

Piotr Gnaciński, Marcin Pepliński, Damian Hallmann  
Akademia Morska w Gdyni

## OBCIĄŻENIA CIEPLNE SILNIKA INDUKCYJNEGO W WARUNKACH JEDNOCZESNEGO WYSTĘPOWANIA SUBHARMONICZNYCH I ODCHYLENIA NAPIĘCIA

### THERMAL LOADS OF AN INDUCTION MOTOR UNDER SIMULTANEOUS PRESENCE OF SUBHARMONICS AND VOLTAGE DEVIATION

**Streszczenie:** Artykuł dotyczy jednoczesnego oddziaływania subharmonicznych napięcia i odchylenia napięcia na obciążenia cieplne silnika indukcyjnego. Dokonano analizy wpływu rozważanych zaburzeń jakości napięcia zasilania na temperaturę uzwojeń oraz szacunkowy czas życia silnika. Przedstawiono wyniki symulacji komputerowych dla silnika indukcyjnego klatkowego budowy zamkniętej o mocy 5,5 kW.

**Abstract:** This paper concerns the effect of simultaneous presence of voltage subharmonics and voltage deviation on thermal loads of an induction cage machine. The influence of the considered power quality disturbances on windings temperature rise is analyzed. The operational life expectancy of a machine is discussed as well. The results of computer simulation are presented for a totally enclosed induction cage machine of the rated power 5.5 kW.

**Słowa kluczowe:** maszyny indukcyjne, subharmoniczne, interharmoniczne, jakość napięcia

**Keywords:** induction machines, subharmonics, interharmonics, power quality

#### 1. Wstęp

W systemach elektroenergetycznych występują zaburzenia jakości napięcia, które niekorzystnie oddziałują na odbiorniki energii elektrycznej. Jednym z odbiorników szczególnie wrażliwych na zaburzenia jakości napięcia zasilania jest silnik indukcyjny klatkowy. Zasilanie napięciem o zaniżonej jakości powoduje wzrost strat w silniku, i w konsekwencji – wzrost temperatury uzwojeń [1,2,3,4,5,6,7]. Z kolei wyższa temperatura uzwojeń powoduje szybsze starzenie cieplne układu izolacyjnego, i w efekcie – skrócenie czasu życia silnika [2,4,5]. Dla większości materiałów elektroizolacyjnych wzrost temperatury o 8 – 11 K powoduje dwukrotny wzrost szybkości starzenia cieplnego układu izolacyjnego [2]. Należy nadmienić, że nawet zastosowanie wyższej klasy izolacji niż wynikającej z przyrostów temperatury uzwojeń w warunkach pracy znamionowej, nie chroni skutecznie silnika przed przegrzaniem i nadmiernym skróceniem czasu jego eksploatacji [4]. Skuteczną metodą ochrony silnika indukcyjnego przed nadmiernymi obciążeniami cieplnymi jest odpowiednie obniżenie mocy na wale [4].

Zaburzeniem jakości napięcia, które jest szczególnie szkodliwe dla różnych elementów sys-

temu elektroenergetycznego [6,7,8,9,10] są subharmoniczne (podsynchroniczne interharmoniczne) – składowe napięcia o częstotliwościach niższych od podstawowej harmonicznej. Są one spowodowane między innymi zmianą obciążenia odbiorników [8,11,12], pracą odbiorników nieliniowych [13,14] oraz elektrowni wiatrowych [15]. Wprawdzie źródła subharmonicznych napięć często znajdują się w systemach średniego napięcia, jednak w praktyce rozważane zaburzenia przenikają również do sieci niskiego napięcia. Przykładowo, w pracy [16] odnotowano wysokie poziomy subharmonicznych w budynku z dużą liczbą odbiorników nieliniowych, znajdującym się w pobliżu huty. Maksymalna wartość pierwiastka z sumy kwadratów subharmonicznych napięcia o częstotliwości 5, 10, ... 45 Hz wynosiła 1,67 % amplitudy składowej podstawowej.

