

Badania symulacyjne wpływu wybranych zakłóceń napięcia zasilania na prądy silnika indukcyjnego małej mocy

Streszczenie. Stały wzrost mocy odbiorników nieliniowych w tym przekształtników powoduje pojawienie się w sieci zasilającej, zwłaszcza typu miękkiego (np. okrętowy system elektroenergetyczny), zaburzeń charakteryzujących się pojawieniem subharmonicznych i interharmonicznych. Artykuł prezentuje wyniki badań symulacyjnych wskazujących stopień wpływu zawartości tych zaburzeń w napięciu zasilania silnika indukcyjnego na prądy silnika. Wpływ powyższych zaburzeń badano dodatkowo z użyciem wskaźników zachowań chaotycznych. Do badań wykorzystano autorski model silnika indukcyjnego zrealizowany w środowisku ANSYS Electronics Desktop.

Projekt finansowany w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019 - 2022 nr projektu 006/RID/2018/19 kwota finansowania 11 870 000 zł.

Abstract. The continuous increase in the power of non-linear receivers, including converters, causes the appearance in the supply network, especially of the soft type (e.g. the marine power system), disturbances characterized by the appearance of subharmonics and interharmonics. This article presents the results of simulation studies showing the degree of influence of the content of these disturbances in the supply voltage of an induction motor on its currents. The impact of the above mentioned disorders was additionally investigated with the use of indicators of chaotic behaviour. The original model of the induction motor, realized in the ANSYS Electronics Desktop environment, was used for the tests. **(Simulation studies of the effect of selected supply voltage disturbances on the currents of a low-power induction motor)**

Słowa kluczowe: subharmoniczne, interharmoniczne, silnik indukcyjny, chaos
Keywords: subharmonics, interharmonics, induction motor, chaos

Wprowadzenie

Charakterystyczną cechą systemów elektroenergetycznych są zakłócenia przebiegu napięcia, które najczęściej spowodowane są pracą urządzeń energoelektronicznych. Zwykle jest to związane z obecnością harmonicznych napięcia, ale w niektórych układach [1, 2, 3] występują również składowe napięcia o częstotliwościach niższych od częstotliwości podstawowej, zwane subharmonicznymi (interharmoniczne podesynchroniczne - składowe o częstotliwościach mniejszych od harmonicznej podstawowej) oraz interharmoniczne, których częstotliwości nie są równe wielokrotności harmonicznej podstawowej. Głównymi przyczynami występowania subharmonicznych i interharmonicznych napięcia (na szynach głównych) jest praca odbiorników nieliniowych, a także produkcja energii elektrycznej przez prądnice wałowe na statku (jest podłączona do obracającej się śruby napędu głównego) oraz odnawialne źródła energii [1]. Należy podkreślić, że problem odkształcenia przebiegu jest bardziej widoczny w przypadku tzw. sieci miękkich, do których należy system okrętowy.

W pracach [2, 4, 5, 6, 7, 9] pokazano, że nawet niewielka zawartość interharmonicznych i subharmonicznych wpływa na skrócenie żywotności silników indukcyjnych. Biorąc pod uwagę silnik, który jest urządzeniem nieliniowym i dodatkowo zasilanym napięciem odkształconym, możliwa jest odpowiedź chaotyczna lub bliska chaotycznej (prądy stojana). Powoduje to dodatkowe drgania lub wzrost strat mocy i temperatury uzwojeń [9, 10].

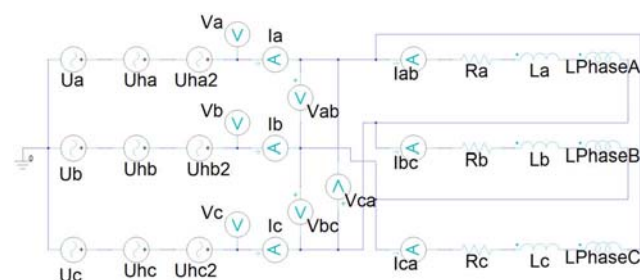
W klasycznej literaturze [11, 12, 13] związanej z teorią chaosu można znaleźć wiele różnych wskaźników zachowania chaotycznego takich jak: przebieg chwilowy sygnału; trajektoria fazowa sygnału; funkcja autokorelacji; widmo mocy; odwzorowanie Poincarego; wykładniki Lyapunova. Powyższe wskaźniki można podzielić na jakościowe i ilościowe. Większość proponowanych wskaźników ilościowych wymaga dodatkowych parametrów takich jak wymiar przestrzeni fazowej, wymiar zanurzenia czy czas opóźnienia. Należy podkreślić, iż według wielu autorów [11, 12, 13] nie istnieje jednoznaczna uniwersalna metoda dla każdego zbioru danych wyznaczająca te parametry.

Dlatego podjęto próbę zbadania wpływu takiego odkształconego napięcia na dwa wybrane wskaźniki zachowa-

nia chaotycznego, tj. trajektorie fazowe i mapy Poincarego. Oprócz tego zaprezentowano określenie nowego ilościowego wskaźnika opartego na odchyleniu standardowym, który może wskazywać stopień nieregularnego odkształcenia sygnału. Do badań wykorzystano model połowo-obwodowy silnika indukcyjnego klatkowego zaimplementowanego w środowisku ANSYS Electronics Desktop. Procentowy udział tych interharmonicznych i subharmonicznych w stosunku do podstawowej harmonicznej przyjęto w przedziale 1-2%. Zakres ten odzwierciedla obserwacje analizy harmonicznej przedstawione w pracach [2, 3].

