

Jakub Bernatt, Tadeusz Glinka, Artur Polak
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

BADANIE DRGAŃ MASZYN ELEKTRYCZNYCH

EXAMINATION OF VIBRATIONS OF ELECTRIC MACHINES

Streszczenie: Drgania są opisywane przez: przemieszczenie, prędkość i przyspieszenie. W maszynach elektrycznych drganie mierzone są w paśmie częstotliwości do kilku, kilkudziesięciu kHz. W tym zakresie częstotliwości najczęściej mierzy się wartość skuteczną prędkości drgań. W artykule przedstawiono dwa przykłady niesymetrii osiowej obwodu magnetycznego silników elektrycznych i jej wpływ na prędkość drgań. Pierwszym z nich jest silnik indukcyjny pierścieniowy o mocy znamionowej 2500 kW i liczbie par biegunów $p = 8$, a drugi silnik synchroniczny o mocy znamionowej 13750 kW i $p = 2$. Niesymetria osiowa pakietów blach stojana i rdzenia wirnika wpływa na prędkość drgań, w szczególności drgań osiowych węzła od strony przeciwnej do napędu A_{N-DE} .

Abstract: The vibrations are described by: displacement, velocity and acceleration. In electric machines, vibrations are measured in the frequency range up to several tens kHz. In this frequency range, the most frequently measured value is the RMS value of the vibration velocity. The article presents two examples of the axial asymmetry of the magnetic circuit of electric motors and its influence on the vibration velocity. The first case it is a ring induction motor with a rated power of 2500 kW and the number of pole pairs $p = 8$, and the second is a synchronous motor with a rated power of 13 750 kW and $p = 2$. The axial asymmetry of the stator and rotor core sheet packages affects the vibration velocity, in particular the axial vibrations of the node on the side opposite to the AN-DE drive.

Słowa kluczowe: drgania mechaniczne, maszyny elektryczne, niesymetria osiowa

Keywords: mechanical vibrations, electrical machines, axial asymmetry

1. Informacje wstępne

Drgania mechaniczne działają szkodliwie na łożyska, elementy konstrukcyjne maszyn elektrycznych i fundamenty, a poprzez wał i sprzęgło także na maszyny robocze. Drgania generują także hałas i powinny być ograniczane. W literaturze drgania opisuje się poprzez:

- ✓ przemieszczenie $x(t)$,
- ✓ prędkość $v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$,
- ✓ przyspieszenie $a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$.

W maszynach elektrycznych w zakresie częstotliwości od kilku Hz do 1 kHz korzystnie jest mierzyć wartość skuteczną prędkości drgań - rms (*Root Mean Square*).

$$v = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

gdzie:

v , $v(t)$ – wartość skuteczna i przebieg czasowy prędkości drgań,

T – okres bądź przedział czasu, w którym oblicza się wartość skuteczną

Prędkość drgań przyjęto podawać w [mm/s].

Jeśli wartość skuteczna prędkości drgań v w funkcji częstotliwości $f = \frac{\omega}{2\pi}$ jest stała

$$v(t) = \sqrt{2}v \cdot \sin\omega t$$

$$v = \text{constas}$$

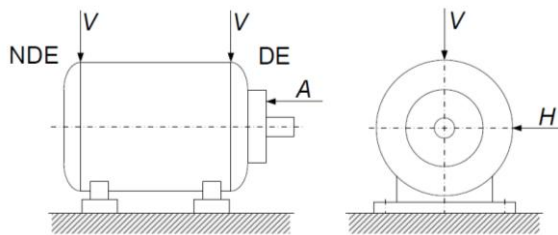
to przemieszczenie $x(t)$ w funkcji częstotliwości f

$$x(t) = x_0 - \frac{\sqrt{2}v}{2\pi f} \cdot \cos\omega t$$

a przyspieszenie

$$a(t) = 2\sqrt{2}\pi v f \cdot \cos\omega t$$

Pomiar prędkości drgań maszyn elektrycznych przeprowadza się na tarczach łożyskowych: DE (*Drive End*) – od strony napędu i N-DE (*Non-drive End*) od strony przeciwnej. Pomiar wykonuje się w trzech osiach: horyzontalnej - H (*horizontal*), wertykalnej - V (*vertical*) i osiowej - A (*axial*). W maszynach o poziomej osi wału: H – jest osią poziomą prostopadłą do osi wału, V – osią pionową prostopadłą do osi wału, a oś A – jest równoległa do osi wału bądź pokrywa się z osią wału. Miejsca pomiarowe prędkości drgań pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Miejsca pomiarowe drgań na tarczach łożyskowych

