

doi:10.15199/48.2024.01.37

Rozruch silników synchronicznych z magnesami trwałymi

Streszczenie. Silniki elektryczne z magnesami trwałymi i z uzwojeniem klatkowym w wirniku, mogą być uruchamiane asynchronicznie lub częstotliwościowo. Przy rozruchu asynchronicznym prąd rozruchowy, w tym prąd udarowy, mają bardzo duże wartości (rys. 2), a drgania przekraczają wartości dopuszczalne. Należy przypuszczać, że rozruchy asynchroniczne będą determinować trwałość eksploatacyjną silników. Drugim wariantem jest rozruch częstotliwościowy. Przetwornica napięcia i częstotliwości, może być energoelektroniczna bądź elektromaszynowa. Rozruch silnika, zasilanego z przetwornicy częstotliwości, jest synchroniczny i przebiega łagodnie. Następnie silnik jest przełączany synchronicznie do sieci elektroenergetycznej. W stanie pracy ustalonej silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi, zasilane z sieci elektroenergetycznej, pracują poprawnie. Jedna przetwornica napięcia i częstotliwości może być wykorzystana do rozruchu kilku silników.

Abstract. Electric motors with permanent magnets and squirrel-cage windings in the rotor can be started asynchronously or frequency-wise. With asynchronous starting, the starting current, including the surge current, is very high (Fig. 2) and the vibration exceeds all standards. It should be assumed that asynchronous starts will determine the service life of the motors. The second variant is frequency start. The voltage and frequency converter can be power electronic or electromechanical. The start of the motor, powered by a frequency converter, is synchronous and runs smoothly. The motor is then switched synchronously to the power grid. In the steady state of operation, synchronous motors excited by permanent magnets, supplied from the power grid, work correctly. One voltage and frequency converter can be used to start several motors. (**Starting synchronous motors with permanent magnets**)

Słowa kluczowe: silniki z magnesami trwałymi, drgania, rozruch asynchroniczny, rozruch częstotliwościowy
Keywords: permanent magnet motors, vibrations, asynchronous start, frequency start

Wstęp

Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi ma w wirniku umieszczone magnesy trwałe i uzwojenie klatkowe. Magnesy trwałe są umieszczone w szczelinach w środku jarzma wirnika, a uzwojenie klatkowe złożone z prętów miedzianych jest umieszczonych w żłobkach na obwodzie zewnętrznym jarzma wirnika, na czołach pręty są zwarte pierścieniami. Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi i uzwojeniem klatkowym w wirniku, może być uruchamiany asynchronicznie lub częstotliwościowo.

Rozruch częstotliwościowy jest możliwy jeśli dysponujemy przetwornicą częstotliwości odpowiedniej mocy, która umożliwi rozruch silnika obciążonego momentem niejednokrotnie większym od momentu znamionowego. Przetwornica powinna umożliwić równoczesną regulację napięcia $U=(U_{\min}+U_N)$ i częstotliwości $f=(f_{\min}+f_N)$, przy $U/f \approx U_N/f_N$, gdzie U_N i f_N jest napięciem i częstotliwością znamionową. Początkowe napięcie musi być stosunkowo duże ($U_{\min} \approx 2U_z$), gdyż wirnik stoi i potrzebny jest odpowiedni moment aby wirnik ruszył i synchronizować z siłą magnetomotoryczną (smm) twornika. Rozruch częstotliwościowy kończy synchronizacja silnika do sieci elektroenergetycznej. Synchronizacja wymaga odpowiedniego oprzyrządowania i jest to czynność dodatkowa przedłużająca rozruch. Uzwojenie klatkowe nie uczestniczy rozruchu. Natomiast jest wykorzystane do tłumienia drgań (kołysań) prędkości kątowej silnika ($d\omega_m/dt$) tak w czasie rozruchu jak i w czasie pracy silnika. Kołysania prędkości obrotowej występują głównie w napędach o zmieniającym się momencie obciążenia jakim są młyny kulowe.

