

*silnik indukcyjny, wahania napięcia  
subharmoniczne, temperatura*

Piotr GNACIŃSKI\*, Marcin PEPLIŃSKI\*

## **WPLYW WAHAŃ NAPIĘCIA NA OBCIĄŻENIA CIEPLNE SILNIKA INDUKCYJNEGO – BADANIA WSTĘPNE**

Jednym z zaburzeń jakości energii elektrycznej są wahania napięcia. Definiuje się jako serie zmian wartości skutecznej lub obwiedni przebiegu czasowego napięcia. Cykliczne wahania napięcia można rozpatrywać jako złożenie subharmonicznych i interharmonicznych napięcia, tj. składowych o częstotliwościach mniejszych od składowej podstawowej i odpowiednio składowych o częstotliwościach większych od częstotliwości harmonicznej podstawowej, nie będących jej całkowitymi wielokrotnościami. Subharmoniczne i interharmoniczne występujące w napięciu zasilającym silnika powodują przepływ przez uzwojenia dodatkowych składowych prądu. Ze względu na swoje niskie częstotliwości subharmoniczne i interharmoniczne prądu są znacznie gorzej tłumione przez uzwojenia niż wyższe harmoniczne prądu. Nawet pozornie niewielka zawartość subharmonicznych w napięciu zasilającym może powodować przepływ przez uzwojenia subharmonicznej prądu o znacznych nieraz wartościach. W konsekwencji, wahania napięcia zasilania silnika mogą spowodować znaczący wzrost strat w maszynie i przegrzanie uzwojeń.

W referacie przedstawiono wstępne wyniki badań eksperymentalnych wpływu wahań napięcia na rozkład temperatury w silniku indukcyjnym klatkowym małej mocy.

### **1. WSTĘP**

Jednym z zaburzeń jakości energii elektrycznej są wahania napięcia, które definiuje się jako serie zmian wartości skutecznej lub obwiedni przebiegu czasowego napięcia [13]. Częstotliwość wahań napięcia może zmieniać się w szerokim zakresie. Według pracy [17] wynosi od 0,01 Hz do 40 Hz (dla systemów 60 Hz). Przyczyną wahań napięcia są zmiany mocy biernej pobieranej przez tzw. odbiorniki niespokojne, np. piece łukowe, napędy walcownicze, urządzenia spawalnicze i dźwignicowe [13]. Wahania napięcia mogą być również spowodowane pracą elektrowni wiatrowych oraz odbiorników nieliniowych [13, 16, 15]. Wahania napięcia zaburzają pracę wielu od-

---

\* Akademia Morska, Gdynia, ul. Morska 81-87, e-maile piotrg@am.gdynia.pl, marcin-pe@am.gdynia.pl

biorników – maszyn elektrycznych, przekształtników, urządzeń do elektrolizy, urządzeń elektrotermicznych i oświetleniowych, powodując między innymi bardzo uciążliwe zjawisko migotania światła [5, 13, 18].

Cykliczne wahania napięcia można rozpatrywać jako złożenie subharmonicznych i interharmonicznych napięcia, tj. składowych o częstotliwościach mniejszych od składowej podstawowej i odpowiednio składowych o częstotliwościach większych od częstotliwości harmonicznej podstawowej, nie będących jej całkowitymi wielokrotnościami. Dla sinusoidalnej modulacji amplitudy napięcia o częstotliwości  $f_m$  w przebiegu napięcia występują subharmoniczne i interharmoniczne o częstotliwościach  $f_{sh}$  i  $f_{ih}$  opisanych zależnościami [5, 17]:

$$f_{sh} = f_1 - f_m \quad (1)$$

$$f_{ih} = f_1 + f_m \quad (2)$$

gdzie  $f_1$  – częstotliwość podstawowej harmonicznej napięcia

Literatura przedmiotu dotycząca silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne i interharmoniczne w znacznej mierze dotyczy ich wpływu na prądy, moment obrotowy, strumień magnetyczny, straty mocy, sprawność oraz wahania prędkości obrotowej [2–5, 7, 8, 10, 14, 17]. Przykładowo, w pracach [2, 3] przedstawiono wpływ wahań napięcia na moment obrotowy, prędkość obrotową, sprawność, prąd i moc chwilową pobieraną i oddawaną przez silnik. Problematykę obciążeń cieplnych silnika spowodowanych subharmonicznymi i interharmonicznymi napięcia rozważano w pracach [1, 4] i opracowaniach autorów [7–9, 11, 12]. W pracy [1] zaprezentowano wyniki obliczeń dotyczących wpływu różnych zaburzeń jakości napięcia (w tym subharmonicznych) na skrócenie czasu życia silników w wyniku dodatkowych obciążeń cieplnych. Należy podkreślić, że autorzy rozważanej prac nie zweryfikowali doświadczalnie wykorzystanego modelu silnika. W pracach [4, 7, 8, 9, 11, 12] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących wpływu pojedynczej subharmonicznej lub interharmonicznej na nagrzewanie silnika oraz rozważano dokładność stosowanych modeli symulacyjnych.

