OPEN ACCESS

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

Piotr GNACIŃSKI[1], Damian HALLMANN[2]
ORCID: [1]0000-0003-3903-0453, [2]0000-0003-4129-8336
DOI: 10.15199/48.2025.11.1

Rozruch silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne

Start-up of induction motor supplied with voltage containing subharmonics

[1] prof. dr hab. inż. Piotr Gnaciński, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, e-mail: p.gnacinski@we.umg.edu.pl
[2] dr inż. Damian Hallmann, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, e-mail: d.hallmann@we.umg.edu.pl

Adres do korespondencji: d.hallmann@we.umg.edu.pl

Streszczenie: W niektórych systemach elektroenergetycznych w przebiegu napięcia mogą występować subharmoniczne i interharmoniczne – odpowiednio składowe o częstotliwości mniejszej, niż składowa podstawowa lub niebędące jej całkowitą wielokrotnością. Subharmoniczne i interharmoniczne wywierają szczególnie negatywny wpływ na maszyny wirujące. W artykule zawarto analizę wpływu subharmonicznych napięcia na rozruch silnika indukcyjnego. Wyniki dwuwymiarowych obliczeń polowych przedstawiono dla silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 3 kW.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, interharmoniczne, metoda elementów skończonych, subharmoniczne

Abstract: In some power systems there may occur voltage subharmonics and interharmonics – components of frequency less than the fundamental component or not being its integer multiple, respectively. Subharmonics and interharmonics exert particularly harmful impact on the rotating machinery. This paper discusses the effect of voltage subharmonics on the start of an induction motor. Results of 2D finite method computations are presented for a 3-kW cage induction motor.

Keywords: induction motor, interharmonics, finite element method, subharmonics

Wstęp

W systemie elektroenergetycznym powszechnie występują różne zaburzenia jakości napięcia, jak odchylenia napięcia od wartości znamionowej, asymetria napięcia, zapady napięcia, wahania napięcia oraz odkształcenia napięcia od przebiegu sinusoidalnego [1]. Odkształcenia napięcia w praktyce oznaczają, że przebieg napięcia zawiera dodatkowe składowe częstotliwościowe. Zazwyczaj są to harmoniczne, niemniej mogą również występować składowe o częstotliwościach niższych, niż podstawowa harmoniczna (np. 10 Hz) lub wyższych, ale niebędących całkowitą wielokrotnością częstotliwości harmonicznej podstawowej (np. 80 Hz), czyli odpowiednio subharmoniczne i interharmoniczne. Subharmoniczne często uważa się za szczególny przypadek interharmonicznych (subsynchroniczne interharmoniczne), niemniej w niektórych pracach [2–7] traktuje się je jako osobne zaburzenie jakości napięcia ze względu na specyficzne oddziaływanie na odbiorniki energii elektrycznej [1].

Należy nadmienić, że cykliczne wahania napięcia o przebiegu sinusoidalnym wiążą się z obecnością subharmonicznej i interharmonicznej napięcia o jednakowych amplitudach oraz częstotliwościach symetrycznych względem częstotliwości harmonicznej podstawowej (np. 35 Hz i 65 Hz w systemie elektroenergetycznym o częstotliwości znamionowej 50 Hz) [1, 4, 8, 9]. Z tego względu w literaturze przedmiotu określa się je mianem *symetrycznych interharmonicznych* lub *symetrycznym subharmonicznych i interharmonicznych* [4, 8]. W zależności od ich kąta fazowego [8], wahania napięcia mogą przyjąć postać modulacji amplitudy napięcia, modulacji fazy lub może wystąpić przypadek pośredni [1, 4, 8]. Warto dodać, że wahania napięcia występujące w rzeczywistych systemach elektroenergetycznych [10–14] rzadko przyjmują postać sinusoidalnej modulacji napięcia, znacznie częściej spotyka się wahania o przebiegu prostokątnym ze skokową zmianą napięcia [11, 12]. W praktyce, cykliczne wahania napięcia o dowolnym przebiegu funkcji modulującej można traktować jako przypadek

jednoczesnego występowania modulacji sinusoidalnych o różnych częstotliwościach [4, 15].

Subharmoniczne, interharmoniczne oraz powiązane z nimi wahania napięcia zazwyczaj są spowodowane pracą urządzeń energoelektronicznych, odnawialnych źródeł energii oraz odbiorników pobierających zmienną w czasie moc [16–29].

Szczególnie znaczącym źródłem subharmonicznych i interharmonicznych są układy podwójnego przetwarzania (*double conversion systems*) – urządzenia energoelektroniczne łączące dwa systemy o różnych częstotliwościach poprzez obwód pośredniczący prądu stałego, np. falowniki [23]. Ponieważ kondensator lub dławik znajdujący się w obwodzie pośredniczącym ma ograniczoną pojemność (lub indukcyjność), występują w nim pulsacje napięcia (lub prądu) [23, 28]. Ich skutkiem może być obecność subharmonicznych i interharmonicznych zarówno w sieci zasilającej, jak i w napięciu wyjściowym [19, 21, 23, 24, 28]. W [21], w systemie o częstotliwości znamionowej 60 Hz zarejestrowano subharmoniczną o wartości 0,9% i częstotliwości 45 Hz występującą jednocześnie z interharmonicznymi o wartościach 0,89% – 1,17% i częstotliwościach od 135 Hz do 405 Hz. Ich obecność była spowodowana pracą falowników wielkiej mocy zasilających silniki indukcyjne [21]. Innym urządzeniem energoelektronicznym, którego praca powoduje występowanie rozważanych zaburzeń jest cyklokonwerter [23].