Badania dotyczące silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym niepożądane składowe subharmoniczne i interharmoniczne zostały zapoczątkowane przez Lazima i Shepherd, którzy w 1985 r. opublikowali analizę teoretyczną wpływu subharmonicznych napięć na prądy i moment silnika indukcyjnego [17]. Zagadnienia wpływu subharmonicznych i interharmonicznych napięć na prądy, sprawność, moc chwilową moment obrotowy, stru-

mień magnetyczny oraz obciążenia cieplne silnika analizowano w pracach [1,3,5,6,7,17,18,19,20].

Badania dotyczące wpływu subharmonicznych napięcia na obciążenie cieplne silnika indukcyjnego zostały przedstawione między innymi w pracy de Abreu i Emmanuela [1]. Zamieszczono w niej wyniki obliczeń dotyczące wpływu subharmonicznych napięcia na szybkość starzenia cieplnego układu izolacyjnego silnika indukcyjnego. Subharmoniczne w przebiegach prądów zostały wyznaczone na podstawie schematu zastępczego silnika i następnie przeliczone na dodatkowe straty mocy w maszynie. Straty te następnie stanowiły podstawę do analizy wpływu subharmonicznych w napięciu na wzrost temperatury uzwojeń i skrócenie czasu życia silnika indukcyjnego. Badania wykonano dla przypadku jednoczesnego występowania: subharmonicznych, wyższych harmonicznych oraz asymetrii napięcia. Należy podkreślić, że w obliczeniach posłużono się modelem cieplnym nieodpowiednim dla silnika zasilanego napięciem asymetrycznym, co wykazano w pracy autorów [4].

W pracach autorów [6,7] dokonano analizy prądów i obciążeń cieplnych silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne i interharmoniczne. Wykazano między innymi, że subharmoniczne napięcia powodują wzrost składowej podstawowej prądu magnesującego. Jego pominięcie może prowadzić do znaczących błędów obliczeniowych w przypadku silników, w których obwód magnetyczny jest mocno nasycony.

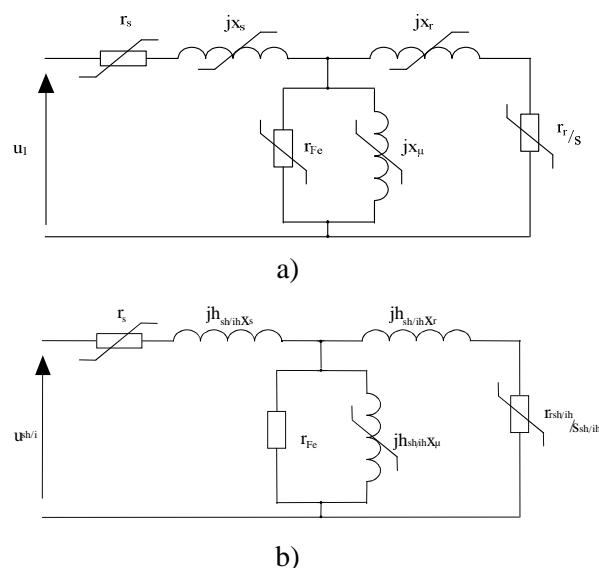
Podsumowując, w literaturze przedmiotu istnieje znacząca luka dotycząca obciążeń cieplnych silnika spowodowanych jednoczesnym oddziaływaniem subharmonicznych i innych zaburzeń jakości napięcia. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań wstępnych wpływu jednoczesnego występowania subharmonicznych i odchylenia napięcia na obciążenia cieplne silnika indukcyjnego. Jako metodę badawczą zastosowano symulację komputerową

## 2. Modele symulacyjne

Dla celów analizy prądów silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne i interharmoniczne zazwyczaj stosuje się metodę opartą na transformacji d-q [6,7,20] oraz schemacie zastępczym typu T [1,3,6,7]. Odpowiedni schemat zastępczy typu T jednej

fazy silnika dla pierwszej harmonicznej oraz subharmonicznych i interharmonicznych napięcia przedstawiono na rys. 1. Powyższe schematy uwzględniają wpływ temperatury na rezystancję uzwojeń – obliczenia wykonano metodą iteracyjną za pomocą sprzężonego modelu elektryczno – cieplnego.

