

Janusz Jaszczyk
Partner Serwis Sp. z o.o., Legnica

DŁAWIK Z LITYM RDZENIEM FERROMAGNETYCZNYM DO ROZRUCHU I HAMOWANIA ELEKTRYCZNEGO SILNIKÓW INDUKCYJNYCH PIERŚCIENIOWYCH

THREE PHASE REACTOR WITH FERROMAGNETIC CORE FOR START-UP AND ELECTRICAL BRAKING WOUND-ROTOR INDUCTION MOTORS

Abstract: Middle and large drives which work in special technological processes or work in application with many start-ups and breakings require using start-up and braking devices. A well-known modern solution for start-up of asynchronous sleep-ring motors is reactors with solid ferromagnetic core, also known as addy current starters. Research on the reactors done for many years by Faculty of Electrical Engineering of Wrocław University of Technology made it possible to use them for sub-synchronous electrical braking of drives with sleep-ring motors. This article describes applications of electrical reactor with solid ferromagnetic core for start-up and electrical braking of sleep-ring asynchronous motor 630 kW exemplified with application of electrical reactor for counter-current braking in the bucket wheel drive in the process of braking with the addy starter.

1. Wstęp

W układach napędowych średnich i dużych mocy pracujących w specjalnych procesach technologicznych lub tam gdzie liczba rozruchów i zatrzymań mechanizmu jest duża, konieczne jest stosowanie układów rozruchowych i hamowania.

Hamowanie obejmujące okres przejściowy od stanu pracy ustalonej do postoju silnika jest jedną z bardziej odpowiedzialnych i ważniejszych funkcji w pracy napędu zarówno z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy jak i konsekwencji, jakie może spowodować niewłaściwe lub niepewne hamowanie. Niewłaściwe hamowanie, niezadziałanie hamulca lub niewłaściwy czas lub droga hamowania mogą być przyczyną zagrożenia życia ludzkiego, poważnych awarii lub zniszczenia układu napędowego. Ważne jest również podniesienie wydajności pracy napędu przez skrócenie czasu trwania procesów przejściowych. Równie istotnym stanem w pracy napędu jest rozruch silnika obejmujący okres przejściowy od postoju do stanu pracy ustalonej. Pobierany jest wówczas duży prąd rozruchowy (szczególnie w początkowym etapie), który jest szkodliwy, zarówno dla silnika (pod względem cieplnym oraz dynamicznym) jak i dla sieci zasilającej (duże spadki napięcia).

Znanym i nowoczesnym rozwiązaniem stosowanym do rozruchu silników indukcyjnych pierścieniowych jest zastosowanie dławików z

litym rdzeniem ferromagnetycznym, noszących również nazwę rozruszników wiroprądowych [4], [11], [12]. Prace nad dławikami prowadzone od szeregu lat w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej pozwoliły na ich zastosowanie również do podsynchronicznego hamowania elektrycznego układów napędowych z silnikami pierścieniowymi [5].

W artykule przedstawiono:

- koncepcję zastosowania dławika elektrycznego z litym rdzeniem ferromagnetycznym do rozruchu i hamowania elektrycznego układu napędowego z asynchronicznym silnikiem pierścieniowym,
- uzasadnienie propozycji modyfikacji hamowania elektrycznego przez zastosowanie dławika z litym rdzeniem ferromagnetycznym zastępującego powszechnie stosowane rezystory,
- przykład zastosowania dławika do hamowania przeciwwłoczeniem w układzie napędowym koła czerpakowego z silnikiem pierścieniowym 630kW współpracującego w procesie hamowania z rozrusznikiem wiroprądowym.

2. Koncepcja zastosowania dławików z litym rdzeniem ferromagnetycznym do rozruchu i hamowania elektrycznego

2.1. Rozruszniki wiroprądowe do rozruchu silników indukcyjnych pierścieniowych

Rozruchem silnika nazywamy przejście od postoju do stanu pracy ustalonej przy prędkości właściwej dla danych warunków zasilania i obciążenia.

