

SPÍNANÝ RELUKTANČNÝ MOTOR A JEHO VYUŽITIE V TRAKČNEJ APLIKÁCIÍ

SWITCHED RELUCTANCE MOTOR AND ITS UTILIZATION IN TRACTION APPLICATIONS

Článok sa zaoberá vlastnosťami spínaného reluktančného motora (SRM) a jeho využitím v elektrickej trakcii. V článku sú uvedené výsledky vyšetrenia parametrov náhradnej schémy SRM meraním a výpočtom pomocou metódy konečných prvkov. Vypočítané a namerané parametre sú použité ako vstupné údaje do matematického modelu, ktorý bol použitý na simuláciu. Výstupom zo simulácie sú priebehy fázových prúdov a napätí, momentu a charakteristika $T = f(\omega)$, z ktorej je možné získať trakčnú charakteristiku. Uvedené sú aj priebehy strát a účinnosti. V závere uvádzame krátke porovnanie vybraných parametrov SRM a indukčného motora.

1. Úvod

V minulosti mali jednosmerné sériové motory jednoznačné postavenie v elektrickej trakcii, pretože ich prirodzená mechanická charakteristika sa najviac približovala trakčným požiadavkám. S rozvojom impulzných meničov a nových polovodičových štruktúr sa postupne na ich miesto dostávali jednosmerné cudzobudené motory, ktorých kotva a buďenie boli napájané z dvoch nezávislých meničov, čo umožňovalo úpravu tvrdej mechanickej charakteristiky tohto druhu motora na mäkkú charakteristiku tak, aby sa čo najviac podobala trakčnej charakteristike. Rozvoj polovodičovej a riadiacej techniky však spôsobil aj rozširovanie pohonov s indukčnými motormi (IM). Riadenie týchto strojov, či už skalárne alebo vektorové, bolo teoreticky a simulačne vyriešené už predtým, ale výkonové zaťaženia vtedy používaných striedačov a riadiaca elektronika neumožňovali použitie vysoko výkonových pohonov s IM, ku ktorým patrí aj elektrická trakcia. To umožnil až v poslednej dobe rozvoj mikropočítačov a polovodičových štruktúr s vysokým záverným napätím a priepustným prúdom. Tým začali pohony s IM vážne konkurovať pohonom s jednosmernými strojmi, pretože z ekonomického hľadiska začali vynikať výhody IM voči jednosmerným strojom: jednoduchá konštrukcia, nižšie výrobné náklady a teda aj cena, nenáročná údržba (nie je tam komutátor, ktorý pri jednosmerných strojoch predstavuje najhlavnejšiu časť pri údržbe), vysoký hmotný výkon, pri súčasnom zvažení, že výrobné náklady striedača sú vyššie ako výrobné náklady impulzného meniča. Avšak pohon s IM musí byť vektorovo riadený, aby sa dosiahlo nezávislé riadenie toku a momentu stroja, tak ako je to

This paper deals with the performances of switched reluctance motor (SRM) and with its utilization in electric traction. The investigation of SRM equivalent circuit parameters by measurement and by finite element method is described. The calculated and measured values of parameters are used in the mathematical model of SRM, which was simulated. The simulation outputs are time profiles of the phase currents, voltages and torque and also the torque/speed characteristic, which can be used for the traction characteristic calculation. The dependencies of the losses and efficiency on the speed are shown. The comparison of performances of induction machine and SRM is shown at the end.

1. Introduction

The DC series machine had a unique status in electric traction drives in the past because of its natural mechanical characteristic approaches to traction demand. The development of DC choppers with new semiconductor structures has caused DC series machines to be replaced by DC separately excited ones, whose field and armature winding are fed from two independent DC choppers to improve its hard characteristic to the soft one, so it is similar with traction characteristic. However, the development of the semiconductor and control electronics has also caused the spread usage of drives with induction machines (IM). The control techniques of IM, scalar or vector, had been theoretically brought under control and from the simulations point of view many years ago, but the power stresses of inverters and control electronics used in that time did not allow use of high power drives with IM, where electric traction also takes place. Only in the recent development of microcontrollers and semiconductor structures with high reverse blocking voltage and current density has the usage of the IM drives in electric traction been enabled.