Należy nadmienić, że pominięto wzrost składowej podstawowej prądu magnesującego, co w przypadku silnika słabo nasyconego prowadzi do akceptowalnych błędów [6,7].



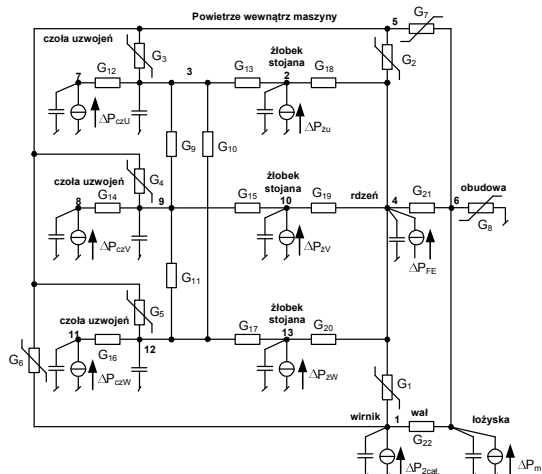
Rys. 1. Schemat zastępczy typu T dla 1-fazy silnika indukcyjnego klatkowego dla składowej podstawowej ( $h=1$ ) (rys. 1a) oraz subharmonicznych i interharmonicznych (rys. 1 b) napięcia

$h_{sh/ih}$  – rząd subharmonicznej, interharmonicznej,  $s_{sh/ih}$  – poślizg dla składowych subharmonicznych i interharmonicznych,  $r_{sh/ih}$  – sprawdzona rezystancja uzwojeń wirnika dla składowych subharmonicznych i interharmonicznych

W obliczeniach wykorzystano nieliniowy zastępczy schemat cieplny silnika indukcyjnego przedstawiony na rys. 2 [5]. W rozważanym cieplnym schemacie zastępczym poszczególne węzły modelują temperatury w różnych punktach silnika indukcyjnego [5]. Temperatura poszczególnych pasm uzwojeń została zamodelowana za pomocą następujących węzłów: 2,3,7 – pasmo uzwojeń U1-U2, 8,9,10 – pasmo uzwojeń V1-V2, 11,12,13 – pasmo W1-W2. Potencjały w węzłach 3,9,12 – odwzorowują średnie przyrosty temperatur czół poszczególnych pasm uzwojeń podczas gdy węzłom: 7,8,11 odpowiadają maksymalne temperatury czół po-

szczególnych pasm. Natomiast pozostałe temperatury w silniku są modelowane za pomocą następujących węzłów: 1 – rdzeń wirnika wraz z uzwojeniem, 4 – rdzeń stojana, 5 – powietrze wewnątrz maszyny, 6 – obudowa.

Szczegółowy opis rozważanych modeli wraz z ich weryfikacją eksperymentalną przedstawiono w pracach [5,6,7].



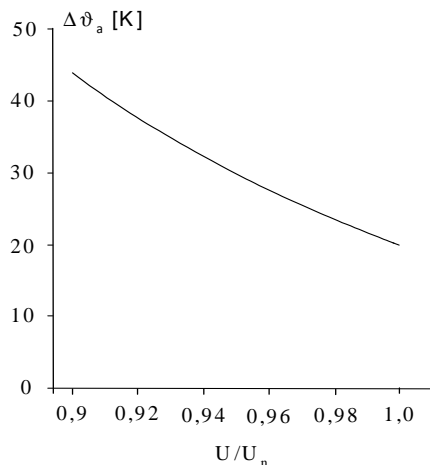
Rys. 2. Nieliniowy cieplny schemat zastępczy silnika indukcyjnego budowy całkowicie zamkniętej