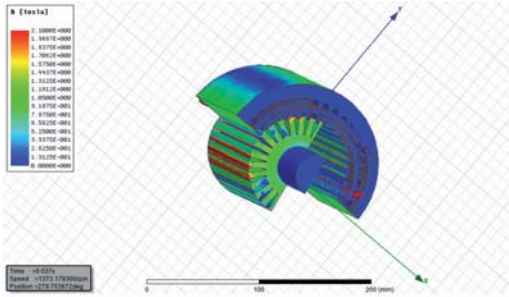
Metodyka badań i skrócony opis modelu

Zastosowany do badań model silnika był zweryfikowany numerycznie i eksperymentalnie w pracach autorów [8, 9, 10, 14]. Model silnika indukcyjnego klatkowego zrealizowano na podstawie obiektu rzeczywistego, którego moc znamionowa wynosi 3 kW, napięcie znamionowe 380 V, prąd znamionowy 6,9 A, a obciążenie znamionowe 20,25 Nm. Omawiany model ma charakter połowo-obwodowy i opiera się na rozwiązaniu układu równań pola elektromagnetycznego oraz równania ruchu. Jednocześnie część połową sprzężono z częścią obwodu elektrycznego, która stanowi zasilanie trójfazowe (rys. 1) zaś rysunek 2 przedstawia przykładowy rozkład gęstości strumienia w modelu 3D silnika. Autorzy posiadają modele 2D i 3D silnika indukcyjnego. Jednak ze względu na konieczność długiego czasu symulacji potrzebnego do wyznaczenia mapy Poincarego, w pracy wykorzystano model 2D. Na rysunku 3 przedstawiono siatkę podziału zastosowanego modelu, która liczy około 22 tysięcy elementów.

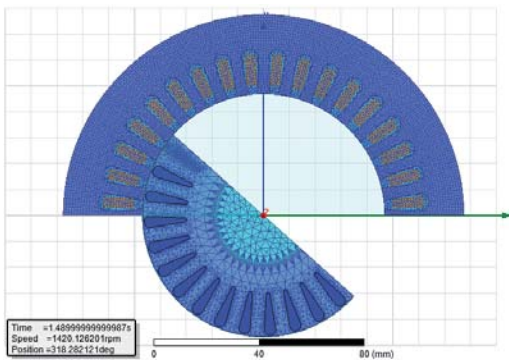


Rys. 1. Obwód zasilania stojana silnika

Przeprowadzone badania symulacyjne zakładały istnienie dodatkowej składowej subharmonicznej U_{ha} , interharmonicznej U_{ha2} lub obu razem w napięciu zasilania. Procentowy udział tych interharmonicznych i subharmonicznych w stosunku do podstawowej harmonicznej przyjęto w przedziale 1-2%.



Rys. 2. Przykładowy rozkład gęstości strumienia w modelu 3D silnika



Rys. 3. Siatka podziału dla modelu 2D

W celach badawczych zbadano wybrane podstawowe wskaźniki jakości sygnałów, jakie są ujęte w normie IEC 61000-4-7 [16]. W pierwszym wzorze wyznaczono wartości skuteczne (1) na podstawie zarejestrowanego (symulowanego) przebiegu.

$$(1) \quad I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i_k^2},$$

gdzie: i_k to wartość chwilowa k -tej próbki prądu zasilania stojana, N to liczba próbek wziętych do analiz.

Wartość N obliczano na podstawie szerokości okna (2), które obejmuje 10 okresów (dla częstotliwości 50 Hz oznacza to czas 200 ms) i może się zmieniać w zależności od tego, jaka występuje częstotliwość w sieci zasilającej na statku. Częstotliwość ta może się zmieniać w zakresie od 47,5 Hz do 52,5 Hz [17].

$$(2) \quad N = T_w f_s,$$

gdzie: T_w – szerokość okna pomiarowego / obliczeniowego, a f_s częstotliwość próbkowania.

W dalszej części artykułu na wykresach przedstawiono względne maksymalne wartości prądów wyznaczone na podstawie (3).

$$(3) \quad I_{RMS} [\%] = \frac{I_{RMS}}{I_N} \cdot 100\%,$$

gdzie: I_N wartość skuteczna prądu otrzymana dla warunków znamionowych silnika.

Kolejnymi wskaźnikami, które wykorzystano w pracy to współczynnik $THDS$ (*Total Harmonic Distortion Subgroups*) obliczany według (4), gdzie posłużono się podgrupami harmonicznych.

$$(4) \quad THDS = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left(\frac{G_{sg,h}}{G_{sg,1}} \right)^2} \cdot 100\%,$$

gdzie: $G_{sg,h}$ to wartość skuteczna podgrupy harmonicznych h -tego rzędu, a $G_{sg,1}$ wartość skuteczna podgrupy pierwszej harmonicznej.

