

**Prof. dr hab. inż. Jerzy Świder**  
**Dr inż. Adrian Zbilski**

Politechnika Śląska  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Ul. Konarskiego, 44-100 Gliwice, Polska  
e-mail: jerzy.swider@polsl.pl

## **Straty mocy oraz ich własności w niskim zakresie warunków pracy silnika elektrycznego robota w kontekście badań efektywności energetycznej**

**Słowa kluczowe:** efektywność energetyczna, robot przemysłowy, silnik elektryczny, mapy mocy, straty mocy, zniekształcenia, zakłócenia, harmoniczne

**Streszczenie:** Straty mocy są jednym z wielu czynników wpływających na efektywność energetyczną procesów produkcyjnych, jednak pomimo tego, najczęściej badane zakresy strat mocy nie określają sposobu ich zmian w trybach pracy odmiennych od typowej pracy napędowej. Opisane badania zostały skoncentrowane na niskim zakresie warunków pracy silnika robota przemysłowego oraz na własnościach zmian postaci strat mocy podczas przechodzenia ze stanu pracy napędowej do pracy statycznej. Oprócz wyznaczonych wartości komponentów mapy mocy, w pracy przedstawiono techniczne rozwiązania umożliwiające wykonywanie pomiarów stanów elektrycznych robota w warunkach przemysłowych, którymi były zniekształcenia, zakłócenia oraz ograniczony zakres pozycji kątowych badanego przegubu robota.

### **1. Wprowadzenie**

Efektywność energetyczna procesów produkcyjnych jest tą częścią dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn, której znaczenie zostało dostrzeżone i jest ciągle rozwijane [3, 4, 9, 10, 11]. Autorzy artykułu skoncentrowali uwagę na tych wszystkich czynnikach, które wpływają na końcową wartość energii elektrycznej, zużywanej przez technologiczne procesy transportu i manipulacji, a w szczególności zużywanej przez roboty przemysłowe.

Opisane w niniejszej publikacji badania są rozszerzeniem prac nad stratami mocy w silnikach elektrycznych robota FANUC AM100iB, przedstawionych w [20], oraz stanowią etap rozwoju szerszego zakresu badań nad efektywnością energetyczną.

Obiektem opisanych badań był robot Fanuc AM100iB (rys. 1), a dokładniej - silnik elektryczny, napędzający jego pierwszy człon, pracujący w stanie ustalonym, w niskim zakresie warunków pracy, czyli przy niskiej prędkości obrotowej oraz przy niskim obciążeniu. Istotne w takim stanie jest to, że silniki robota są zasilane za pomocą energoelektronicznego wzmacniacza, co w efekcie przyczynia się do powstawania dużych zniekształceń i dużych zakłóceń doprowadzanej mocy elektrycznej, które musiały zostać uwzględnione podczas wyznaczania sprawności elektrotechnicznej badanego silnika. Źródłami tych zniekształceń oraz zakłóceń są prostowniki mostkowe, tranzystory, technologia PWM, wewnętrzne niedokładności, zaburzenia równowagi elektrycznej lub nieliniowość wprowadzana między innymi przez nasycenie transformatorów [7, 12].

Ograniczeniami, które należało uwzględnić podczas realizacji badań, była konieczność dokonywania pomiarów stanów elektrycznych testowanego silnika, pozostającego w oryginalnym połączeniu z dedykowanym wzmacniaczem, będącym jedynym dostępnym

układem sterująco-zasilającym. Jednocześnie znacząco zniekształcone przebiegi napięcia elektrycznego powodowały powstawanie szerokich fluktuacji wskazań na przyrządach pomiarowych, natomiast wał badanego silnika mógł obracać się jedynie w ograniczonym zakresie pozycji kątowych, co wynikało z ograniczeń systemów bezpieczeństwa układu sterowania robotem. W konsekwencji stany ustalone należało rozpoznawać jedynie w oddzielnym trybie statycznej analizy wyników pomiarów. Całokształt występujących ograniczeń zrekonstruował rzeczywiste warunki eksploatacji oraz warunki badania maszyny i jednocześnie pozwolił na dobór aparatury pomiarowej i metodyki pomiarowej, wymaganej do tego typu testów.



