

Tadeusz ŚLIWIŃSKI¹⁾

WPLYW PARAMETRÓW ROZRUCHOWYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH NA ICH KOSZT PRODUKCJI I EKSPLOATACJI

Streszczenie. Jednym z najważniejszych kierunków działania przy ograniczaniu strat energii w systemie energetycznym jest zmniejszanie strat w silnikach indukcyjnych. W pracy przedstawiono analizę wpływu parametrów rozruchowych tych silników na ich sprawność oraz na koszt materiałów przy ich produkcji. Analizę przeprowadzono w przypadku dwóch silników czterobiegunowych o mocy 2,2 i 22 kW w trzech rozwiązaniach odpowiadających różnym klasom sprawności. Obliczenia wykonano programem OSIN3 do optymalnej syntezy silników. Wnioski mają charakter ogólny i przedstawiają znaczenie przyjmowanych przy projektowaniu wartości momentu i pozornej mocy rozruchowej na koszty materiałów przy produkcji silników i na koszty strat energii podczas ich eksploatacji.

INFLUENCE OF INDUCTION MOTOR STARTING QUANTITIES ON ITS MANUFACTURING AND WORKING COSTS

Summary: One of the most important actions towards the energy loss economy in electrical systems is limiting the losses in induction motors. The paper deals with the influence of motor starting quantities on the material costs in motor manufacturing and on the energy losses during its operation. This problem was studied using the program OSIN3 for optimal motor synthesis. Motors of three efficiency classes with the output of 2.2 and 22 kW were analyzed. The conclusions of this study are of general character and point out the importance of proper selection of starting parameters in course of motor designing on the material costs and on the motor efficiency.

Key words: induction motors, energy loss economy, optimisation

1. WPROWADZENIE

Przy projektowaniu silników indukcyjnych nasuwa się często pytanie, czy postawione wymagania co do wartości momentu rozruchowego i pozornej mocy rozruchowej (w stanie zahamowanym) mogą wpływać na koszt materiałów i sprawność silnika. Wymagania co do parametrów rozruchowych określone w normie [6] są często zaostrzane przez użytkowników, którzy chcą mieć pewność, że w czasie eksploatacji silnika nie wystąpią trudności wynikające ze zbyt małego momentu rozruchowego przy spadku napięcia w sieci lub z nadmiernego prądu rozruchowego. Często również producenci przystępując do projektowania silników przyjmują wygórowane założenia dotyczące parametrów rozruchowych, przypuszczając, że silniki o takich właściwościach znajdą łatwiej nabywców.

W ostatnich latach stawiane są silnikom indukcyjnym coraz ostrzejsze wymagania, również jeśli chodzi o powstające w nich straty energii, co wiąże się z akcją zmniejszania zanieczyszczenia środowiska i ograniczania efektu cieplarnianego. Z drugiej strony zaostrza się konkurencja na rynkach światowych, co zmusza do coraz staranniejszego projektowania i produkowania silników. Dla utrzymania się na rynku jest zatem konieczne, by silniki spełniały wymagania norm międzynarodowych przy możliwie małych kosztach produkcyjnych, których najbardziej wymiernym elementem jest koszt podstawowych materiałów.

Obecna znajomość zjawisk zachodzących w silnikach oraz umiejętność takiego ich projektowania, by dotrzymane były możliwie dokładnie postawione wymagania, pozwala na przeprowadzanie analiz wpływu różnych czynników na koszt materiałów i sprawność silników. Dotyczy to również wpływu parametrów rozruchowych na koszty materiałów i koszty strat energii w silnikach.

¹⁾ Prof.dr inż., Instytut Elektrotechniki, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, tel.812-25-77, fax 812-12-46, e-mail: t.sliwinski@iel.waw.pl.

2. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA METODY OPTIMALNEJ SYNTEZY

Jednoznaczną odpowiedź na postawione pytanie można uzyskać stosując metodę optymalnej syntezy silników. Założenia tej metody i niektóre wyniki jej stosowania były przedstawione szczegółowo w poprzednich publikacjach [1, 2, 3]. Tutaj założenia te powtórzone zostaną w bardzo zwartej formie umożliwiającej prezentację otrzymanych wyników.

