ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: ELEKTRYKA z. 173 Nr kol. 1471

Wojciech BURLIKOWSKI [1]
Krzysztof KLUSZCZYŃSKI [1]
Tomasz GĄSIOROWSKI [2]
Tomasz TRAWIŃSKI [1]
Andrzej WIECZOREK [2]

PRZESUNIĘCIE OBSZARU PRACY STABILNEJ CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNEJ SILNIKA SEMKG71-4B2/PO1, PRZEZNACZONEGO DO ZASILANIA Z SIECI JEDNOFAZOWEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki prac projektowych i badawczych, dotyczących przesunięcia stabilnego zakresu pracy 1-fazowego silnika indukcyjnego zbudowanego na bazie silnika klatkowego SEMKg71-4B2/PO1. Ich celem było uzyskanie przebiegu charakterystyki mechanicznej, stabilnej w całym zakresie pracy silnikowej, przy zachowaniu dopuszczalnych przyrostów temperatury. Rozważono kilka wersji projektowych silnika, obejmujących wirniki klatkowe o różnych wymiarach żłobków oraz wirnik kubkowy zalewany.

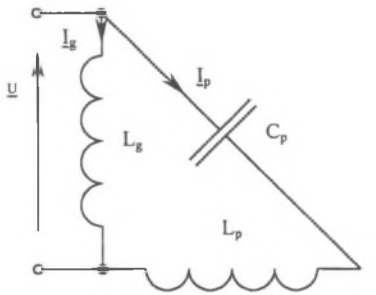
CHANGE OF THE STABLE REGION OF THE TORQUE-SPEED CHARACTERISTIC OF THE SEMKG71-4B2/PO1 MOTOR REDESIGNED TO A SINGLE-PHASE SUPPLY

Summary. The paper presents the results of design and research investigations aiming at the change of the stable region of the torque-speed characteristic of a single-phase induction motor. As a basis for the design process the squirrel-cage induction motor SEMKg71-4B2/PO1 was adopted. The goal of the design was to achieve a linear torque-speed characteristic in its motoring region, with allowable temperature rises. Several designs were considered, ranging from various squirrel cage rotors of different slot dimensions to a-like drug-cup motor.

[1] Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej, Zakład Mechatroniki
[2] Fabryka Silników Elektrycznych BESEL S.A.

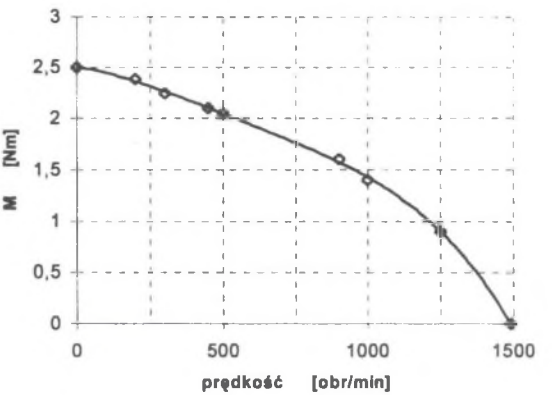
1. WPROWADZENIE

Silniki indukcyjne 1-fazowe z kondensatorem pracy znajdują zastosowanie zarówno w sprzęcie gospodarstwa domowego, jak i w przemyśle oraz rolnictwie. Stosuje się różne układy połączeń uzwojeń fazowych stojana. Przedstawiony na rys.1 tzw. układ połączeń L stanowi najczęściej stosowany typ połączeń uzwojeń stojana. Powszechnie stosowanym rozwiązaniem, pozwalającym na ekonomiczną pracę maszyny indukcyjnej przy zasilaniu jednofazowym, jest odpowiedni dobór jednego lub dwóch kondensatorów.



Rys.1. Silnik indukcyjny 1-fazowy z kondensatorem pracy o układzie połączeń uzwojeń stojana typu L
Fig.1. Single – phase capacitor motor with L connected stator windings

W stosunku do projektowanego silnika sformułowano następujące wymagania:
- duży poślizg krytyczny s_{kr} (związany z zadaną przez odbiorcę praktycznie liniową charakterystyką mechaniczną w zakresie prędkości $(0 \div n_s)$, gdzie n_s prędkość synchroniczna, rys.2),
- minimalna wartość momentu rozruchowego: $T_1 \geq 1{,}6$ [Nm],
- zastosowanie pojedynczego kondensatora pracy.



