

Uwarunkowania czasowe wyznaczania napięcia zwarcia silników klatkowych metodą bez mechanicznej blokady wirnika

Artykuł prezentuje ograniczenia czasowe jakie występują podczas wyznaczania napięcia zwarcia silników klatkowych metodą bez mechanicznej blokady wirnika. Oprócz symulacji komputerowych w artykule są przedstawione wyniki badań przeprowadzonych w laboratoriach Centrum EMAG wykonane dla grupy silników małej mocy.

1. WSTĘP

W procesie produkcji silników indukcyjnych ważne jest testowanie podzespołów i wyrobów finalnych. Jednym z testów gotowego wyrobu jakim jest silnik asynchroniczny klatkowy jest pomiar napięcia zwarcia, który daje informacje o impedancji silnika w czasie rozruchu przy bezpośrednim włączeniu do sieci zasilającej w chwili, kiedy wirnik silnika pozostaje jeszcze nieruchomy. Pomiar napięcia zwarcia z definicji polega na zasileniu silnika takim napięciem przemiennym o częstotliwości znamionowej silnika aby uzyskać prąd znamionowy silnika. Napięcie, przy którym przez silnik płynie prąd znamionowy przy nieruchomym wirniku jest napięciem zwarcia [1]. O ile dla silników średniej i dużej mocy napięcie zwarcia osiąga wartości małe, rzędu kilkunastu procent napięcia znamionowego, o tyle w silnikach małej mocy, poniżej 1 kW wartości napięć zwarcia mogą stanowić nawet kilkadziesiąt procent napięcia znamionowego. Przy tak dużym napięciu wirnik silnika nie pozostaje już nieruchomy, ale zaczyna wirować, wprowadzając błąd pomiaru napięcia zwarcia. Jednym ze sposobów wyeliminowania ruchu wirnika jest jego mechaniczna blokada. Jednak na linii produkcyjnej operacja mechanicznej blokady wirnika jest kłopotliwa, wydłuża czas całej operacji i dlatego poszukuje się innych, szybszych metod pomiaru napięcia zwarcia bez potrzeby mechanicznej blokady wirnika.

W artykule jest opisana metoda wyznaczania napięcia zwarcia bez mechanicznej blokady wirnika oraz wynikające stąd ograniczenia czasowe na czas wykonania pomiaru.

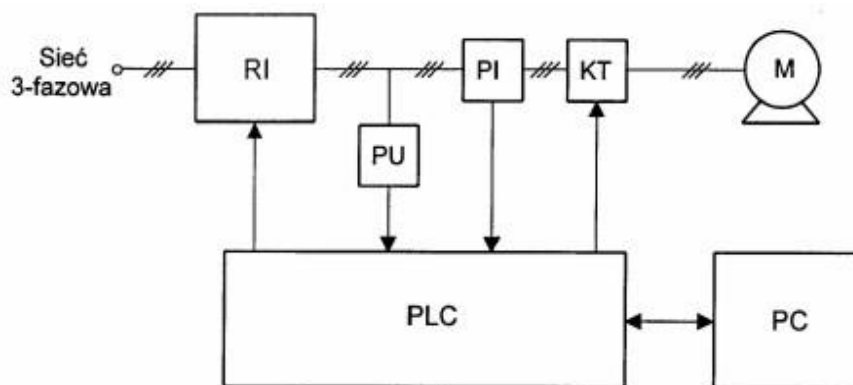
2. POMIAR NAPIĘCIA ZWARCIA

Pomiar napięcia zwarcia jest wykonywany, jak już wspomniano we wstępie, w celu określenia impedancji silnika. Napięcie zwarcia często podaje się w odniesieniu do napięcia znamionowego. Odwrotność napięcia zwarcia podanego w odniesieniu do napięcia znamionowego jest w przybliżeniu krotnością prądu rozruchowego przy bezpośrednim rozruchu silnika z sieci.

Metoda pomiaru napięcia zwarcia bez mechanicznej blokady wirnika została zastrzeżona patentem [2], a którą można scharakteryzować w następujący sposób cyt.:

„Sposób pomiaru napięcia zwarcia silników indukcyjnych, znamienny tym, że prąd badanego silnika załącza się chwilowo przy kilku wartościach napięcia zasilającego tak, aby odczytać ustaloną wartość prądu zanim wystąpi ruch obrotowy wirnika, a następnie z odczytanych wartości napięć i prądów silnika wyznacza się równanie krzywej aproksymującej, z której oblicza się napięcie zwarcia przy prądzie znamionowym I_n ”, koniec cyt.