Metoda optymalnej syntezy służy do rozwiązywania zadań odwrotnych w stosunku do normalnej procedury stosowanej przy projektowaniu silników. Według powszechnie stosowanej procedury obliczenia charakterystyk silników wykonuje się przy założonych wszystkich wymiarach i danych uzwojeniowych. W procedurze syntezy wyznacza się odwrotnie wszystkie wymiary i dane uzwojeniowe, przy których otrzymuje się żądane wartości parametrów maszyny. Postawione wymagania techniczne spełnione są zwykle przez wiele rozwiązań maszyny. Jednoznaczne rozwiązanie otrzymuje się wtedy, kiedy wprowadzi się dodatkowy postulat optymalizujący rozwiązanie syntezy, np. osiągnięcie minimum kosztu materiałów lub minimalnych strat mocy.

W programach komputerowych opracowanych w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki zadanie optymalnej syntezy sformułowane jest w ogólnej postaci jako funkcja celu

$$K = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow K_{\min}$$

przy założonych ograniczeniach

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq g_{i \max}$$

Funkcja celu K , nazywana ogólnie rocznym kosztem użytkowania silnika, ma postać

$$K = K_a + K_e + K_q$$

Poszczególne składniki oznaczają:

- K_a – roczny koszt amortyzacji silnika,
- K_e – roczny koszt strat energii w silniku,
- K_q – roczny koszt energii biernej pobieranej przez silnik.

Najważniejsze ograniczenia to:

- m_{k0} – najmniejsza dopuszczalna wartość momentu obrotowego przy zahamowanym wirniku odniesiona do momentu znamionowego,
- p_{k0} – największa dopuszczalna wartość pozornej mocy przy zahamowanym wirniku odniesiona do mocy znamionowej,
- ϑ_s – największy dopuszczalny przyrost temperatury uzwojenia stojana przy obciążeniu znamionowym,
- ϑ_x – największy dopuszczalny skok przyrostu temperatury uzwojenia stojana po rozruchu ze stanu nagrzanego w warunkach określonych w normie [6].

Zainteresowanych szczegółami metody odsyłam do wymienionych publikacji.

3. ZAKRES I ZAŁOŻENIA OBLICZEŃ

Zakres przeprowadzonych obliczeń wynika z obecnej sytuacji na światowym rynku silników. Do niedawna produkowane były jednolite podstawowe serie silników klatkowych o właściwościach określonych szczegółowo w normach międzynarodowych. W normach tych zawarte są powiązania mocy z wymiarami montażowymi oraz wymagania co do parametrów rozruchowych. Dotychczas jednak nie było ustalonych wymagań co do wartości sprawności silników. Obecnie z przyczyn wymienionych na wstępie pracy powstała tendencja do równoległego produkowania serii silników przeznaczonych do różnego sposobu ich wykorzystania, co ma się przyczynić do znacznego ograniczenia strat energii.

Najwcześniej produkcję silników o zwiększonej sprawności (energooszczędnych) rozpoczęto w Stanach Zjednoczonych. W Europie, dostosowując się do zaleceń Komisji Europejskiej, Stowarzyszenie Producentów Maszyn Elektrycznych CEMEP ustaliło trzy różne poziomy sprawności silników: wysoki (eff1), przeciętny (eff2) i niski (eff3). Właściwy dobór silnika do konkretnego napędu zależy od tego, jak intensywnie ma on być wykorzystywany. W przeprowadzonych tu obliczeniach przyjęto, że silniki energooszczędne (eff1), których koszt produkcji jest znacznie większy niż pozo-

stałych rodzajów silników, powinny być tak zaprojektowane, by ich koszt użytkowania był najmniej przy pracy w ciągu 4000 godzin w roku z pełnym obciążeniem. W przypadku silników o przeciętnym poziomie sprawności (eff2) założono, że typowy czas ich pracy wynosi 1000 godzin rocznie. Wreszcie silniki o niskim poziomie sprawności (eff3), charakteryzujące się bardzo dużym wykozystaniem materiałów i niską ceną, powinny być projektowane na minimum kosztu użytkowania przy pracy w ciągu 100 godzin w roku.