**Rys. 1. Ogólny widok badanego robota Fanuc AM100iB**

Do poprawnego wyznaczenia wartości mocy elektrycznej w niskich zakresach warunków pracy, należało zastosować adekwatną metodologię pomiaru, uwzględniającą wpływ zniekształconych oraz zakłóconych przebiegów mierzonych parametrów na wartość mocy czynnej. Spośród wielu znanych metod obliczania wartości mocy wybrano standard IEEE 1459-2010 [8]. Wybór wynikał z pragmatycznie zorientowanego celu, którym było pozyskanie wartości mocy, możliwych do porównania z wartościami wyników pomiarów, wykonywanych przez analizatory mocy [6]. Najbardziej powszechnymi, alternatywnymi metodami wyznaczania wartości mocy elektrycznej, odpowiednimi do zastosowania w niebalansowanych, niesinusoidalnych systemach, do zniekształconych i zakłóconych przebiegów mierzonych parametrów i stosowanymi w opracowaniach naukowych, są metody Budeanu, Fryzego oraz Czarneckiego [1, 5, 15, 18, 19].

## **2. Cele badań**

Wszystkie parametry dynamiczne robota są czynnikami, wpływającymi na efektywność energetyczną. W przypadku tej pracy, uwaga została skoncentrowana na identyfikacji wartości strat mocy w pierwszym silniku elektrycznym badanego robota, pracującym w niskich zakresach warunków pracy, a w szczególności w niskiej prędkości obrotowej i pod niskim obciążeniem. Oddzielnym celem poznawczym było zbadanie zachowania elektrycznych własności silnika elektrycznego podczas zmiany sposobu jego pracy z trybu napędowego na tryb pracy statycznej. Ponadto oceniono wyniki zastosowanych technik przetwarzania sygnałów, o które można rozbudować zastosowane w pracy narzędzia pomiarowe, w celu automatyzacji procesów pomiarowych.

## **3. Aparatura pomiarowa**

W celu wykonania analizy mocy elektrycznej oraz akwizycji parametrów kinematycznych badanego robota Fanuc AM100iB, została dobrana oraz wytworzona specjalizowana aparatura pomiarowa (rys. 2a). Aparatura składała się z kart pomiarowych NI 6581, NI 3xTB-4300B oraz 2x NI PXIe-6363, które umożliwiły dokonywanie próbkowania

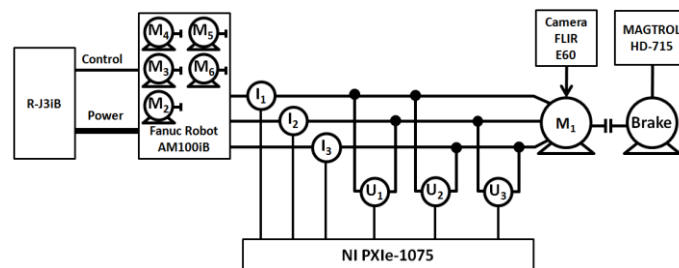
mierzonych przebiegów z dużą częstotliwością oraz monitorowanie i dekodowanie danych cyfrowych, zawierających wartości pozycji kątowych wałów wszystkich silników, generowanych przez enkodery - *Fanuc Pulse Coders*. Alternatywną metodą pomiaru wartości parametrów kinematycznych wałów silników może być również zastosowanie bezpośredniego pomiaru położenia kątowych ramion robota, umożliwiającą dokonywanie przeliczeń na wartości położenia kątowych wałów, co szerzej zostało opisane w pracy [13] w odniesieniu do punktu TCP robota. Wszystkie karty pomiarowe były synchronizowane oraz sterowane za pomocą komputera NI PXIe-1075 i aplikacji SCADA, uruchomionej w środowisku LabVIEW. Obciążenie mechaniczne wału silnika oraz moc mechaniczna były wytwarzane za pomocą hamulca histerezy MAGTROL HD-715 (rys. 2b).



a)

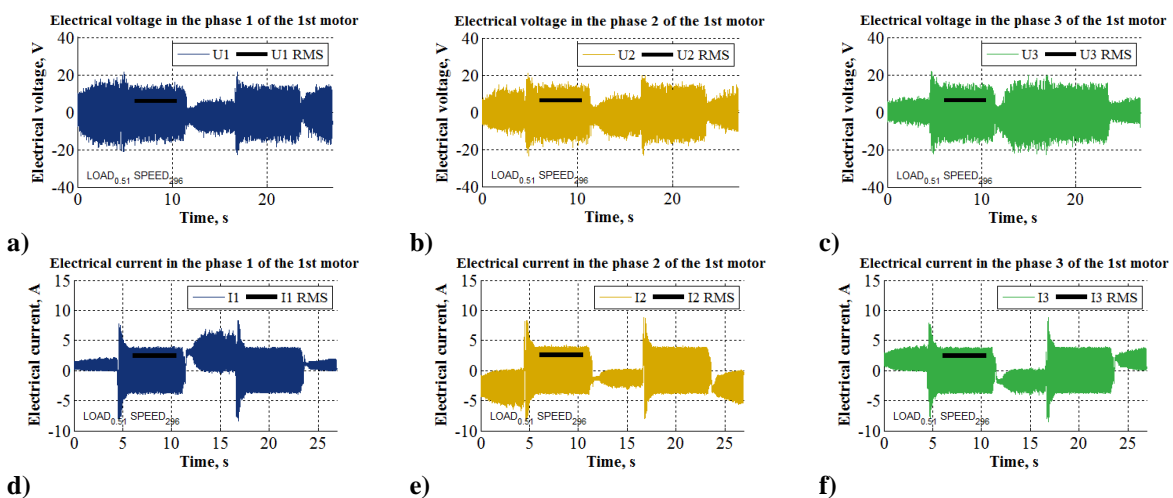
b)