Podgrupy harmonicznych obliczano na podstawie widma otrzymanego z prążków (5).

$$(5) \quad G_{sg,h}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{10h+i}^2,$$

gdzie: C_{10h+i} to wartość skuteczna prążka (h -tej harmonicznej) w szeregu Fouriera (6), którą obliczono za pomocą DFT (*Discrete Fourier Transform*).

$$(6) \quad C_m = \frac{\sqrt{2}}{N} |X(m)|,$$

gdzie: $X(m)$ to kolejne prążki obliczane na podstawie (7).

$$(7) \quad X(m) = \sum_{k=0}^{n-1} x_k \exp\left(\frac{-j2\pi km}{N}\right),$$

gdzie: $m = 0, 1, \dots, N-1$ to indeks próbek wyjściowych DFT w dziedzinie częstotliwości, x_k to ciąg próbek wejściowych, N to liczba próbek ciągu wejściowego.

Kolejny współczynnik jakości energii elektrycznej użyty w badaniach to TWD (*Total Wide Distortion*), który obliczono na podstawie wartości skutecznej I_{RMS} oraz składowej podstawowej I_1 według (8).

$$(8) \quad TWD = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2}}{I_1} \cdot 100\%,$$

Pośród wymienionych we wstępie wskaźników jakościowych, w pracy wykorzystano mapy Poincarego i trajektorie fazowe. Dodatkowo zdefiniowano propozycje wskaźników ilościowych, które pozwolą na łatwiejsze określenie stopnia nieregularności omawianych w dalszej części przebiegów [18, 19]. Pierwszym takim wskaźnikiem jest odchylenie standardowe od punktu idealnego (10). Punkt idealny (IP) stanowi mapę Poincarego dla idealnego sygnału sinusoidalnego, którego współrzędne zależą od początkowego kąta fazowego (9).

$$(9) \quad IP = [I_m \sin(StartPhase); I_m \cos(StartPhase)],$$

gdzie: I_m to amplituda składowej podstawowej, a $StartPhase$ to faza początkowa sygnału.

$$(10) \quad \sigma_{IDEAL} = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^n [(map_{k,0} - IP_0)^2 + (map_{k,1} - IP_1)^2]}{n+1}},$$

gdzie: $map_{k,0}$, $map_{k,1}$ to współrzędne punktów mapy Poincarego, n to liczba próbek.

Oprócz tego zbadano podobny wskaźnik poprzez obliczenie odchylenia standardowego od punktu średniego (12),

gdzie współrzędne średniego środka (*Mean Point - MP*) zostały wyznaczone na podstawie punktów mapy Poincarego (11).

$$(11) \quad MP = \left[\frac{\sum_{k=0}^n map_{k,0}}{n+1}; \frac{\sum_{k=0}^n map_{k,1}}{n+1} \right],$$

$$(12) \quad \sigma_{MEAN} = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^n [(map_{k,0} - MP_0)^2 + (map_{k,1} - MP_1)^2]}{n+1}},$$

gdzie: $map_{k,0}$, $map_{k,1}$ to kolejne wartości odczytane z mapy Poincarego, n to liczba próbek.

Wyniki badań dla niezakłóconego sinusoidalnego napięcia zasilania

Pierwszym badaniem, jakie wykonano była symulacja dla warunków znamionowych silnika przy zasilaniu go idealnym napięciem sinusoidalnym. Uzyskane wyniki stanowiły pewien punkt odniesienia do kolejnych badań z napięciem odkształconym, przedstawionych w dalszej części artykułu. Na rysunku 4 zaprezentowano podstawowe wielkości takie jak widmo napięcia (rys. 4a) oraz prądu (rys. 4b), a także trajektorię fazową i mapę Poincarego dla napięcia (rys. 4c, 4e) i prądu (rys. 4d, 4f). Zgodnie z teorią, wyznaczona trajektoria fazowa dla napięcia sinusoidalnego przy zachowaniu skali obu osi jest okręgiem (rys. 4c), a mapa Poincarego jest punktem (rys. 4e) tego okręgu zależnym od fazy początkowej (wybranego momentu). Z kolei trajektorię fazową prądu (rys. 4d) cechuje wyraźna nieregularność, a mapa Poincarego (rys. 4f) tym razem nie jest punktem tylko porusza się po pewnej krzywej zamkniętej. Taka odpowiedź pomimo idealnego napięcia jest wynikiem nieliniowości odbiornika.

Dla omawianego przypadku wykonano również badania wskaźników ilościowych. Wartość skuteczna prądu I_{RMS} , jaką otrzymano dla tych obliczeń, wyniosła 6,81 A. Wartości współczynnika *THDS* oraz *TWD* dla prądu stojana wyniosły odpowiednio 3,6% i 6,7%. Dla wskaźników dotyczących zachowań chaotycznych, wartości odchylenia standardowego względem idealnego i średniego środka wyniosły odpowiednio 13,99% i 5,83%.

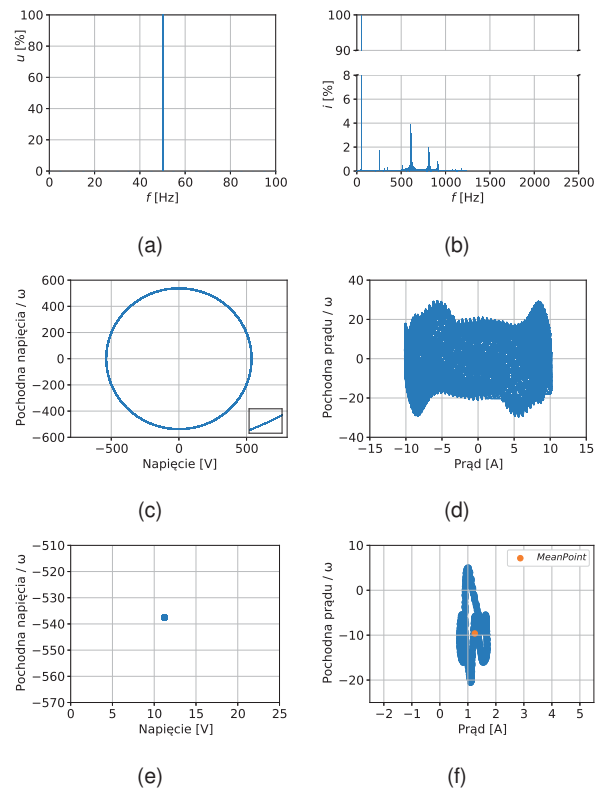
Wyniki badań dla napięcia zawierającego subharmoniczną