$\Delta P_{czU}$ ,  $\Delta P_{czV}$ ,  $\Delta P_{czW}$  – straty mocy czołach poszczególnych pasm uzwojeń,  $\Delta P_{zU}$ ,  $\Delta P_{zV}$ ,  $\Delta P_{zW}$  – straty mocy w części żłobkowej poszczególnych pasm uzwojeń,  $\Delta P_{2cał}$  – straty całkowite w wirniku,  $\Delta P_{Fe}$  – straty w żelazie,  $\Delta P_m$  – straty mechaniczne,  $G$  – e przewodność cieplna

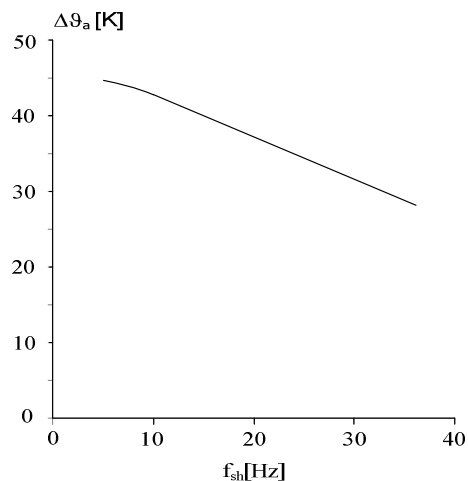
### 3. Wyniki badań symulacyjnych

Poniżej, na rys. 3 i rys. 4 zamieszczono obliczony dodatkowy przyrost temperatury uzwojeń dla silnika indukcyjnego typu Sg 132S-4 o mocy 5,5 kW. Badania przeprowadzono dla znamionowego momentu obciążenia oraz podstawowej harmonicznej napięcia zasilania o wartości znamionowej.

Na rys. 3 przedstawiono charakterystyki dodatkowego przyrostu temperatury czoł uzwojeń, spowodowanego zaniżoną jakością napięcia zasilania, w funkcji wartości skutecznej podstawowej harmonicznej napięcia zasilania. Obliczenia wykonano dla subharmonicznej napięcia o kolejności zgodnej o częstotliwości  $f_{sh}=5$  Hz oraz wartości  $U_{sh}=2,5\% U_N$ . Zmiana wartości podstawowej harmonicznej napięcia zasilania z  $90\% U_N$  do  $100\% U_N$  powoduje zmniejszenie dodatkowego przyrostu temperatury uzwojeń  $\Delta\vartheta_a$  z ok. 45 K do ok. 20 K.



Rys. 3. Dodatkowy przyrost temperatury czoł uzwojeń w funkcji znormalizowanej harmonicznej podstawowej napięcia zasilania (odniesionej do wartości znamionowej). Obliczenia wykonano dla subharmonicznej napięcia o kolejności zgodnej o częstotliwości  $f_{sh}=5$  Hz i wartości  $U_{sh}=2,5\% U_N$

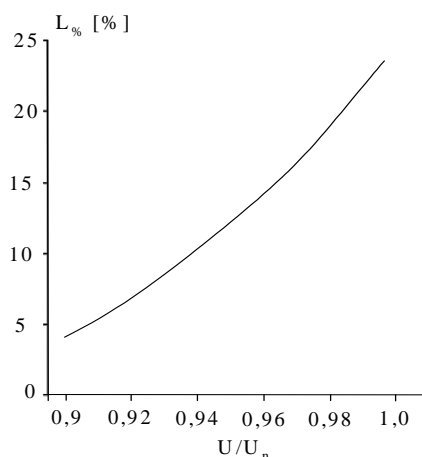


Rys. 4. Dodatkowy przyrost temperatury czoł uzwojeń badanego silnika w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia. Obliczenia wykonano dla harmonicznej podstawowej napięcia obniżonej do  $90\% U_N$  oraz subharmonicznej o kolejności zgodnej o wartości  $U_{sh}=2,5\% U_N$