They have become a very strong competitor to the DC drives because some advantages of the IM, such as simple construction, lower production costs and price, maintenance-free operation (there is no commutator which is the key part during the DC machine maintenance), and higher power density. Therefore, IM have come to the forefront with DC machines considering the parallel that production costs of the inverter are higher as that of DC choppers. But the IM drive has to be vector controlled to achieve

* Pavol Rafajdus, Valéria Hrabovcová, Ladislav Janoušek, Peter Hudák

Department of Electric Traction and Energetics, Faculty of Electrical Engineering, University of Žilina, Veľký diel, 010 26 Žilina, Slovak Republic, Tel.: +421-89-5132158, E-mail: rafajdus@kete.utc.sk, hrabovc@fel.utc.sk, ladislav@kete.utc.sk, hudak@kete.utc.sk

priradené dané v jednosmernom stroji, čím sa zvyšujú nároky na riadenie a riadiacu elektroniku. To isté platí aj o tom, že prirodzená charakteristika $T = f(\omega)$ IM je v oblasti prevádzkových sklzov tvrdá a preto musí byť výstupná charakteristika pohonu, podobne ako pri cudzobudenom jednosmernom motore, upravená riadením pre trakčné požiadavky. Vektorové riadenie IM má aj nevýhody ktorými sú hlavne závislosť presnosti riadenia od presnej znalosti parametrov stroja, pretože riadené veličiny – tok a moment stroja nie sú priamo merané, ale sú vypočítavané z modelu stroja na základe meraných veličín ako sú prúdy, napätia a otáčky.

Rozvoj výkonovej elektroniky spustil aj vývoj pohonov, ktoré sa označujú ako „moderné“, aj keď akčné členy v týchto pohonoch využívajú princípy objavené už v 19. storočí. Jedným z takýchto pohonov je pohon so spinaným reluktančným motorom, ktorého princíp činnosti bol objavený v roku 1838. A práve tento pohon sa stáva vážnym konkurentom pohonov s IM. SRM vyniká voči IM hlavne jednoduchšou konštrukciou a teda aj jednoduchšou a lacnejšou sériovou výrobou, vyššou robustnosťou, menšími nárokmi na údržbu. Menič, ktorý je z princípu činnosti pri SRM nutný, je ale jednoduchší ako striedač pohonov s IM a teda aj finančne menej nákladný. To isté platí aj o riadení SRM. To je tiež z princípu činnosti nutné, avšak je oveľa jednoduchšie ako pri IM, pretože pri SRM riadime len veľkosť prúdu fázy a dĺžku jej zopnutia, čo je závislé od rýchlosti a táto nelineárna závislosť môže byť v riadiacom mikropočítači zadaná tabuľkovo. Ďalšou nespornou výhodou je možnosť riadenia v otvorenej slučke, samozrejme za cenu zmenšenia prevádzkovej oblasti, resp. možnosť bezsnímačového riadenia, čo je súčasným vedeckým trendom v riadení IM. Tvar prirodzenej charakteristiky SRM ($T = f(n)$), hoci je napájaný z meniča, sa veľmi podobá trakčnej charakteristike. Preto aj z tohoto dôvodu sa stáva vážnym konkurentom ostatným, doteraz používaným motorom v elektrickej trakcii. Na druhej strane je potrebné spomenúť aj zopár nevýhod, medzi ktoré patrí najmä zvlnený vyvíjaný moment, ktorý je daný konštrukciou motora a spinaním jednotlivých fáz, magnetický hluk a potreba snímača polohy pre spoľahlivý chod. Z hľadiska uvedených vlastností boli urobené podrobné analýzy SRM pre trakčné účely elektromobilov [2] a lokomotív [3].

Ako bolo spomenuté vyššie, konštrukcia SRM je jednoduchá, na statore a rotore má vyjadrené póly, ktoré je vhodnejšie volať zuby, pretože pojem pólu motora reluktančného typu vyjadruje len fyzický pól, t. j. vyjadrený výstupok statora na vnútornom obvode a rotora na vonkajšom obvode. Rotor aj stator sú vrstvené z plechov. Napájacie (budiace) vinutie je umiestnené iba na statore, rotor je pasívny a má malý moment zotrvačnosti. Každý statorový zub má budiace vinutie navinuté priamo na ňom. Protihľadé zuby môžu byť spojené do série alebo paralelne a tvoria jednu fázu (napr. A, obr.1a). Prierez trojfázového 6/4 SRM ($m = 3$, m je počet fáz), ktorý má šesť zubov na statore $N_s = 6$ a štyri na rotore $N_r = 4$, môžeme vidieť na obr. 1a. V tomto stroji sa pri zopnutí jednotlivých fáz vytvára vždy 2-pólové pole.