W kolejnym kroku przeprowadzono symulację przy zasilaniu silnika napięciem zawierającym składową podstawową i jedną subharmoniczną, której częstotliwość zmieniano od 5 Hz do 45 Hz, z krokiem co 5 Hz. Prezentowane poniżej wyniki dotyczą dodatkowej składowej o częstotliwości 10 Hz i zawartości $2\%U_N$ w napięciu zasilania (widmo z rysunku 5a). Trajektoria fazowa napięcia (rys. 5c) jest krzywą spiralną stanowiącą pięć okręgów, co wynika ze stosunku częstotliwości harmonicznej podstawowej (50 Hz) oraz częstotliwości subharmonicznej (10 Hz). W widmie prądu pokazanym na rysunku 5b widać, że wartości subharmonicznych powstających w prądzie są znaczne (15-krotny wzrost) zaś interharmoniczna, która tam również występuje, jest niewielka. W efekcie występowania subharmonicznej w napięciu widać różnicę w trajektorii fazowej prądu (rys. 5d) w porównaniu z przypadkiem dla idealnego zasilania (rys. 4d). Widoczny jest również ewidentny wpływ subharmonicznej w napięciu na mapę Poincarego prądu, w której widać trzy odrębne cykle (rys. 5f). Jednak obserwując animację tworzenia się mapy, można było zauważyć, że tak naprawdę składa się z 5 cy-

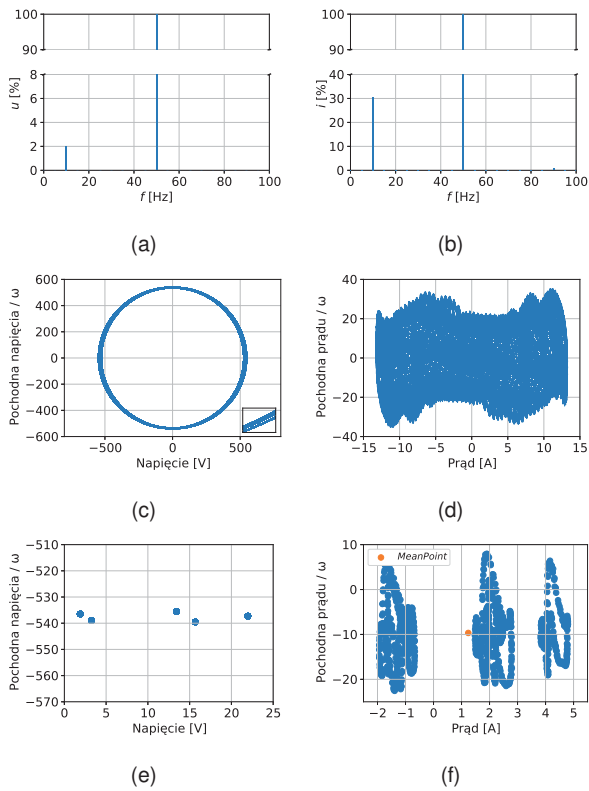
kli nakładających się na siebie, co jest związane z pięcioma punktami mapy Poincarego napięcia.

Należy podkreślić, że mapa Poincarego w literaturze chaosu[15] definiowana jest, jako zbiór punktów uzyskanych z trajektorii fazowej dla wybranych momentów czasowych oddzielonych od siebie ustalonym okresem dla całego zarejestrowanego przebiegu. Okres, który przyjęto do wyznaczenia map Poincarego jest okresem podstawowej sinusoidy (20 ms), chociaż przebiegi powstające z sumy tej sinusoidy i subharmonicznej zmieniają ten okres. Liczbę okręgów oraz punktów na mapie Poincarego można obliczyć, jako częstotliwość składowej podstawowej podzielonej przez wartość największego wspólnego dzielnika częstotliwości składowej podstawowej oraz częstotliwości subharmonicznej występującej w napięciu zasilania.