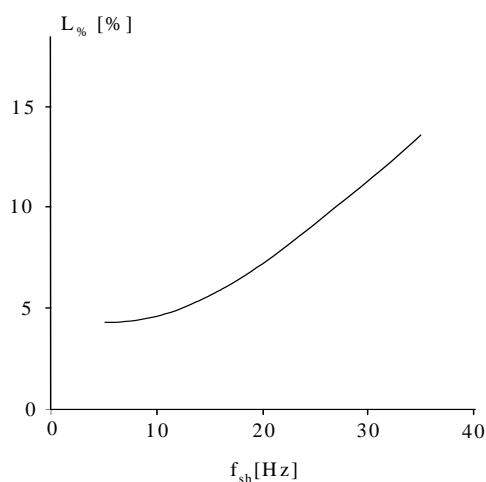
Na kolejnym rysunku – rys. 4 – zamieszczono charakterystykę dodatkowego przyrostu temperatury czoł uzwojeń badanego silnika w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia. Obliczenia wykonano dla harmonicznej podstawowej napięcia obniżonej do  $90\% U_N$  oraz subharmonicznej o kolejności zgodnej o wartości  $U_{sh}=2,5\% U_N$ . Zwiększenie częstotliwości subharmonicznej napięcia z  $f_{sh}=5$  Hz do  $f_{sh}=35$  Hz powoduje spadek dodatkowego

przyrostu temperatury z ok. 45 K do ok. 25 K. Dodatkowe przyrosty temperatury z rys. 3 i rys. 4 przeliczono na szacunkowy czas życia silnika w oparciu o równanie Arrheniusa [3,5]

Wyniki obliczeń zaprezentowano na rys. 5 i rys. 6. Rozważana subharmoniczna o częstotliwości  $f_{sh}=5$  Hz występująca jako pojedyncze zaburzenie jakości napięcia



Rys. 5. Charakterystyka skrócenia szacunkowego czasu życia badanego silnika indukcyjnego w funkcji znormalizowanej harmonicznej podstawowej napięcia zasilania (odniesionej do wartości znamionowej). Obliczenia wykonano dla subharmonicznej napięcia o kolejności zgodnej o częstotliwości  $f_{sh}=5$  Hz i wartości  $U_{sh}=2,5 \% U_N$



Rys. 6. Charakterystyka skrócenia szacunkowego czasu życia badanego silnika indukcyjnego w funkcji w funkcji częstotliwości subharmonicznej napięcia. Obliczenia wykonano dla harmonicznej podstawowej napięcia obniżonej do 90 %  $U_N$  oraz subharmonicznej o kolejności zgodnej o wartości  $U_{sh}=2,5 \% U_N$

powoduje skrócenie czasu życia układu izolacyjnego  $L_{\%}$  do ok. 25 % czasu życia dla zasilania znamionowego (rys. 5). Jeszcze bardziej szkodliwe jest jednocześnie oddziaływanie obu rozważanych zaburzeń jakości napięcia. Badana subharmoniczna występująca jednocześnie z obniżeniem napięcia może spowodować skrócenie czasu życia układu izolacyjnego nawet do ok. 5 % czasu życia dla zasilania znamionowego (rys. 5, 6).

Podsumowując, jednocześnie występowanie różnych zaburzeń jakości napięcia może prowadzić do istotnego wzrostu temperatury uzwojeń i skrócenia czasu życia układu izolacyjnego.

### 3. Wnioski

Jednoczesne oddziaływanie różnych zaburzeń jakości napięcia zasilania na silnik indukcyjny może prowadzić do znaczącego zwiększenia obciążeń cieplnych układu izolacyjnego i skrócenia czasu jego życia. Jednocześnie istnieje potrzeba wprowadzenia dopuszczalnych poziomów subharmonicznych do norm i przepisów dotyczących jakości napięcia.

### 4. Literatura

- [1]. de Abreu, J. P. G., Emanuel, A. E: "Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 38, No. 1, pp. 12-20, 2002
- [2]. P. Pillay, M. Manyage, "Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 42, pp. 813-822, Dec. 2006
- [3]. E. F. Fuchs, D. J. Roesler, M. A. S. Masoum, "Are harmonics recommendations according to IEEE and IEC too restrictive?", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1775-1786, 2004
- [4]. P. Gnaciński, "Effect of unbalanced voltage on windings temperature, operational life and load carrying capacity of induction machine", *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no 4, pp. 761-770, Apr. 2008
- [5]. P. Gnaciński, "Wybrane zagadnienia oceny wpływu jakości energii elektrycznej na obciążenia cieplne silników indukcyjnych klatkowych małych mocy", *Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni*, Gdynia 2009
- [6]. M. Pepliński, "Wpływ subharmonicznych i interharmonicznych napięcia na prądy i temperaturę uzwojeń silników indukcyjnych małych mocy", *Rozprawa doktorska, Akademia Morska w Gdyni*, 2014