Subharmoniczne i interharmoniczne napięcia są również generowane przez odnawialne źródła energii, takie jak elektrownie wiatrowe i instalacje fotowoltaiczne [1, 20, 22, 25, 26, 27]. Przykładowo, w [22] odnotowano liczne subharmoniczne i interharmoniczne w prądzie oddawanym do sieci przez instalację fotowoltaiczną. Najważniejsze składowe miały częstotliwość 12,5 Hz, 26,3 Hz (dominująca składowa subharmoniczna), 40,1 Hz, 48,9 Hz, 53,9 Hz, 57,6 Hz, 60,2 Hz, a ich wartość wynosiła od ok. 5% do ponad 10% składowej podstawowej prądu. Należy również nadmienić, że szczególnie znaczące poziomy subharmonicznych napięcia (1–2%) oraz interharmonicznych (4%) zaobserwowano w stanach awaryjnych elektrowni wiatrowych [26, 27].

Znaczącym źródłem subharmonicznych i interharmonicznych są odbiorniki pracujące ze zmienną w czasie mocą, takie jak piece łukowe [23] oraz silniki asynchroniczne i synchroniczne napędzające urządzenia o zmiennym momencie oporowym, np. kompresory tłokowe [16, 17, 28, 29]. W [29] praca kompresora o mocy 7,5 kW powodowała obecność w napięciu zasilającym niesymetrycznej subharmonicznej o częstotliwości 37.5 Hz i wartości od ok. 0,2% do ok. 0,5% oraz interharmonicznej o częstotliwości 62,5 Hz i wartości od 0,1% do 0,4%.

Niektóre odbiorniki (np. silniki indukcyjne, prostowniki diodowe) zasilane napięciem zawierającym interharmoniczną dodatkowo generują subharmoniczne [9, 18, 23]. Przykładowo, jeśli w napięciu zasilającym występuje interharmoniczna o częstotliwości 120 Hz, w prądzie pobieranym przez prostownik diodowy występuje zarówno interharmoniczna o częstotliwości 120 Hz, jak i subharmoniczna o częstotliwości 20 Hz [23]. Analogiczna sytuacja występuje, gdy napięcie zasilające zawiera subharmoniczną o częstotliwości 20 Hz.

Należy wspomnieć, że niektórzy operatorzy systemów elektroenergetycznych wykorzystują interharmoniczne napięcia jako sygnał telekomunikacyjny [1].

Subharmoniczne, interharmoniczne i powiązane z nimi wahania napięcia zakłócają pracę różnych urządzeń elektrycznych. Powodują między innymi, zjawisko migotania światła [1, 7, 8, 11, 14], nasycenie rdzeni transformatorów energetycznych i pomiarowych [2, 7, 8], wahania momentu obrotowego turbogeneratorów [7, 8], zaburzenia pracy układów zdalnego sterowania [7] oraz urządzeń elektronicznych i energoelektronicznych [7, 18], w tym niewłaściwe załączenie tyrystorów.

Rozważane zaburzenia wywierają również szczególnie niekorzystny wpływ na silniki indukcyjne [3–6, 9, 19, 30–33], powodując między innymi przepływ przez uzwojenia subharmonicznych i interharmonicznych prądu [3–6, 9, 30, 32], wahania momentu obrotowego [3–6, 15, 30, 32], drgania i drgania skrętne [4–6, 15, 24], lokalne nasycenie obwodu magnetycznego [33], wzrost strat mocy i przegrzewanie się uzwojeń [7, 8, 30–32]. Przykładowo, w pracy [3] subharmoniczna o wartości 1% spowodowała wzrost temperatury uzwojeń o 20 K. Należy dodać, że szczególnie znaczący wzrost strat mocy i temperatury uzwojeń oraz szczególnie szkodliwe drgania i drgania skrętne występują w warunkach rezonansu [3–6, 15, 16, 24]. Ich skutkiem może być nawet uszkodzenie układu napędowego [24].

Obecne przepisy i normy dotyczące jakości napięcia [34, 35] nie zawierają dopuszczalnych poziomów subharmonicznych i interharmonicznych, co jest spowodowane brakiem wystarczających danych. Przykładowo, od wielu lat w kolejnych wersjach normy *PN-EN 50160 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych* [34] znajduje się zapis, że odpowiednie „poziomy są rozważane". Z kolei norma *IEEE-519 Standard for harmonic control in electric power systems* [35] zawiera uzasadnienie wprowadzenia dopuszczalnych poziomów rozwa-

żanych zaburzeń oraz dwie propozycje odpowiednich krzywych granicznych. Pierwsza z nich generalnie ogranicza podgrupy subharmonicznych i interharmonicznych [8] do poziomu 0.3%, za wyjątkiem zakresu częstotliwości 50 Hz – 70 Hz. Według [35], dla danego zakresu dopuszczalny poziom subharmonicznych/interharmonicznych powinien być określony na podstawie wskazań miernika migotania światła, co uzasadniono trudnościami związanymi z pomiarem składowych o bardzo małych amplitudach [35]. Z kolei druga proponowana krzywa ogranicza subharmoniczne i interharmoniczne napięcia do poziomu 0,5%, za wyjątkiem częstotliwości znajdujących się w pobliżu składowej podstawowej oraz 3. i 5. harmonicznej.