Cieľom tohoto článku je poukázať na vlastnosti SRM z hľadiska trakčnej aplikácie, uviesť metódy pre identifikáciu hlavných parametrov SRM, ktoré sú použité v matematickom modeli. Tento model je aplikovaný v simulácii, ktorej výstupom sú priebehy fázo-

decoupled flux and torque control of the machine as it is naturally given in DC machines. It increases claim for the controlling and control electronics. Vector control of IM drives also has drawbacks, mainly the dependence of control preciseness on the exact knowledge of the machine equivalent circuit parameters because the controlled quantities – flux and torque are not measured directly, but they are calculated from the machine model based on the measured quantities like currents, voltages and speed.

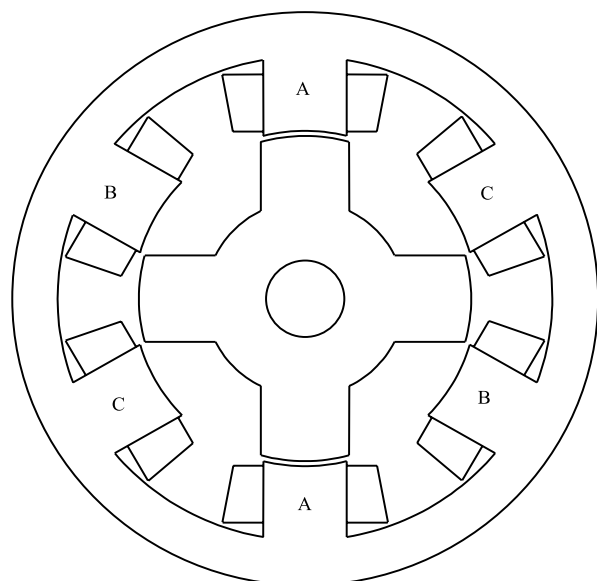
The power electronics evolution has also started the development of drives, called “modern”, although the actuators used in these drives work based on the principles invented in the 19th century. Switched reluctance machine (SRM) is one of them. Its principle of operation was invented in 1838. And just the drive with this machine is becoming a very strong competitor to the drives with IM. SRM has simpler construction and, therefore, lower production costs, higher robustness and lower maintenance demands as the drives with IM. The SRM can work only if it is fed from an inverter, but the inverter of SRM is simpler and, therefore, cheaper than the one used to feed IM. The same conclusion is also valid for controlling SRM. Basically, it is also needed for the SRM operation, but it is simpler as the vector control for drives with IM, because only the values of the phase currents and the switching time, which are speed dependent, are controlled and these non-linear dependencies can be given in table form and put to the microcontroller. The next indisputable advantage of the SRM drive is that it can be controlled in the open speed loop and also sensorlessly in the closed speed loop, which is the up-to-date trend in IM drives. The profile of the SRM torque/speed characteristics ($T = f(n)$), although it is fed from the inverter, looks similar to traction characteristics. That is why the SRM is becoming a very strong competitor to the IM. On the other hand, we should mention also that the drawbacks of the SRM is the torque ripples, which are given by the teeth construction and phase switching, magnetic noise and speed sensor necessity if the unfailling operation is desired. From the SRM performances point of view mentioned above, the detailed analyses of the SRM used in electromobiles and locomotives are given in [2], [3].

As it was mentioned earlier, the construction of SRM is very simple. It has salient poles on stator as well as on rotor. It is preferable to name these poles as teeth, because the term of pole in the SRM expresses only the physical pole, which means salience on the inner surface of stator and outer surface of rotor. Both the stator and rotor are laminated. The field windings are located only on the stator; the rotor is passive and has a low moment of inertia. Each stator tooth has a field winding on it. The windings of the teeth, which are geometrically opposite, are connected in series, and they create one phase (for example A, Fig. 1a). The cross section area of the three phase $m = 3$ (m - number of phases), 6/4, which means that the machine has six poles on the stator $N_s = 6$ and four poles on the rotor $N_r = 4$, SRM is shown on Fig. 1a. A two-poles field is created in this machine if the individual phases are switched.