Badanie wpływu parametrów rozruchowych na straty mocy w silnikach i na koszt materiałów przeprowadzono na czterobiegunowych silnikach o dwóch wartościach mocy znamionowej: 2,2 i 22 kW w trzech rozwiązaniach zaprojektowanych jako optymalne do pracy z pełnym obciążeniem w ciągu 100, 1000 i 4000 godzin w roku. Przyjęto, że rdzeń silników o mocy 2,2 kW wykonany jest z blach EP600, zaś rdzeń silników o mocy 22 kW z blachy EP530. Obliczenia optymalizacyjne wykonano przyjmując aktualne relacje cen podstawowych materiałów (blachy elektrotechnicznej, miedzianego drutu nawojowego, aluminium na kłatkę i odlewów żeliwnych) do średniej ceny energii elektrycznej. W koszcie materiałów K_m silnika uwzględniono koszt wymienionych czterech materiałów, zaś roczny koszt amortyzacji silnika

$$K_a = K_m d$$

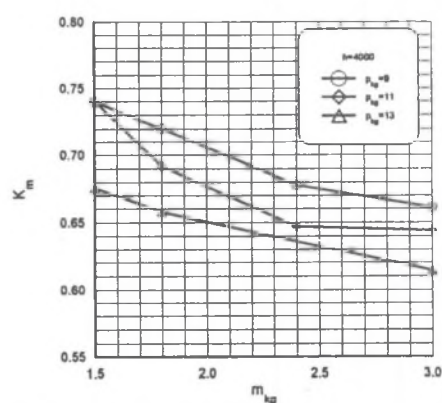
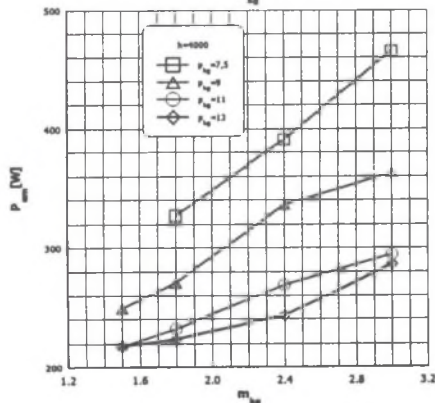
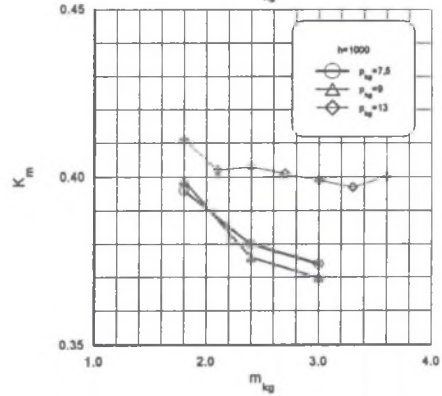
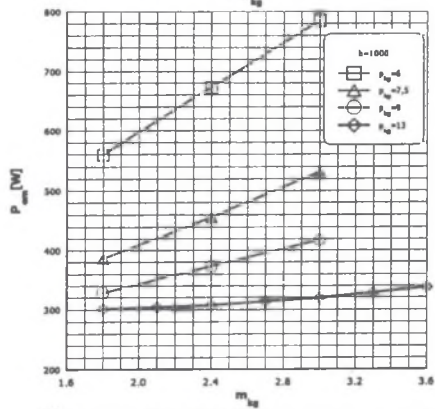
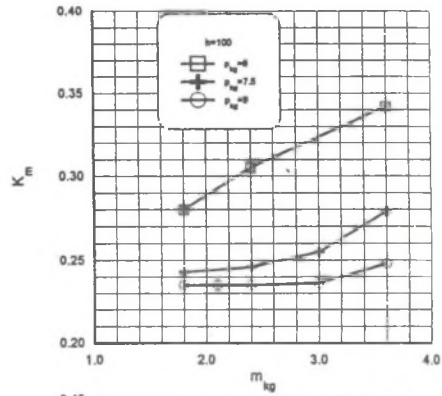
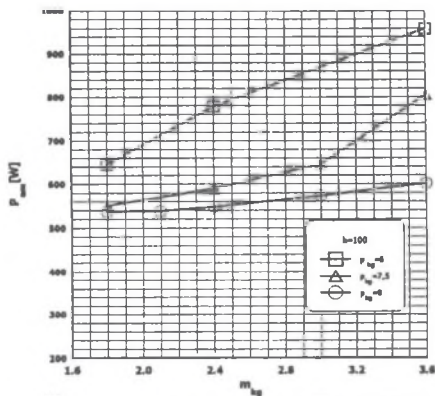
otrzymano przyjmując wartość współczynnika amortyzacji $d=0,25$, co jest równoważne założeniu, że okres amortyzacji silnika wynosi 5 lat, a stopa dyskontowa 8% [3]. Jak wykazały wcześniej przeprowadzone obliczenia [5], przyjęcie zamiast pełnego kosztu silnika kosztu podstawowych materiałów nie zmienia charakteru przebiegu zależności, lecz powoduje tylko niewielkie przesunięcie otrzymywanych charakterystyk. Omija się przy tym niejednoznaczność określania innych kosztów produkcji silnika. Obliczanie kosztu energii biernej przeprowadza się w rutynowy sposób określony w [3].