Silnik zasilony przy postoju napięciem znamionowym pobierał będzie z sieci prąd o wartościach kilkukrotnie większych niż prąd znamionowy. Prąd ten w stanie ustalonym (przy nieruchomym wirniku) będzie równy ustalonemu prądowi zwarcia, który dla typowych silników pierścieniowych osiąga wartości 6, a nawet 8 krotną wartość prądu znamionowego. Mimo tak znacznego prądu, moment rozruchowy jest na ogół mały, znacznie mniejszy od momentu znamionowego. Powodem tego jest to, że współczynnik mocy jest w tym stanie mały i wynosi $\cos\varphi=0,2..0,3$. Nie bez znaczenia jest również pewne zmniejszenie wartości strumienia głównego, co dodatkowo wpływa na zmniejszenie wartości momentu rozruchowego. Duże prądy rozruchowe mogą okazać się groźne dla silnika pod względem cieplnym oraz dynamicznym, mimo, że czasy trwania rozruchów nie przekraczają na ogół kilkudziesięciu sekund. Poza oddziaływaniem na silnik, duże prądy mogą wywołać znaczne spadki napięć w sieci zasilającej, co niekorzystnie wpływa na pracę pozostałych odbiorców zasilanych z tej sieci. Z niebezpieczeństwami tymi należy się liczyć przede wszystkim w silnikach dużej mocy, a także w przypadku często powtarzanych rozruchów. W celu ograniczenia prądu rozruchowego oraz zwiększenia momentu rozruchowego do wartości uwarunkowanej rodzajem rozruchu, uruchomienia silników pierścieniowych dokonuje się za pomocą rozruszników włączonych w obwód wirnika.

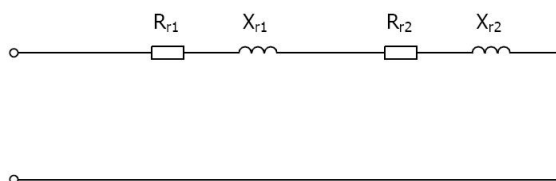
Dławiki z litym rdzeniem ferromagnetycznym, nazywane również rozrusznikami wiroprądowymi [4], [13] stosowane są z powodzeniem do rozruchu silników pierścieniowych począwszy od najmniejszych a skończywszy na największych mocach, w układach napędowych o dowolnym rodzaju rozruchu [4], [12], [14], [15]. Rozruszniki wiroprądowe włączone na czas rozruchu, wnoszą do obwodu wirnika impedancję, której wartość zmienia się samoczynnie w funkcji prędkości kątowej (poślizgu) silnika.

Wynikiem tego uzyskuje się bezstopniowy przebieg charakterystyk prądu $I_2=f(s)$ i momentu $M_e=f(s)$. Kształtowanie charakterystyk odbywa się poprzez dobór parametrów konstrukcyjnych rdzenia dławika.

Rozruszniki wiroprądowe buduje się na podobieństwo rdzeni transformatorów z materiałów ferromagnetycznie miękkich (grubościennych rur oraz prętów stalowych) o dużej pojemności cieplnej, w których wydziela się moc od prądów wirowych. Na kolumnach rdzenia wykonane są cewki uzwojeń fazowych [13], [14], [15]. Konstrukcja ta charakteryzuje się prostotą wykonania i odpornością na trudne warunki pracy przy jednoczesnym braku potrzeby dodatkowych czynników chłodzących.

Impedancja dławika wynikająca ze strat od prądów wirowych w rdzeniu, zależy od częstotliwości i wartości prądu płynącego w jego uzwojeniu. Zmienny w czasie strumień magnetyczny od płynącego w uzwojeniach rozrusznika prądu I_2 , indukuje w kolumnach rdzenia siły elektromotoryczne, pod wpływem których płyną prądy wirowe. Te następnie są przyczyną powstawania strat mocy czynnej i biernej w rdzeniu rozrusznika. Starty na przemagnesowanie ze względu na wąską pętlę histerezy (materiały magnetycznie miękkie) pomijają się. Kolumny rdzenia stanowią jednocześnie część obwodu magnetycznego oraz zwarty obwód wtórny, w którym płyną prądy wirowe.

Odbiornik energii, jakim jest rozrusznik wiroprądowy może być opisany parametrami umownej rezystancji R_{r2} i reaktancji X_{r2} rdzenia (strony wtórnej) oraz rezystancji R_{r1} i reaktancji X_{r1} uzwojenia (strony pierwotnej) [11].