Modyfikacja odnośnych norm i przepisów oraz wprowadzenie do nich dopuszczalnych poziomów subharmonicznych i interharmonicznych napięcia wymaga dalszych prac badawczych, dotyczących między innymi wpływu rozważanych zaburzeń na silnik indukcyjny.

Silnik indukcyjny zasilany napięciem zawierającym subharmoniczne i interharmoniczne jest tematem licznych prac badawczych [3–9, 15, 19, 30–33], dotyczących między innymi prądów [3–6, 9, 19, 30, 32], strat mocy i temperatury uzwojeń [7, 8, 30–32], momentu obrotowego [4–6, 15, 24, 31], wahań prędkości obrotowej [9, 30, 32], drgań i drgań skrętnych [4–6, 15, 24]. Należy podkreślić, że powyższe prace dotyczą stanu ustalonego silnika – biegu jałowego lub pracy silnikowej z prędkością zbliżoną do synchronicznej. Wyjątkiem jest [30], w której przedstawiono analizę charakterystyk mechanicznych silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne. W badaniach wykorzystano schemat zastępczy typu transformatorowego. Wyniki obliczeń wskazują, że subharmoniczne napięcia mogą powodować moment hamujący o znaczących wartościach dla silnika pracującego z dużym poślizgiem (np. rozruch). W związku z powyższym rekomendowano ograniczenie poziomów subharmonicznych do 0.1%.

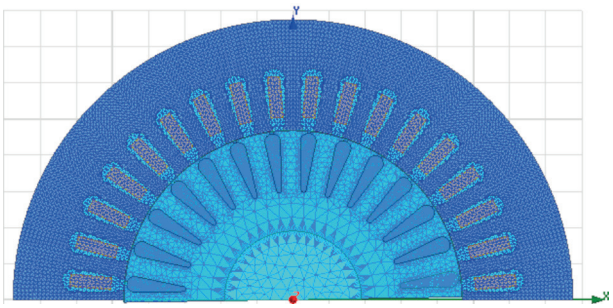
Głównym celem niniejszego artykułu jest ocena wpływu subharmonicznych napięcia na rozruch silnika indukcyjnego. Badania wykonano za pomocą metody elementów skończonych dla silnika indukcyjnego klatkowego małej mocy.

Model polowy

Obiektem badań był silnik indukcyjny klatkowy typu TSg100L-4B, o znamionowej mocy 3 kW, napięciu znamionowym 380 V, prądzie znamionowym 6,9 A i prędkości znamionowej 1415 obr./min, z uzwojeniami połączonymi w trójkąt.

Dwuwymiarowy model polowy silnika zaimplementowano w środowisku ANSYS-MAXWELL. W pierwszej kolejności wprowadzono otrzymane od producenta dane konstrukcyjne silnika oraz charakterystykę magnesowania blach do modułu RMxprt. Niektóre parametry (np. związane ze stratami mechanicznymi) wyznaczono na podstawie wyników pomiarów. Następnie za pomocą modułu RMxprt utworzono wstępny model silnika, który skorygowano na podstawie danych eksperymentalnych oraz analizy zbieżności. Między innymi zagęszczono siatkę podziału, zwiększając liczbę elementów z 5 000 do 22 000. Zastosowaną siatkę podziału typu tau przedstawiono na rysunku 1.

W obliczeniach polowych wykorzystano moduł typu *transient* o nazwie Maxwell2D, który umożliwia rozwiązanie stanu przejściowego. Dzięki temu dla każdego kolejnego kroku obliczenia są wykonywane dla parametrów punktu pracy (np. położenia kątowego wirnika) wyznaczonego na podstawie poprzedniego kroku. Temperaturę uzwojeń obliczono za pomocą modelu cieplnego silnika [3], pośrednio sprzężonego z polowym modelem elektromagnetycznym.



Rys. 1. Wykorzystana siatka podziału

W celu walidacji modelu porównano wyniki obliczeń polowych oraz pomiarów dla napięcia zasilania o rożnych wartościach oraz przypadków różnych zaburzeń – subharmonicznych, interharmonicznych oraz asymetrii napięcia. Porównanie wyników pomiarów i obliczeń zamieszczono we wcześniejszych pracach autorów, np. [3].

Więcej informacji na temat wykorzystanego modelu polowego zawarto w [3].

Wyniki badań

Poniżej zamieszczono wyniki badań symulacyjnych dotyczących wpływu subharmonicznych napięcia na rozruch silnika indukcyjnego.

