

## Wyznaczanie parametrów składowych przejściowych momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego klatkowego dla stanu zwarcia dwufazowego

**Streszczenie.** W pracy zaprezentowano wyznaczanie parametrów składowych przejściowych momentu elektromagnetycznego dla silnika indukcyjnego klatkowego podczas stanu zwarcia dwufazowego przy warunkach znamionowego obciążenia. W artykule zaprezentowana została analiza momentu na podstawie analitycznego rozwiązania równań ruchu. Przedstawienie zostało podejście bazujące na wyrażeniu zależności występujących w silniku zjawisk dla zadanych parametrów maszyny indukcyjnej o mocy 1.5kW. W tym celu wymagane jest przyjęcie wartości reaktancji (własnych oraz wzajemnych) i rezystancji obwodów silnika.

**Abstract.** The paper presents the determination of the parameters of transient components of electromagnetic torque for squirrel cage induction motor during two-phase short-circuit state at nominal load conditions. It presents an analysis of torque based on analytical solution of the equations of motion. The calculations were made for the induction motor with a power 1.5kW. This requires the adoption of reactance and resistance for given motor. (**Determination of parameters components of electromagnetic torque for squirrel-cage induction motor for two-phase short circuit condition**).

**Słowa kluczowe:** Silnik asynchroniczny, Zwarcie dwufazowe, składowe przejściowe momentu elektromagnetycznego.

**Keywords:** Asynchronous motor, Two-phase short circuit, transient components of electromagnetic torque.

### Wprowadzenie

Stan zwarcia dwufazowego w maszynie asynchronicznej klatkowej występuje zazwyczaj w sytuacji uszkodzenia izolacji uzwojenia stojana przez przebicie do fazy sąsiedniej i jest ono co do miejsca występowania losowe. Losowość występowania tego zjawiska zależy od wielu czynników takich jak: anomalie występujące w izolacji uzwojenia silnika (wtrącenia, zadry), warunki eksploatacji (stany nieustalone i ich częstotliwość występowania, temperatura pracy izolacji silnika, naprężenia mechaniczne).

W pracy zaprezentowano metodę wyznaczania przebiegu momentu elektromagnetycznego na podstawie parametrów składowych przejściowych momentu elektromagnetycznego dla silnika indukcyjnego klatkowego podczas stanu zwarcia dwufazowego przy warunkach znamionowego obciążenia.

W artykule przedstawione zostały charakterystyki składowej stałej, składowych aperiodycznych i periodycznych. W tym celu analizie poddana została maszyna indukcyjna o mocy 1.5kW. Jednak przedstawiona metoda jest uniwersalna i można przy jej użyciu wyznaczać przebiegi maszyn dużych i średnich mocy podczas zwarcia dwufazowego. Metoda składowych przejściowych wykorzystywana do wyznaczania momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego dla stanu zwarcia dwufazowego wymaga uwzględnienia wszystkich dziewięciu składowych (jedna składowa stała, dwóch aperiodycznych oraz sześciu składowych periodycznych).

Przy analizie zwarcia trójfazowego oraz nawrotu składowych jest mniej.

W tego typu zwarciach istotne są zwłaszcza pierwsze okresy udarów prądów i momentów, które szczególnie są niebezpieczne dla całego układu napędowego i uszkodzeń mechanicznych sprzężenia wałów mogących doprowadzić do ścięcia wpustów, a w skrajnym przypadku ukręcenia wału lub innych mechanicznych uszkodzeń zwłaszcza przy dużym momencie bezwładności.

Od strony elektrycznej zwarcie dwufazowe jest niebezpieczne dla strony zasilającej. W pierwszych okresach powinno nastąpić wyłączenie maszyny, a przy źle dobranych zabezpieczeniach jest to niebezpieczne dla układu zasilającego.