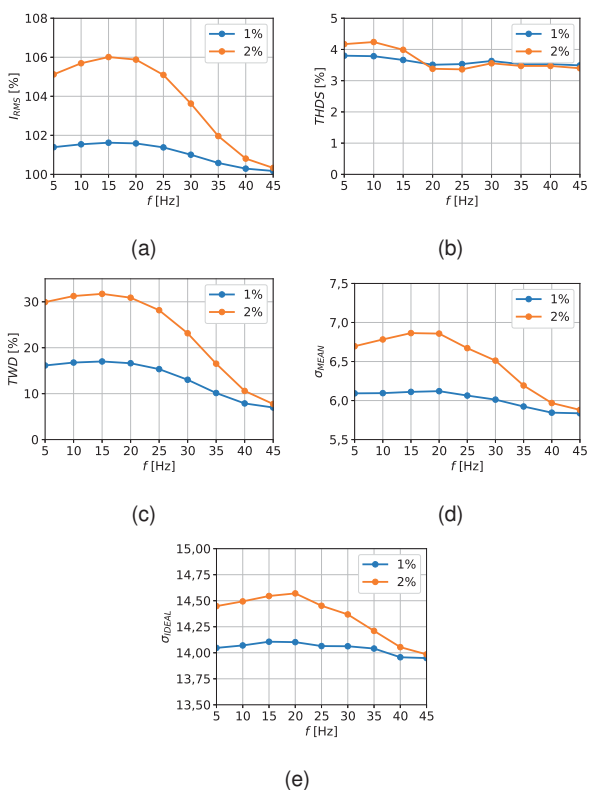
Na rysunku 6 przedstawiono względne wartości skuteczne prądów (rys. 6a), wartości współczynników *THDS* (rys. 6b) oraz *TWD* (rys. 6c), a także odchylenie standardowe względem średniego środka (rys. 6d) oraz względem idealnego środka (rys. 6e). Z wykresów na rysunkach 6a-e można odczytać względną maksymalną wartość skuteczną prądu (106%), współczynnik *TWD* (31,7%) uzyskanych dla częstotliwości subharmonicznej 15 Hz oraz jej zawartości w napięciu zasilania równej $2\%U_N$. Jak widać, współczynnik *THDS* posiada znacznie mniejsze wartości niż współczynnik *TWD* i jego wartość maksymalna występuje dla 10 Hz oraz wynosi 4,24%. Z wykresów odchylenia standardowego względem średniego środka (rys. 6d) oraz względem idealnego środka (rys. 6e) wynika, że najwyższa wartość odchylenia standardowego, jaką uzyskano wystąpiła przy tej samej częstotliwości subharmonicznej równej 20 Hz w obu przypadkach. Wartości tych współczynników wyniosły odpowiednio: 6,86% i 14,57%.



Rys. 4. Widma napięcia (a) i prądu stojana (b); trajektorie fazowe napięcia (c) i prądu stojana (d); mapy Poincarego dla napięcia (e) oraz prądu stojana (f) przy zasilaniu silnika napięciem sinusoidalnym



Rys. 5. Widma napięcia (a) i prądu stojana (b); trajektorie fazowe napięcia (c) i prądu stojana (d); mapy Poincarego dla napięcia (e) oraz prądu stojana (f) przy zasilaniu silnika napięciem zawierającym subharmoniczną



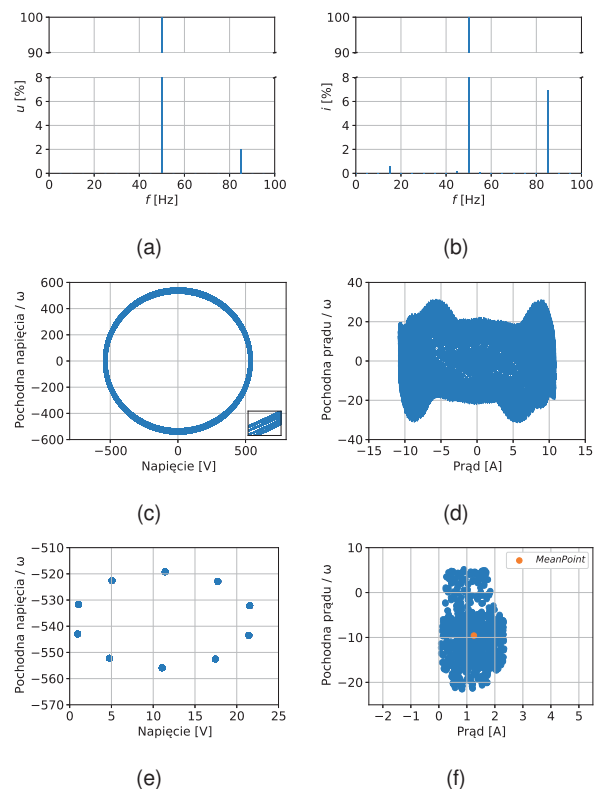
Rys. 6. Wskaźniki ilościowe prądu stojana w funkcji częstotliwości subharmonicznej zawartej w napięciu: a) I_{RMS} , b) $THDS$, c) TWD , d) odchylenie standardowe od średniego środka i e) idealnego środka

Wyniki dla napięcia zawierającego interharmoniczną

Analogiczne badania wykonano dla napięcia sinusoidalnego zawierającego jedną interharmoniczną, której zawar-

tość wynosiła $1\%U_N$ lub $2\%U_N$ przy częstotliwości zmieniającej się od 55 Hz do 95 Hz z krokiem 5 Hz. Wyniki symulacji trajektorii fazowych i map Poincarego dla częstotliwości interharmonicznej 85 Hz przedstawiono na rysunku 7. Na podstawie widma prądu, można zauważyć, że pod wpływem interharmonicznej występującej w napięciu zasilania (rys. 7a) powstaje kilkukrotnie większa interharmoniczna w prądzie, a także subharmoniczna o znacznie mniejszej wartości (rys. 7b). Trajektorja fazowa napięcia ma podobny kształt i właściwości, jak dla przypadku, kiedy w sinusoidalnym napięciu zasilania występowała subharmoniczna. Z mapy Poincarego dla prądu nie można już odczytać wielu punktów jak dla przykładu z napięciem zawierającym subharmoniczną. Tak więc mapa Poincarego ma tendencję do wypełniania pewnego obszaru, co według Schustera [15] może być wskaźnikiem zachowania zbliżonego do chaotycznego.