Powyższa metoda pomiaru napięcia zwarcia została wykorzystana przy konstrukcji Komputerowego Sys-



Rys. 1. Schemat układu wyznaczania napięcia zwarcia

temu Testowania Silników jedno- i trójfazowych w procesie produkcyjnym (KSTS) [3]. Powyższy system został wdrożony w Fabryce Silników Elektrycznych Besel w Brzegu i pracuje na linii produkcyjnej zakładu.

Opisana metoda wyznaczania napięcia zwarcia silników małej mocy testowanych na stanowisku KSTS bez mechanicznej blokady wirnika ma szansę dawać dobre rezultaty dzięki istnieniu momentu bezwładności wirnika. Wytworzony w silniku asynchronicznym, włączonym na spodziewane napięcie zwarcia, niezrównoważony moment elektromagnetyczny rozprędkuje wirnik do prędkości bliskiej prędkości synchronicznej w krótkim, aczkolwiek niezerowym czasie. Pomiaru napięcia zwarcia można dokonać w czasie, w którym prąd pobierany przez silnik pozostaje na wartości znamionowego prądu silnika. Na podstawie przeprowadzonych symulacji można stwierdzić, iż czas w jakim należy dokonać pomiaru napięcia zwarcia silnika ze swobodnym wirnikiem to około 1/4 czasu rozruchu silnika włączanego na spodziewane napięcie zwarcia [4].

3. SCHEMAT STANOWISKA POMIAROWEGO

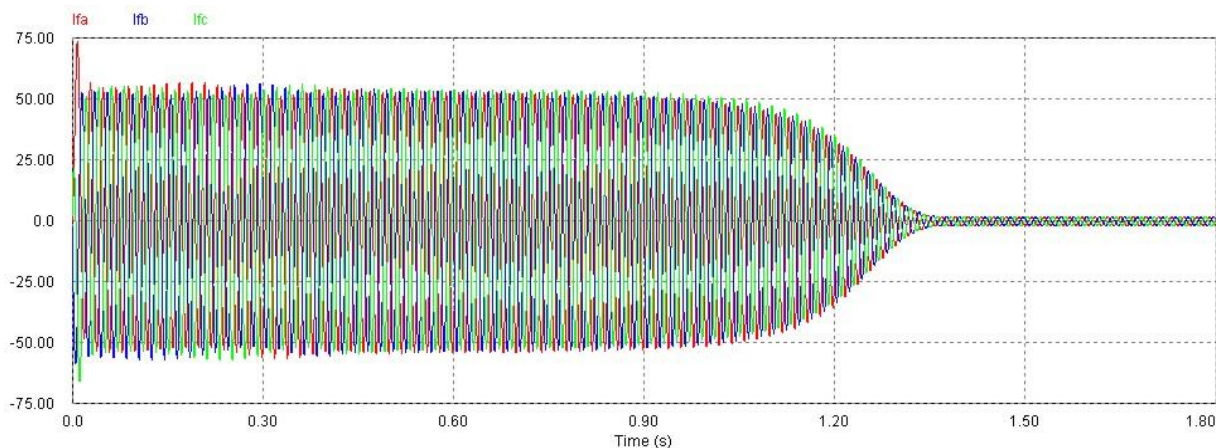
Schemat układu wyznaczania napięcia zwarcia zastosowany na stanowisku KSTS jest przedstawiony na rys. 1.

W układzie powyższym silnik M jest zasilany poprzez regulator indukcyjny RI sterowany ze sterownika programowalnego PLC. Sterownik PLC ustawia na regulatorze RI wartość nieco niższą od spodziewanego napięcia zwarcia. Informacja o ustawionym napięciu dociera do sterownika PLC poprzez przetworniki wartości skutecznej napięcia PU umieszczone w każdej fazie. Gdy wartość ustawionego napięcia jest już odpowiednia sterownik PLC załącza silnik poprzez klucz tyrystorowy KT. Prąd pobierany przez