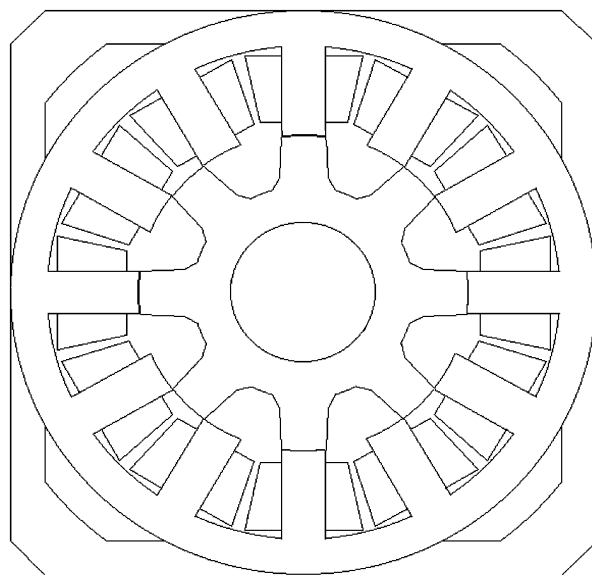
The aims of this paper are to point out the performances of SRM from the traction application point of view and to show how the parameters of the SRM used in its model can be identified. The SRM model, described below, has been used in simulation. The results are time profiles of phase currents i and voltages u ; i ,

vého prúdu i a napätia u v závislosti od času $i, u = f(t)$ a charakteristika $T = f(n)$, od ktorej je veľmi blízko k trakčnej charakteristike. Na ilustráciu sú uvedené priebehy strát a účinnosti. Aby bolo možné overiť simulované priebehy, bol analyzovaný konkrétny SRM (jeho prierez je zobrazený na obr.1.b), ktorý má nasledovné štítkové údaje: $m = 3$, (12/8, pričom štyri zuby tvoria jednu fázu a vytvára sa 4-pólové pole) 3,7 kW; 11,8 Nm; 3000 ot/min. V závere je krátke porovnanie niektorých parametrov SRM a indukčného motora, napájaného z meniča podľa [3] a [9].

$u = f(t)$ and torque/speed characteristic $T = f(n)$, from which the traction characteristic can be constructed. The dependencies of the losses and efficiency on the speed are illustrated. The SRM (its cross section area is shown on Fig. 1b) with nameplate: $m = 3$, 12/8 (four teeth create one phase and a four-pole field is in the machine) 3.7 kW, 11.8 Nm, 3000 rpm has been analyzed to prove the simulation results. The comparison of the performances of the IM, fed from the inverter, and SRM with the same rated power and speed based on [3] and [9] is shown at the end.



a) prierez trojfázového SRM 6/4
a) cross-section of three phase 6/4 SRM



b) prierez analyzovaného SRM 12/8
b) cross-section of analyzed SRM 12/8

Obr. 1. Prierezy SRM

Fig. 1. Cross-sections of SRM

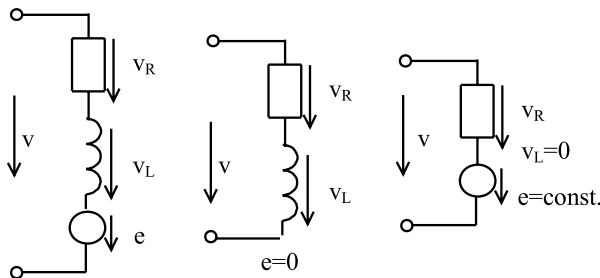
2. Analýza parametrov SRM

Jedným z najdôležitejších parametrov SRM sú magnetizačné charakteristiky spriahnutého toku $\psi = f(\Theta, i)$ v závislosti od veľkosti prúdu i a polohy rotora Θ . Náhradná schéma jednej fázy je na obr. 2, ktorá pozostáva z odporu vinutia fázy R_f , fázovej indukčnosti L a indukovaného napätia u_i . Dôležitým rozdielom oproti náhradným schémam ostatných motorov je ten, že indukčnosť L sa mení s veľkosťou prúdu a polohou rotora $L = f(\Theta, i)$, to znamená, že je závislá od dvoch premenných. Vzájomná indukčnosť medzi fázami je veľmi malá, preto sa vo všeobecnosti zanedbáva. Charakteristiky spriahnutého toku je možné získať viacerými metódami: statickým meraním, metódou konečných prvkov (MKP) alebo analytickým výpočtom, ak je napájaná iba jedna fáza. Priebeh nameraných hodnôt spriahnutého toku vyšetřovaného motora vidíme na obr. 3. Hodnoty toku sú uvedené iba do hodnoty prúdu 12 A, pretože pri vyššej hodnote prúdu motor vyvíjal taký moment, pri ktorom sa nedala s dostatočnou presnosťou udržať konštantná poloha rotora, ktorá sa menila po jednom stupni (mechanickom). Pre vyššie hodnoty prúdu bol spriahnutý tok vypočítaný pomocou MKP [4].