Jak wynika z powyższego przeglądu stanu wiedzy, dotychczas w literaturze przedmiotu brakowało badań dotyczących obciążeń cieplnych silnika dla specyficznego przypadku występowania subharmonicznych i interharmonicznych, jakim jest modulacja amplitudy napięcia.

## 2. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Badania eksperymentalne wykonano dla 4-biegunowego silnika indukcyjnego o budowie zamkniętej typu mSZJe34a o mocy 3 kW, obciążonego prądnicą prądu stałego. Silnik ten posiada wbudowane termopary rozlokowane w różnych jego czę-

ściach: w czołach i w części żłobkowej uzwojeń stojana w żelazie czynnym stojana: w zębie i jarzmie, oraz na obudowie. Schematyczny rysunek ilustrujący rozmieszczenie termopar w badanym silniku przedstawiono w pracy [12].

Badany silnik zasilano z programowalnego źródła napięcia Chroma 6590-3 o mocy 9 kVA (3 kVA na fazę). Umożliwia ono między innymi precyzyjne zadawanie asymetrii fazowej, amplitudowej, odchylenia napięcia, częstotliwości, wtrącanie harmonicznych o zadanej amplitudzie i fazie oraz programowanie takich zaburzeń, jak np. zapady, przepięcia czy wahania napięcia. Dla celów prezentowanego eksperymentu zaprogramowano cykliczne wahania napięcia o modulacji prostokątnej, opisanej zależnością:

$$u_f(t) = U_{1\max} \sin(\omega t + 2/3k\pi) [1 + u_{\text{mod}}(t)] \quad (3)$$

gdzie:  $u_f(t)$  – napięcie fazowe;  $U_{1\max}$  – amplituda podstawowej harmonicznego napięcia,  $k = 0, 1, 2$ ;  $u_{\text{mod}}(t)$  – funkcja modulująca

Przebieg funkcji modulującej przedstawiono na rysunku 1. Okres wahań napięcia był równy 28 ms, a głębokość modulacji określona zależnością [18]:

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right) = 100\%(\max[u_{\text{mod}}(t)] - \min[u_{\text{mod}}(t)]) \quad (4)$$

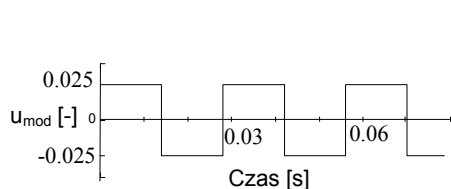
równa 5%.

Na rysunkach 2–4 zamieszczono zarejestrowane przebiegi napięcia zasilania (rys. 2) i prądu silnika (rys. 3) oraz ich widma (rys. 4 i rys. 5). W widmie napięcia zasilania dominuje subharmoniczna o częstotliwości  $f_s = 14,3$  Hz i wartości  $U_{sh} = 1,25\% U_1$  oraz interharmoniczna o częstotliwości  $f_s = 85,7$  Hz i wartości  $U_{ih} = 1,4\% U_1$ . Subharmonicznej i interharmonicznej napięcia odpowiada subharmoniczna i interharmoniczna prądu o wartości odpowiednio równej  $I_{sh} = 25,2\% I_1$  i  $I_{ih} = 8,5\% I_1$  (rys. 5).

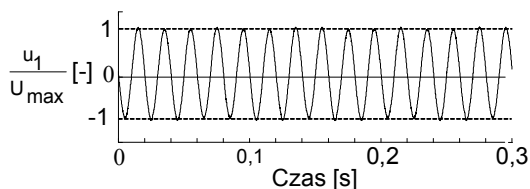
Na rysunku 6 porównano zmierzone przyrosty temperatury w badanym silniku dla zasilania znamionowego (rys. 6a) oraz wahań napięcia (rys. 6b). Obie próby cieplne wykonano dla momentu obciążenia równego znamionowemu. Ponadto, częstotliwość i uśredniona (dla przypadku wahań napięcia) wartości skutecznej napięcia zasilania były równe wartości znamionowej. Należy podkreślić, że pomiarów dokonano dla zbliżonej temperatury otoczenia oraz jednakowej wartości ciśnienia atmosferycznego.