Rys. 1. Uproszczony, obwodowy schemat elektryczny rozrusznika wiroprądowego

Przyjmuje się, że rezystancja R_{r1} i reaktancja X_{r1} uzwojenia rozrusznika posiadają podczas rozruchu wartości stałe, podobnie jak parametry uzwojenia silnika (pomijany jest wpływ wypierania prądu i nagrzewania uzwojeń). Istotne znaczenie, ze względu na swoją wartość i zmienność w czasie rozruchu silnika mają parametry strony wtórnej - rezystancji R_{r2} i reaktancji X_{r2} rdzenia.

Podstawową zaletą wiroprądowych rozruszników jest możliwość uzyskania dowolnej wartości impedancji zarówno pod względem modułu, jak i współczynnika mocy $\cos\varphi_r$ oraz bezstopniowego przebiegu charakterystyk rozruchowych prądu $I_2=f(s)$ i momentu $M_e=f(s)$.

2.2. Analiza możliwości zastosowania dławików z litym rdzeniem ferromagnetycznym do hamowania elektrycznego

Dla stosowanych powszechnie rozwiązań technicznych układów hamowania elektrycznego, wymagana wartość rezystancji R_d bloku rezystorowego zależy od przyjętego sposobu hamowania oraz żądanego momentu hamowania. Zastąpienie rezystora dławikiem z litym rdzeniem ferromagnetycznym wnosi do obwodu wirnika impedancję, której wartość zmienia się samoczynnie w funkcji prędkości kątowej.

Przepływający w uzwojeniach dławika podczas hamowania prąd wirnika I_2 , wytworzy w kolumnach rdzenia pole magnetyczne o zmiennej częstotliwości, zależnej od wartości poślizgu silnika. Zmienne pole magnetyczne indukuje w kolumnach rdzenia siły elektromotoryczne, pod wpływem, których płyną prądy wirowe. Te następnie są przyczyną powstawania strat mocy czynnej i biernej w rdzeniu dławika [1], [2], [3], [6], [7]. Możemy, zatem stwierdzić, że dławik z litym rdzeniem ferromagnetycznym posiada impedancję, gdy częstotliwość prądu wirnika f_2 jest większa od 0, przy czym ze wzrostem częstotliwości rośnie impedancja wraz ze stratami mocy czynnej i biernej w rdzeniu. Wartość impedancji dławika związana jest z kształtem i wymiarami przekroju poprzecznego oraz właściwościami magnetycznymi i elektrycznymi materiału elementów rdzenia [1], [2], [6], [7].

Hamowanie elektryczne stosowane w warunkach przemysłowych wykorzystywane jest najczęściej do szybkiego zatrzymania maszyny będącej w ruchu lub w celu szybkiego przejścia z jednego do drugiego punktu pracy maszyny. Ponieważ hamowanie takie zachodzi dla prędkości mniejszych od synchronicznych nazywamy je podsynchronicznym. Realizowane jest najczęściej dwoma metodami: dynamiczne prądem stałym oraz przeciwłączeniem (przeciwprądem). Pamiętając o tym, że podczas hamowania przeciwłączeniem częstotliwość prądu wirnika w początkowej fazie jest niemalże dwukrotnie większa niż w przypadku hamowania dynamicznego prądem stałym oraz to, że impedancja dławika hamowania rośnie wraz ze

wzrostem częstotliwości prądu w wirniku, możemy stwierdzić, że dla hamowania przeciwłączeniem uzyskamy znaczne zmniejszenie gabarytów dławika. Dodatkowo hamowanie przeciwłączeniem nie wymaga dodatkowego źródła prądu stałego i pozwala osiągnąć całkowite wyhamowanie napędu do prędkości kątowej $\omega=0$.