Eksperymenty numeryczne przeprowadzono dla napięcia zasilania zawierającego pojedynczą subharmoniczną o wartości U_{sh}=1% (tj. o wartości zbliżonej do subharmonicznych spotykanych w rzeczywistych

systemach elektroenergetycznych [21, 26]), częstotliwości f_{sh} = 5 Hz oraz f_{sh} = 20 Hz (odpowiadającej częstotliwości rezonansowej drgań skrętnych ciała sztywnego [3–6, 16] badanego silnika), oraz względnych momentów bezwładności napędzanego urządzenia (odniesionych do momentu bezwładności silnika): j=0 (urządzenie o pomijalnym momencie bezwładności) i j=15. Uwzględniono przypadek, dla którego moment oporowy napędzanego urządzenia (T_L) jest pomijalny oraz przypadek, dla którego moment oporowy równy momentowi znamionowemu silnika (T_{rat}). Ponadto wykonano testy referencyjne dla napięcia zasilania niezawierającego subharmonicznej. Zestawienie analizowanych przypadków zamieszczono w tabelach 1–4, a wybranych przebiegów momentu obrotowego i prędkości obrotowej na rysunkach 2–12.

W celu porównania rozruchu silnika dla testu referencyjnego oraz dla napięcia dla zawierającego subharmoniczną, w tabelach 1–4 dodatkowo zamieszczono czas, po którym silnik osiąga 95% prędkości stanu ustalonego (t_{95}). Należy podkreślić, że czas potrzebny do zakończenia procesów przejściowych (rozruchu) często jest wielokrotnie dłuższy od t_{95}.

Tab. 1. Analizowane przypadki dla j=0 i T_L=0

Lp.	f_{sh} [Hz]	U_{sh} [%]	t_{95} [ms]	Uwagi
1.1	-	-	20,8	test referencyjny
1.2	5	1	21,0	-
1.3	20	1	21,0	-

Tab. 2. Analizowane przypadki dla j=0 i T_L= T_{rat}

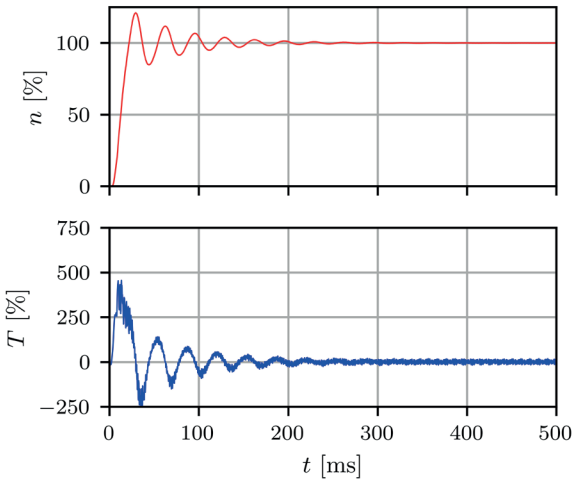
Lp.	f_{sh} [Hz]	U_{sh} [%]	t_{95} [ms]	Uwagi
2.1	-	-	26,2	test referencyjny
2.2	5	1	26,4	-
2.3	20	1	26,4	-

Tab. 3. Analizowane przypadki dla j=15 i T_L=0

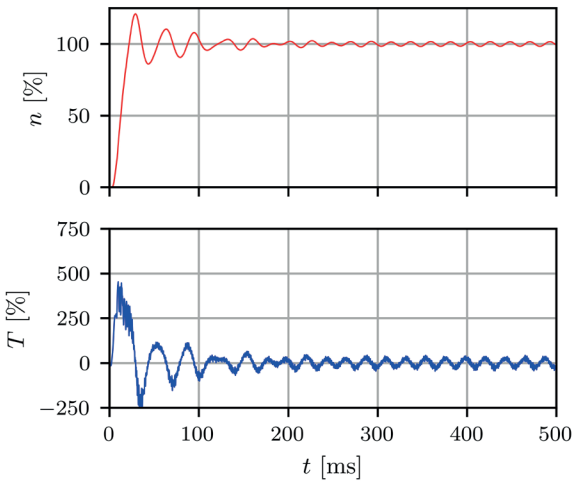
Lp.	f_{sh} [Hz]	U_{sh} [%]	t_{95} [ms]	Uwagi
3.1	-	-	328,4	test referencyjny
3.2	5	1	330,4	-
3.3	20	1	328,4	-

Tab. 4. Analizowane przypadki dla j=15 i T_L= T_{rat}

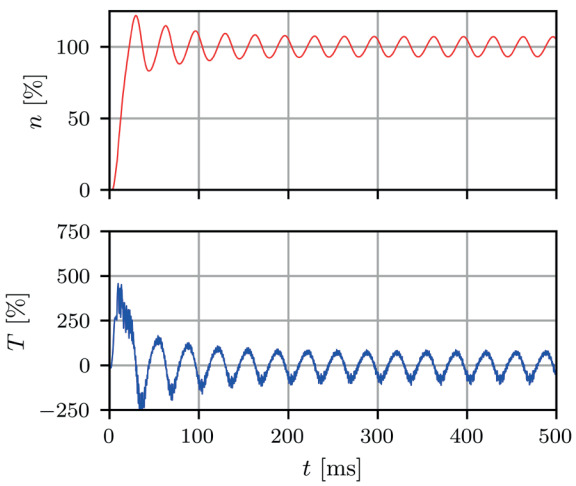
Lp.	f_{sh} [Hz]	U_{sh} [%]	t_{95} [ms]	Uwagi
4.1	-	-	459,4	test referencyjny
4.2	5	1	463,2	-
4.3	20	1	460,6	-