Obliczenia silników w każdej klasie sprawności wykonano przy trzech lub czterech stałych wartościach granicznej pozornej mocy rozruchowej p_{kg} i przy kilku różnych granicznych wartościach momentu rozruchowego m_{kg} . W obliczeniach przyjęto stałą wartość graniczną przyrostu temperatury uzwojenia stojana $\vartheta_s = 80$ K i stałą wartość graniczną skoku przyrostu temperatury uzwojenia stojana w czasie rozruchu $\vartheta_x = 30$ K.

4. ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ

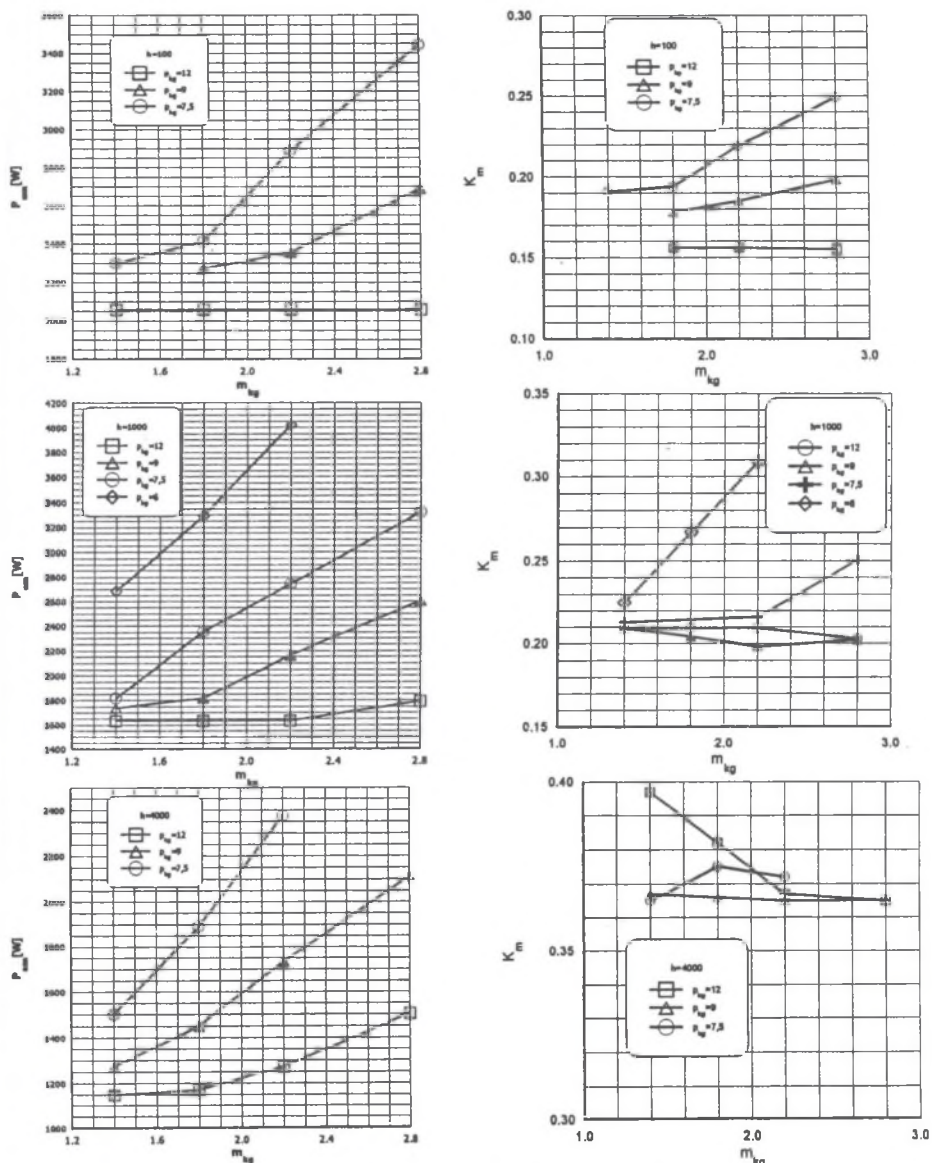
Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach $P_{em}=f(m_{kg})$ i $K_m=f(m_{kg})$ przy różnych stałych wartościach p_{kg} . P_{em} są to wyrażone w watach straty elektromagnetyczne otrzymane przez odjęcie strat mechanicznych od sumy strat. Natomiast K_m jest to koszt podstawowych materiałów przypadający na 1 W mocy znamionowej silnika, przy czym jako jednostkę kosztu przyjęto średnią cenę 1 kWh energii elektrycznej. Taki wybór wielkości dla celów porównawczych ma na celu skoncentrowanie się na fizycznym obrazie zjawisk przetwarzania energii w silnikach z pominięciem niejednoznacznych składników kosztów. Dzięki przyjęciu za jednostkę kosztu ceny 1 kWh energii elektrycznej omija się kłopoty związane z inflacyjnym ruchem cen, gdyż relacje cen zmieniają się w czasie w znacznie mniejszym stopniu niż poszczególne ceny.