Jak dowodzą wyniki pomiarów przedstawione na rysunku 6, szybkozmienne wahania napięcia zasilania mogą powodować znaczący wzrost obciążeń cieplnych układu izolacyjnego silnika. W rozważanym przypadku spowodowały zwiększenie temperatury uzwojeń (w najgorętszym mierzonym punkcie) z ok. 90 K (rys. 6a) do ok. 103 K (rys. 6b). Tak duży dodatkowy przyrost temperatury uzwojeń wpływa na szybkość starzenia cieplnego układu izolacyjnego i w konsekwencji – na trwałość i niezawodność silnika. Przyjmuje się, że dla większości materiałów izolacyjnych wzrost maksymalnej temperatury uzwojeń o 8–12 K (w zależności od materiału izolacyjnego)

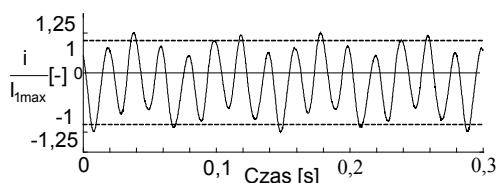
dwukrotnie skracając czas życia układu izolacyjnego. W związku z tym, wzrost temperatury uzwojeń spowodowany wahaniami napięcia może znacząco zmniejszyć trwałość i niezawodność silnika.



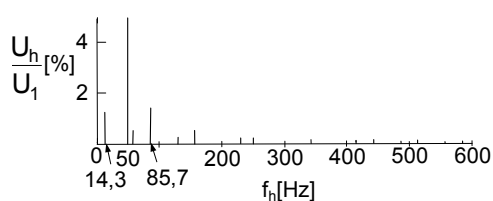
Rys. 1. Przebieg funkcji  $U_{mod}(t)$   
Fig. 1. Waveform of  $U_{mod}(t)$  function



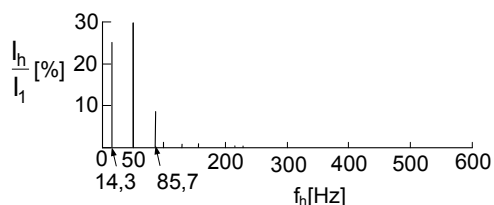
Rys. 2. Zarejestrowany przebieg napięcia zasilania  
Fig. 2. Registered waveform of supply voltage



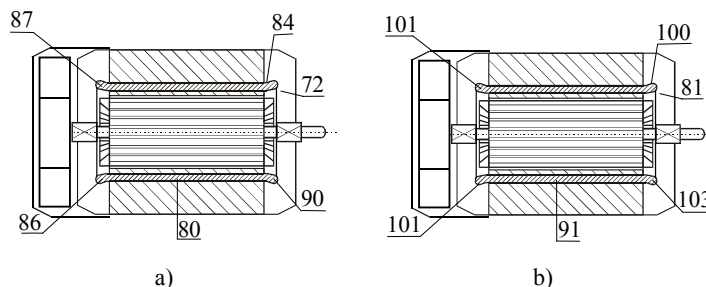
Rys. 3. Zarejestrowany przebieg prądu silnika  
Fig. 3. Registered waveform of motor current



Rys. 4. Widmo napięcia zasilania  
Fig. 4. Spectrum of supply voltage



Rys. 5. Widmo prądu silnika  
Fig. 5. Spectrum of motor current



Rys. 6. Zmierzone przyrosty temperatury dla zasilania znamionowego (a) i wahań napięcia zasilania (b)  
Fig. 6. Measured temperature-rise for nominal supply (a) and voltage fluctuations (b)

### 3. WNIOSKI

W dotychczasowym stanie wiedzy istniały jedynie przesłanki teoretyczne wskazujące na możliwość przegrzania silnika indukcyjnego w wyniku wahań napięcia zasilania. Przeprowadzone badania eksperymentalne dowodzą, że szybkozmienne wahania napięcia mogą powodować istotny wzrost temperatury uzwojeń. Konsekwencją wyższej temperatury uzwojeń jest szybsze starzenie cieplne układu izolacyjnego, co prowadzi do znaczącego zmniejszenia trwałości i niezawodności silnika.