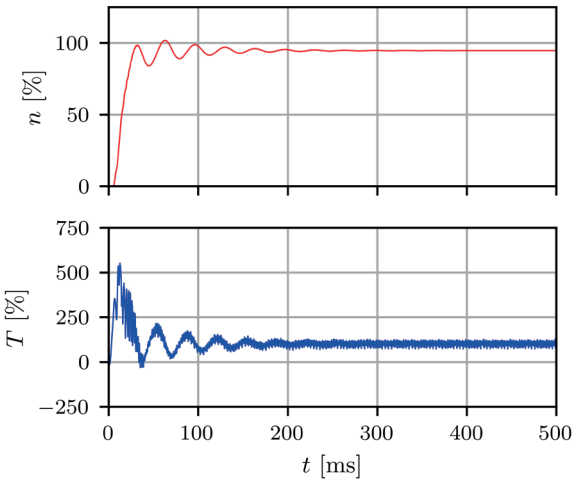
Rys. 2. Przebiegi prędkości obrotowej (w procentach prędkości synchronicznej) i momentu obrotowego (w procentach momentu znamionowego) dla przypadku 1.1 (test referencyjny, j = 0, T_L = 0)



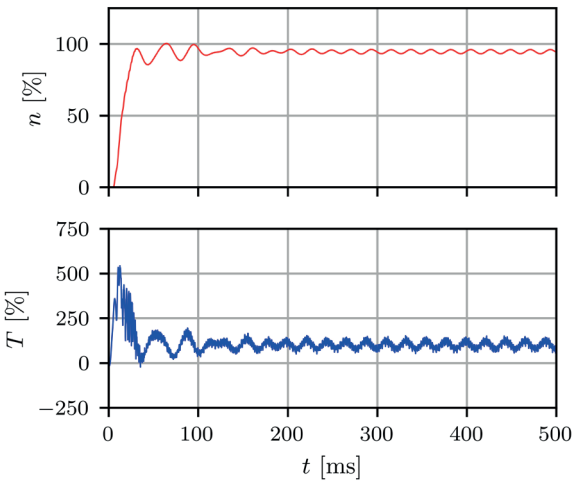
Rys. 3. Przebiegi prędkości obrotowej (w procentach prędkości synchronicznej) i momentu obrotowego (w procentach momentu znamionowego) dla przypadku 1.2 (f_{sh} = 5 Hz, j = 0, T_L = 0)



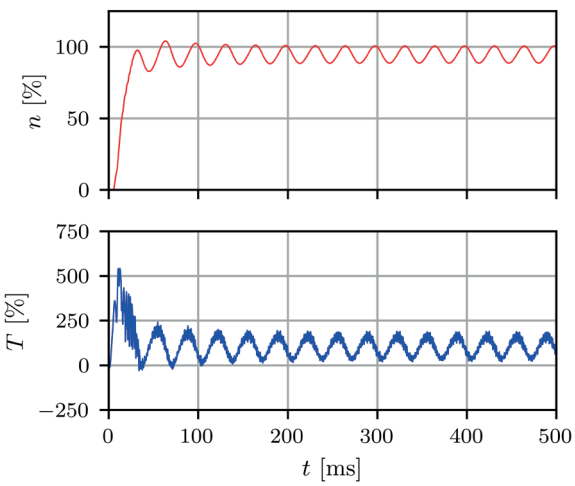
Rys. 4. Przebiegi prędkości obrotowej (w procentach prędkości synchronicznej) i momentu obrotowego (w procentach momentu znamionowego) dla przypadku 1.3 (f_{sh} = 20 Hz, j = 0, T_L = 0)



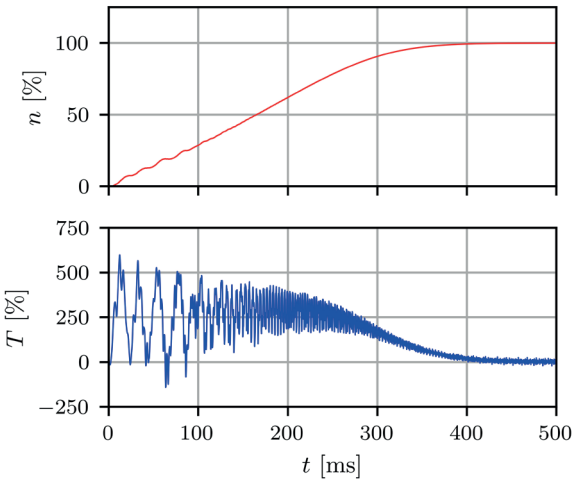
Rys. 5. Przebiegi prędkości obrotowej (w procentach prędkości synchronicznej) i momentu obrotowego (w procentach momentu znamionowego) dla przypadku 2.1 (test referencyjny, j = 0, T_L = T_{rat})