2. The analysis of SRM parameters

One of the most important parameters of SRM are magnetization curves of flux-linkage(versus current i and rotor position Θ , given as $\psi = f(\Theta, i)$). The equivalent circuit of one phase is in Fig. 2, consisting of winding resistance R_f , phase inductance L and induced voltage u_i . The important difference between the equivalent circuit of SRM and other motors is that the inductance varies with current and rotor position $L = f(\Theta, i)$, which means the inductance depends on two variables. Mutual inductance between phases is very low; consequently, it may be neglected. It is possible to obtain the magnetization curves of $\psi = f(\Theta, i)$ by many methods: by static measurement, by finite element method (FEM), or by analytical approach, only when one phase is supplied. The profile of measured values of the investigated motor flux-linkage can be seen on Fig. 3. Values of flux-linkage ψ are presented only for current to 12 A, because it was very difficult to maintain the rotor in the stable position for such a high value of torque if the current was over 12 A. The rotor position was changed by 1 mechanical degree. For higher values of current the flux-linkage has been computed by means of FEM [4]. It is possible to calculate phase

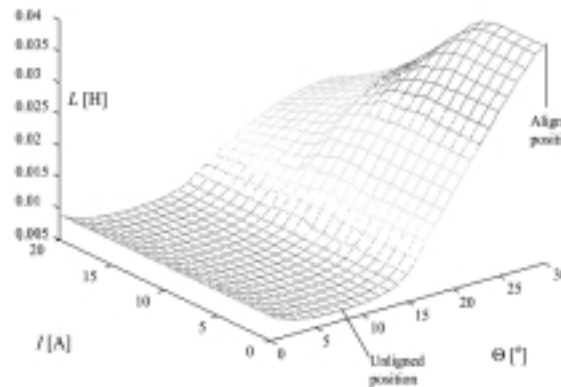
Zo spriahnutého toku je možné vypočítať na základe prúdu pre danú polohu rotora fázovú indukčnosť. Na obr. 4 je znázornený priebeh fázovej indukčnosti $L = f(\Theta, i)$ vyšetřovaného SRM, ktorá je vypočítaná pomocou MKP. Fázová indukčnosť je jedným zo vstupných parametrov matematického modelu SRM.



Obr. 2. Náhradná schéma jednej fázy SRM
Fig. 2. Equivalent circuit of one phase of SRM

Dôležitú úlohu v simulácii má matematický popis zmeny indukčnosti v závislosti od fázového prúdu a polohy rotora. Existujú dva bežné prístupy:

1. Jednotlivé hodnoty indukčnosti (namerané, alebo vypočítané) sú zadané tabuľkovo použitím lineárnej, kubickej alebo kubicko-splínovej interpolácie medzi jednotlivými hodnotami.
2. Na základe tabuľkových hodnôt je urobená analytická aproximácia vyjadrená spojitou funkciou. Táto metóda nemusí byť celkom presná, pretože sa veľmi ťažko hľadá analytická funkcia, ktorá by presne zodpovedala nameraným alebo vypočítaným tabuľkovým hodnotám. Ale je potrebné vziať do úvahy, že táto metóda je oveľa rýchlejšia [2].