Rys. 2. a) Widok ogólny systemu NI PXIe-1075 z zastosowanymi kartami pomiarowymi; b) Widok ogólny badanego silnika robota oraz hamulca histerezy MAGTROL HD-715

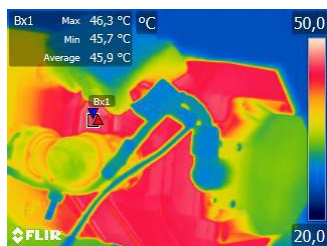


Rys. 3. Schemat połączeń elektrycznych oraz sygnałowych

Schemat połączeń elektrycznych i sygnałowych oraz połączeń mechanicznych przedstawia rys. 3. Przykłady pozyskanych, nieprzetworzonych danych przebiegów napięcia oraz natężenia prądu elektrycznego, zarejestrowane za pomocą tej aparatury, przedstawiono na rys. 4. Próbką zarejestrowanych sygnałów jest oznaczona grubą, czarną linią, i jednocześnie wskazuje wartość skuteczną każdego z przebiegów. Kształty przebiegów wynikają z ograniczonego zakresu pozycji kątowych wału badanego silnika.



Rys. 4. Przykłady pozyskanych, nieprzetworzonych danych przebiegów napięcia oraz natężenia prądu elektrycznego, zarejestrowane za pomocą skonfigurowanej aparatury



Rys. 5. Termograficzny widok obudowy silnika elektrycznego

Im dłuższy był czas rejestracji próbki w stanie ustalonym, tym dokładniej zniekształcenia oraz zakłócenia były redukowane z końcowej wartości obliczonej mocy- i tym lepszą jakość posiadały uzyskane wyniki. Czas rejestracji głównie wpływał na możliwość korekcji identyfikacji wartości określonej numerycznie za pomocą szybkiej transformacji Fouriera (FFT). Dodatkowo, im dłuższy czas rejestracji próbki, tym dokładniej były wyznaczane wartości kątów przesunięć fazowych między przebiegami napięć i natężeń prądów. Z drugiej strony, maksymalny czas rejestracji próbki był ograniczony dostępnym zakresem pozycji kątowych wału silnika.

Temperatura uzwojenia była monitorowana pośrednio za pomocą kamery termowizyjnej FLIR E60. Wszystkie pomiary dokonywano w chwili, gdy wartość temperatury obudowy znajdowała się w zakresie 42-48°C (rys. 5).

#### 4. Obliczenia mocy

Poziom zniekształcenia, zakłóceń przebiegów napięcia oraz natężenia prądu elektrycznego jest oceniany za pomocą współczynnika zawartości harmonicznych THD, który zgodnie ze standardem IEEE 519-1992 jest określany jako stosunek wartości skutecznej składowych harmonicznych całkowitego zniekształcenia i zakłócenia oraz wartości skutecznej harmonicznej podstawowej; jest on wyrażony jako procent podstawowej harmonicznej [17].

Współczynniki zawartości harmonicznych przebiegu napięcia i natężenia prądu elektrycznego, zgodnie z najnowszą rewizją standardu [7, 8], są wyrażone za pomocą równań (1) oraz (2).

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_{krms}^2}}{V_{1rms}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{krms}^2}}{I_{1rms}} \cdot 100\% \quad (2)$$

$V_{krms}$  i  $I_{krms}$  oznaczają odpowiednio wartość skuteczną składowych harmonicznych zniekształceń i zakłóceń przebiegów napięcia i natężenia prądu elektrycznego,  $V_1$  oraz  $I_1$  oznaczają odpowiednio wartość skuteczną podstawowej składowej harmonicznej przebiegu napięcia i natężenia prądu elektrycznego.