### Parametry składowych przejściowych momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego klatkowego dla stanu zwarcia dwufazowego

Przy zwarciu dwufazowym silnika występuje dziewięć składowych momentu elektromagnetycznego, zgodnie ze wzorem (1):

$$T_e = T_{e0} + \sum_{k=1}^n T_{ek} e^{\rho_k t} + \sum_{i=3}^m T_{ei} e^{\rho_i t} \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

gdzie:  $T_e$  – moment elektromagnetyczny,  $T_{e0}$  – składowa ustalona (stała) momentu elektromagnetycznego,  $T_{ek}$ ,  $T_{ei}$  – amplitudy składowych nieustalonych momentu elektromagnetycznego,  $n$  – liczba składowych aperiodycznych momentu dla zwarcia dwufazowego wynosi 2,  $m$  – liczba aperiodycznie okresowo-zmiennych momentu wynosi 6 ( $m=8$ ),  $\rho_k$ ,  $\rho_i$  – współczynniki tłumienia przebiegów aperiodycznych,  $f_i$  – częstotliwość przebiegów okresowo-zmiennych,  $\varphi_i$  – faza początkowa przebiegów okresowo-zmiennych,  $t$  – czas.

Moment stały  $T_{e0}$  uzyskano przy napięciu znamionowym i wartości poślizgu silnika w chwili przed zwarcie dwufazowym.

Moment elektromagnetyczny ustalony można obliczyć ze wzoru (2):

$$T_{e0} = 2 \frac{p}{\omega_s} U_f^2 \frac{1-\sigma}{R_{st}} \cdot \frac{s \alpha_r' \alpha_s'}{(\alpha_r' \alpha_s' \sigma - s)^2 + (\alpha_r' + s \alpha_s')^2} \quad (2)$$

gdzie:  $p$  – liczba par biegunów,  $U_f$  – wartość skuteczna napięcia zasilającego, fazowego,  $\omega_s = 2\pi f_s$  – pulsacja synchroniczna, Dla poślizgu  $s=s_n$  jest to moment znamionowy silnika, natomiast dla  $s=1$  – ustalony moment rozruchowy.

- współczynniki tłumienia uzwojenia stojana i wirnika, równanie (3),

$$\alpha_s = \frac{R_{st}}{X_{ss}}; \quad \alpha_r = \frac{R_{rt}}{X_{rr}}; \quad (3)$$

- współczynniki rozproszenia stojana i wirnika równanie (4),

$$k_s = \frac{X_m}{X_{ss}}; \quad k_r = \frac{X_m}{X_{rr}} \quad (4)$$

- reaktancje całkowite stojana i wirnika, równanie (5),

$$X_{ss} = X_s + X_m$$

$$X_{rr} = X_{r1} + X_m \quad (5)$$

- całkowity współczynnik rozproszenia, równanie (6),

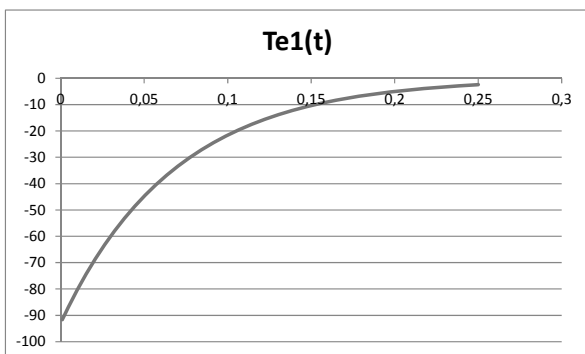
$$\sigma = 1 - k_s k_r = 1 - \frac{X_m^2}{X_{ss} X_{rr}} \quad (6)$$

- współczynniki tłumienia uzwojenia stojana i wirnika uwzględniające całkowity współczynnik rozproszenia, równanie (7).

$$\alpha'_s = \frac{\alpha_s}{\sigma} = \frac{R_{st}}{\sigma X_{ss}}; \quad \alpha'_r = \frac{\alpha_r}{\sigma} = \frac{R_{rt}}{\sigma X_{rr}} \quad (7)$$

Do obliczeń współczynników  $T_{e1}$ ,  $T_{e2}$ ,  $T_{e3}$ ,  $T_{e4}$ ,  $T_{e5}$ ,  $T_{e6}$ ,  $T_{e7}$ ,  $T_{e8}$  wykorzystany został ustalony moment elektromagnetyczny silnika  $T_{e0}$ , przy wartości poślizgu w chwili zwarcia. Przebieg dwóch pierwszych składowych aperiodycznych momentu elektromagnetycznego  $T_{e1}(t)$  oraz  $T_{e2}(t)$  dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego przedstawiony został na Rys.1 i Rys.2. Składowe te nie są okresowe i po czasie 0.25 sekundy zanikają do wartości stosunkowo niewielkiej.