Posługując się przykładami doboru rezystorów hamowania przeciwłączeniem do silników pierścieniowych [8], [9], [10] możemy stwierdzić, że wartości rezystancji takich rezystorów przy zapewnieniu początkowych momentów hamowania na poziomie $M_h=0,7\div 0,8M_n$ jest bardzo duża, równa $120\div 130$ krotności rezystancji fazowej wirnika R_2 . Wykonanie rezystora o tak dużej wartości, szczególnie do silników dużej mocy, jest bardzo kosztowne. Gabaryty są na tyle duże, że w rozwiązaniach przemysłowych muszą być montowane w oddzielnych obudowach, poza rozrusznikami. Dławik do analogicznego zastosowania jak rezystor R_h posiada znacząco mniejsze wymiary i może być umieszczony w jednej obudowie z rozrusznikiem. Nieznacznym ograniczeniem stosowania dławików jest występowanie większych wartości prądów silnika podczas hamowania przy porównywalnym momencie hamującym. Wynika to z obniżenia wartości współczynnika mocy w obwodzie wirnika ($\cos\varphi_r < 1$) przez występowanie w elektrycznym schemacie zastępczym dławika dodatkowej reaktancji X_{r1} i X_{r2} (rys. 1).

Z powyższych rozważań wynika, że propozycja zastąpienia tradycyjnego rezystora hamowania dławikiem z litym rdzeniem ferromagnetycznym ma szczególne uzasadnienie do hamowania elektrycznego przeciwprądem.

Parametry elektryczne dławików (rys. 1) określą się na podstawie analizy pola elektromagnetycznego dla nieliniowego środowiska ferromagnetycznego [2], [6], utworzonego przez stalowe elementy rdzeni kolumn (lity materiał ferromagnetyczny). Zmiana pulsacji pola magnetycznego w kolumnach powoduje zmianę zastępczych wartości rezystancji i reaktancji rdzenia dławika włączonego do obwodu wirnika silnika. Częstotliwość prądu wirnika w procesie hamowania zależy od prędkości obrotowej silnika oraz rodzaju zastosowanego hamowania. Przez analogię do rozruszników wiroprądowych [11], częstotliwość prądu wirnika

wyrazić można iloczynem częstotliwości napięcia sieci zasilającej f_1 i poślizgu silnika s .

Hamowanie przeciwwłączeniem powoduje pracę dławika przy częstotliwościach prądu wirnika praktycznie w granicach 50÷100Hz. Z tego powodu oraz z konieczności zapewnienia większej wartości impedancji dławika do hamowania, kryteria doboru parametrów konstrukcyjnych rdzenia dławika różnią się od kryteriów doboru parametrów rdzenia rozrusznika. Do budowy dławików przewiduje się elementy rdzenia o dwustronnym wnikaniu płaskiej fali elektromagnetycznej [1]. Doświadczenia w projektowaniu rozruszników wiropędowych [1], [2], [6], [7], [11], [13], [14], [15] pokazują, że takie rozwiązanie konstrukcyjne rdzeni zapewnia duży współczynnik wypełnienia okna cewki kolumny oraz nie stwarza problemów technologicznych wykonania. Wybór ten ma szczególne znaczenie w przypadku dławika do hamowania przeciwwłączeniem ze względu na wymiary gabarytowe.

Parametry elektryczne dławika wynikają z jego parametrów konstrukcyjnych. Składają się z rezystancji i reaktancji uzwojenia (strony pierwotnej) oraz impedancji rdzenia (strony wtórnej) sprowadzonej na stronę pierwotną (fazowy schemat zastępczy dławika przedstawiono na rysunku 1). Parametry elektryczne strony pierwotnej dławika – R_{r1} , X_{r1} , czyli uzwojenia, stanowią kilka procent wartości parametrów strony wtórnej (rdzenia). W obliczeniach traktowane są jako wielkości korygujące, uściślające obliczenia. Ich wartość wyznacza się jak dla rozruszników wiropędowych [2], [11]. Parametry elektryczne strony wtórnej dławika wykonanego z elementów o dwustronnym wnikaniu płaskiej fali elektromagnetycznej oblicza się analogicznie jak dla rozruszników wiropędowych [2], [11] z uwzględnieniem zmienności poślizgu w granicach $1 \leq s < 2$.