W sieciach zasilania energetycznego, pracujących z częstotliwością 50/60 Hz, składowymi harmonicznymi, które mają najmocniejszy wpływ na wartości wyników pomiarów, są składowe rzędu 3-go, 5-go oraz 7-go [7]. Jednak, ponieważ podstawowe harmoniczne, liczba znaczących składowych harmonicznych oraz ich wartości zmieniały się w szerokim zakresie w zależności od warunków pracy silnika, ostatecznie zastosowano metodę wyznaczania całkowitych, łącznych współczynników zawartości harmonicznych i zakłóceń THD+N, w celu wyznaczenia wartości wskaźników zakłóceń  $THD_V$  i  $THD_I$  (3) [2, 14, 16, 22].

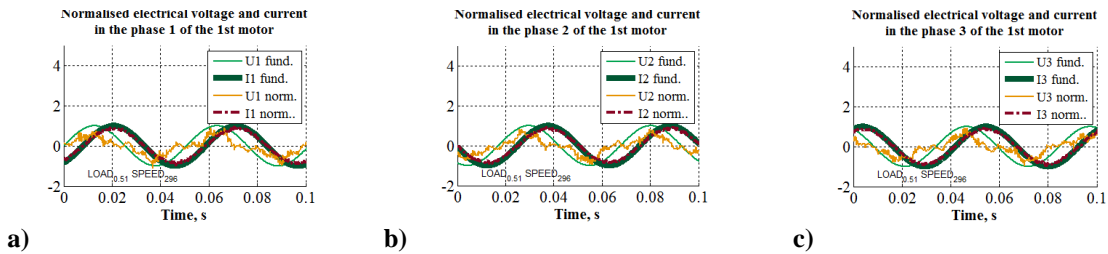
$$THD + N = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} (S_{harm} + S_{noise})_{rms}}{S_{rms}} \quad (3)$$

$S_{harm}$  oznacza wartość zniekształconego napięcia lub natężenia prądu elektrycznego,  $S_{noise}$  oznacza wartość zakłóconego napięcia lub natężenia prądu elektrycznego, a  $S_{rms}$  reprezentuje wartość skuteczną przebiegu napięcia lub natężenia prądu elektrycznego.

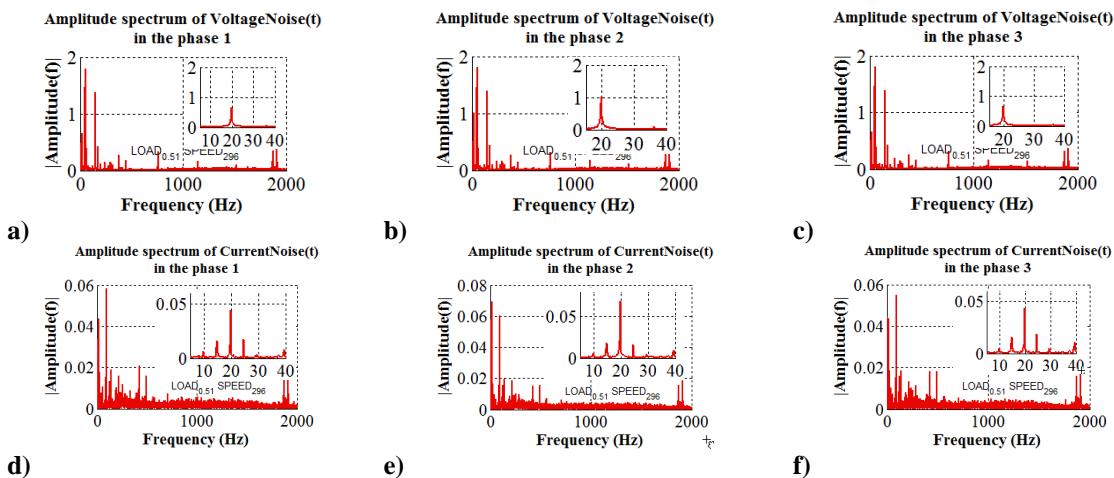
Aby wyznaczyć częstotliwości podstawowych harmonicznym przebiegów napięcia i natężenia prądu elektrycznego, oraz wyznaczyć wartości ich amplitud i ocenić jakość uzyskanych wyników, zastosowano szybką transformację Fouriera (FFT) oraz wzorcowe sygnały sinusoidalne. Wzorcowe sygnały były dostrajane do analizowanych przebiegów i wyodrębniane z zarejestrowanych danych (4), oraz służyły do określania indeksów, od których zaczynały się próbki mierzonych wielkości. Były również stosowane do określania wartości przesunięć fazowych między przebiegami napięcia i natężenia prądu. Ponadto, jeśli było to konieczne, wzorce były stosowane do korygowania wartości częstotliwości podstawowych składowych harmonicznym, identyfikowanych za pomocą szybkiej transformacji Fouriera. Przebiegi mierzonych parametrów, z których wyodrębniono wzorcowe sygnały sinusoidalne, stawały się przebiegami całkowitego zniekształcenia i zakłócenia mierzonych wielkości (5). Wypadkowe i znormalizowane przebiegi zniekształcenia, zakłócenia oraz podstawowych składowych harmonicznym przedstawia rys. 6.