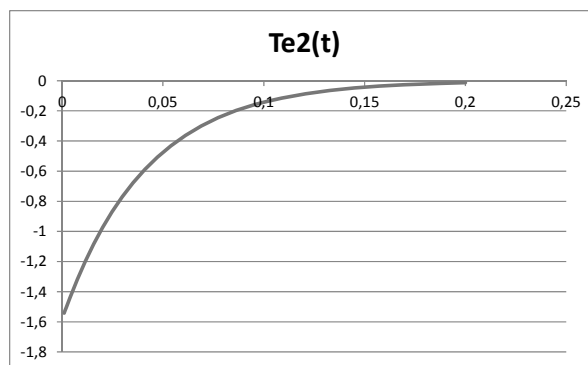
Przebieg składowej  $T_{e3}(t)$  dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego przedstawiony został na Rys.3. Składowa ta wdaje się tylko składową aperiodyczną jednak jest składową aperiodyczną okresową o częstotliwości poniżej 0.3 Hz. Aperiodyczność i duże tłumienie powoduje jej szybkie zanikanie. Jej udział w całkowitym przebiegu momentu w pierwszej chwili momentu nie może zostać pominięty.



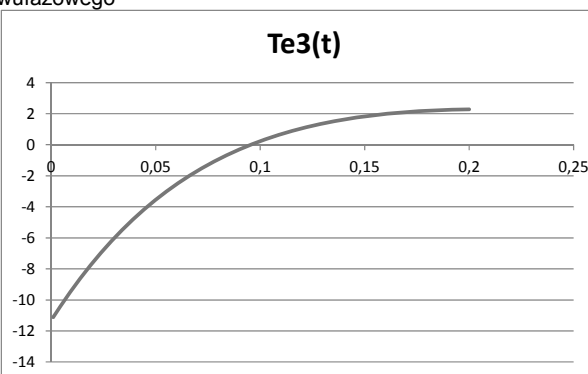
Rys.1. Przebieg pierwszej składowej aperiodycznej momentu elektromagnetycznego dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego

Przebiegi składowych aperiodycznych okresowych  $T_{e4}(t)$ ,  $T_{e5}(t)$ ,  $T_{e6}(t)$ ,  $T_{e7}(t)$  i  $T_{e8}(t)$  momentu elektromagnetycznego dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego zostały zaprezentowane na rysunku Rys.4, Rys.5, Rys.6, Rys.7 i Rys.8. Należy przy tym zauważyć, że składowa  $T_{e6}(t)$  i  $T_{e7}(t)$  mają częstotliwość w granicach podwójnej częstotliwości składowych  $T_{e4}(t)$  i  $T_{e5}(t)$  i  $T_{e8}(t)$ . Każda ze składowych okresowych ma różną fazę w przebiegu częstotliwości.

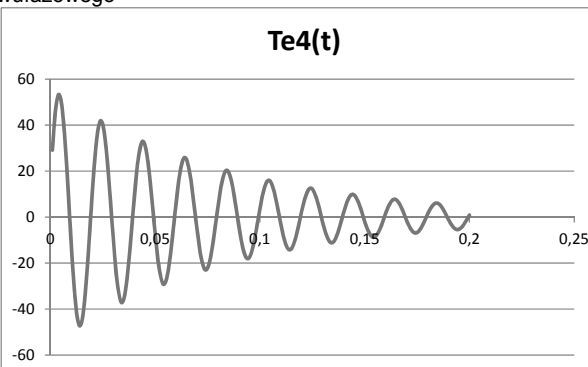
Sumaryczny przebieg udaru momentu elektromagnetycznego dla zwarcia dwufazowego przedstawiony został na Rys.9. Rysunek ten stanowi złożenie poszczególnych składowych zgodnie ze wzorem (1).