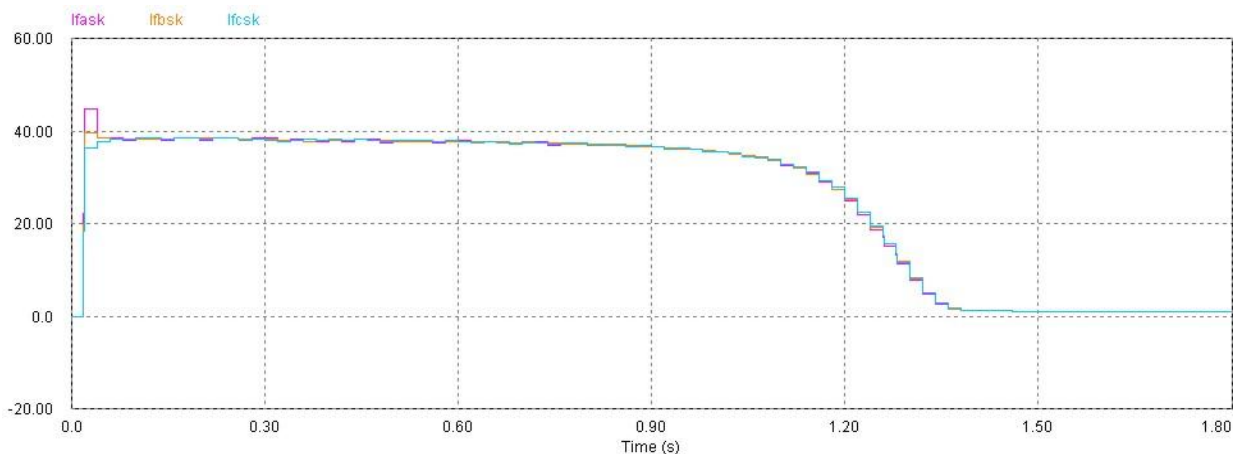
silnik mierzą przetworniki wartości skutecznej prądu PI umieszczone w każdej fazie. Sterownik PLC wymienia informacje o występującym w układzie prądzie i napięciu z komputerem PC. Następnie sterownik PLC otrzymuje z komputera PC informację o wartości napięcia jakie ma ustawić na regulatorze RI, które tym razem jest nieco wyższe od spodziewanego napięcia zwarcia. Następuje wyłączenie silnika kluczem KT i odczekanie aż silnik wybiegnie się zatrzyma. W tym czasie następuje ustawienie na regulatorze RI nowej wartości napięcia. Następuje załączenie silnika M na napięcie nieco wyższe od spodziewanego napięcia zwarcia. Dokonywany jest pomiar prądu pobieranego przez silnik i rzeczywistej wartości napięcia występującego na silniku. Pomiar rzeczywistej wartości napięcia występującego na silniku jest ważny, ponieważ ze względu na niezerową impedancję obwodu zasilania rzeczywiste napięcie zasilania silnika M jest nieco niższe od ustawionego na regulatorze RI w stanie bezprądowym o spadki napięcia wywołane prądem pobieranym przez silnik. Następnie wszystkie informacje sterownik PLC przesyła do komputera PC, w którym następuje wyznaczenie napięcia zwarcia na drodze aproksymacji.

4. UWARUNKOWANIA CZASOWE POMIARU NAPIĘCIA ZWARCIA

Silnik ze swobodnym wirnikiem włączony na spodziewane napięcie zwarcia rusza i zaczyna zwiększać prędkość obrotową wirnika. Dzięki momentowi bezwładności wirnika trwa to pewien czas, w którym należy wykonać pomiar prądów i napięć. Produkowane silniki charakteryzują się różną dynamiką rozruchu. W celu określenia wymaganego czasu pomiaru zostały przeprowadzone symulacje komputerowe rozruchu silników włączonych na napięcie zwarcia. Symulacje prowadzono za pomocą programu PSIM v.7.1.2 firmy Powersim Inc.



Rys. 2. Przebiegi czasowe prądów fazowych I_{fa} , I_{fb} , I_{fc} podczas rozruchu silnika o mocy 22 kW typu dSKg180L4 włączonego na napięcie zwarcia



Rys. 3. Przebiegi czasowe wartości skutecznych prądów fazowych I_{fask} , I_{fbsk} , I_{fcsk} silnika o mocy 22 kW typu dSKg180L4 włączonego na napięcie zwarcia

Na rys. 2. są przedstawione przebiegi czasowe prądów fazowych I_{fa} , I_{fb} , I_{fc} podczas rozruchu silnika 4-biegunowego o mocy 22 kW typu SKg180L4 włączonego na napięcie zwarcia. Analizując te przebiegi możemy określić, że czas rozruchu silnika włączonego na napięcie zwarcia wynosi 1,4 sekundy.