$$S_1 = S - S_p \quad (4)$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} S_{harm} + S_{noise} = S - S_1 \quad (5)$$

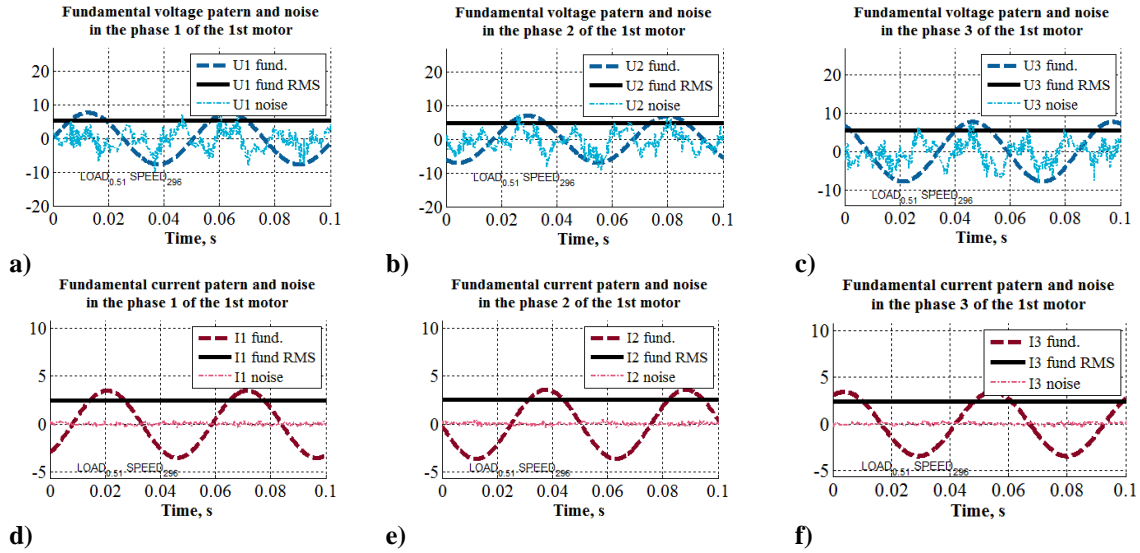


Rys. 6. Znormalizowane przebiegi napięcia i natężenia prądu elektrycznego oraz wzorcowe sygnały sinusoidalne ich podstawowych składowych harmonicznym w każdej fazie pierwszego silnika robota



Rys. 7. Analizy częstotliwościowe przebiegów napięć i natężeń prądów elektrycznych. W górnych prawych narożnikach są widoczne zredukowane, podstawowe składowe harmonicznym

Przykłady analizy częstotliwościowej przebiegów napięć i natężeń prądów elektrycznych, zarejestrowanych w niskich zakresach warunków pracy silnika elektrycznego, są przedstawione na rys. 7. Na podstawie wykresów z rys. 6 i rys. 7 zostały wyznaczone wartości skuteczne przebiegów całkowitych zniekształceń oraz zakłóceń, były identyfikowane częstotliwości oraz amplitudy podstawowych składowych harmonicznnych, a także była oceniana ich jakość. Przykłady relacji między przebiegami zniekształceń, zakłóceń i podstawowych składowych harmonicznnych przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Przykłady porównania przebiegów zniekształcenia, zakłócenia oraz podstawowych składowych harmonicznnych, wyznaczonych w niskich zakresach warunków pracy

Elektryczna moc czynna w każdej fazie silnika, mierzona za pomocą metody 3V3A/trzy-napięcia trzy-prądy [23], stosowanej w układach trójfazowych, mierzonych międzyfazowo, w niezbalansowanych i niesinusoidalnych przypadkach, została wyrażona za pomocą równań (6), (7) i (8) [8].