- [7]. P. Gnaciński, M. Pepliński, “Induction cage machine supplied with voltage containing subharmonics and interharmonics”, *IET Electric Power Applications*, Volume 8, Issue 8, pp. 287 – 295, September 2014
- [8]. T. Sürgevil, E. Akpınar, “Effects of electric arc furnace loads on synchronous generators and asynchronous motors”, *Proc. of International Conference on Electrical and Electronics Engineering ELECO 2009*, Bursa, pp. I-49 - I-53, 5-8 Nov. 2009
- [9]. P. Gnaciński, D. Hallmann, P. Jankowski, “Badanie wpływu subharmonicznych napięcia na pracę transformatora jednofazowego”, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 4/2014 (104)* str. 173-178
- [10]. S. A. Deokar, L. Waghmare, G. N. Jadhav, “Voltage flicker assessment of induction motors used in the integrated water pumping station”, *Proc. of 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India*, New Delhi, 20-23 December 2010
- [11]. Hsu, C. T., Chen, C. S., Lin, C. H., “Electric power system analysis and design of an expanding steel cogeneration plant”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47, No. 4, pp. 1527-1535, 2011
- [12]. Yılmaz, I., Ermis, M., Cadircı, I., “Medium-frequency induction melting furnace as a load on the power system”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 48, No. 4, pp. 1203-1214, 2012
- [13]. Chang, G. W., Chen, S. K., Su, H. J., Wang, P. K., “Accurate assessment of harmonic and interharmonic currents generated by VSI-fed drives under unbalanced supply voltages”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, No. 2, pp. 1083-1091, 2011
- [14]. D. Basic, “Input current interharmonics of variable-speed drives due to motor current imbalance”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2797-2806, October 2010
- [15]. Kolagar, A. D., Shoulaie, A., “Reduction of undesired harmonic components in a steel industrial plant with DC electric arc furnaces”, *Proc. of 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*, 2011
- [16]. Barros, J., de Apraiz, M., Diego, R.I., “Measurement of subharmonics in power voltages”, *Power Tech 2007 IEEE Conference*, Lausanne, Switzerland, pp. 1736–1740, 1-5 July 2007
- [17]. M. T. Lazim, W. Shepherd: *Analysis of induction motors subjected to nonsinusoidal voltage containing subharmonics*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1985, IA-21, (4), pp. 956-965.
- [18]. R. K. Jordan, P. Stumpf, P. Barta, Z. Varga, I. Nagy, “A novel approach in studying the effects of subharmonics on ultrahigh-speed ac motor drives”, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 58, (4), pp. 1274-1281, 2011
- [19]. J. Baptista, J. Gonçalves, S. Soares, A. Valente, Morais, R., Bulas-Cruz, J., Reis, M. J., “Induction motor response to periodical voltage fluctuations”, *Proc. XIX International Conference on Electrical Machines ICEM*, Roma, Italy 2010
- [20]. Tennakoon, S., Perera, S., Robinson, D., “Flicker attenuation—Part I: Response of three-phase induction motors to regular voltage fluctuations”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 1207 – 1214, 2008

### Autorzy

dr hab. inż. Piotr Gnaciński, prof. nadzw. AM,  
e-mail: p.gnacinski@we.am.gdynia.pl  
dr inż. Marcin Pepliński,  
email: m.peplinski@we.am.gdynia.pl  
mgr inż. Damian Hallmann  
email: d.hallmann@we.am.gdynia.pl  
Akademia Morska w Gdyni,  
Katedra Elektroenergetyki Okrętowej  
ul. Morska 83, 81-225 Gdynia