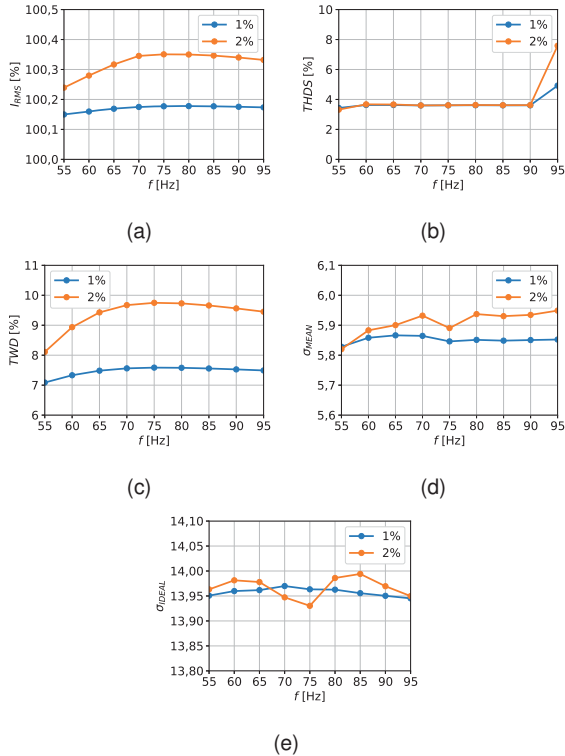
Na rysunku 8 przedstawiono względne skuteczne wartości prądu stojana, $THDS$, TWD oraz badania odchylenia standardowego względem średniego środka oraz idealnego środka określonych dla map Poincarego.



Rys. 7. Widma napięcia (a) i prądu stojana (b); trajektorie fazowe napięcia (c) i prądu stojana (d); mapy Poincarego dla napięcia (e) oraz prądu stojana (f) przy zasilaniu silnika napięciem zawierającym interharmoniczną

Z wykresu prądu silnika (rys. 8a) odczytano maksymalną wartość skuteczną prądu, która wystąpiła przy częstotliwości interharmonicznej 75 Hz i wyniosła 100,35%. Dla tej samej częstotliwości wystąpiło maksimum współczynnika TWD (9,75%), natomiast $THDS$ (3,61%) osiągnął maksimum dla największej badanej częstotliwości (95 Hz). Z rysunku 8b można odczytać wartość maksymalną występującą dla częstotliwości interharmonicznej 95 Hz i wynoszącą 7,58%. W przypadku badania odchylenia standardowego dla średniego środka (rys.8d) i idealnego środka (rys. 8e) widać, że przy częstotliwości 75 Hz występuje tak naprawdę obniżenie wartości, w którym występuje minimum dla obu przypadków i głównie przy zawartości tego zaburzenia wynoszącego

$2\%U_N$. Dla tej częstotliwości subharmoniczna prądu znajduje się blisko tzw. częstotliwości rezonansowej badanego silnika [14]. Z wykresów, z rysunków 8d i 8e odczytano wartości maksymalne występujące dla częstotliwości interharmonicznej 95 Hz (dla odchylenia standardowego względem średniego środka) oraz 85 Hz (dla odchylenia standardowego względem idealnego środka), które wyniosły odpowiednio 5,92% i 13,99%.

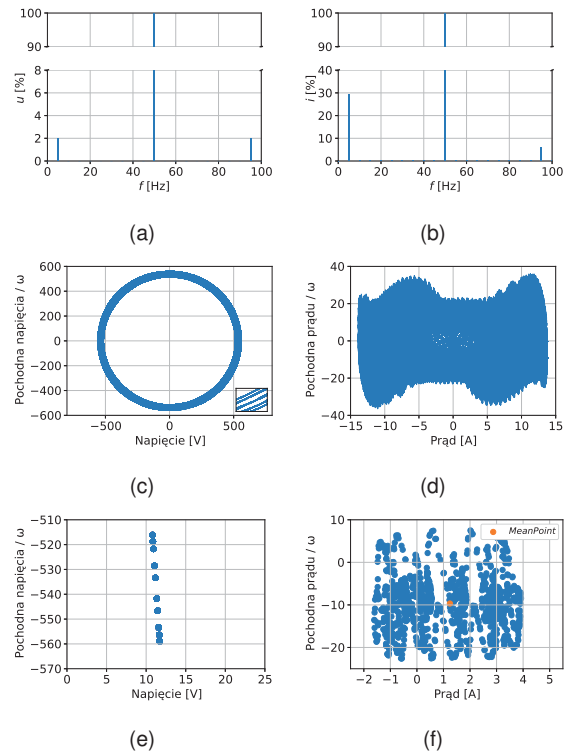


Rys. 8. Wskaźniki ilościowe prądu stojana w funkcji częstotliwości interharmonicznej zawartej w napięciu: a) I_{RMS} , b) $THDS$, c) TWD , d) odchylenie standardowe od średniego środka i e) idealnego środka