Określenie poprawności procesu hamowania, szczególnie ze względu na czas zatrzymania lub dopuszczalnego opóźnienia układu napędowego, wymaga znajomości charakterystyki momentu hamującego w funkcji prędkości obrotowej silnika (poślizgu s). W układach tradycyjnych kształtowanie charakterystyk momentu odbywa się za pomocą rezystora hamowania o wartości rezystancji zmiennej najczęściej skokowo w funkcji czasu przy pomocy styczników zwierających. Dławik do hamowania nie wymaga sterowania podczas zmiany prędkości obrotowej silnika. O przebiegach charakterystyk

momentu hamującego oraz prądu wirnika decyduje samoczynna zmienność parametrów elektrycznych dławika w funkcji poślizgu.

Kształtowanie charakterystyk hamowania realizuje się, zatem przez dobór parametrów konstrukcyjnych dławika, głównie jego rdzenia.

Podstawowym parametrem konstrukcyjnym jest wymiar elementu rdzenia w kierunku wnikania fali elektromagnetycznej, określony grubością „ d ”. Uogólnienie zasad wyboru wymiaru d elementów w celu kształtowania charakterystyk hamowania jest trudne i wymaga doświadczeń projektowych [5], [10]. O przebiegach charakterystyk decydują również parametry elektryczne silnika. Takim parametrem katalogowym silnika pozwalającym szacować jego wpływ na przebiegi charakterystyk hamowania jest znamionowa przeciążalność momentem.

2.3. Realizacja hamowania elektrycznego na przykładzie układu napędowego koła czerpakowego koparki w górnictwie odkrywkowym

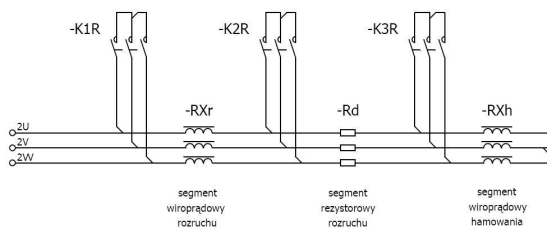
Układy napędowe kół czerpakowych koparek typu SRS-1200 pracujących w górnictwie odkrywkowym muszą posiadać możliwość hamowania. Brak tych możliwości podczas nagłego zatrzymania koła czerpakowego ze względu zadziałania zabezpieczeń przeciążeniowych powoduje występowanie niekorzystnych drgań konstrukcji nośnej a szczególnie wysięgnika przeciwcieżaru. Nie pozwala także na szybkie zatrzymanie koła czerpakowego w momencie zablokowania się kamienia w czerpaku. W następstwie powoduje to uszkodzenie zsuwni, ślizgu i innych elementów wysypu.

Oznacza to, że hamowanie układu napędowego koła czerpakowego jest hamowaniem awaryjnym. Wykorzystany sposób hamowania musi zapewniać zatem szybkie i pewne wyhamowanie napędu do prędkości zerowej. Ograniczona ilość miejsca na konstrukcji koparki oraz ekstremalnie trudne warunki pracy wymagają z kolei minimalizacji wymiarów gabarytowych dodatkowych elementów układu hamowania oraz prostoty i pewności sterowania i działania. Na podstawie powyższych ograniczeń oraz analizy metod hamowania elektrycznego zastosowano hamowanie elektryczne przeciwwłączeniem. W miejsce tradycyjnie stosowanych rezystorów hamowania postanowiono wykorzystać dławik z litym rdzeniem ferromagnetycznym na wzór rozruszników wiropędowych [4],

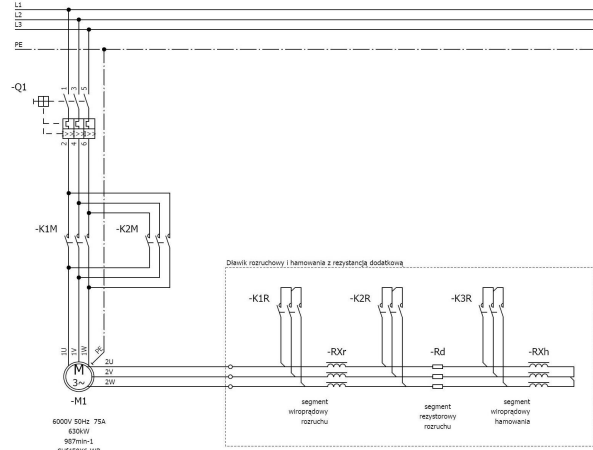
[10], [12]. Wybrany sposób hamowania zapewnia:

- wyhamowanie układu napędowego do prędkości zerowej,
- minimalizację gabarytów w porównaniu do rezystorów hamowania,
- brak potrzeby dodatkowego zasilania jak w przypadku hamowania dynamicznego prądem stałym,
- prostotę układu sterowania.