Pomiary wartości skutecznej prędkości drgań przeprowadza się w zadanym paśmie częstotliwości np. $0 \div 1000$ Hz. Mierniki pomiarowe drgań rejestrują w pamięci prędkość drgań w podanym paśmie częstotliwości, co umożliwia analizę harmoniczną drgań i określenie wartości skutecznej prędkości drgań.

Dopuszczalne poziomy prędkości drgań (rms) oraz przyspieszeń drgań (rms) podane są normie PN-ISO 10816 z 2019 r [6]. Bazując na tej normie poziomy graniczne prędkości drgań rozpatrywane w tym artykule, sklasyfikowane jako stan: dobry, dopuszczalny i niedopuszczalny. Dla maszyn elektrycznych o mocy znamionowej $P_N > 1$ MW wartości graniczne rms drgań wynoszą:

- dobry H i $V \leq 0,4$ mm/s
- dobry A do $0,8 \leq 0,8$ mm/s
- dopuszczalny H i $V \leq 1,8$ mm/s
- dopuszczalny $A \leq 2,8$ mm/s
- niedopuszczalny H i $V > 1,8$ mm/s
- niedopuszczalny $A > 2,8$ mm/s.

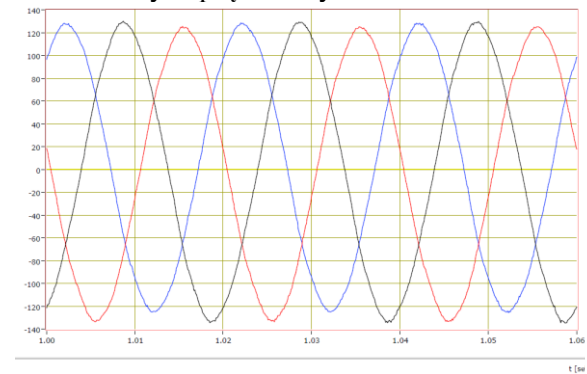
Literatura drganiowa maszyn elektrycznych jest obszerna i dotyczy głównie drgań H i V . Dobrze rozpoznane są zależności między częstotliwością tych drgań i ich przyczyną. Na przykład drgania o częstotliwości obrotowej generuje układ mechaniczny maszyny (niewywaga wirnika, skrzywiony wał), Drgania o podwójnej częstotliwości napięcia zasilania generują niesymetrie rozkładu pola magnetycznego w szczelinie, których przyczyną może być jedno z uzwojeń bądź niesymetria obwodu magnetycznego. W artykule akcent położono na drgania osiowe A .

2. Drgania silnika A

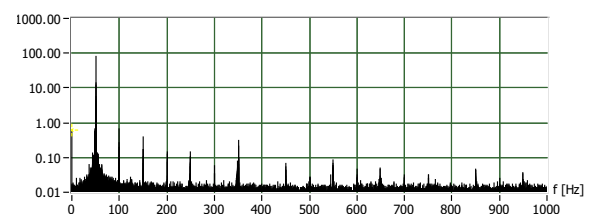
Silnik indukcyjny pierścieniowy typu SYUe-1716s o parametrach znamionowych: $P_N = 2500$ kW, $U_N = 6$ kV, $I_N = 294$ A, $U_{20} = 1740$ V, $n_N = 370$ obr/min, napędza wentylator. Silnik był remontowany i po

remontcie zamontowano go na stanowisku pracy. Po uruchomieniu silnika pomierzono drgania. Skuteczna prędkość drgań, w punktach pomiarowych zaznaczonych na rys. 1 wynosiła: $H_{DE} = 0,31$ mm/s, $V_{DE} = 0,22$ mm/s, $A_{DE} = 2,0$ mm/s, $H_{N-DE} = 0,74$ mm/s, $V_{N-DE} = 1,53$ mm/s, $A_{N-DE} = 3,24$ mm/s.