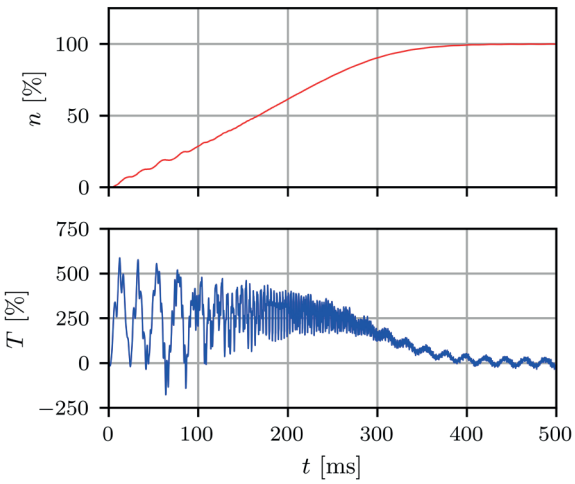
Rys. 6. Przebiegi prędkości obrotowej (w procentach prędkości synchronicznej) i momentu obrotowego (w procentach momentu znamionowego) dla przypadku 2.2 (f_{sh} = 5 Hz, j = 0, T_L = T_{rat})



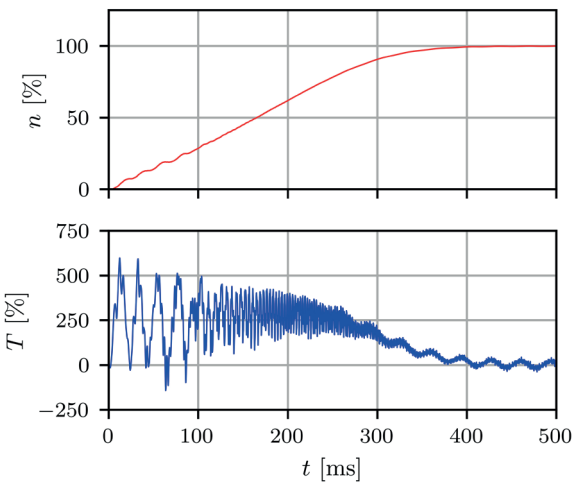
Rys. 7. Przebiegi prędkości obrotowej (w procentach prędkości synchronicznej) i momentu obrotowego (w procentach momentu znamionowego) dla przypadku 2.3 (f_{sh} = 20 Hz, j = 0, T_L = T_{rat})



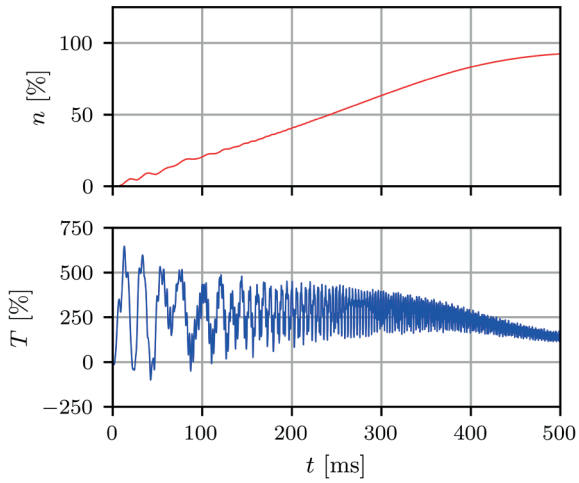
Rys. 8. Przebiegi prędkości obrotowej (w procentach prędkości synchronicznej) i momentu obrotowego (w procentach momentu znamionowego) dla przypadku 3.1 (test referencyjny, j = 15, T_L = 0)



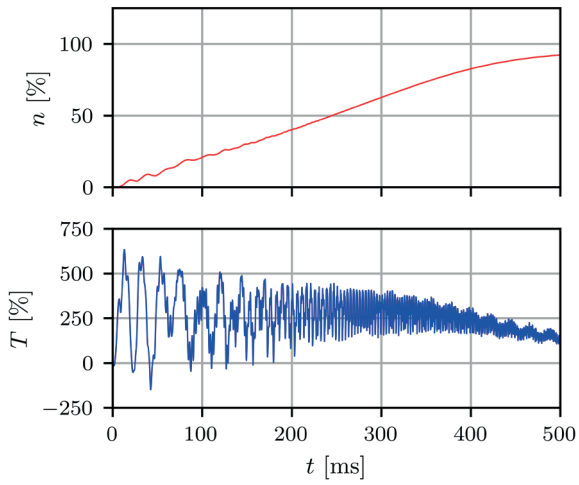
Rys. 9. Przebiegi prędkości obrotowej (w procentach prędkości synchronicznej) i momentu obrotowego (w procentach momentu znamionowego) dla przypadku 3.2 (f_{sh} = 5 Hz, j = 15, T_L = 0)



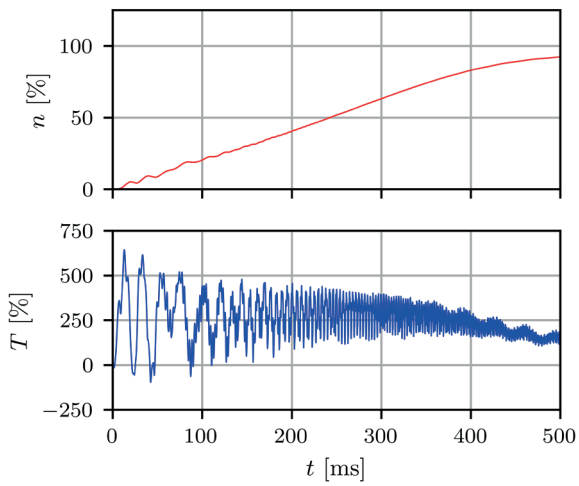
Rys. 10. Przebiegi prędkości obrotowej (w procentach prędkości synchronicznej) i momentu obrotowego (w procentach momentu znamionowego) dla przypadku 3.3 (f_{sh} = 20 Hz, j = 15, T_L = 0)