Rys.2. Przebieg momentu silnika sporządzony na podstawie zakładanych danych
Fig.2. Electromagnetic torque versus speed of the motor made on basis of the assumed data

2. ALGORYTM PROJEKTOWANIA SILNIKA

Przedstawione we wstępie wymagania pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

- w procesie projektowania należy dążyć do maksymalnego wykorzystania materiałów czynnych,
- podstawowy problem będzie stanowić odprowadzenie ciepła wydzielanego w wirniku ze względu na wymaganie dużego poślizgu krytycznego.

W procesie projektowania wykorzystano algorytm, przedstawiony w pracy [1]. Wykorzystano w nim fakt, iż z teoretycznego punktu widzenia jednofazowy silnik indukcyjny z kondensatorem pracy stanowi niesymetryczną maszynę 2-fazową. Najdogodniejszym sposobem jej analizy jest wyodrębnienie:

- rezystancji i reaktancji rozproszeń, stanowiących wraz z kondensatorem roboczym „niesymetryczny układ zasilania",
- dołączonej przezeń do sieci jednofazowej „idealnej maszyny 2-fazowej".

Wynikający stąd schemat zastępczy maszyny i otrzymane na jego podstawie zależności matematyczne wykorzystano w opracowanym programie komputerowym.

3. POŚREDNIE WARIANTY PROJEKTU SILNIKA

Jako wariant wyjściowy (wzorcowy) dla projektu silnika o zadanej charakterystyce mechanicznej (rys.2) przyjęto silnik trójfazowy typu SEMKg71-4B2/PO1 o danych: P_n=250W, U_s=230V, n=1426 obr/min.

Osiągnięcie zadanej charakterystyki mechanicznej wymagało:

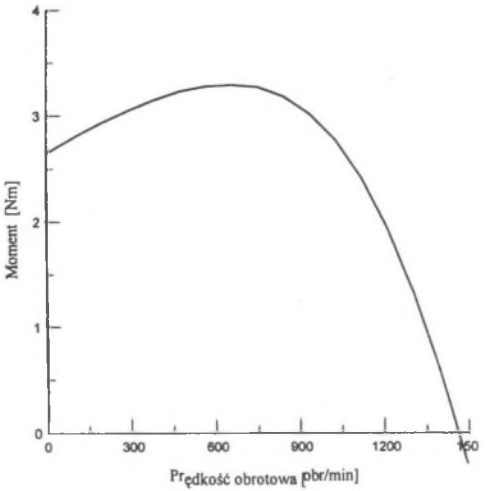
- zwiększenia wartości poślizgu krytycznego maszyny s_{kr},
- zachowania wartości momentu rozruchowego $T_l \geq 1{,}6$ [Nm].

Realizacja projektu wiązała się z koniecznością znacznego zwiększenia wartości rezystancji klatki wirnika, przy jednoczesnym zachowaniu wartości temperatur poszczególnych elementów maszyny w dopuszczalnym zakresie.

W pierwszym etapie badań powyższe założenia postanowiono osiągnąć przy wykorzystaniu standardowych konstrukcji wirników i stojanów. Zmiany odnosiły się tylko do materiału klatki wirnika i danych nawojowych stojana.

Otrzymane wyniki okazały się niezadowalające. Przy zachowaniu dopuszczalnych temperatur poszczególnych elementów maszyny poślizg krytyczny udało się obniżyć zaledwie do $s_{kr} \approx 0{,}5$. Otrzymaną charakterystykę mechaniczną momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji prędkości przedstawiono na rys.3.

W trakcie dalszych prac zdecydowano się na dalej idące zmiany konstrukcji wirnika. Otrzymane wyniki nadal nie odpowiadały stawianym wymogom. Mimo osiągnięcia wartości poślizgów krytycznych $s_{kr} \approx 1$, otrzymane wartości gęstości prądów i związane z nimi straty w maszynie okazały się niedopuszczalne, co przedstawiono w tab.1.