Drgania rms H_{DE} i V_{DE} , na tarczy łożyskowej od strony napędowe DE, są na poziomie drgań dobrych. Drgania rms A_{DE} , H_{N-DE} , V_{N-DE} , są na poziomie drgań dopuszczalnych, a drgania A_{N-DE} przekraczają wartość drgań dopuszczalnych. Poszukiwano przyczyny powiększonych drgań A_{N-DE} . Zarejestrowano przebiegi prądów stojana przy biegu jałowym silnika, to jest przy zamkniętych klapach wentylatora. Przebieg prądu przedstawiono na rys. 2, a spektrum harmonicznego prądu na rys. 3.

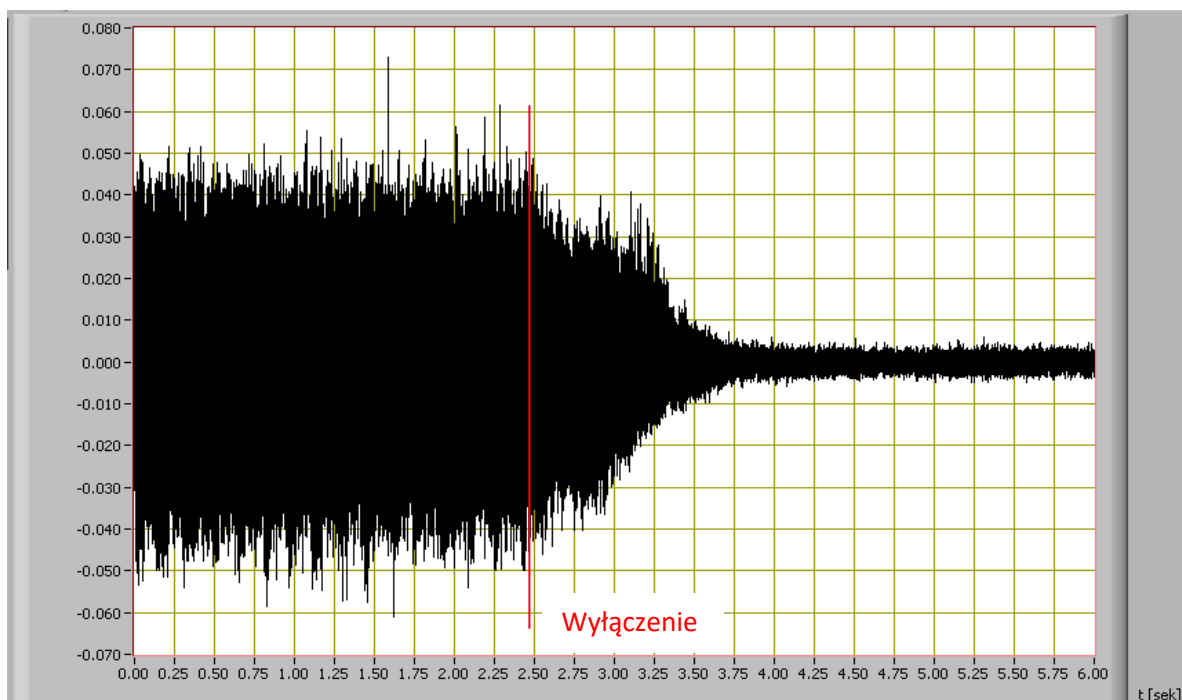


Rys. 2. Przebiegi prądów stojana przy biegu jałowym silnika



Rys. 3. Spektrum harmonicznego prądu stojana, skala na osi rzędnych [A]

Analiza harmoniczna prądu jednej fazy uzwojenia stojana wykazała, że harmoniczne $f_\mu > 50$ Hz mają wartości poniżej 1 A, czyli poniżej 1%, zatem przebieg prądu jest praktycznie sinusoidalny. Przyczyna drgań może być mechaniczna bądź elektromagnetyczna. Jednoznaczną identyfikację przyczyny drgań można zrobić rejestrując drgania na wybiegu silnika. Przebieg wartości chwilowych drgań A_{N-DE} podczas wyłączenia napięcia zasilania przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Przebieg drgań A_{N-DE} silnika na biegu jałowym i na wybiegu po wyłączeniu napięcia zasilnia