Obr. 4. Fázová indukčnosť $L = f(\Theta, i)$
Fig. 4. Phase inductance $L = f(\Theta, i)$

3. Matematický model SRM

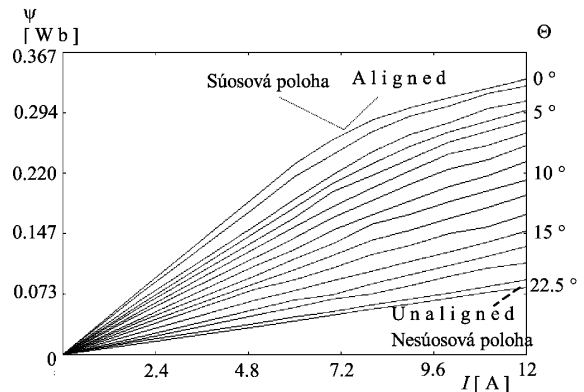
V predchádzajúcej kapitole sme uviedli náhradnú schému SRM pre jednu fázu, ktorú môžeme popísať rovnicou pre okamžitú hodnotu napätia:

$$u = R_f i + \frac{d\psi(i, \Theta)}{dt} = u_R + \frac{d\psi(i, \Theta)}{dt} \quad (1)$$

kde u - je svorkové napätie a u_R je úbytok napätia na odpore.

Pretože SRM má vyjadrené zuby na statore aj rotore, počas jeho prevádzky neexistuje ustálený stav, v ktorom má priebeh

inductance for a given current and rotor position from flux-linkage. The profile of phase inductance $L = f(\Theta, i)$ of investigated SRM computed by means of FEM is shown on Fig. 4. The phase inductance is one of the input parameters of the SRM mathematical model.



Obr. 3. ψ -i charakteristiky
Fig. 3. Magnetization curves ψ -i

The very important position in simulation takes the mathematical description of inductance versus phase current and rotor position. There are two common approaches:

1. The values of inductance (measured or calculated) are given in the table form with using linear, cubic or cubic-spline interpolation.
2. Analytical approximation expressed by continual function is done on the basis of a table's values. This method would not be too accurate, because it is very difficult to find the analytical function, which exactly corresponds with a table's values (measured or calculated). But take into account that this method is quicker [2].

3. Mathematical model of SRM

One-phase equivalent circuit of the SRM shown above can be described by the equation for the instantaneous value of voltage:

$$u = R_f i + \frac{d\psi(i, \Theta)}{dt} = u_R + \frac{d\psi(i, \Theta)}{dt} \quad (1)$$

where u - is the terminal voltage and u_R is the voltage drop due to resistance.

Because the SRM has salient poles on the stator as well as on the rotor, there is no steady state condition during its running, in

prúdu alebo napätia konštantnú alebo ustálenú hodnotu, pretože prúd aj spriahnutý tok narastajú počas každého pracovného cyklu z nulovej hodnoty v závislosti od rýchlosti otáčania a spôsobu riadenia. Preto je spriahnutý tok funkciou dvoch premenných: fázo-vého prúdu a polohy rotora a jeho časová derivácia môže byť vyjadrená nasledovne:

$$\frac{d\psi(i, \Theta)}{dt} = \frac{\partial \psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \Theta} \frac{d\Theta}{dt} = L(i, \Theta) \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \Theta} \omega \quad (2)$$

kde ω - je uhlová rýchlosť rotora.

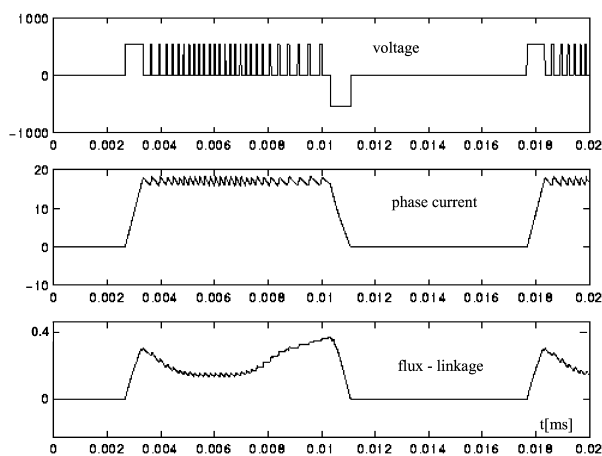
Vieme, že spriahnutý tok je daný súčinom indukčnosti a prúdu

$$\psi(i, \Theta) = L(i, \Theta) i \quad (3)$$

Ak dosadíme do vzťahu (2) vzťah (3), tak môžeme napísať:

$$\frac{d\psi(i, \Theta)}{dt} = L(i, \Theta) \frac{di}{dt} + i \omega \frac{dL}{d\Theta} = u_L + u_i \quad (4)$$

Prvá časť vzťahu u_L predstavuje indukčný úbytok napätia na indukčnosti a druhá časť vzťahu predstavuje indukované napätie, ktoré je úmerné veľkosti prúdu, uhlovej rýchlosti ω a pomeru zmeny indukčnosti od polohy rotora.