Rys.3. Charakterystyka mechaniczna dla pierwszego wariantu pośredniego
Fig.3. Electromagnetic torque versus speed curve for first motor version

Tabela 1

	Bieg jałowy	Obciążenie znamionowe	Stan krytyczny	Rozruch
Poślizg	0.087	0.271	0.901	1.0
Prędkość obr. [obr/min]	1369	1094	149	0
Moment [Nm]	0	1.223	2.882	2.804
Krotność momentu	0	1.0	2.307	2.292
Moc pobierana [W]	381.6	455.2	590.3	593.6
Sprawność	0	0.308	0.075	0
Współczynnik mocy	0.881	0.935	0.968	0.968
Straty całkowite	381.6	315.1	546.3	593.6
Prąd sieci [A]	1.883	2.118	2.653	2.666
Prądy: Fazy G [A]	2.525	2.227	2.352	2.417
Fazy P [A]	2.404	2.201	1.594	1.526
Napięcie na kond. [V]	546.6	500.4	362.4	347
Gęstość prądów:				
Fazy G [A/mm^2]	7.16	6.32		
Fazy P [A/mm^2]	8.5	7.78		

4. WARIANT OSTATECZNY PROJEKTU SILNIKA

Wykorzystując przedstawione uprzednio wyniki oraz przyjmując wymiary maszyny, przy których możliwe byłoby uzyskanie charakterystyki mechanicznej z rys.2, wybrano silnik indukcyjny z wirnikiem bezżłobkowym. Możliwe były następujące trzy rozwiązania [2]:

- wirnik lity (masywny),
- wirnik lity (masywny) z warstwą przewodzącą,
- wirniki pakietowany z warstwą przewodzącą.

Ze względu na:

- możliwości technologiczne producenta prototypu (którym była firma BESEL),
- brak doświadczeń konstruktorskich i technologicznych, dotyczących silników wyposażonych w wirnik lity przy zasilaniu niesymetrycznym,
- duże znaczenie składowej przeciwbieżnej pola magnetycznego przy biegu jałowym, narzucające dobór kondensatora,

wybrano rozwiązanie wirnika pakietowanego z warstwą przewodzącą. Jego przekrój poprzeczny przedstawia rys.4. Wykorzystując analogię tego rozwiązania z silnikiem kubkowym w obliczeniach przyjęto następujące parametry zastępczej warstwy [3]:

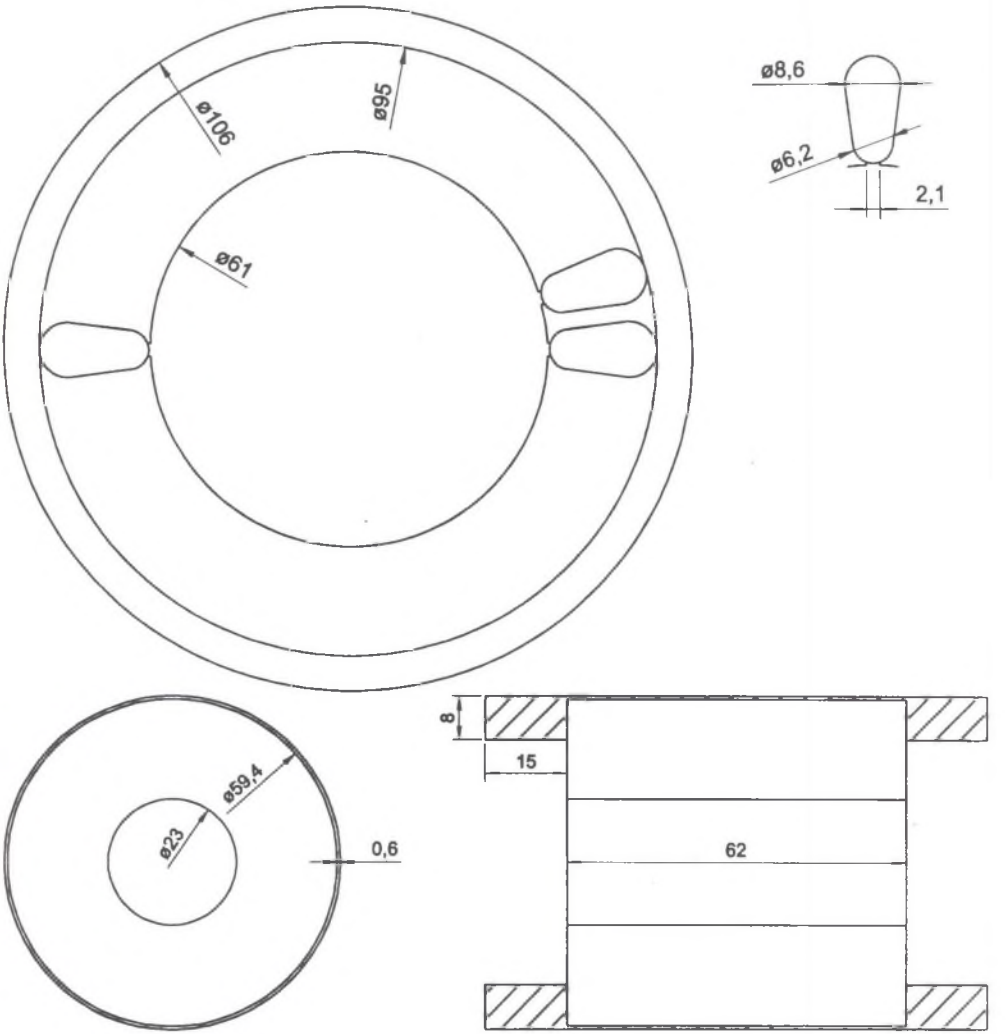
$$R_2^* = m_1 z_1^2 k_{ws}^2 \frac{2}{\pi}\left(\frac{2\rho_2 l_1}{d_{re} d_1} + \frac{\rho_2 d_{re}}{p^2 b_2 d_2}\right), \quad X_{2\sigma}^* \approx 0 \tag{1}$$