Po wyłączeniu napięcia drgania zanikają po czasie 1,25 s. Czas wybiegu silnika wynosi 900 s, a determinuje go moment bezwładności wentylatora. Z oscylogramu drgań wynika, że drgania silnika są generowane przez strumień magnetyczny w szczelinie. Po wyłączeniu napięcia zasilania strumień magnetyczny "przykleja" się do wirnika i wiruje z tą samą prędkością obrotową co wirnik. Strumień jest podtrzymywany przez prąd w uzwojeniu wirnika. Prąd w uzwojeniu wirnika zanika z elektromagnetyczną stałą czasową uzwojenia wirnika, która w przybliżeniu jest trzy razy mniejsza od czasu zaniku strumienia, dla tego silnika wynosi zatem około 0,4 s. Po zaniku strumienia, wirnik wiruje, a drgań nie ma, co dowodzi, że drgania są generowane przez strumień magnetyczny. Podstawowa częstotliwość f drgań wzbudzanych przez strumień magnetyczny jest **dwa razy** większa od częstotliwości synchronicznej f_s , to jest od zmiany strumienia względem stojana. W tym przypadku częstotliwość synchroniczna f_s jest częstotliwością elektryczną prędkości obrotowej (pn_N) wirnika.

$$f = 2f_s = 2 \frac{pn_N}{60} = 2 \frac{8 \cdot 370}{60} = 98,6 \text{ Hz}$$

gdzie: $p = 8$ jest liczbą par biegunów uzwojenia, a $n_N = 370$ obr/min jest prędkością znamionową.

Oględziny położenia pakietu blach wirnika względem pakietu blach stojana ujawniły przesunięcie pakietów względem siebie o ok. 3 mm. Takie przesunięcie mogło powstać w czasie montażu silnika na ramie fundamentowej. Wirnik jest zamocowany na kozłach łożyskowych. Kadłub stojana i kozły łożyskowe są zamocowane na jednej ramie utwierdzonej na fundamencie. Położenie kadłuba stojana można korygować względem wirnika, w zakresie kilku milimetrów, w osi A i osi H (rys. 1) w celu ustawienia symetrycznej szczeliny powietrznej między stojanem i wirnikiem i równe ustawienie pakietów blach stojana i wirnika. Po wyrównaniu ustawienia pakietów blach stojana i wirnika pomierzono drgania:

$H_{DE} = 0,09$ mm/s, $V_{DE} = 0,22$ mm/s, $A_{DE} = 1,0$ mm/s,

$H_{N-DE} = 0,9$ mm/s, $V_{N-DE} = 0,65$ mm/s, $A_{N-DE} = 2,5$ mm/s.

Drgania H_{DE} i V_{DE} były na poziomie dobrym, a A_{DE} , H_{N-DE} , V_{N-DE} , A_{N-DE} na poziomie dopuszczalnym. Silnik z takim poziomem drgań dopuszczono do eksploatacji.

3. Drgania silnika B

Silnik synchroniczny typu AMS 900 SE, o danych znamionowych: $P_N = 13750$ kW, $\cos\varphi = 1$ $U_N = 6$ kV układ - Y. $I_N = 1349$ A. wzbudzenie: $U_{fN} = 95$ V DC, $I_{fN} = 9,9$ A,

$n_N = 1500$ obr/min. Silnik jest jawnobiegunowy i jest konstrukcyjnie przystosowany do rozruch bezpośredniego przy zasilaniu z sieci trójfazowej o napięciu 6 kV. Funkcję klatki rozruchowej pełni: uzwojenie wzbudzenia i lite stalowe nabiegunki przykręcone śrubami do pieńków biegunów wzbudzenia. Silnik napędza turbosprężarkę. Czas rozruchu wynosi ok. 6 s. Pierwsza awaria silnika wystąpiła po 18 latach eksploatacji. Na rysunku 5 pokazano miejsce wystąpienia uszkodzenia. Dwie cewki zewnętrzne uzwojenia, położone w dwóch sąsiednich żłobkach, w miejscach wyjścia cewek ze żłobków, miały spaloną izolację przez łuk elektryczny, który wytopił częściowo także skrajne blachy zęba między tymi cewkami. Obraz z rysunku 5 jest charakterystyczny do zwarcia zwojowego cewek uzwojenia. Uszkodzone zastały cztery cewki, gdyż uzwojenie jest dwuwarstwowe i izolacja dolnych cewek, przy zwarciu cewek górnych, jest także zniszczona.