$$P_A = V_A \cdot I_A \cdot PF_{True A} \quad (6)$$

$$P_B = V_B \cdot I_B \cdot PF_{True B} \quad (7)$$

$$P_C = V_C \cdot I_C \cdot PF_{True C} \quad (8)$$

$V_A$ ,  $V_B$  i  $V_C$  oznaczają odpowiednio wartość skuteczną napięcia elektrycznego w fazie A, B i C;  $I_A$ ,  $I_B$  i  $I_C$  oznaczają odpowiednio wartość skuteczną natężenia prądu elektrycznego w fazach A, B i C;  $P_A$ ,  $P_B$  i  $P_C$  oznaczają odpowiednio elektryczną moc czynną w fazach A, B i C;  $PF_{true}$  oznacza rzeczywisty współczynnik mocy (9), składający się z fazowego współczynnika mocy  $PF_{displ}$  (10), oraz współczynnika mocy zniekształceń  $PF_{dist}$  (11) [7, 8].

$$PF_{true} = PF_{displ} \cdot PF_{dist} \quad (9)$$

$$PF_{displ} = \cos(\delta - \theta) \quad (10)$$

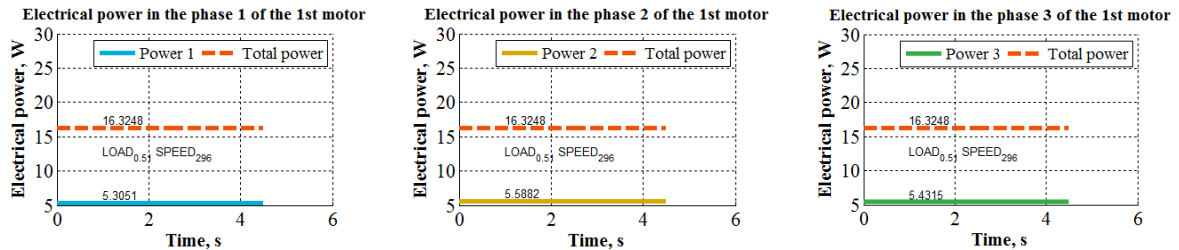
$$PF_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_V/100)^2} \cdot \sqrt{1 + (THD_I/100)^2}} \quad (11)$$

gdzie  $\delta$  i  $\theta$  oznaczają kąt przesunięcia fazowego przebiegów odpowiednio napięcia i natężenia prądu elektrycznego, natomiast  $THD_V$  i  $THD_I$  oznaczają współczynniki zawartości

harmonicznych zniekształcenia oraz zakłócenia przebiegów odpowiednio napięcia i natężenia prądu elektrycznego.

Całkowita aktywna czynna moc elektryczna, przedstawiona na rys. 9, była obliczana za pomocą równania (12), między innymi stosowanego do systemów uzwojeń w układzie gwiazdy, dla których jest prawdziwa zależność  $I_A + I_B + I_C = 0$  [8].