gdzie:

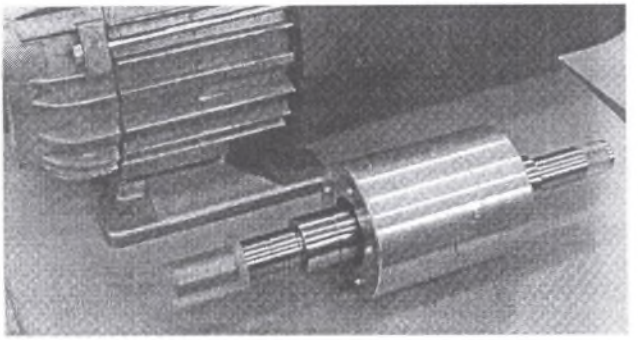
d_{re} - zewnętrzna średnica kubka wirnika, d_1 - grubość kubka wirnika, ρ_2 - rezystywność materiału kubka wirnika, b_2 - szerokość pierścienia, d_2 - wysokość pierścienia, m_1 - liczba faz (2), z_1 - l. zwojów szeregowych (fazy głównej), k_{ws} - współczynnik uzwojenia stojana (fazy głównej).

Dla celów analizy porównawczej zaprojektowano i wykonano dwie konstrukcje silnika:

- Konstrukcja **1** - stanowiła wstępny wariant silnika, łatwy do wykonania ze względu na niewielkie zmiany konstrukcyjne. W tym wariancie wykrój blach stojana pozostał niezmieniony w stosunku do silnika wzorcowego SEMKg71-4B2/T/PO1. Zmieniono dane nawojowe, przekroje przewodów oraz pojemność kondensatora. Przyjęto największe możliwe współczynniki wypełnienia żłobka (0.78), co pozwoliło na sprawdzenie, jakie parametry można uzyskać przy konstrukcji już istniejącej, przy zachowaniu niezmienionego wykroju blach stojana.
- Konstrukcja **2** - w tym wariancie zmieniono wykrój blach stojana silnika, dane nawojowe, przekroje przewodów oraz pojemność kondensatora. Budowa wirnika była identyczna jak w Konstrukcji **1**.



Rys.4. Przekrój poprzeczny maszyny z wirnikiem pakietowanym pokrytym warstwą przewodzącą Konstrukcji 2
Fig.4. Cross-section of the motor with laminated rotor covered by conductive solid layer – Construction 2

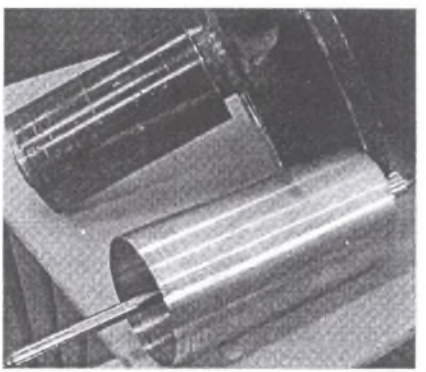


Rys.5. Wirnik o Konstrukcji 2
Fig.5. Rotor according to Construction 2

Wykorzystanie w obliczeniach projektowych algorytmu numerycznego, opracowanego dla maszyn o budowie tradycyjnej, wymagało jego wstępnej weryfikacji. Sprawdzenia dokonano, wykorzystując wyniki pomiarów, przeprowadzonych na przykładzie tachoprądnicy PTF-40 o danych: 1-fazowe uzwojenie mostkowe symetryczne, 4 W, 1500 obr/min, 220/45 V, 0.55 A – 1986 r. producent - ZAP Ostrów Wielkopolski (rys.6). W tym celu jej uzwojenia połączono do pracy silnikowej przy zasilaniu z sieci 1-fazowej, łącząc szeregowo kondensator o pojemności 1 μF do jednej z faz (faza pomocnicza). Otrzymane na tej podstawie wyniki pomiarowe wraz z rezultatami symulacji komputerowych przedstawiono w tab.2.