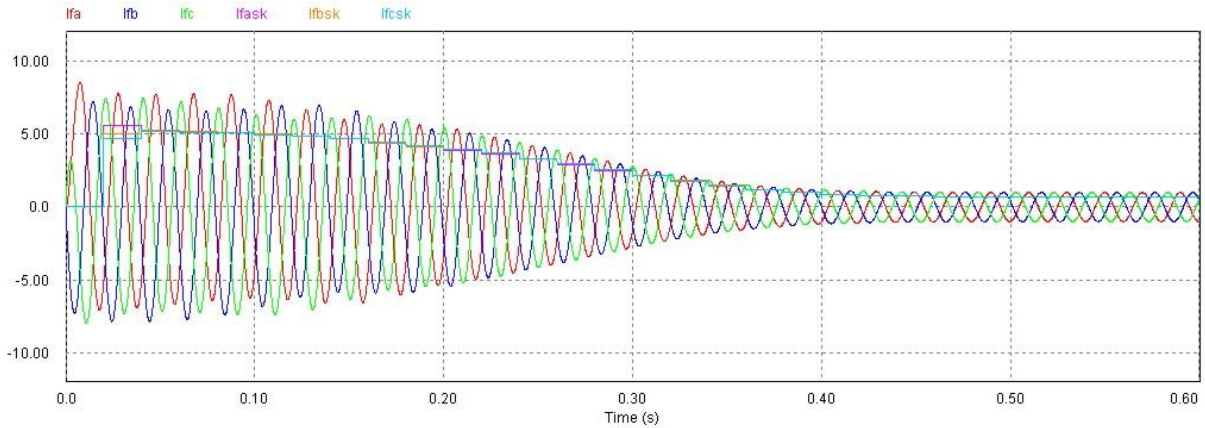
Na rys. 3. są przedstawione przebiegi czasowe wartości skutecznych prądów fazowych I_{fask} , I_{fbsk} , I_{fcsk} przedstawionych na rys. 2. Analiza tych przebiegów pozwala określić czas pomiaru napięcia zwarcia silnika. Przyjmując dopuszczalny błąd wyznaczania napięcia zwarcia równy 3% to pomiar należy wykonać w czasie poniżej 0,7 sekundy.

Na rys. 4. są przedstawione przebiegi czasowe prądów fazowych I_{fa} , I_{fb} , I_{fc} i ich wartości skutecznych I_{fask} , I_{fbsk} , I_{fcsk} podczas rozruchu silnika 4-biegunowego o mocy 2,2 kW typu ShR90x-4M włączonego na napięcie zwarcia. Analizując te przebiegi można określić czas rozruchu silnika włączonego na napięcie zwarcia, który w tym

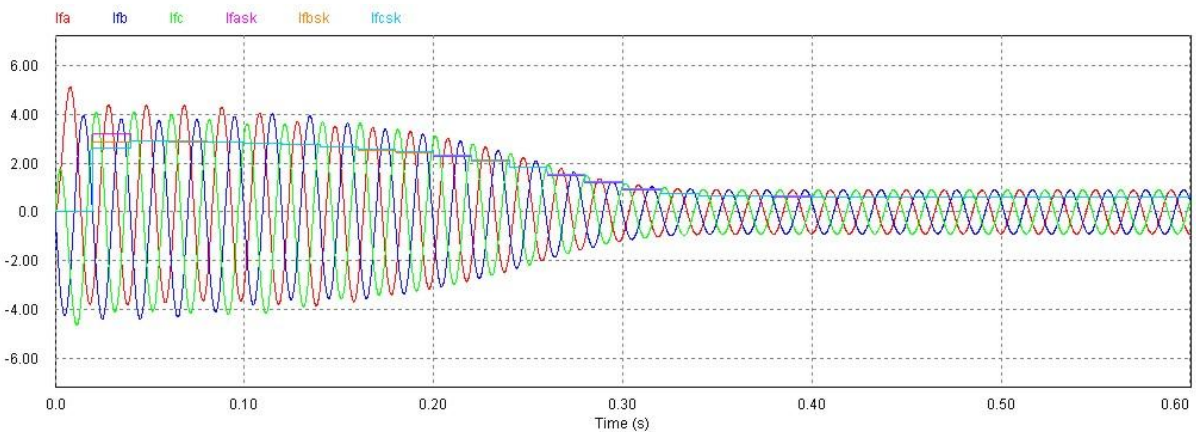
przypadku wynosi 0,45 sekundy. Przyjmując dopuszczalny błąd wyznaczania napięcia zwarcia równy 3% to pomiar należy wykonać w czasie poniżej 0,12 sekundy. Jest to już bardzo krótki czas pomiaru.