W celu ograniczenia prądu rozruchowego oraz zwiększenia momentu rozruchowego silnika do wartości wymaganej w procesie rozruchu koła czerpakowego koparki zastosowano w obecnej pracującym układzie napędowym rozrusznik dwustopniowy, składający się z segmentu wiroprowadowego RXr i dodatkowej sekcji rezystorów Rd. Rozwiązanie takie zapewnia w trakcie rozruchu monotonicznie zmienną wartość przyspieszenia układu napędowego, przez co zmniejsza naprężenia w uzwojeniach silnika oraz w elementach pędnych - szczególnie istotne w początkowym etapie rozruchu. Końcowy etap dwustopniowego rozruchu pozwala na łagodne przejście na naturalną charakterystykę silnika i zakończenie procesu rozruchu. Do rozruchu i hamowania silnika indukcyjnego pierścieniowego pracującego w napędzie głównym koła czerpakowego koparki zastosowano układ trójstopniowy, składający się z segmentów wiroprowadowych rozruchu RXr i hamowania RXh oraz dodatkowej sekcji rezystorów Rd. Dla celów rozruchu zwierany jest dławik hamowania RXh a układ działa jako rozrusznik dwustopniowy z wykorzystaniem segmentu wiroprowadowego RXr i dodatkowej sekcji rezystorów Rd. Podczas hamowania w obwód wirnika włączone się wszystkie segmenty wiroprowadowe wraz z dodatkową sekcją rezystorową.



Rys. 2. Schemat elektryczny wiroprowadowego rozrusznika wirnikowego z rezystancją dodatkową i dławikiem hamowania



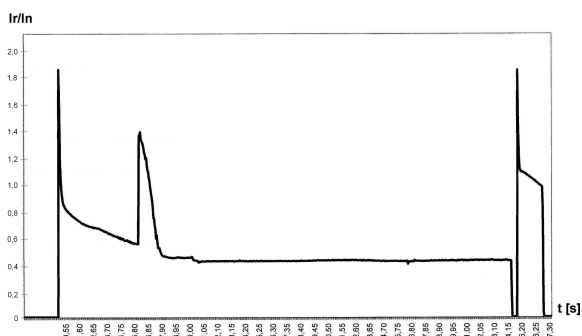
Rys. 3. Schemat elektryczny napędu do rozruchu i hamowania przeciwwłasczeniem z segmentem wiroprowadowym rozruchu RXr i hamowania RXh oraz dodatkową sekcją rezystorową Rd

Przed rozpoczęciem procesu rozruchu następuje załączenie wyłącznika silnikowego Q1 i zwarcie segmentu wiroprowadowego RXh poprzez załączenie stycznika K3R. Taka konfiguracja początkowa sterowania napędu koła czerpakowego oraz gotowość i prawidłowa praca pozostałych systemów koparki pozwala na rozpoczęcie pracy układu. Załączenie stycznika K1M rozpoczyna rozruch silnika. W początkowej fazie dwustopniowego rozruchu włączone są dwie sekcje rozrusznika – segment wiroprowadowy RXr i sekcja rezystorowa Rd. Silnik rozpędza się z monotonicznie zmienną wartością przyspieszenia do pewnej ustalonej prędkości obrotowej, po czym segment rezystorowy Rd zostaje zwarty stycznikiem K2R. Następuje końcowa druga faza rozruchu. Pozwala ona na łagodne przejście na naturalną charakterystykę silnika i zakończenie procesu rozruchu poprzez zwarcie rozrusznika stycznikiem K1R. Po zwarcu rozrusznika (załączeniu stycznika K1R) styczniki K2R i K3R mogą być wyłączone. Hamowanie napędu odbywa się z wykorzystaniem wszystkich segmentów wiroprowadowych RXr i RXh wraz z dodatkową sekcją rezystorową Rd. Pierwszy etap łączy obejmuje odłączenie pracującego silnika od sieci (rozwarciu stycznika K1M) oraz rozwarciu wszystkich styczników w obwodzie wirnika (K1R, K2R i K3R). Następnie stycznikiem K2M następuje załączenie silnika do sieci ze zmienioną kolejnością faz. Po wyhamowaniu napędu do prędkości obrotowej równej zero następuje wyłączenie silnika (rozwarciu stycznika K2M).