Tabela 2

Stan pracy		I_g [A]	I_p [A]	I_s [A]	U_c [V]	P [W]
Bieg jałowy	Pomiar	0,13	0,12	0,11	360	16
	Symulacja	0,129	0,121	0,132	384	12,1
Stan zwarcia	Pomiar	0,28	0,08	0,28	245	54
	Symulacja	0,291	0,079	0,286	250	64,7



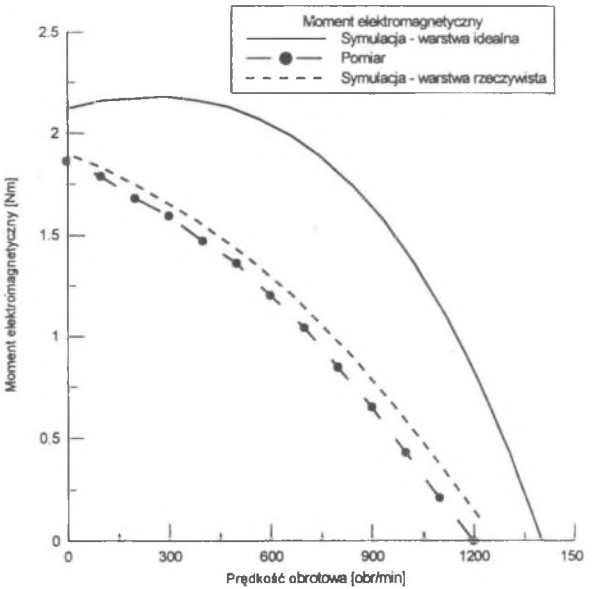
Rys.6. Wirnik tachoprądnicy kubkowej PTF-40
Fig.6. The rotor of a tachometer PTF-40

Błąd, dotyczący pomiaru mocy na biegu jałowym, może wynikać z niedokładności danych, dotyczących strat mechanicznych maszyny w tym stanie pracy. Ponadto źródłem błędów proponowanej metody może być zaniedbanie trójwymiarowego (3D) rozkładu pola, zwłaszcza dla stanu zwarcia (odnosi się to głównie do obszaru pierścieni, zwierających warstwę przewodzącą).

Wyniki pomiarów i symulacji dla Konstrukcji 2 przedstawiono na rys.7. Wykazywały one znaczące rozbieżności w odniesieniu do poszczególnych prototypów. Za podstawową przyczynę należy uznać trudności technologiczne, związane z wykonaniem warstwy przewodzącej wirnika. Proces technologiczny obejmował:

- pokrycie nieużłobkowanego wirnika (pakietowanego) ciekłym aluminium o grubości ok. 3 mm,
- obróbkę mechaniczną (toczną) zmniejszającą grubość warstwy przewodzącej do zadanej wartości 0,6 mm.

Obróbka mechaniczna prowadziła do dużych uszkodzeń warstwy przewodzącej, a w konsekwencji – do zmiany rozkładu przestrzennego prądów wirowych i zmiany parametrów elektrycznych warstwy. Powodowało to znaczące zniekształcenie założonej charakterystyki mechanicznej maszyny.



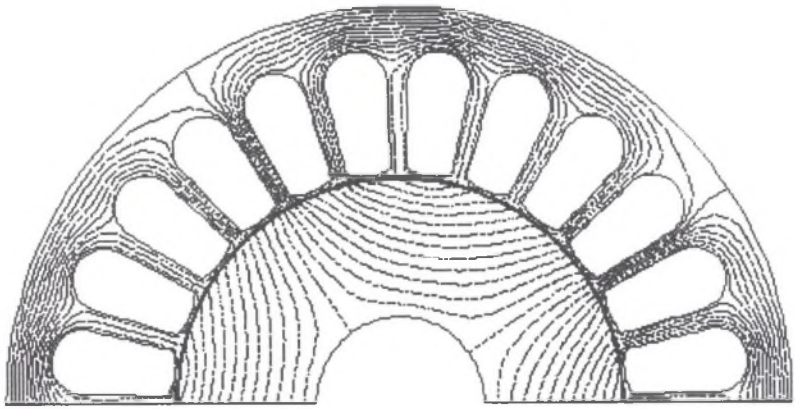
Rys.7. Porównanie wyników symulacji i pomiarów
Fig.7. Comparison of measurement and simulation results