Na rys. 5. są przedstawione przebiegi czasowe prądów fazowych I_{fa} , I_{fb} , I_{fc} i ich wartości skutecznych I_{fask} , I_{fbsk} , I_{fcsk} podczas rozruchu silnika 4-biegunowego o mocy 1,1 kW typu Sh80x-4C włączonego na napięcie zwarcia. Analizując te przebiegi można określić, że czas rozruchu silnika włączonego na napięcie zwarcia wynosi 0,38 sekundy. Przyjmując dopuszczalny błąd wyznaczania napięcia zwarcia równy 3% to pomiar należy wykonać w czasie poniżej 0,1 sekundy.

Najostrzejsze kryterium czasowe wyznaczania napięcia zwarcia stawiają silniki charakteryzujące się dużą dynamiką rozruchu i niską prędkością znamionową. Ale w jaki sposób wytypować takie typy silników spośród produkowanych?. W katalogach producentów silników zamieszczają dwie informacje, które są



Rys. 4. Przebiegi czasowe prądów fazowych I_{fa} , I_{fb} , I_{fc} oraz wartości skutecznych prądów fazowych I_{fask} , I_{fbask} , I_{fcask} silnika o mocy 2,2 kW typu ShR90x-4M włączanego na napięcie zwarcia



Rys. 5. Przebiegi czasowe prądów fazowych I_{fa} , I_{fb} , I_{fc} oraz wartości skutecznych prądów fazowych I_{fask} , I_{fbask} , I_{fcask} silnika o mocy 1,1 kW typu Sh80x-4C włączanego na napięcie zwarcia

przydatne do określenia dynamiki rozruchu silnika włączanego na napięcie znamionowe, a mianowicie moment rozruchowy M_r oraz moment bezwładności J [5,6]. O przyspieszeniu kątowym $d\omega/dt$ decyduje stosunek tych dwu wartości, a mianowicie:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_r}{J} \quad (1)$$

Ponieważ w naszym przypadku mamy do czynienia ze specyficznym rozruchem wykonywanym przy zasilaniu silnika napięciem obniżonym w stosunku do napięcia znamionowego U_N , to również moment rozruchowy występujący przy napięciu obniżonym będzie mniejszy od momentu rozruchowego znamionowego. Dla silnika klatkowego można w przybliżeniu przyjąć, że moment rozruchowy spada z kwadratem obniżania napięcia zasilającego. Ponieważ w katalogu silników producenci nie zamieszczają informacji o napięciu zwarcia, to jednak można je oszacować korzystając z parametru krot-

ności prądu rozruchowego I_r/I_N , który jest zamieszczany w katalogach. Napięcie zwarcia U_{ZW} jest w przybliżeniu równe:

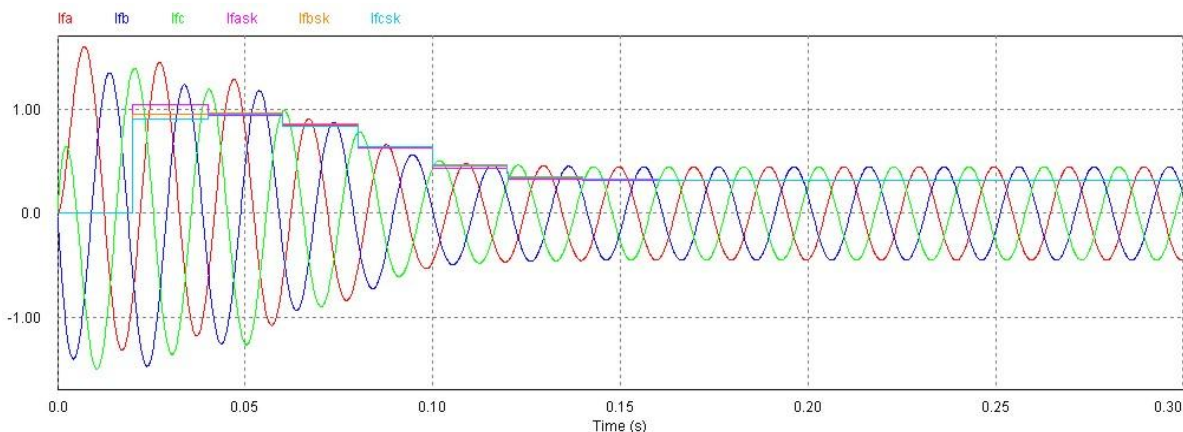
$$U_{ZW} = \frac{U_N}{\frac{I_r}{I_N}} \quad (2)$$