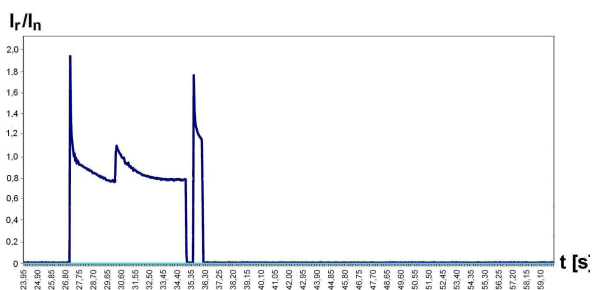
3. Przebiegi prądowe silników w procesie rozruchu i hamowania przeciwwłóczyeniem

Na rysunku 4 przedstawiono pomiary przebiegów prądów rozruchowych i hamowania silnika napędowego koła czepakowego bliźniaczej koparki typu SRs-1200. Hamowanie napędu przeciwwłóczyeniem odbywa się z wykorzystaniem tradycyjnego układu rezystorów hamowania. Porównując pomiary tradycyjnego rozwiązania (rys. 4) z pomiarami proponowanego nowego rozwiązania (rys. 5) możemy stwierdzić, że stosowanie dławików hamowania w miejsce tradycyjnie instalowanych rezystorów hamowania jest poprawne i w pełni uzasadnione efektami technicznymi w postaci zmniejszenia prądu hamowania oraz szybszego i bezstopniowego przebiegu procesu zatrzymywania.

Zastosowanie dławików hamowania pozwala na znaczne zmniejszenie wymiarów gabarytowych urządzenia dodatkowego w układzie napędowym, co umożliwi minimalizację wymaganej przestrzeni do jego zabudowy.



Rys. 4. Przebieg prądu silnika napędowego koła czepakowego koparki 1200 w procesie rozruchu i hamowania przeciwwłóczyeniem – układ tradycyjny



Rys. 5. Przebieg prądu silnika napędowego koła czepakowego koparki 1500 w procesie rozruchu i hamowania przeciwwłóczyeniem – układ z dławikiem hamowania

4. Wnioski

Umożliwienie i łagodzenie negatywnych skutków procesu rozruchu indukcyjnego silnika pierścieniowego odbywa się poprzez włączenie do obwodu wirnika na czas rozruchu dławika z litym rdzeniem ferromagnetycznym noszącego również nazwę rozrusznika wiropądowego [4]. Impedancja rozrusznika zmienia się samoczynnie w funkcji prędkości kątowej (poślizgu) silników. W wyniku czego uzyskuje się bezstopniowe przebiegi charakterystyk prądu $I_2=f(s)$ i momentu $M_e=f(s)$. Uzyskane ograniczenie wartości prądu rozruchowego oraz dwustopniowy przebieg rozruchu zmniejsza narażenia termiczne i elektromechaniczne silnika, szczególnie jego uzwojeń.

Zastosowanie dławików do hamowania w miejsce tradycyjnie instalowanych rezystorów hamowania w obwodzie wirników silników pierścieniowych jest możliwe i przynosi efekty techniczne w postaci bezstopniowych przebiegów charakterystyk hamowania oraz zmniejszenia wymiarów gabarytowych dodatkowych urządzeń w układzie napędowym.

Przez dobór czynnych elementów rdzenia dławika pod względem ich kształtu i wymiarów przekroju poprzecznego możliwa jest optymalizacja konstrukcji według kryterium minimalnego zużycia materiału.