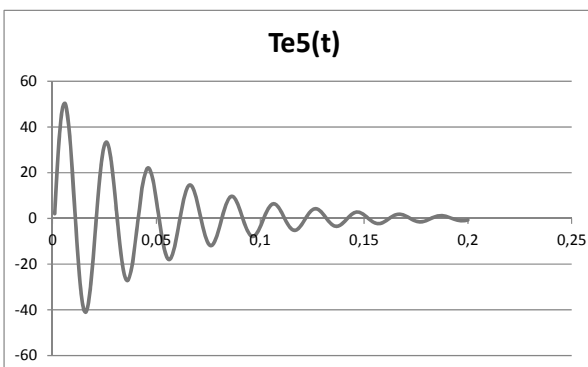
Rys.2. Przebieg składowej  $T_{e2}(t)$  aperiodycznej momentu elektromagnetycznego dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego



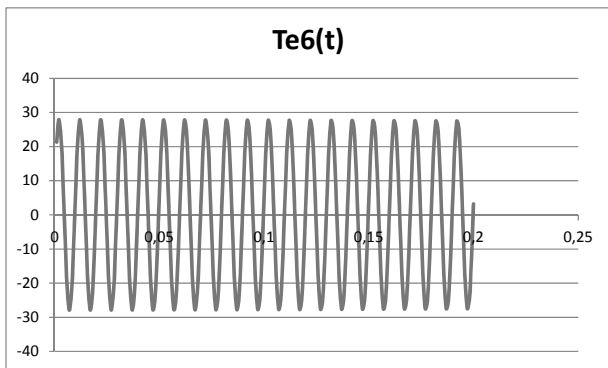
Rys.3. Przebieg składowej  $T_{e3}(t)$  aperiodycznej okresowej momentu elektromagnetycznego dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego



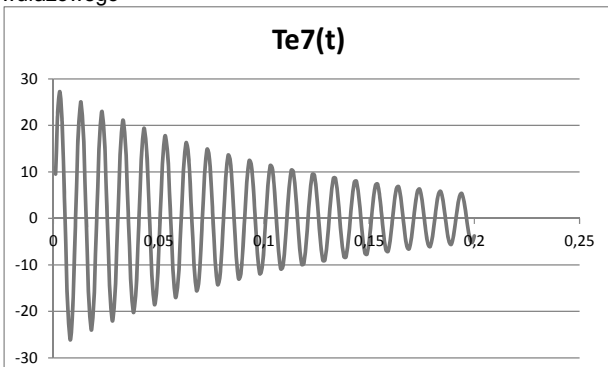
Rys.4. Przebieg składowej  $T_{e4}(t)$  aperiodycznej okresowej momentu elektromagnetycznego dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego



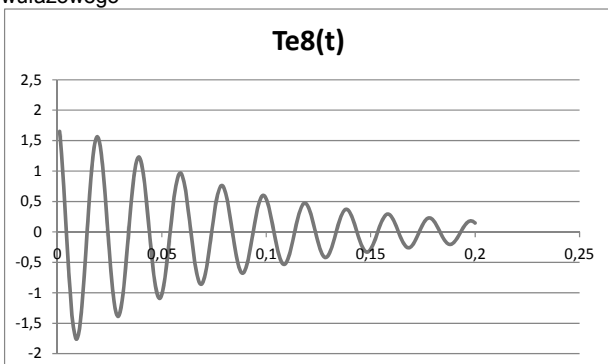
Rys.5. Przebieg składowej  $T_{e5}(t)$  aperiodycznej okresowej momentu elektromagnetycznego dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego



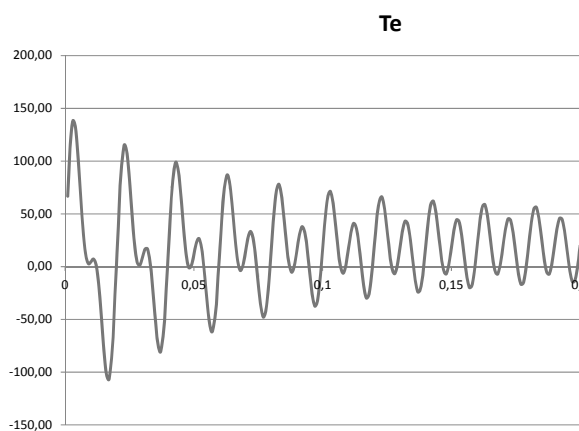
Rys.6. Przebieg składowej  $T_{e6}(t)$  aperiodycznej okresowej momentu elektromagnetycznego dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego



Rys.7. Przebieg składowej  $T_{e7}(t)$  aperiodycznej okresowej momentu elektromagnetycznego dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego



Rys.8. Przebieg składowej  $T_{e8}(t)$  aperiodycznej okresowej momentu elektromagnetycznego dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego



Rys.9. Przebieg udaru momentu elektromagnetycznego dla pierwszych okresów zwarcia dwufazowego. Moment podawany jest w [Nm], czas w [s].

## Podsumowanie

W artykule przedstawione zostały charakterystyki składowej stałej, składowych aperiodycznych i periodycznych. Metoda składowych przejściowych wykorzystywana do wyznaczania momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego dla stanu zwarcia dwufazowego wymaga uwzględnienia wszystkich dziewięciu składowych (jedna składowa stała, dwóch aperiodycznych oraz sześciu składowych periodycznych). W obliczeniach niezbędne jest obliczenie lub pozyskanie na drodze eksperymentalnej wartości reaktancji (własnych oraz wzajemnych) i rezystancji obwodów silnika. Parametry te ściśle wpływają na przebieg w pierwszych chwilach zwarcia dwufazowego.

## LITERATURA

- [1] Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока, Л.: Энергия, 1980.
- [2] Arkan M., Kostic-Perovic D., Unsworth P.J., Modelling and simulation of induction motors with inter-turn faults for diagnostics, Electric Power Systems Research 75, 2005.
- [3] Thomsen J., Carsten S. Kallesoe, Stator fault modelling of induction motors International Symposium on Power Electronics, Electrical drives, Automation and motion, Speedam 2006.
- [4] Rosołowski E., Wieczorek M., Modelowanie silnika indukcyjnego do symulacji zwarć wewnętrznych, X Konferencja Naukowo – Techniczna Petro Eltech 2009, Soczewka, 20-22 maja 2009.
- [5] ANTAL, L., ANTAL, M., ZAWILAK, J., Weryfikacja modelu obliczeniowego silnika klatkowego pomiarami statycznych i dynamicznych stanów pracy, Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych, PEMINE. Ustroń, 19-21 maja 2004, Zeszyty Problemowe BOBRME Komel, nr 69 2004, s. 99-104
- [6] MELERO, M.G.; CABANAS, M.F.; ROJAS, C.; ORCAJO, G.A.; CANO, J.M.; SOLARES, J., Study of an induction motor working under stator winding inter-turn short circuit condition, SDEMPED 2003. 4th IEEE International Symposium on Power Electronics and Drives, 24-26 Aug. 2003 pp. 52 - 57.
- [7] Korzeniewska E., Duraj A., Krawczyk A.; Detection of local changes in resistance by means of data mining algorithms, Przegląd Elektrotechniczny, 2014 R.90, nr 12, s. 229-232.
- [8] Korzeniewska E., Jakubas A.: Pomiar rezystancji powierzchniowej warstw cienkich o dowolnych kształtach wytworzonych na podłożach elastycznych. Przegląd Elektrotechniczny, 2014, rocznik 90, nr 12, s. 233-236.

**Autorzy:** dr inż. Paweł Drzymała, Politechnika Łódzka, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [pawel.drzymała@p.lodz.pl](mailto:pawel.drzymała@p.lodz.pl); dr inż. Henryk Welfle, Politechnika Łódzka, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [henryk.welfle@p.lodz.pl](mailto:henryk.welfle@p.lodz.pl).