Rozruch asynchroniczny odbywa się poprzez bezpośrednie załączenie silnika do sieci elektroenergetycznej. Rozruch przebiega przy pełnym wzbudzeniu strumieniem magnetycznym generowanym przez magnesy trwałe. Jest to prostsza forma rozruchu. Silniki takie, o mocach znamionowych: 1600 kW, 6 kV, 1500 obr/min. [5] i 400 kW, 630 kW, 1000 kW i 1250 kW, wszystkie 6 kV, 187, 5 obr/min. [6, 7, 8], wykonano, zainstalowano i są uruchamiane poprzez załączenie bezpośrednie do sieci elektroenergetycznej. Moment

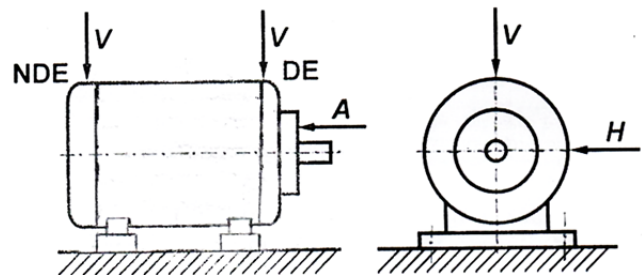
asynchroniczny doprowadza silnik do prędkości podsynchronicznej, a pole magnetyczne magnesów trwałych synchronizuje wirnik z smm twornika i silnik pracuje z synchroniczną prędkością obrotową. Rozruch asynchroniczny umożliwia uzwojenie klatkowe wirnika i jest to najprostszy z możliwych sposobów rozruchu.

Powstają pytania jak rozruch asynchroniczny oddziałuje na konstrukcję silnika i ile takich rozruchów silnik wytrzyma? Pytania te są związane z drganiami generowanymi w czasie rozruchu asynchronicznego.

Drgania

Drgania generuje niewyważenie wirnika i zmienne w czasie pole magnetyczne między stojanem i wirnikiem. Drganiami generowanymi przez niewyważenie wirnika nie będziemy się zajmować. Zmienne pole magnetyczne generuje siły i naprężenia, które ogólnie nazywane są siłami magnetycznymi, są to:

- siły obwodowe działające między polem magnetycznym wirnika i okładem prądowym stojana, są to siły generujące moment elektromagnetyczny silnika,
- siły promieniowe działające między wirnikiem i stojanem, są to siły reluktancyjne,
- siły działające w rdzeniach maszyny, są to siły magnetostrykcyjne.



Rys.1. Miejsca pomiarowe drgań na tarczach łożyskowych i ich oznaczenie

Wszystkie ww. siły działają na wirnik i na stojan, generują naprężenia w elementach konstrukcyjnych silnika i

ujawniają się w widmie drgań. Drgania silnika tradycyjnie mierzone są na tarczach łożyskowych. Oznaczenie kierunków pomiaru V, H, A i oznaczenie tarcz łożyskowych pokazano na rys. 1.

Drgania opisywane są poprzez przemieszczenie $x(t)$, prędkość $v(t)$ i przyspieszenie $a(t)$. W maszynach elektrycznych standardowo drgania są mierzone w zakresie częstotliwości do 1 kHz, PN-EN-ISO 10816 z 2019 r. [9]. W normie preferowany jest pomiar wartości skutecznej prędkości drgań - rms (*Root Mean Square*)

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

gdzie: v , $v(t)$ – wartość skuteczna i przebieg czasowy prędkości drgań, T – okres bądź przedział czasu, w którym oblicza się wartość skuteczną drgań. Prędkość drgań przyjęto podawać w [mm/s].

Oznaczenie międzynarodowe tarcz łożyskowych od strony napędu DE (*Drive End*) i od strony przeciwnej NDE (*Non-drive End*). Pomiary wykonuje się w trzech osiach: horyzontalnej - H (*horizontal*), wertykalnej - V (*vertical*) i poosiowej - A (*axial*). W maszynach elektrycznych o poziomej osi wału: H – jest osią poziomą prostopadłą do osi wału, V – osią pionową prostopadłą do osi wału, a oś A – pokrywa się z osią wału bądź jest równoległa do osi wału.