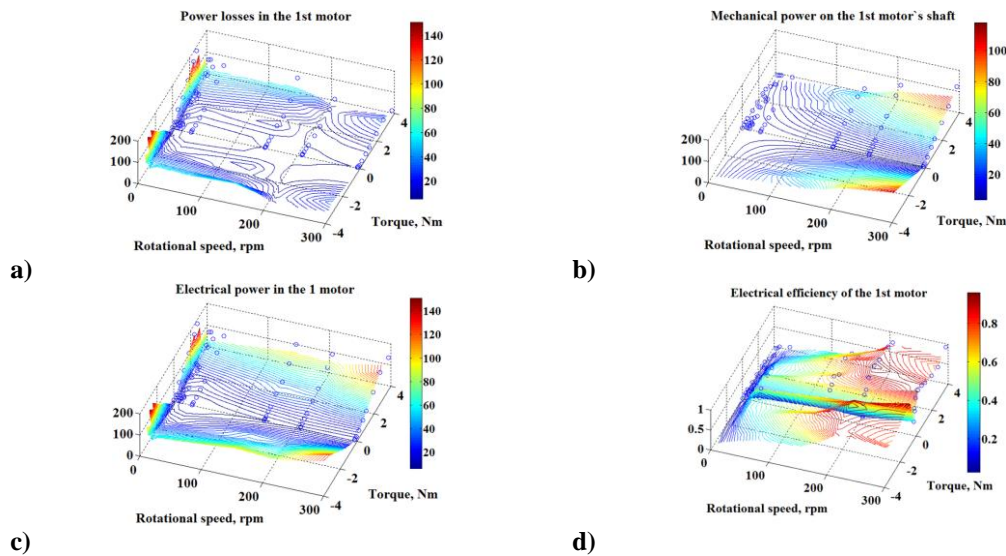
$$P_T = P_A + P_B + P_C \quad (12)$$



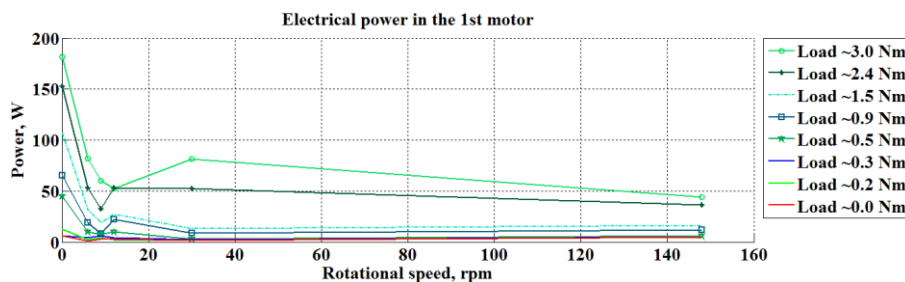
Rys. 9. Przykłady wyników całkowitej czynnej mocy elektrycznej w każdej fazie silnika, w niskich zakresach warunków pracy

Mapy strat mocy (13) (rys. 10a) były obliczane jako różnica między całkowitą czynną mocą elektryczną (12) (rys. 10c), mierzoną pośrednio za pomocą system NI PXIe-1075 i mocą mechaniczną (rys. 10b), mierzoną za pomocą hamulca histerezyowego MAGTROL HD-715.

$$P_L(\tau_1, q_1) = P_T(\tau_1, q_1) - P_M(\tau_1, q_1) \quad (13)$$



Rys. 10. Mapy mocy w niskich warunkach pracy



Rys. 11. Czynna moc elektryczna w pierwszym silniku, z widoczną, nagłą zmianą stanów elektrycznych w obszarze prędkości obrotowej równej 6 obr/min, oraz z widocznym uskokiem powyżej prędkości 6 obr/min

Mapa sprawności elektrotechnicznej została sporządzona za pomocą wyrażenia (14) (rys. 10d).

$$\eta(\tau_1, q_1) = \frac{P_M(\tau_1, q_1)}{P_T(\tau_1, q_1)} \quad (14)$$

Ze względu na swój kompleksowy zakres informacji, mapa mocy strat (rys. 10a) jest najważniejszą daną wejściową do modelowania strat energii elektrycznej, będących częścią całkowitego zużycia energii, ocenianego podczas analizy efektywności energetycznej procesów produkcyjnych, realizowanych przez badanego robota [20, 21, 24].

Przeprowadzone badania wykazały, że zmiana elektrycznych stanów podczas zmiany trybu pracy z napędowej na statyczną jest bardzo intensywna, a w przypadku badanego silnika jest realizowana w zakresie prędkości od 0 do 6 obr/min (rys. 11). Ponadto powyżej prędkości 6 obr/min jest widoczny wyraźny uskok, zarejestrowany w każdym przypadku obciążenia (rys. 11). Tego typu fakty muszą być uwzględnione przez autorów niniejszej pracy w rozwijanym modelu numerycznym badanego robota.

## 5. Wnioski

Skonfigurowania i przetestowana aparatura pomiarowa umożliwiła przeprowadzenie badań w sytuacji typowych, przemysłowych, technicznych ograniczeń oraz z wymaganą dokładnością, co wynikało z konieczności badania niskich zakresów warunków pracy i dokonywania pomiarów parametrów elektrycznych testowanego silnika bez odłączania go od oryginalnego układu sterowania. Aparatura umożliwiła rejestrację danych z częstotliwością, pozwalającą na analizę składowych harmonicznym mierzonych przebiegów do bardzo wysokich częstotliwości oraz na monitorowanie pozycji wałów silnika z bardzo dużą dokładnością. Takie rozwiązanie można porównać do pracy sześciu analizatorów mocy z dodatkową funkcją dekodowania cyfrowych danych z wartościami parametrów kinematycznych wałów silników.

Analiza częstotliwościowa wykazała że zastosowanie wzorcowych sygnałów sinusoidalnych nie wyodrębniło w całości podstawowych składowych harmonicznym z przebiegów zniekształcenia oraz zakłócenia. Przyczyniło się to w konsekwencji do zwiększenia niepewności pomiaru oraz pogorszyło jakość wyników na etapie przetwarzania danych. Niemniej jednak uzyskany ostatecznie poziom redukcji podstawowych harmonicznym nie wpływał znacząco na zmiany wyników całkowitej mocy w przypadku coraz lepszych redukcji. Pomimo tego przed dalszymi badaniami efektywności energetycznej jest wskazane dokonanie oceny jakości zastosowania filtra środkowozaporowego w celu filtrowania podstawowych składowych harmonicznym i porównanie uzyskanych wyników z zastosowanym w pracy rozwiązaniem.