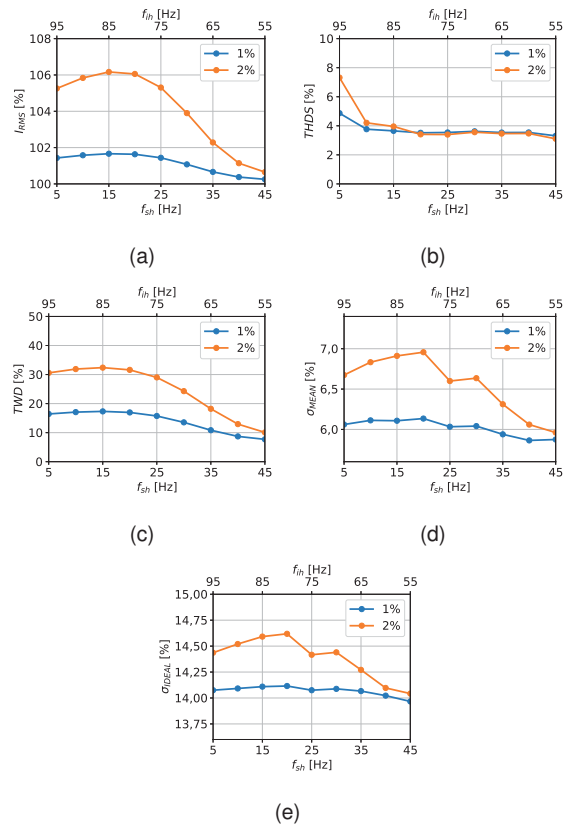
Wyniki dla napięcia zawierającego subharmoniczną i interharmoniczną

Ostatnie wykonane badania polegały na zasilaniu silnika napięciem sinusoidalnym zawierającym jedną subharmoniczną i jedną interharmoniczną jednocześnie. Na rysunku 9 przedstawiono wyniki symulacji dla składowych w napięciu zasilania o wartości skutecznej $2\%U_N$, częstotliwości subharmonicznej 5 Hz oraz częstotliwości interharmonicznej 95 Hz. Przy czym dla każdej pary przyjęto częstotliwość różniącą się o tę samą wartość względem 50 Hz (5 Hz i 95 Hz; 10 Hz i 90 Hz; ...).

Dla jednoczesnego występowania subharmonicznej i interharmonicznej można zauważyć, że przebiegi wartości wskaźników, takich jak względna wartość skuteczna prądu silnika I_{RMS} (rys. 10a) czy TWD (rys. 10c) mają podobny charakter do wcześniej przedstawionych wyników dla subharmonicznych. Natomiast wartości maksymalne I_{RMS} i TWD , jakie odczytano z wykresów dla częstotliwości subharmonicznej 15 Hz i interharmonicznej 85 Hz (górną skalą) wynoszą odpowiednio 106,17% i 32,38%. W przypadku wskaźnika $THDS$ wartość maksymalna występuje przy częstotliwości subharmonicznej 5 Hz i interharmonicznej 95 Hz. Przebiegi $THDS$ oraz odchylenia standardowe względem średniego środka (rys. 10d) i idealnego środka (rys. 10e) mają podobny kształt do tych, jakie występowały dla interharmonicznej w napięciu zasilania.



Rys. 9. Widma napięcia (a) i prądu stojana (b); trajektorie fazowe napięcia (c) i prądu stojana (d); mapy Poincaré dla napięcia (e) oraz prądu stojana (f) przy zasilaniu silnika napięciem zawierającym subharmoniczną i interharmoniczną



Rys. 10. Wskaźniki ilościowe prądu stojana w funkcji częstotliwości subharmonicznej (dolna skala) i interharmonicznej (górną skalą) zawartych w napięciu: a) I_{RMS} , b) $THDS$, c) TWD , d) odchylenie standardowe od średniego środka i e) idealnego środka

Wartości maksymalne występowały dla częstotliwości subharmonicznej 20 Hz i interharmonicznej 80 Hz, dla obu przypadków i wyniosły 6,96% oraz 14,62% dla odchylenia standardowego względem średniego środka i idealnego środka.

Podsumowanie

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu tylko subharmonicznych i interharmonicznych występujących w napięciu zasilania (zawierających w praktyce także innego typu zakłócenia). Dodatkowo, aby uwypuklić ten wpływ w odniesieniu do odchyłki od częstotliwości składowej podstawowej, w artykule zaprezentowano przypadki tylko dla wymierzonych częstotliwości.

W przypadku przyjęcia częstotliwości niewymiernej uzyskane trajektorie fazowe i mapy Poincarego (nieprezentowane w tym artykule) wskazywały na bardziej chaotyczne zachowanie, co jest wynikiem skończonej reprezentacji liczby niewymiernej. Obserwując zwłaszcza mapy Poincarego prądów dla napięcia zwierającego sub- i interharmoniczne w porównaniu z mapą prądu uzyskaną dla idealnego napięcia zasilania, stwierdzono wyraźną różnicę, co wskazuje na istotny wpływ subharmonicznej i interharmonicznej. Jednocześnie badając ten wpływ przy użyciu wskaźników ilościowych, stwierdzono, że subharmoniczne mają dominujący wpływ na badane wskaźniki z wyjątkiem *THDS*, gdzie dominują interharmoniczne.