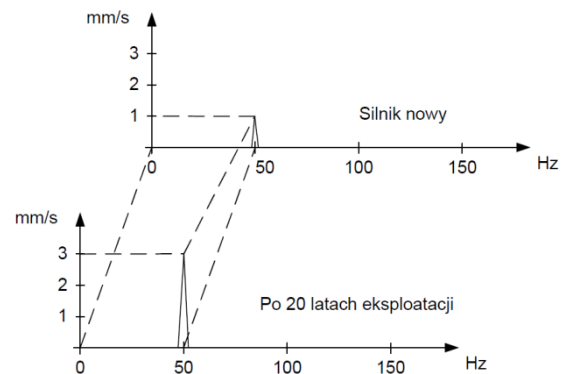
Rys. 5. Uszkodzone ceki uzwojenia stojana

Naprawa silnika polegała na nagraniu stojana do temperatury około 400°C , wyjęciu uzwojenia, i włożeniu do żłobków nowego uzwojenia. Po naprawie silnik pracował półtora roku. Zarejestrowano powiększoną temperaturę łożyska N-DE i powiększoną prędkość drgań silnika, w szczególności A_{N-DE} . Prędkość drgań zmierzona na silniku nowym $A_{N-DE} = 1,1$ mm/s, a wzrosła do wartości $A_{N-DE} = 3,38$ mm/s, pokazano to na rys. 6. Częstotliwość drgań wynosiła 50 Hz. Wzrost drgań przypisano łożyskom i postanowiono przeprowadzić ich regenerację. Olej w łożyskach był zanieczyszczony cząstkami stałymi, które uszkodziły powierzchnię wału pod łożyskami i powierzchnię panewek łożysk.

Prędkość drgań silnika po wypolerowaniu wału i regeneracji łożysk:

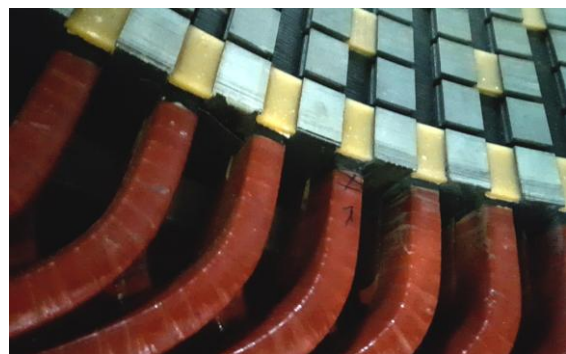
$$H_{DE} = 0,76 \text{ mm/s}, \quad V_{DE} = 1,03 \text{ mm/s}, \\ A_{DE} = 0,82 \text{ mm/s}$$

$$H_{N-DE} = 0,62 \text{ mm/s}, \quad V_{N-DE} = 1,02 \text{ mm/s}, \\ A_{N-DE} = 2,96 \text{ mm/s}$$



Rys. 6. Spektrum prędkości drgań A_{N-DE} silnika nowego i po regeneracji łożysk

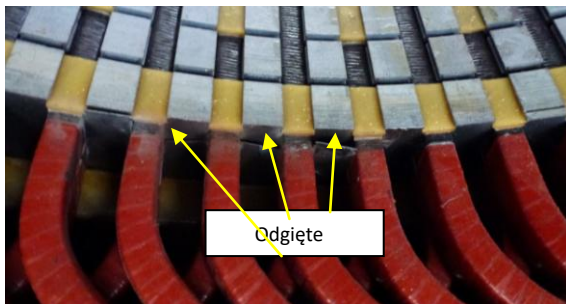
Prędkości drgań H_{DE} , V_{DE} , A_{DE} , H_{N-DE} , V_{N-DE} , A_{N-DE} mieściły się w przedziale prędkości drgań dopuszczalnych, natomiast prędkość drgań A_{N-DE} przekraczała granicę prędkości drgań dopuszczalnych. Następnie przeprowadzono badanie prędkości drgań w czasie wybiegu silnika. Badania te wykazały, że wszystkie drgania znikają po zaniku strumienia magnetycznego. W ten sposób wykazano, że źródłem drgań jest pole magnetyczne. Przy wybiegu maszyny ze sprężonej z turbosprężarką, w spektrum prędkości drgań A_{N-DE} , oprócz częstotliwości 50 Hz, pojawiają się częstotliwości 39,38 Hz i 296 Hz o niewielkiej wartości. Drgania o częstotliwości 100 Hz nie występują, czyli niesymetria pola magnetycznego nie jest przyczyną wymienionych drgań, zatem źródło drgań o częstotliwości 39,38 Hz i 296 Hz jest nieznane. Silnik włączono do eksploatacji. Po trzech miesiącach silnik uległ awarii, wystąpiło doziemienie uzwojenia stojana i zabezpieczenia silnika spowodowało jego wyłączenie.