Rys. 11. Przebiegi prędkości obrotowej (w procentach prędkości synchronicznej) i momentu obrotowego (w procentach momentu znamionowego) dla przypadku 4.1 (test referencyjny, j = 15, $T_L = T_{rat}$)



Rys. 12. Przebiegi prędkości obrotowej (w procentach prędkości synchronicznej) i momentu obrotowego (w procentach momentu znamionowego) dla przypadku 4.2 (f_{sh} = 5 Hz, j = 15, $T_L = T_{rat}$)



Rys. 13. Przebiegi prędkości obrotowej (w procentach prędkości synchronicznej) i momentu obrotowego (w procentach momentu znamionowego) dla przypadku 4.3 (f_{sh} = 20 Hz, j = 15, $T_L = T_{rat}$)

Dla wszystkich rozważanych przypadków (tab. 1–4), subharmoniczne napięcia powodują wydłużenie czasu t_{95} ok. 0,5 – 1%. Na rysunkach 2–13 subharmoniczne powodują wahania prędkości obrotowej i pulsacje momentu obrotowego w stanie ustalonym, natomiast wpływ rozważanych zaburzeń na przebiegi prędkości obrotowej i momentu obrotowego w trakcie rozruchu można uznać za pomijalny. Należy podkreślić, że rozważane zaburzenia nie powodują zauważalnego wzrostu szczytowej wartości momentu obrotowego, co jest istotne ze względu na obciążenia mechaniczne układu napędowego (np. sprzęgła, wału).

Analizę pulsacji momentu obrotowego i prędkości obrotowej w stanie ustalonym przedstawiono we wcześniejszych pracach autorów (np. [4,5]).

Podsumowując, subharmoniczne o wartościach obserwowanych w rzeczywistych systemach elektroenergetycznych mają pomijalny wpływ na rozruch badanego silnika.

Wnioski

Subharmoniczne napięcia powodują powstanie dwóch składowych momentu obrotowego – składowej tętniącej [4, 5] oraz składowej stałej, która generalnie zwiększa moment oporowy. Dotychczasowy stan wiedzy wskazywał, że składowa stała może osiągać znaczne wartości w przypadku pracy silnika z dużym poślizgiem (np. rozruch) [31] i w związku z tym w [31] rekomendowano ograniczenie poziomów subharmonicznych napięcia do 0.1%.

W niniejszym artykule dokonano oceny wpływu subharmonicznych napięcia na rozruch silnika indukcyjnego. W badaniach wykorzystano dwuwymiarową metodę elementów skończonych. Wyniki eksperymentów numerycznych dowodzą, że subharmoniczne napięcia o wartościach obserwowanych w rzeczywistych systemach elektroenergetycznych [21, 26] mają pomijalny wpływ na rozruch badanego silnika małej mocy. Ocena wpływu subharmonicznych napięcia na rozruch silników dużej mocy będzie tematem dalszych prac badawczych.

Przyjęto: 07.10.2025, **zaakceptowano:** 24.10.2025, **opublikowano:** 24.11.2025