Mierniki pomiarowe drgań są najczęściej wyposażone w sensory przyspieszenia drgań. Prędkość drgań (przebieg czasowy) jest obliczana i rejestrowana w pamięci miernika, umożliwia to analizę harmoniczną drgań. Obliczana jest także wartość skuteczna prędkości drgań (rms - *Root Mean Square*).

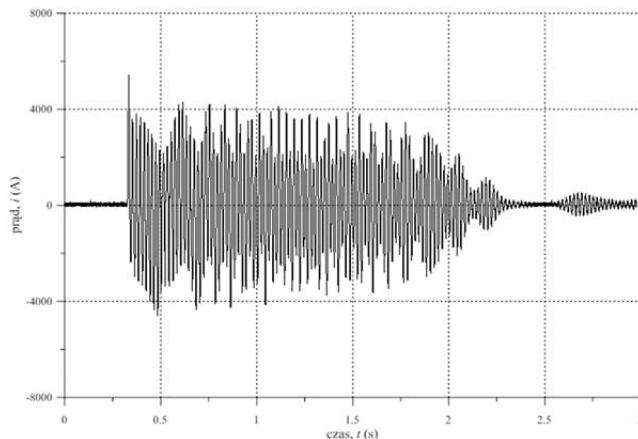
W maszynach elektrycznych na tarczach łożyskowych sumują się siły pochodzące z naprężeń stojana oraz siły z wału silnika przenoszone przez węzły łożyskowe. Siły te generują drgania, które mierzymy. Dopuszczalne poziomy prędkości drgań (rms) podane są w normie [9]. Poziomy graniczne prędkości drgań wynoszą:

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

Maszyny elektryczne wymienione we Wstępie są maszynami wolnoobrotowymi. Dla tych maszyn, według normy [10], dopuszczalna wartość prędkości drgań wynosi 2,8 mm/s.

Identyfikacja drgań w czasie rozruchu silników

Drgania maszyn elektrycznych mierzy się bezpośrednio, najczęściej czujnikami przyspieszenia, a miernik sprzęgnięty z czujnikiem rejestruje sygnał drgań $a(t)$ i przetwarza go na przebieg czasowy wartości skuteczne prędkości drgań $v(t)$. Podjęto próbę zarejestrowania prędkości (rms) drgań silnika: 1250 kW, 6 kV, 187,5 obr/min, zainstalowanego na jednym z młynów w Zakładzie produkcyjnym. Kierownictwo Zakładu pozwoliło na wykonanie jednego rozruchu asynchronicznego silnika. Zainstalowano czujniki drgań na tarczach łożyskowych DE i NDE, jeden w osi V drugi w osi H, do aparatury pomiarowej dołączono także sygnał prądu silnika. Próba zarejestrowania przebiegu rozruchu udała się tylko częściowo. Zarejestrowano tylko przebieg prądu (rys. 2), nie zarejestrowano drgań. Udar drgań w chwili załączenia silnika znacząco przekroczył zakres pomiarowy zainstalowanej aparatury. W konsekwencji układ pomiarowy rejestratora drgań zablokował się. Nie uzyskano zgody na powtórzenie rozruchu.



Rys.2. Przebieg prądu rozruchowego silnika: 1250 kW, 6 kV, 124 A, 187,5 obr/min, 31,85 kNm

Z przebiegu prądu widać, że czas rozruchu wynosi niespełna 2s, co przy napędzie o tak dużym momencie bezwładności należy uznać za czas krótki. Wartość udarowa prądu wynosi $I_u=5500$ A i w stosunku do amplitudy prądu znamionowego wynosi około $30I_{Nm}$. W całym rozruchu przebieg prąd jest nieregularnie zmodulowany, wartość amplitudy prądu zmienia się od wartości 2000 A do 4000 A, czyli od $11I_{Nm}$ do $22I_{Nm}$. Są to wartości bardzo duże. Dla porównania w silnikach indukcyjnych klatkowych, o zbliżonych parametrach, amplituda ustalonego prądu rozruchowego wynosi ($\sim 7I_{Nm}$), a maksymalna wartość prądu udarowego ($\sim 12I_{Nm}$). Prąd udarowy generuje moment udarowy, a składowe harmoniczne prądu momenty zmienne. Momenty te działają zarówno na wirnik jak i na stojan. Naprężenia mechaniczne, które te momenty wytwarzają w jarmie wirnika i jarmie stojana oraz kadłubie, generują drgania promieniowe elementów konstrukcyjnych silnia. Drgania niekorzystnie działające na: łożyska, izolację uzwojenia stojana, magnesy trwałe, konstrukcję wirnika, osadzenie jarmza stojana w kadłubie, tarcze łożyskowe i fundament. Moment udarowy działa także na sprzęgło i przekładnię mechaniczną stanowiąc zagrożenie ich uszkodzenia. Wydaje się, że rozruchy asynchroniczne będą determinować trwałość silników.