Zespół wykresów na rys.1 dotyczy trzech klas rozwiązań silnika o mocy 2,2 kW, zaś zespół wykresów na rys.2 – silnika o mocy 22 kW. Należy tu podkreślić, że wartości m_{kg} i p_{kg} są to wartości graniczne przyjęte w założeniach, a nie wartości otrzymane z obliczeń. W większości przypadków wartości te pokrywają się ze sobą. Występuje to wtedy, gdy określone ograniczenie okazało się aktywne w punkcie optymalnym i punkt ten leży na granicy obszaru rozwiązań dopuszczalnych [4]. Jeśli ograniczenie nie jest aktywne w punkcie optymalnym, obdwie wartości różnią się od siebie i punkt ten leży wewnątrz obszaru rozwiązań dopuszczalnych. Taką sytuację zaobserwować można w przypadku mniejszego silnika na rys.1 przy $h=100$ i $p_{kg}=9$. Zwiększanie wartości granicznej momentu aż do wartości $m_{kg}=3$ nie powoduje wzrostu strat ani kosztu materiałów. W tym przedziale otrzymuje się praktycznie to samo optymalne rozwiązanie, gdyż obliczana wartość momentu rozruchowego jest cały czas większa od wartości granicznej. W przypadku większego silnika (rys.2) podobna sytuacja występuje w silnikach zaprojektowanych do pracy z liczbą godzin pracy w ciągu roku wynoszącą 100 i 1000 i przy granicznej wartości $p_{kg}=12$.



Rys. 1. Zależność strat elektromagnetycznych P_{em} i kosztu materiałów K_m od granicznej wartości momentu rozruchowego m_{kg} przy stałych granicznych wartościach mocy rozruchowej p_{kg} . Czterobiegunowe silniki o mocy znamionowej 2,2 kW zaprojektowane były jako optymalne do pracy z liczbą godzin $h=100, 1000$ i 4000 w roku

Fig. 1. Dependence of electromagnetic losses P_{em} and material costs K_m on limiting values of the locked-rotor torque m_{kg} at constant limiting values of the locked-rotor apparent power p_{kg} . The four-pole motors of rated output 2,2 kW were designed as optimal for $h=100, 1000$ and 4000 operating hours per year



Rys.2. Zależność strat elektromagnetycznych P_{em} i kosztu materiałów K_m od granicznej wartości momentu rozruchowego m_{kg} przy stałych granicznych wartościach mocy rozruchowej p_{kg} . Czterobiegunowe silniki o mocy znamionowej 22 kW zaprojektowane były jako optymalne do pracy z liczbą godzin $h=100, 1000$ i 4000 w roku