#### LITERATURA

- [1] de ABREU J.P.G., EMANUEL A.E., *Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and im-balance: loss of useful life and its estimated costs*, IEEE Transactions on Industry Applications, January/February 2002, Vol. 38, 12–20.
- [2] BAPTISTA J., GONC J., SOARES S., VALENTE A., MORAIS R., BULAS-CRUZ J., MANUEL J.C.S., *Reis Induction motor response to periodical voltage fluctuations*, XIX International Conference on Electrical Machines, ICEM, Rome 2010.
- [3] BUCCI G., FIORUCCI E., OMETTO A., ROTONDALE N., *The Evaluation of the Effects of the Voltage Amplitude Modulations on Induction Motors*, IEEE Power Tech Conference, Russia, 27–30 June 2005.
- [4] FUCHS E.F., ROESLER D.J., MASOUM M.A.S., *Are harmonics recommendations according to IEEE and IEC too restrictive?*, IEEE Transactions on Power Delivery, October 2004, Vol. 19, No. 4, 1775–1786.
- [5] GALLO D., LANDI C., LANGELLA R., TESTA A., *Limits for Low Frequency Interharmonic Voltages: can They be Based on the Flickermeter Use*, IEEE Power Tech Conference, Russia, 27–30 June 2005.
- [6] GNACIŃSKI P., *Wybrane zagadnienia wpływu jakości energii elektrycznej na obciążenia cieplne silników indukcyjnych klatkowych małej mocy*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2009.
- [7] GNACIŃSKI P., PEPLIŃSKI M., SZWEDA M., *Badanie silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym składowe subharmoniczne*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni.
- [8] GNACIŃSKI P., PEPLIŃSKI M., SZWEDA M., *Silnik indukcyjny zasilany napięciem zawierającym składowe interharmoniczne*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 88/2010, 175–180, Katowice 2010.
- [9] GNACIŃSKI P., PEPLIŃSKI M., SZWEDA M., *The effect of subharmonics on induction machine heating*, Proc. of 13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008, Poznań, 1–3 września 2008, 826–829.
- [10] GNACIŃSKI P., PEPLIŃSKI M., SZWEDA M., *The effect of subharmonics on the flux in an induction cage machine*, Proc. of 5th International Workshop Compatibility in Power Electronics CPE'07, Gdańsk–Jelitkowo, 29 maja–1 czerwca 2007, (CD-ROM).
- [11] GNACIŃSKI P., PEPLIŃSKI M., SZWEDA M., *Wpływ interharmonicznych na obciążenie cieplne silnika indukcyjnego*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, nr 178A, Gdynia 2009, 99–104.
- [12] GNACIŃSKI P., PEPLIŃSKI M., SZWEDA M., *Wpływ podharmonicznych na obciążenie cieplne silnika indukcyjnego*, Zeszyty Problemowe, Maszyny Elektryczne, nr 84/2009, Katowice 2009, 97–101.

- [13] HANZELKA Z., *Wahania napięcia*, Automatyka – Elektryka – Zakłócenia, nr 5/2011, www.elektroinnowacje.pl
- [14] JARDAN R.K., STUMPF P., BARTAL P., VARGA Z., NAGY I., *A Novel Approach in Studying the Effects of Subharmonics on Ultrahigh-Speed AC Motor Drives*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, April 2011, Vol. 58, No. 4, 1274–1281.
- [15] KANELLOS F.D., HATZIARGYRIOU N.D., *The Effect of Variable-Speed Wind Turbines on the Operation of Weak Distribution Networks*, IEEE Transaction on Energy Conversion, December 2002, Vol. 17, No. 4, 543–548.
- [16] KUCZMA P., *Wahania napięcia w sieci rozdzielczej jako wynik oddziaływań odbiorników niespokojnych oraz generacji rozproszonej*, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 243, 2009.
- [17] 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, April 2008, Vol. 23, No. 2, 1207–1214.
- [18] WICZYŃSKI G., *Analysis of Voltage Fluctuations in Power Networks*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, November 2008, Vol. 57, No. 11, 2655–2664.

#### INFLUENCE OF VOLTAGE FLUCTUATIONS ON THERMAL LOADS OF INDUCTION MACHINE – PRELIMINARY INVESTIGATIONS

One of power quality disturbances are voltage fluctuations, defined as series of changes of voltage rms value or envelope of voltage waveform. Cyclic voltage fluctuations can be considered as superposition of subharmonics and interharmonics – components of frequency not being an integer multiple of the fundamental one, respectively lower or higher than the fundamental frequency. Supply with voltage containing subharmonics and interharmonics causes flow of additional windings current components that are comparatively weakly suppressed because its low frequency. Even apparently inconsiderable subharmonic content in the supply voltage may lead to windings current subharmonics of significant value. Consequently, voltage fluctuations may lead to considerable increase power losses inside a machine and overheating of windings.

The paper deals with preliminary experimental investigations of influence of voltage fluctuations on temperature distribution in a low-power induction cage machine