Zaprojektowany układ do rozruchu i hamowania silnika indukcyjnego pierścieniowego typu SUf 450X6-WB o mocy 630kW pracującego w napędzie głównym koła czepakowego koparki umożliwia:

- ograniczenie początkowego prądu rozruchowego (dla $s=1$) do wartości $I_r=2,0I_{1n}$ przy zapewnieniu momentu rozruchowego $M_r=1,35M_n$,
- ograniczenie prądu hamowania w fazie początkowej (dla $s=2$) do wartości $I_h=1,2I_{1n}$ przy zapewnieniu momentu hamowania $M_h=0,8M_n$,
- ograniczenie prądu hamowania w fazie końcowej (dla $s=1$) do wartości $I_h=0,9I_{1n}$ przy momencie hamowania $M_h=0,6M_n$.

Pozwala to na dokonanie łagodnego rozruchu i hamowania bezstopniowego, bezpiecznego dla silnika napędowego i maszyny roboczej.

Literatura

- [1]. B. Herman, W. Kędzior: *Kształtowanie charakterystyk mechanicznych silników indukcyjnych z rozrusznikami wiropądowymi*. Raport PRE nr 85, IUE P. Wr., Wrocław 1980.

- [2]. B. Herman, W. Kędzior: *Parametry obwodów wtórnych silników asynchronicznych z rozrusznikami wirowymi*. Raport PRE nr 172 IUE P. Wr., Wrocław 1978.
- [3]. B. Herman: *Analiza doboru urządzeń rozruchowych do silników indukcyjnych w aspekcie ochrony środowiska*. Raport PRE nr 6/2001 IMNPE P. Wr., Wrocław 2001.
- [4]. B. Herman, W. Kędzior: *Rozrusznik wirowy do trójfazowych silników indukcyjnych pierścieniowych*. Patent PRL nr 95541.
- [5]. B. Herman, W. Kędzior i inni: *Układ do rozruchu i hamowania indukcyjnych silników pierścieniowych*. Patent RP nr 155734.
- [6]. B. Herman, R. Brzeziński: *Badania współczynników korekcyjnych do liniowej teorii pola elektromagnetycznego w litych materiałach ferromagnetycznych*. Raport PRE 9/87, IUE P. Wr., Wrocław 1997.
- [7]. B. Herman, W. Kędzior, R. Brzeziński, J. Muchorowski: *Wpływ kształtu i materiałów elementów czynnych na parametry rozruszników wirowych*. Raport nr 294/78, P. Wr., Wrocław 1978.
- [8]. A. M. Plamitzer: *Maszyny elektryczne*, WNT Warszawa 1970, Wydanie IV.
- [9]. Z. Gogolewski, Z. Kuczewski: *Napęd elektryczny*, WNT Warszawa 1971, Wydanie IV.
- [10]. B. Herman: *Dławik z litym rdzeniem ferromagnetycznym do hamowania elektrycznego silników indukcyjnych pierścieniowych*. Raport z serii PRE nr 17/2005, P. Wr., Wrocław 2005.
- [11]. B. Herman, W. Kędzior, R. Brzeziński: *Metodyka obliczeń rozruszników wirowych*. Raport nr 313/78, P. Wr., Wrocław 1978.
- [12]. B. Herman, W. Kędzior: *Rozrusznik wirowy z rdzeniem o kolumnach prętowych. Napędy elektryczne w górnictwie odkrywkowym*. Prace naukowe IUE P. Wr. nr 14 „Konferencje” nr 1, Wrocław 1973.
- [13]. B. Herman: *Rozruszniki wirowe o rdzeniach wielokrotnych*. Rozprawa doktorska, Wrocław 1975.
- [14]. B. Herman, W. Kędzior: *Badania laboratoryjne i eksploatacyjne rozrusznika wirowego segmentowego typu Zcca-320*. Raport P. Wr. nr I-29/R-22/73, Wrocław 1973.
- [15]. B. Herman, W. Kędzior, K. Pieńkowski: *Badania doświadczalnych rozruszników indukcyjnych do napędów małej mocy*. Raport P. Wr. nr I-29/R-187/76, Wrocław 1976.

Autor

Janusz Jaszczyk
Partner Serwis Sp. z o.o.
PL 59-220 Legnica
ul. Złotoryjska 180
www.grupapartner.pl
email: janusz.jaszczyk@grupapartner.pl