Fig.2. Dependence of electromagnetic losses P_{em} and material costs K_m on limiting values of the locked-rotor torque m_{kg} at constant limiting values of the locked-rotor apparent power p_{kg} . The four-pole motors of rated output 22 kW were designed as optimal for $h=100, 1000$ and 4000 operating hours per year

W większości przypadków jednak zarówno m_{kg} , jak i p_{kg} są ograniczeniami aktywnymi i zwiększanie żądanej wartości momentu rozruchowego i zmniejszanie wartości pozornej mocy rozruchowej powoduje znaczny wzrost strat silnika. Z wykresów widać, że przy dostatecznie dużej wartości p_{kg} zwiększanie żądanego momentu rozruchowego powoduje niewielki tylko wzrost strat, podobnie jak przy dostatecznie małej wartości momentu rozruchowego ograniczanie dopuszczalnej mocy rozruchowej. Wzrost strat natomiast jest bardzo duży, jeśli równocześnie zwiększa się wymagania i co do momentu rozruchowego i co do mocy rozruchowej. W tym przypadku może wystąpić nawet przeszło dwukrotny wzrost strat w stosunku do przypadku, gdy rezygnuje się z jakichkolwiek ograniczeń co do parametrów rozruchowych.

Dużo bardziej zawiłany jest obraz zależności kosztu materiałów od parametrów rozruchowych. Ujawnia się tu wyraźnie działanie pozostałych ograniczeń o charakterze termicznym. Jeśli maszyna jest słabo wykorzystana, co występuje szczególnie w przypadku silników energooszczędnych ($h=4000$), to wytworzenie większego momentu rozruchowego wymaga zwiększenia gęstości energii pola elektromagnetycznego w maszynie. Wiąże się z tym zmniejszenie wymiarów części czynnych maszyny i zmniejszenie ich masy i kosztu. Widać to wyraźnie na wykresach K_m (rys. 1 i 2) przy $h=4000$. Natomiast w silnikach o bardzo wykorzystanych materiałach ($h=100$) nie można zwiększyć gęstości energii ze względu na ograniczenia termiczne. Aby otrzymać dostateczną moc w czasie rozruchu, trzeba zwiększyć objętość części czynnych, a więc również ich masę i koszt. Sytuacja taka występuje na rys. 1 i 2 przy $h=100$. Ogólnie biorąc, masa i koszt materiałów zależą w dużo mniejszym stopniu od parametrów rozruchowych niż straty mocy.

5. WNIOSKI

1. W obecnej sytuacji na rynku znajdować się będą serie silników o różnym poziomie sprawności. Przy projektowaniu tych silników należy zwracać szczególną uwagę na wybór właściwych wartości parametrów rozruchowych, gdyż przyjęcie ich z nadmierną rezerwą powodować może wzrost strat mocy i niekiedy również zwiększenie kosztu materiałów.
2. Jak wynika ze studium przeprowadzonego z wykorzystaniem metody optymalnej syntezy, koszt materiałów i straty mocy w silniku zależą w różny sposób od przyjętych w obliczeniach granicznych wartości momentu i mocy pozornej w stanie zahamowanym silnika.
3. Przy zwiększaniu założonego momentu rozruchowego lub przy zmniejszaniu założonej mocy rozruchowej do pewnej granicy ograniczenia te nie są aktywne i nie występuje wzrost strat.
4. Po przekroczeniu tej granicy straty mocy rosną zarówno przy zwiększaniu momentu rozruchowego, jak i przy zmniejszaniu mocy rozruchowej; wzrost ten jest szczególnie duży przy równoczesnej zmianie obydwu parametrów.
5. Zmiany kosztu materiałów są dużo mniejsze niż wzrost strat mocy. W przypadku silników o niskiej sprawności i dużej gęstości przetwarzanej energii występuje wzrost kosztu materiałów z zaostreniem wymagań co do parametrów rozruchowych.
6. W przypadku silników o wysokiej klasie sprawności i niewielkiej gęstości przetwarzanej energii koszt materiałów jest najczęściej prawie niezależny od wartości parametrów rozruchowych; niekiedy koszt ten zmniejsza się niewiele przy zaostreniu wymagań co do tych parametrów.