Dotychczasowe wskaźniki jakości energii elektrycznej takie jak *TWD* i *THDS* nie obejmowały zachowań chaotycznych, które mogą wystąpić w różnego rodzaju układach nieliniowych. Należy uznać, że wskaźniki zachowań chaotycznych takich jak trajektoria fazowa i mapa Poincarego mogą być wskaźnikiem obu tych przypadków, zarówno odkształcenia przebiegu od sinusoidy, jak i zachowania chaotycznego. Oprócz powyższych wskaźników jakościowych wydaje się, że w przyszłości wskaźniki odchylenia standardowego od średniego środka lub idealnego środka mogą również być wykorzystane do kontrolowania z jednej strony stopnia odkształcenia, a z drugiej strony nieregularności przebiegu (zachowania chaotycznego). Przy czym charakter obu tych wskaźników okazał się bardzo podobny, co oznacza, że do kontroli można wybrać jeden z nich.

Praktycznym przykładem negatywnego zachowania chaotycznego może być przypadek opisany w artykule [20, 21], w której autorzy przedstawiają wyniki pracy transformatora energetycznego z silnie nieliniową charakterystyką magnesowania pracującego w stanie ferorezonansu. Przy pewnych parametrach transformatora oraz wartości pojemności pasywnych sieci energetycznej uzyskano w praktyce chaotyczne zachowanie układu, które jest niedopuszczalne z punktu widzenia stabilnej pracy systemu. Z kolei w pracy [22] kontynuowano badania wpływów zachowań chaotycznych w przypadku tzw. subharmonicznego rezonansu. Dlatego przyszłe aplikacje uniwersalnych wskaźników stopnia odkształcenia sygnału, jak i stopnia chaosu wydają się zasadne.

Autorzy: Dr inż. Damian Hallmann, Dr hab. inż. Piotr Jankowski, Prof. UMG, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, ul. Morska 87, 81-225 Gdynia, e-mail: d.hallmann@we.umg.edu.pl, p.jankowski@we.umg.edu.pl

LITERATURA

- [1] Bollen M.H., Gu I.: Signal processing of power quality disturbances, John Wiley & Sons, 2006.
- [2] Barros J., de Apraiz M., Diego R.I.: Measurement of subharmonics in power voltages, IEEE Lausanne Power Tech,

- pp. 1736–1740, 2007.
- [3] 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 Transactions on Energy Conversion, pp. 1117–1126, 2017.
- [4] Gnaciński P.: Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over- or undervoltages, IEEE Transactions on Energy Conversion, pp. 363–371, 2008.
- [5] Gnaciński P.: Wybrane zagadnienia oceny wpływu jakości energii elektrycznej na obciążenia cieplne silników indukcyjnych klatkowych małych mocy, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia, 2009.
- [6] Gnaciński P., Pepliński M.: Wpływ wahań napięcia na obciążenia cieplne silnika indukcyjnego – badania wstępne, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, t. 2, Vol. 66, pp. 288–293, 2012.
- [7] Pepliński M.: Wpływ subharmonicznych i interharmonicznych napięcia na prądy i temperaturę uzwojeń silników indukcyjnych małych mocy, Akademia Morska w Gdyni, Gdynia, 2014.
- [8] Gnaciński P., Pepliński M., Hallmann D.: Currents and Power Losses of Induction Machine Under Voltage Interharmonics, 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe), pp. p.1–p.7, 2019.
- [9] Gnaciński P., Pepliński M., Hallmann D., Jankowski P.: Induction cage machine thermal transients under lowered voltage quality, IET Electric Power Applications, pp. 479–486, 2019.
- [10] Gnaciński P., Hallmann D., Pepliński M., Jankowski P.: The effects of voltage subharmonics on cage induction machine, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 111, pp. 125–131, 2019.
- [11] Kantz H.: A Robust Method to Estimate the Maximal Lyapunov Exponent of a Time Series, Physical Letters A, vol. 185(1), pp. 77–87, 1994.
- [12] Kantz H., Schreiber T.: Nonlinear Time Series Analysis, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- [13] Peters E.E.: Teoria chaosu a rynki kapitałowe, WiG_Press, Warszawa, 1997.
- [14] Gnaciński P., Hallmann D., Klimczak P., Muc A., Pepliński M.: Effects of Voltage Interharmonics on Cage Induction Motors, Energies, 2021.
- [15] Schuster H.G.: Chaos deterministyczny, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1995.
- [16] IEC Standard 61000-4-7: Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques. Section 7: General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, Second Edition, 2002.
- [17] IEC Standard 60092-100: Instalacje elektryczne i elektroniczne na statkach. Definicje i wymagania ogólne, 2002.
- [18] Tarasiuk T., Jankowski P., Shagar V., Pilat A., Górniak M., Nowak J.: Comparative Case Study on Oscillatory Behavior in Power Systems of Marine Vessels With High Power Converters, Frontiers in Energy Research, vol. 8, 2021.
- [19] Pilat A., Tarasiuk T., Jankowski P.: PSCAD Model of the Marine Sub-system with Nonlinear Load for Power Quality Assessment, 2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe), 2018.
- [20] Marti J.R., Soudack A.C.: Ferroresonance in power systems: Fundamental solutions, IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution), vol. 138, pp. 321–329, 1991.
- [21] Araujo A.E.A., Soudack A.C., Marti J.R.: Ferroresonance in power systems: chaotic behaviour, IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution), vol. 140, pp. 237–240, 1993.
- [22] Zhang B., Lu T.: Application of Nonlinear Dynamic on Ferroresonance in Power System, 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, pp. 1–4, 2009.