W publikacjach [5, 6, 7] dotyczących silników wymienionych we Wstępie nie ma informacji o drganiach w czasie rozruchu asynchronicznego silników. Zatem wielkość tych drgań oszacujemy przyjmując jako bazę odniesienia, że w stanie pracy ustalonej, zgodnie z normą [10], prędkości drgań nie przekracza wartości dopuszczalnej 2,8 mm/s. W rozpatrywanym silniku zakładamy połowę tej wartości $v=1,4$ mm/s. W publikacji [7] są zamieszczone przebiegi: napięcia, prądu, mocy i $\cos\phi$ w czasie rozruchu silnika o parametrach znamionowych: 630 kW, 6 kV, 63 A, 187,5 obr/min, 32,1 kNm, nie ma przebiegu prędkości obrotowej i momentu. Są to przebiegi wartości skutecznych, a nie chwilowych.

Przebieg mocy zawiera składową stałą i składową zmienną. Podwójna amplituda składowej zmiennej mocy zmienia się w przedziale: $P_{r\sim} \approx 500 \div 2000$ kW. Zakładając, że przy prędkości obrotowej $n=100$ obr/min podwójna amplituda składowej zmiennej mocy $P_{r\sim} \approx 2000$ kW, to stosunek składowej zmiennej momentu $T_{r\sim}$ do momentu znamionowego T_N wynosi:

$$(2) \quad \frac{T_{r\sim}}{T_N} = \frac{P_{r\sim} n_N}{n P_N} = \frac{2000 \cdot 187,5}{100 \cdot 630} \approx 6$$

Układ drgający jest sprężysty, zatem drgania są proporcjonalne do sił wzbudzających drgania. Przy

powyższych założeniach prędkość drgań wzbudzanych w czasie rozruch ($0 < t \leq t_r$) przez składową zmienną momentu może osiągać wartość

$$(3) \quad v_{(t=0)} \leq v \frac{T_{r\sim}}{T_N} \approx 1,4 \cdot 6 = 8,4 \text{ mm/s}$$

Do tego dodają się drgania wzbudzone przez siły reluktancyjne działające między wirnikiem i stojanem, ich wielkość trudno jest ocenić. W sumie prędkość drgań w czasie rozruchu kilkakrotnie przekracza wartości podane w normie [10].

Rozważania powyższe nie uwzględniają momentu udarowego po załączeniu silnika. Z przebieg mocy [7] nie można obliczyć składowej udarowej momentu po załączeniu napięcia, gdyż prędkość $n_{(t=0)}=0$. Natomiast przebieg wartości skutecznej prądu rozruchowego [7] nie rejestruje wartości udarowej prądu. Wartość udarowa prądu jest widoczna na rys. 2, jej największa wartość jest wówczas gdy załączenie silnika jest w chwili gdy sinusoida napięcia na jednej z faz przechodzi przez zero. Wartość udarowa prądu może wynosić $I_{ud} \approx 1,8 I_{rm}$. Wartość skuteczna prądu rozruchowego $I_{r(t=0)} \approx 480 \text{ A}$ [7]. Wartość udarowa prądu może wynosić

$$(4) \quad I_{ud} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{r(1=0)} \approx 2,5 \cdot 480 = 1200 \text{ A}$$