LITERATURA

1. Śliwiński T.: Optymalizacyjne obliczenia projektowe silników indukcyjnych. Prace Instytutu Elektrotechniki, Nr 114, 1980, s.5-26.
2. Śliwiński T.: Analysis of optimal designed induction motors. Proc.ICEM'86, Munich, 1986, s.121-124.
3. Śliwiński T.: Optymalna synteza silnika indukcyjnego. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Elektryka, Nr 40/1992, s.171-181.
4. Śliwiński T.: Suboptimal induction motors. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Nr 788, Elektryka Nr 91, 1998, s.19-26.

5. Śliwiński T.: Proposed Principles of the Future Standard for High Efficiency Induction Motors w wyd. Energy Efficiency Improvements in Electric motors and Drives. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2000, s.463-471.
6. IEC 60034-12 (1980): Starting Performance of Single-speed Three-phase Cage Induction Motors for Voltages up to and Including 690 V.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 2001 r.

Autor wyraża podziękowanie KBN za sfinansowanie programu badawczego Nr 8 T 10A 055 09.

Abstract

Actually new lines of induction motors that represent the three classes of efficiency level as agreed by CEMEP are emerging on the market. When designing these motors special attention must be paid to a proper choice of required values of starting parameters: locked-rotor torque and locked-rotor apparent power. An unreasonable choice may cause an increase of power losses and sometimes also of material costs.

In the paper the results of a study on this problem by means of the optimization method are presented [1,2,3,4]. The program OSIN 3 based on this method was used to compute optimal solutions of motors at which the minimum value of total motor cost is reached. This cost consists of the motor yearly amortization cost, of the cost of energy losses and of the cost of reactive energy with the assumption that the motor operates h hours in the year at full load. The constraints in the optimization procedure are: minimum allowed value of locked-rotor torque, maximum value of locked-rotor apparent power, maximum allowed temperature rise of the stator winding and the maximum allowed jump of stator winding temperature rise after one start from hot conditions according to IEC standard [6]. The calculations of four-pole motors with the rated output of 2,2 and 22 kW were performed assuming 3 values of operating time: $h=100$, 1000 and 4000 hours per year. These values represent the three classes of efficiency level. To avoid complications with the evaluation of all manufacturing costs only the cost of main materials was taken into account in the motor amortization cost.

As the result of this study the values of two quantities are presented: electromagnetic losses in the motor and material cost. The term "electromagnetic losses" means here the sum of losses with the exclusion of mechanical losses. The material cost consists of the cost of sheet steel for the stack, of copper wire for the stator winding, of the frame and of aluminum for the cage. The material costs are expressed per 1 W of rated output and using as a unit the mean price of 1 kWh of electrical energy in the aim to receive results independent of local currencies.

On graphs (Figs.1 and 2) the dependence of electromagnetic losses P_{em} and of the material cost K_m on the required minimum value of the locked-rotor torque m_{kq} at different values of the maximum allowed locked-rotor apparent power p_{kq} is presented. All the calculations were made using the optimization procedure with the same maximum allowed winding temperature rise of 80 K and with the maximum value of the jump of temperature rise during starting 30 K.

From the graphs it can be seen that the dependence of losses on m_{kq} is different in the case of different values of h and p_{kq} . When increasing the required torque from a small value or decreasing the apparent power from a high value to a certain limit no change of losses is observed. It is the case when the limitations are non-active and the optimal point is situated inside the area of allowed solutions [4] (see Fig. 1 for the 2,2 kW motor at $h=100$ and $p_{kq}=9$ and Fig. 2 for the 22 kW motor at $h=100$ and 1000, $p_{kq}=12$). In the majority of cases raising the required torque value or limiting the value of the apparent power causes a significant rise of losses. The greatest rise is received when

both these changes are made simultaneously. Such a dependence occurs when both the limitations are active and the optimal point is situated on the border of the area of allowed solutions.

The dependence of the material cost on the starting parameters is more complicated than that for the losses. Here the influence of the thermal limitations comes into action. In the case of high density of converted energy and low efficiency ($\eta=100$) the material cost increases when the torque rises. In the case of low density of converted energy in energy efficient motors ($\eta=1000$) the material cost is practically independent of the required starting torque. In some cases it decreases at torque greater values.