Badania niskich zakresów warunków pracy wykazały, że elektryczne stany, występujące między trybem napędowym oraz trybem pracy statycznej, zmieniają się bardzo intensywnie, a w przypadku badanego silnika występują w zakresie prędkości między 0 i 6 obr/min, powyżej której dodatkowo jest widoczny wyraźny uskok, zarejestrowany w każdym przypadku obciążenia.

Najbliższy zakres prędkości 6 obr/min wymaga jeszcze dokładniejszego zbadania w celu poprawy rozdzielczości uzyskanych wyników a także wskazane jest określenie całkowitej niepewności pomiarowej.



Prezentowana praca ma znaczenia poznawcze, a jej wyniki wyjaśniają, w jakim kierunku należy skoncentrować realizację dalszych badań. Ponieważ robot przemysłowy jest przykładem silnie nieliniowego systemu, dlatego w warunkach typowej eksploatacji należy się spodziewać wyższego stopnia niezbalansowania warunków pracy oraz wyższych nieliniowości obciążeń niż te, które zastosowano i które występowały w niniejszej pracy.

**Podziękowania: Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/03/B/ST8/04631.**

## Literatura

1. Akagi H, Watanabe E H, Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning 2017; p. 27.
2. Audio Precision. More about THD+N and THD 2013.
3. Belda K, Burget P. Physical Modelling of Energy Consumption of Industrial Articulated Robots. 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2015).
4. Brossog P M, Kohl J, Merhof J, Spreng S, Franke J. Energy Consumption and Dynamic Behavior Analysis of a Six-axis Industrial Robot in an Assembly System. CIRP 2014; 23: 131-136.
5. Bucci G, Ciancetta F, Fiorucci E, Ometto A. Survey about classical and innovative definitions of the power quantities under nonsinusoidal conditions. International Journal of Emerging Electric Power Systems 2017; 18(3).
6. Fluke 434-II/435-II/437-II. Users Manual 2012. Rev.1 06/12.
7. Grady W M, Gilleskie R J. Harmonics and how they relate to power factor. Proc. of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA'93), San Diego, CA (1993), p. 3, 4, 10.
8. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE Std 1459TM-2010; (Revision of IEEE Std 1459-2000) p. 3, 8, 12, 16.
9. Liu A, Liu H, Yao B, Xu W, Yang M. Energy consumption modeling of industrial robot based on simulated power data and parameter identification. Advances in Mechanical Engineering 2018; Vol. 10(5): 1–11.
10. Mohammeda A, Schmidt B, Wang L, Gaoc L. Minimizing Energy Consumption for Robot Arm Movement. Procedia CIRP 2014; 25: 400-405.
11. Paesa K, Dewulfa W, Elsta K V, Kellensb K, Slaetsa P. Energy efficient trajectories for an industrial ABB robot. CIRP 2014; 15: 105-110.
12. Park O S, Park J W, Bae C B, Kim J M. A Dead Time Compensation Algorithm of Independent Multi-Phase PMSM with Three- Dimensional Space Vector Control. Journal of Power Electronics 2013; Vol. 13, No. 1, p. 1.
13. Płaczek M, Piszczek Ł. Testing of an industrial robot's accuracy and repeatability in off and online environment. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2018; 20 (3): 455–464, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.3.15>.
14. Rane. Audio specifications 2000; p. 2.
15. Revuelta P S, Litrán S P, Thomas J P. Active Power Line Conditioners: Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality 2015; p. 25.
16. Rhode&Schwarz. Harmonic Distortion Measurements in the Presence of Noise Application Note. June 17, 2011-0e.
17. Siemens. Harmonics in power systems, causes, effects and control 2013; p. 3.

18. Stevanović D, Petković P. A single-point method based on distortion power for the detection of harmonic sources in a power system. *Metrology and measurement systems* 2014, Vol. XXI (2014), No. 1, pp. 3–14.
19. Szubert K. Power Measurement when waveform are distorted. *Jakosc i uzytkowanie energii elektrycznej – Electrical Power Quality and Utilisation* 1996; 2(2);
20. Świder J, Zbilski A. Modelling of the power of losses in the Fanuc AM100iB robot drives and in its power electronic systems. *Modelowanie inzynierskie – Engineering modeling* 2013; 17(48): 138-142.
21. Świder J, Zbilski A. The modelling and analysis of a partial loads in the Fanuc AM100iB robot joints. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies* 2013; Vol. V, No. 2 89-96.
22. Texas Instruments. *Digital Audio Measurements* 2001; SLAA114: p. 10.
23. Yokogawa. *WT310/WT310HC/WT330 Digital Power Meter Getting Started Guide* 2013; p. 2-25.
24. Zbilski A. *Doctoral dissertation: Method for energy intensity analysis of manipulation and transportation processes* 2014.