LITERATURA

[1] Bollen M.H.J., Gu I.Y.H., Signal processing of power quality disturbances, in Wiley, New York, USA (2006), 41–162.
[2] Crotti G., D'Avanzo G., Letizia S., Luiso M., Measuring harmonics with inductive voltage transformers in presence of subharmonics, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 70 (2021), 1–13.
[3] Gnaciński P., Hallmann D., Pepliński M., Jankowski P., The effects of voltage subharmonics on cage induction machine, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 111 (2019), 125–131.
[4] Gnaciński P., Pepliński M., Muc A., Hallmann D., Klimczak P., Induction motors under voltage fluctuations and power quality Standards, IEEE Transactions on Energy Conversion, 39 (2024), No. 2, 1255–1264.
[5] Gnaciński P, Pepliński M, Muc A, Hallmann D., Induction Motors Under Voltage Unbalance Combined with Voltage Subharmonics, Energies, 17 (2024), No. 24.
[6] Gnaciński P., Pepliński M., Murawski L., Szeleziński A., Vibration of induction machine supplied with voltage containing subharmonics and interharmonics, IEEE Trans. Energy Convers., 34 (2019), 1928–1937.
[7] Testa A., Langella R., Power system subharmonics, In IEEE Power Engineering Society General Meeting (2005), 2237–2242.
[8] Gallo D., Landi C., Langella R., Testa A., Limits for low frequency interharmonic voltages: can they be based on the flickermeter use, in IEEE Russia Power Tech, St. Petersburg, Russia, (2005), 1–7.
[9] Tennakoon S., Perera S., Robinson D., Flicker attenuation–Part I: Response of three-phase induction motors to regular voltage fluctuations, IEEE Trans. Power Deliv., 23 (2008), 1207–1214.
[10] Kuwałek P., Decomposition by Approximation With Pulse Waves Allowing Further Research on Sources of Voltage Fluctuations, IEEE Trans. Ind. Electron, 71 (2024), 5263–5273.
[11] Kuwalek P., Estimation of parameters associated with individual sources of voltage fluctuations, IEEE Transactions on Power Delivery, 36 (2021), No. 1, 351–361.
[12] Kuwałek P., IEC Flickermeter Measurement Results for Distorted Modulating Signal while Supplied with Distorted Voltage, 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP), Naples, Italy (2022).
[13] Kuwałek P., Practical Verification of Diagnostic Capabilities of Methods for the Recreation of Voltage Fluctuations, Electronics, 13 (2024), No. 16.
[14] Michalski M., Wiczyński G., Flicker dependency on voltage fluctuation at frequencies greater than power frequency, in 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP), Naples, Italy (2022), 1–5.
[15] Ghaseminezhad M., Doroudi A., Hosseinian S.H., Jalilian A., High torque and excessive vibration on the induction motors under special voltage fluctuation conditions, COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 40 (2021), No. 4, 822–836.
[16] Arkkio A., Cederströ, S., Awan H.A.A., Saarakkala S.E., Holopainen T.P., Additional losses of electrical machines under torsional vibration, IEEE Trans. Energy Convers., 33 (2018), 245–251.
[17] Avdeev B.A., Vyngra A.V., Chernyi S.G., Zhilenkov A.A., Sokolov S.S., Evaluation and procedure for estimation of interharmonics on the example of non-sinusoidal current of an induction motor with variable periodic load, IEEE Access, 9 (2021), 158412–158419.
[18] Drapela J., Langella R., Testa A., Vendemia V., 'A new analytical model of single-phase diode bridge rectifiers in the presence of interharmonics in supply voltage, IEEE Open Access J. Power Energy, 10 (2023), 385–394.
[19] Gudiño-Ochoa A., Jalomo-Cuevas J., Molinar-Solís J.E., Ochoa-Ornelas R., Analysis of Interharmonics Generation in Induction Motors Driven by Variable Frequency Drives and AC Choppers, Energies, 16 (2023), No. 14.
[20] Mao M., Xu Z., Yuan Q., Li H., Current interharmonic prediction control based on MPC and Lyapunov for grid-connected PV system, IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., 12 (2024), No. 3, 2686–2696.
[21] Nassif A.B., Assessing the impact of harmonics and interharmonics of top and mudpump variable frequency drives in drilling rigs, IEEE Transactions on Industry Applications, 55 (2019), No. 6, 5574–5583.
[22] Ravindran V., Busatto T., Rönnberg S.K., Meyer J., Bollen M.H.J., Time-varying interharmonics in different types of grid-tied PV inverter systems, IEEE Transactions on Power Delivery, 35 (2020), No. 2, 483–496.
[23] Testa A., Akram M.F., Burch R., Carpinelli G., Chang G., Dinavahi V., Xu W., Interharmonics: Theory and modeling, IEEE Transactions on Power Delivery, 22 (2007), No. 4, 2335–2348.
[24] Tripp H., Kim D., Whitney R., A comprehensive cause analysis of a coupling failure induced by torsional oscillations in a variable speed motor, in Proc. of the 22nd Turbomachinery Symposium, Texas A&M University, Turbomachinery Laboratories, USA (1993), 17–24.
[25] Verma N., Kumar N., Gupta S., Malik H., Márquez F.P.G., Review of sub-synchronous interaction in wind integrated power systems: Classification, challenges, and mitigation techniques, Protection Control Modern Power Syst., 8 (2023), No. 2, 1–26.
[26] Xie X., Zhang X., Liu H., Liu H., Li Y., Zhang C., Characteristic analysis of subsynchronous resonance in practical wind farms connected to series-compensated transmissions, IEEE Trans. Energy Convers, 32 (2017), 1117–1126.
[27] Xu W., Yong J., Marquez H.J., Li C., Interharmonic Power – A New Concept for Power System Oscillation Source Location, in IEEE Transactions on Power Systems, 40 (2025), 4367–4379.
[28] Zhang D., Xu W., Liu Y., On the phase sequence characteristics of interharmonics, IEEE transactions on power delivery, 20 (2005), No. 4, 2563–2569.
[29] Zhiyuan M., Xiong M.W., Le L., Zhong X., Interharmonics analysis of a 7.5 kW air compressor motor, CIRED-Open Access Proc. J., 2017 (2017), No. 1, 738–741.
[30] Farah M.J., Abdollahi R.,An analytical investigation of induction motor behavior in the case of flicker occurrence using finite element method, Univ. Politeh. Buchar. Sci. Bull. Ser. C Electr. Eng. Comput. Sci, 81 (2019), 181–192.
[31] Fuchs E.F., Roesler D.J., Masoum M.A., Are harmonic recommendations according to IEEE and IEC too restrictive?, IEEE Transactions on Power Delivery, 19 (2004), No. 4, 1775–1786.
[32] Ghaseminezhad M., Doroudi A., Hosseinian S.H., Jalilian A., Analysis of voltage fluctuation impact on induction motors by an innovative equivalent circuit considering the speed changes, IET Gener., Transmiss. Distrib., 11 (2017), No. 2, 512–519.
[33] Ghaseminezhad M., et al., An investigation of induction motor saturation under voltage fluctuation conditions, Journal of Magnetics, 22 (2017), 306–314.
[34] Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution network, PN-EN Standard 50160, 2023.
[35] IEEE Standard for harmonic control in electric power systems, IEEE Standard 519, 2022.