Na tej podstawie można oszacować moment rozruchowy $M_{r(ZW)}$ występujący przy zasilaniu silnika napięciem zwarcia:

$$M_{r(ZW)} = M_r * \left(\frac{U_{ZW}}{U_N} \right)^2 \quad (3)$$

Przyspieszenie kątowe występujące przy rozruchu silnika włączanego na napięcie zwarcia wynosi:

$$\frac{d\omega_{(ZW)}}{dt} = \frac{M_{r(ZW)}}{J} \quad (4)$$



Rys. 6. Przebiegi czasowe prądów fazowych I_{fa} , I_{fb} , I_{fc} oraz wartości skutecznych prądów fazowych I_{fask} , I_{fbsk} , I_{fcsk} silnika o mocy 0,25 kW typu Sh71-6B włączonego na napięcie zwarcia

Jeżeli mamy już określoną dynamikę rozruchu silnika włączonego na napięcie zwarcia to czas rozruchu jest jeszcze zależny od prędkości znamionowej silnika. Jeżeli porówna się dwa silniki o tej samej dynamice rozruchu, ale o różnych prędkościach znamionowych to silnik o niższej prędkości znamionowej będzie miał krótszy czas rozruchu od silnika o większej prędkości znamionowej.

Tak więc biorąc pod uwagę wszystkie powyższe informacje i analizując dane zamieszczone w katalogach przez producentów silników najostrzejsze kryterium czasowe stawiają zwykle silniki 6-biegunowe, które charakteryzują się w miarę dużym momentem rozruchowym przy niskim momencie bezwładności wirnika.

Na rys. 6. są przedstawione przebiegi czasowe prądów fazowych I_{fa} , I_{fb} , I_{fc} i ich wartości skutecznych I_{fask} , I_{fbsk} , I_{fcsk} podczas rozruchu silnika 6-biegunowego o mocy 0,25 kW typu Sh71-6B włączonego na napięcie zwarcia. Analizując te przebiegi można określić, że czas rozruchu silnika włączonego na napięcie zwarcia wynosi 0,16 sekundy. Przyjmując dopuszczalny błąd wyznaczania napięcia zwarcia równy 3% to pomiar należy wykonać w czasie poniżej 0,06 sekundy.

5. POMIAR NAPIĘCIA ZWARCIA W WARUNKACH RZECZYWISTYCH

Najszybszymi przetwornikami wartości skutecznej prądu i napięcia dostępnymi na rynku są przetworniki firmy Camille Bauer ze Szwajcarii [7,8]. Deklarowany przez producenta czas przetwarzania tych przetworników wynosi 50 ms. Ponieważ w torze pomiaru napięcia zwarcia znajduje się sterownik PLC to całkowity czas potrzebny do wykonania pomiaru napię-

cia zwarcia wraz z uśrednianiem wartości wynikowej jest nie mniejszy niż 100 ms.

Na stanowisku KSTS stabilne wyniki pomiaru napięcia zwarcia dało się uzyskać dla czasu pomiaru 110 ms. Dla krótszego czasu pomiaru wyniki nie były stabilne. Dla większości produkowanych przez FSE Besel S.A. silników jest to czas wystarczający. Jednak dla niektórych silników 6-biegunowych małej mocy o stosunkowo wysokim napięciu zwarcia czas ten okazał się już niewystarczający. Błąd wyznaczania napięcia zwarcia w niektórych przypadkach sięgał wartości 25%. W tabeli 1 są zamieszczone uzyskane wyniki pomiarów napięcia zwarcia silników wypożyczonych od FSE Besel S.A [5,6].