Rys. 7. Doziemienie uzwojenia w miejscu wyjścia cewki ze żłobka zaznaczone strzałką

Po wyjęciu wirnika zlokalizowano miejsce doziemienia. Na zdjęciu uzwojenia, rys. 7, strzałką zaznaczono miejsce doziemienia. Uszkodzenie izolacji jest mało widoczne, gdyż

szybkie wyłączenie napięcia zasilania przez zabezpieczenie nie rozszerzyło się na zwarcie zwojowe. Stwierdzono, że jedna cewka uzwojenia ma przetartą izolację i ma przebicie izolacji do pakietu blach rdzenia stojana. Izolacja cewki została zeskrobana przez drgającą skrajną blachę pakietu. Pakiet był wykonany z blach o grubości 0,5 mm w tym także blachy skrajne. Pakiet nie był usztywniony na czołach. Zęby skrajnych blach drgały i wyginały się na zewnątrz rdzenia. Uwidoczniono to na rys. 8.



Rys. 8. Widok odgiętych blach skrajnych zębów rdzenia stojana

Główki kilku zębów były wyłamane. W stojanie znaleziono ich fragmenty, a jedna główka wbiła się w uzwojenie wirnika. Na uzwojeniu wirnika widoczne były ślady po uderzeniu metalowych fragmentów blach.

Powiększone drgania A_{N-DE} należy przypisać odkształceniu pakietu blach. Wygięte skrajne zęby pakietu oraz wyłamane główki skrajnych zębów spowodowały niesymetrię osiową obwodu magnetycznego, która ujawniła się powiększoną prędkością drgań osiowych na węźle N-DE od strony przeciwnapędowej.

4. Podsumowanie

Drgania można opisywać przez: przemieszczenie $x(t)$, prędkość $v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ i przyspieszenie $a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$. W maszynach elektrycznych w zakresie częstotliwości od kilku Hz do 1 kHz korzystnie jest mierzyć wartość skuteczną prędkości drgań - rms (*Root Mean Square*).

Przesunięcie osiowe pakietu blach wirnika względem pakietu blach stojana powoduje powiększenie prędkości drgań, w szczególności prędkości drgań osiowych na węźle od strony przeciwnej do napędu A_{N-DE} .

Niesymetria osiowa pakietów blach stojana i rdzenia wirnika może być spowodowana także deformacją mechaniczną jednego z nich i ona

także ma wpływ na prędkość drgań, w szczególności drgań osiowych A_{N-DE} .

Literatura

- [1]. Drak B. Zagadnienia elektromechaniczne czoł uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych dużej mocy prądu przemiennego. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Elektryka z. 163, Gliwice 1998 r.
- [2]. Drak B., Glinka T., Kapinos J., Miksiewicz R., Zientek P.: Awaryjność maszyn elektrycznych i transformatorów w energetyce. Wydawca: Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. ISBN 978-83-931909-4-2. Katowice 2013r.
- [3]. Glinka T. Maszyny elektryczne i transformatory. Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka. Wydawnictwo Instytutu Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. 2015 r., stron 287. ISBN 978-83-931909-1-1.
- [4]. Казовский Е. Я.: Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. Издательство Академии наук С.С.С.Р. 1962 г.
- [5]. Norma PN-98/E-04700. Urządzenia i układy elektryczne. Wytyczne przeprowadzenia pomontażowych badań odbiorczych.
- [6]. Norma PN-EN-ISO 10816 z 2019 r. Drgania mechaniczne. Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach nieruchomych- Część 1: Wytyczne Ogólne.