Stosunek prądu udarowego do prądu znamionowego

$$(5) \quad \frac{I_{ud}}{I_N} = \frac{1200}{63} \approx 19$$

Jeśli założyć, z dużym przybliżeniem, że moment udarowy T_{ud} jest proporcjonalny do prądu udarowego I_{ud}

$$(6) \quad \frac{I_{ud}}{I_N} \approx \frac{T_{ud}}{T_N}$$

to prędkość drgań $v_{ud}=v_{(t=0)}$ jest proporcjonalna do prądu udarowego

$$(7) \quad v_{ud} \approx 1,4 \cdot v \frac{I_{ud}}{I_N} \approx 1,4 \cdot 19 \approx 26 \text{ mm/s}$$

Obliczenia momentu rozruchowego innego silnika: 1600 kW, 6000 V, 1500 obr/min, 10,2 kNm, zamieszczone w publikacji [6], pokazują, że moment udarowy $T_{ud} \approx 13 T_N$ czyli $T_{ud} \approx 13 T_N$.

Prędkość drgań wzbudzanych tym momentem jest również duża

$$(8) \quad v_{ud} \approx v \frac{T_{ud}}{T_N} \approx 1,4 \cdot 13 \approx 18 \text{ mm/s}$$

Identyfikacja prędkości drgań mierzonych na tarczach łożyskowych, w powyższym wywodzie, z konieczności, jest szacunkowa. Jednak drgania te są duże potwierdza to bardzo głośny rozruch, zablokowanie w czasie pomiarów aparatury prędkość drgań i powyższe przeliczenia prędkości drgań.

Praca silnika w stanie ustalonym

Silniki wymienione we Wstępie, napędzają młyny kulowe. Przebieg prądu silnika w stanie pracy ustalonej jest przedstawiony na rys. 3. Przebieg prądu jest zmodulowany. Częstotliwość modulacji obliczona z rys. 3 mieści się w przedziale (3,1÷3,2) Hz. Można przyjąć, że jest to częstotliwość obrotów silnika

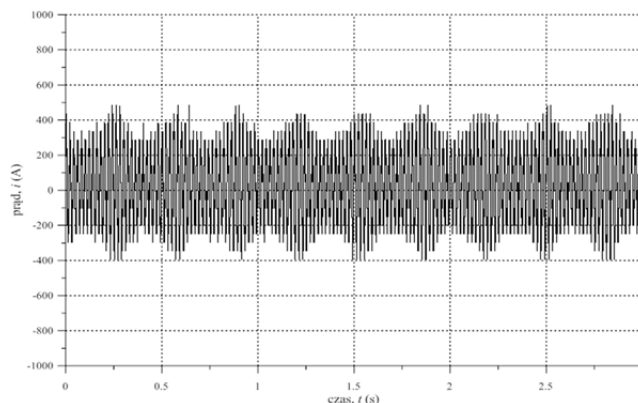
$$(9) \quad f_{mod} = \frac{n_{sil}}{60} = \frac{187,5}{60} = 3,125 \text{ Hz}$$

Modulacje prądu i mocy silnika, już po synchronizacji, widać także na rysunku w publikacji [7]. Świadczy to, że silnik wiruje z prędkością obrotową wahającą się wokół prędkości synchronicznej, to znaczy do prędkości

synchronicznej $n_s=187,5$ obr/min dodaje się składowa zmienna prędkości obrotowej.

$$(10) \quad n(t) = n_s + n_{\sim}$$

Wynika z tego, że moment obciążenia silnika także zawiera składową zmienną, która pochodzi z młyna.



