9):4093–4102. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2235392>.
- [28] Gyftakis KN, Kappatou JC. The zero-sequence current as a generalized diagnostic mean in δ -connected three-phase induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2014;29(1):138–148. <https://doi.org/10.1109/TEC.2013.2292505>.
- [29] Kato T, Inoue K, Yoshida K. Diagnosis of stator-winding-turn faults of induction motor by direct detection of negative-sequence currents. *Electrical Engineering in Japan*. 2014;186(3):75–84. <https://doi.org/10.1002/eej.22350>.
- [30] St-Onge XF, Cameron JAD, Saleh SAM, Scheme EJ. A symmetrical component feature extraction method for fault detection in induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019;66(9):7281–7289. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2875644>.
- [31] Heno H, Demian C, Capolino G-A. A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2003;39(5):1272–1279. <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.816531>.
- [32] da Silva AM, Povinelli RJ, Demerdash NAO. Induction machine broken bar and stator short-circuit fault diagnostics based on three-phase stator current envelopes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55(3):1310–1318. <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.909060>.
- [33] Sharifi R, Ebrahimi M. Detection of stator winding faults in induction motors using three-phase current monitoring. *ISA Transactions*. 2011;50(1):14–20. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2010.10.008>.