6. PODSUMOWANIE

Podsumowując należy stwierdzić, iż aby możliwy był pomiar napięcia zwarcia wszystkich silników małej mocy produkowanych przez firmę FSE Besel S.A. metodą bez mechanicznej blokady wirnika należy wykonać cały pomiar w czasie poniżej 60 ms. Wtedy błąd wyznaczania napięcia zwarcia będzie poniżej 3%. Na stanowisku KSTS najkrótszy czas pomiaru, dla którego uzyskiwano stabilne wyniki pomiaru napięcia zwarcia wynosił 110 ms. Dla takiej wartości czasu pomiaru napięcia zwarcia dla testowanych silników jednofazowych napięcie zwarcia było wyznaczane na stanowisku KSTS z błędem do 4%. Dla silników trójfazowych błąd wyznaczania napięcia zwarcia jest wyższy z uwagi na większą dynamikę rozruchu silnika trójfazowego zasilonego napięciem trójfazowym, wytwarzającym w silniku kołowe pole magnetyczne, w stosunku do silnika jednofazowego z kondensatorem rozruchowym, gdzie napięcie zasilające wytwarza w silniku pole

Tabela 1

Zmierzone wartości napięcia zwarcia na stanowisku KSTS

Typ silnika	Wartość napięcia zwarcia wyznaczona w laboratorium przy zablokowanym wirniku	Wartość napięcia zwarcia wyznaczona na stanowisku KSTS przy swobodnym wirniku	Wartość błędu
Silniki 1-fazowe			
SEHhR 90-4M P _N = 1,5 kW	96,4 V	96,2 V	0,2 %
SEhR 90-4M P _N = 2,2 kW	122,2 V	123,3 V	0,9 %
SEh 80-2CF P _N = 1,5 kW	85,6 V	88,1 V	2,9 %
SEMh 80-2B P _N = 0,75 kW	73,3 V	74 V	1 %
SEKg 56-4A1 P _N = 0,06 kW	120 V	122,2 V	1,8 %
SEh 71-4B P _N = 0,37 kW	124,1 V	124,9 V	0,6 %
SEK 145/60-4 P _N = 0,25 kW	85,8 V	86,4 V	0,7 %
SEMh 83/25-2/EWM P _N = 0,025 kW	130,2 V	135,4 V	4 %
Silniki 3-fazowe			
Sh 80x-4C P _N = 1,1 kW	141,2 V	150 V	6,2 %
Sg 56-2A P _N = 0,09 kW	141,7 V	146,3 V	3,2 %
Sh 71-6B P _N = 0,25 kW	173 V	217 V	25,4 %
ShR 90x-4M P _N = 2,2 kW	138,9 V	141,9 V	2,2 %

eliptyczne. Niektóre silniki trójfazowe charakteryzujące się dużą dynamiką rozruchu rozpędzają się w czasie wyznaczania napięcia zwarcia na stanowisku KSTS na tyle, że metoda pomiaru bez mechanicznej blokady wirnika daje duże błędy pomiarowe.

Literatura

1. *Plamitzer Antoni M.*: Maszyny Elektryczne, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1970.
2. Opis patentowy nr PL 194929 B1, data zgłoszenia 28.07.2000, uprawniony z patentu: Instytut Systemów Sterowania w Chorzowie, twórca wynalazku: Roman Fąfara i Henryk Więcek.
3. Dokumentacja „Komputerowego systemu testowania silników jedno- i trójfazowych w procesie produkcyjnym”, Instytut Systemów Sterowania w Chorzowie.
4. Praca statutowa Centrum EMAG nr 320.070.8.
5. Katalogi producenta silników elektrycznych FSE Besel S.A.: <http://www.cantonigroup.com/pl/motors/besel/series/11/silniki-1-fazowe/>
6. Katalogi producenta silników elektrycznych FSE Besel S.A.: <http://www.cantonigroup.com/pl/motors/besel/series/12/silniki-3-fazowe/>
7. Karty katalogowe przetworników pomiarowych firmy Camille Bauer: http://www.gossenmetrawatt.com/resources/me/sineax_i_552/db_gb.pdf
8. Karty katalogowe przetworników pomiarowych firmy Camille Bauer: http://www.gossenmetrawatt.com/resources/me/sineax_u_553/db_gb.pdf

Recenzent: doc. dr inż. Franciszek Szczucki