Rys. 3. Przebieg prądu silnika: 1250 kW, 6 kV, 124 A, 187,5 obr/min, 31,85 kNm w czasie pracy ustalonej

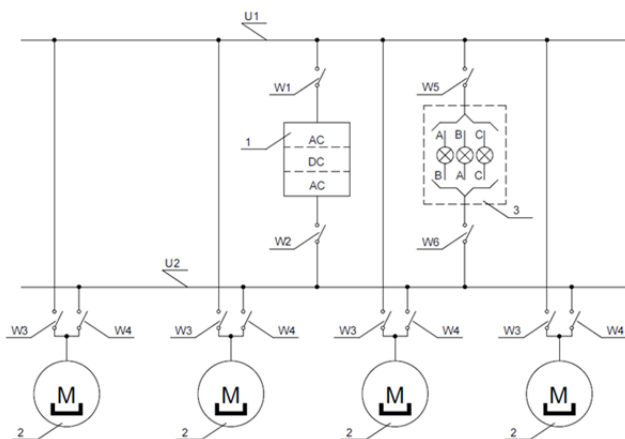
Rozruch częstotliwościowy silników

Silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi zasilane bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej, po rozruchu, pracują poprawnie w stanie ustalonym przy stałej (średniej) prędkości obrotowej (rys. 3). Silniki są aplikowane w układach napędowych nie wymagających regulacji prędkości obrotowej. Rozruch asynchroniczny silników jest najprostszy, lecz generuje stosunkowo duże drgania. Rozruch łagodny można przeprowadzić zasilając silnik napięciem o regulowanej częstotliwości. Budowa takiej przetwornicy częstotliwości bazuje na falowniku AC/DC/AC. Zakres regulacji napięcia $U=(0,03\div 1) U_N$ i częstotliwości $f=(3\div 50) \text{ Hz}$, przy stałym stosunku $E/f \approx U/f \approx U_N/f_N$, E oznacza napięcie rotacji. W napędach młynów rozruch silnika może odbywać się pod obciążeniem, zatem prąd znamionowy przetwornicy powinien być co najmniej równy prądowi znamionowemu silnika. Po załączeniu napięcia o częstotliwości $f=3 \text{ Hz}$ smm twornika wiruje z prędkością 11,25 obr/min. Przy tej prędkości obrotowej moment synchronizujący, wzbudzany przez współdziałanie strumienia magnetycznego magnesów trwałych z smm twornika, powoduje, że wirnik sam synchronizuje się. Dalszy rozruch, przy podwyższaniu częstotliwości do 50 Hz, przebiega synchronicznie. Przy częstotliwości $f=50 \text{ Hz}$ przeprowadza się synchronizację silnika z siecią elektroenergetyczną. Układ synchronizujący jest elementem przetwornicy częstotliwości, bądź może być oddzielny. Jedną przetwornicą może być przeznaczona do uruchamiania kilku silników, jak to pokazano na rys. 4.

Rozruch każdego z silników M przebiega następująco:

- wyłącznikiem W1 załącza się falownik AC/DC/AC do sieci elektroenergetycznej U1,
- wyłącznikiem W2 łączy się falownik 1 z szynami U2 i na falowniku 1 nastawia się minimalną częstotliwość napięcia (np. 3 Hz),
- wyłącznikiem W4 załącza się do szyn U2 wybrany silnik M i falownikiem podwyższa się częstotliwość napięcia do wartości około 50 Hz,
- silnik synchronizuje się z siecią elektroenergetyczną U1 poprzez korektę częstotliwości falownika,
- przy zgodności częstotliwości i faz napięcia, załącza się wyłącznik W3 i wyłącza wyłącznik W4 i to jest koniec rozruchu.

Falownik jest gotowy do rozruchu kolejnego silnika M. Jeśli rozruchu kolejnego silnika nie przeprowadza się to należy wyłączyć falownik z sieci U1 i z szyn U2.



Rys. 4. Schemat ideowy zasilania silników napięciem U1 sieci i napięciem U2 z przetwornicy częstotliwości AC/DC/AC

Przetwornicą częstotliwości może być także zespół elektromaszynowy złożony z dwóch maszyn synchronicznych, przy czym jedna z nich powinna być typu SAS (silnik synchroniczny z rozruchem asynchronicznym). Synchronizacja silnika z magnesami trwałymi z siecią w tym układzie jest trudniejsza, z uwagi na przesunięcie fazowe między napięciem silnika i sieci. Najpierw należy odłączyć silnik od przetwornicy, obroty silnika będą się zmniejszać i przy **pierwszej** zgodności faz należy załączyć silnik do sieci. Czynność ta powinna być wykonana szybko i bez pomyłki, zatem powinien to być synchronizator automatyczny.