Jakość wykonania warstwy przewodzącej sprawdzono na podstawie pomiaru stanu zwarcia przy symetrycznym zasilaniu dwufazowym. Prądy fazowe dobrano w ten sposób, by zapewnić równość przepływów uzwojeń:

$$N_{sg} I_g = N_{sp} I_p \tag{2}$$

Otrzymana na tej podstawie wartość rezystancji zastępczej wirnika była dwukrotnie większa niż otrzymana z zależności (1) przy założonych wymiarach warstwy oraz połączeń czołowych.

Zmiana rezystancji warstwy przewodzącej na wartość równą wartości wyznaczonej pomiarowo dała wyniki symulacji, będące w bardzo dobrej zgodności z rezultatami otrzymanymi pomiarowo. Parametry wykorzystane w algorytmie $(R_2^*, X_{2\sigma}^*, X_{1\sigma})$ zweryfikowano przy wykorzystaniu metody elementów skończonych (rys.8), otrzymując zadowalającą zgodność wyników [5].



Rys.8. Rozkład magnetycznego potencjału wektorowego dla zasilania składową zgodną prądu (s=1)
Fig.8. Magnetic vector potential distribution for positive current sequence supply (s=1)

LITERATURA

1. Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Projektowanie indukcyjnych silników jednofazowych z kondensatorem pracy za pomocą maszyny cyfrowej, Rozprawy Elektrotechniczne 1983, 29, z.1, s.133-143.
2. Dąbrowski M., Gieras J.: Maszyny indukcyjne o wirniku masywnym, PWN, Warszawa 1977.
3. Turowski J.: Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych, WNT, Warszawa 1982.
4. Gieras J.: Silniki indukcyjne liniowe, WNT, Warszawa 1990.
5. Binns K.J., Lawrenson P.J., Trowbridge C.W.: The analytical and numerical solutions of electric and magnetic fields. John Wiley, New York 1992.

Recenzent: Dr hab. inż. Ernest Mendrela

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 kwietnia 2000 r.

Abstract

The main purpose of this paper is design and research investigations aiming at the change of the stable region of the torque-speed characteristic of a single-phase induction motor with L connected stator windings. As a basis for the design process the squirrel-cage induction motor SEMKg71-4B2/PO1 was adopted. The goal of the design was to achieve a linear torque-speed characteristic in its motoring region, with allowable temperature rises. Several designs were considered, ranging from various squirrel cage rotors of different slot dimensions to a-like drug-cup motor. Simulation results are compared with measurement results.

Single-phase induction motors are used in many home appliances as well as in industry and agriculture. The way to achieve high efficiency for L connected stator windings (Fig.1) is the appropriate choice of the capacity of the employed capacitor. In the described design process the following requirements are applied:

- high slip s_{kr} for the breakdown (maximum) torque, (Fig.2),
- minimal value of the starting torque: $T_1 \geq 1{,}6$ [Nm],

In Chapter 2 the algorithm of design is briefly discussed. In Chapter 3 several designs of the prototype single-phase motor with L connected stator windings are considered. To achieve previously described goals considerable increase of the rotor resistance is necessary.

In the first stage of the design standard setups of stator and rotor were employed. The obtained results were unsatisfactory as value of the slip s_{kr} was increased only to around 0,5 (Fig.3). In the next step of researches design of the rotor was considerably changed. Although the value of the slip s_{kr} was increased to around 1 (starting), current densities in rotor and stator windings were unacceptable (Table 1).

In the final stage of the design three different smooth (unslotted) rotor versions were considered:

- solid rotor,
- solid rotor with conducting surface layer,
- laminated rotor with conducting surface layer.

Taking into account the following circumstances:

- technology to be employed (BESEL Ltd.),
- lack of engineering experience in the design of solid rotor machines for the unsymmetrical supply,

only the third version was further analysed. The final data of the prototype of a single-phase motor are given in Chapter 4 (Figs.4, 7).