Podsumowanie

Rozruchy silników synchronicznych wzbudzanych elektromagnetycznie są asynchroniczne. Silniki w czasie rozruchu nie są wzbudzone. Uzwojenie wzbudzenia jest zwarte i współczesniczy z uzwojeniem kłatkowym w generacji momentu asynchronicznego w czasie rozruchu..

Silniki elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi i z uzwojeniem kłatkowym w wirniku są silnikami synchronicznymi, które w czasie rozruchu asynchronicznego są wzbudzone stałym strumieniem magnetycznym, stwarza to zupełnie inne elektromechaniczne warunki rozruchu. Prądy udarowe i rozruchowe mają duże wartości (rys. 2), a prędkość drgań przekracza wielokrotnie wartości podane w normach. Rozruchy silników mogą determinować trwałość eksploatacyjną silników. Problem rozruchu silników może rozwiązać rozruch częstotliwościowy. Przetwornica napięcia i częstotliwości, może być energoelektroniczna

AC/DC/AC bądź elektromaszynowa. Przetwornica zmienia w sposób płynny napięcie i częstotliwość od wartości U_{\min} i f_{\min} do wartości znamionowych: $U_N=6$ kV i $f_N=50$ Hz. Rozruch silnika, zasilanego z przetwornicy częstotliwości, jest synchroniczny i przebiega łagodnie. Następnie silnik jest przełączany synchronicznie do sieci elektroenergetycznej. W stanie pracy ustalonej silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi zasilane z sieci elektroenergetycznej pracują poprawnie.

Przetwornica częstotliwości może być wykorzystana do rozruchu kilku silników zainstalowanych w jednym Zakładzie.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Górnośląski Instytut Technologiczny, ul. K. Miarki 12-14, 44-100 Gliwice, E-mail: glinka.tadeusz@gmail.com; Marek Leśnik, ZWR KGHM, ul. M. Skłodowskiej - Curie 48 59-301 Lubin.

LITERATURA

- [1] Bernatt J., Glinka T., Polak A., Badanie drgań maszyn elektrycznych, *Wiadomości Elektrotechniczne*, Nr 3/2022, ss. 24-26. ISSN 2449-9560.
- [2] Kwaśnicki S., Hałas magnetyczny silników indukcyjnych trójfazowych kłatkowych, *Wyd. BOBRME Komet*, 1998 r, ss. 158. ISBN 83-910585-1-4.
- [3] Ludziński Ł., Drgania tarcz łożyskowych silników asynchronicznych wymuszane siłami elektromagnetycznymi, *Politechnika Gdańska, Rozprawa doktorska*, 2018 r
- [4] Szymaniec S., Pomiar drgań względnych w silnikach elektrycznych, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 82/2009, ss. 117-122, ISSN 0239-3646.
- [5] Lipiński S., Zawilak J., Analiza pracy stacji głównego odwodnienia kopalni z energooszczędnymi silnikami o magnesach trwałych, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 3/2015, ss 155 -160, ISSN 0239-3646.
- [6] Zawilak T., Zawilak J., Wpływ warunków zasilania na parametry eksploatacyjne silnika z magnesami trwałymi. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr. 4/2015, ss 185-190. ISSN 0239-3646.
- [7] Zawilak T., Zawilak J.: Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie młyna kulowego, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 3/2016, ss 169-173. ISSN 0239-3646.
- [8] Kisielewski P., Pacholski E., Leśnik M., Zawilak T., Zawilak J., Żeleźnik M., Konstrukcja, wykonanie i próby typoszeregu prototypów dużych silników synchronicznych z magnesami trwałymi, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 3/2016, ss 191-195, ISSN 0239-3646.
- [9] Norma PN-EN-ISO 10816 z 2019, Drgania mechaniczne. Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach nieruchomych - Część I: Wytyczne Ogólne.
- [10] Norma PN-EN 60034-14:2004, Maszyny elektryczne wirujące, Drgania mechaniczne określonych maszyn o wzniosach osi wału 56 mm i większych, Pomiar, ocena i wartości graniczne drgań.