a) $n = 500 \text{ min}^{-1}$
a) $n = 500 \text{ rpm}$

which the current or voltage would have constant value, because the current and flux-linkage are established from zero every stroke depending on speed and on control strategy. Therefore, the flux-linkage depends on both variables: phase current and rotor position, and its time derivation can be expressed as follows:

$$\frac{d\psi(i, \Theta)}{dt} = \frac{\partial \psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \Theta} \frac{d\Theta}{dt} = L(i, \Theta) \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \Theta} \omega \quad (2)$$

where ω - is angular speed of rotor.

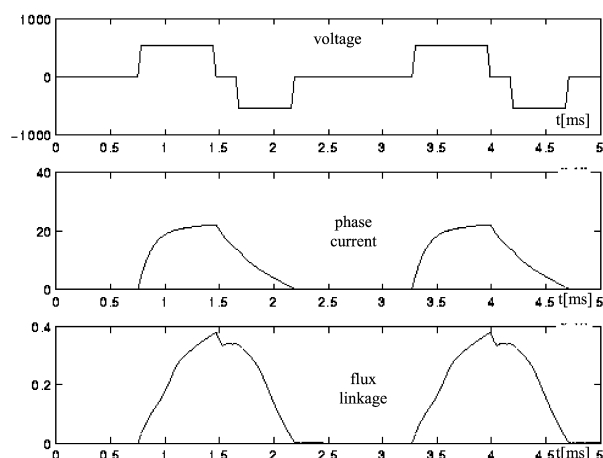
As it is known, the product of inductance and current gives the flux-linkage

$$\psi(i, \Theta) = L(i, \Theta) i \quad (3)$$

If equation (3) is included, the equation (2) can be rewritten:

$$\frac{d\psi(i, \Theta)}{dt} = L(i, \Theta) \frac{di}{dt} + i \omega \frac{dL}{d\Theta} = u_L + u_i \quad (4)$$

The first part of the equation u_L presents a voltage drop due to inductance, and the second part is induced voltage, which is proportional to the current, angular speed ω and position variation of the inductance.



b) $n = 3000 \text{ min}^{-1}$
b) $n = 3000 \text{ rpm}$

Obr. 5 Simulované priebehy napätia, prúdu a spriahnutého toku
Fig. 5 Simulated profiles of voltage, current and linkage flux

Aby sme mohli získať priebehy prechodových dejov SRM je potrebné riešiť m napätových rovníc. Pre jednu fázu má napätová rovnica nasledovný tvar:

$$u = R_f i + \frac{d\psi}{dt} = \left[R_f + \frac{dL(i, \Theta)}{d\Theta} \frac{d\Theta}{dt} \right] i + L(i, \Theta) \frac{di}{dt} \quad (5)$$

Ak zanedbáme vzájomné indukčnosti, tak potom môžeme vyjadriť vyvíjaný elektromagnetický moment nasledovne:

$$T_{in}(\Theta, i) = \frac{i^2}{2} \frac{dL(i, \Theta)}{d\Theta} \quad (6)$$

a súčasne

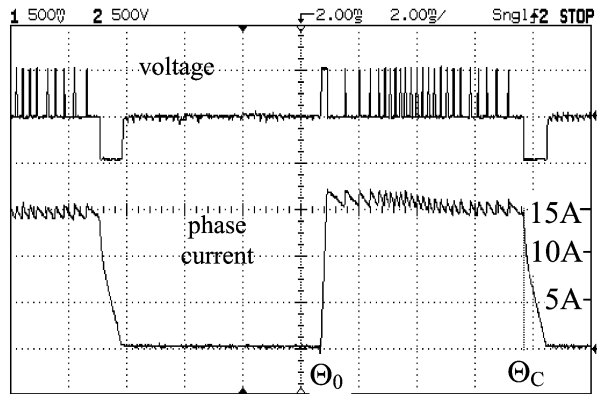
To get the profiles of SRM transients, it is necessary to solve m voltage equations. For one phase the voltage equation form is as follows:

$$u = R_f i + \frac{d\psi}{dt} = \left[R_f + \frac{dL(i, \Theta)}{d\Theta} \frac{d\Theta}{dt} \right] i + L(i, \Theta) \frac{di}{dt} \quad (5)$$

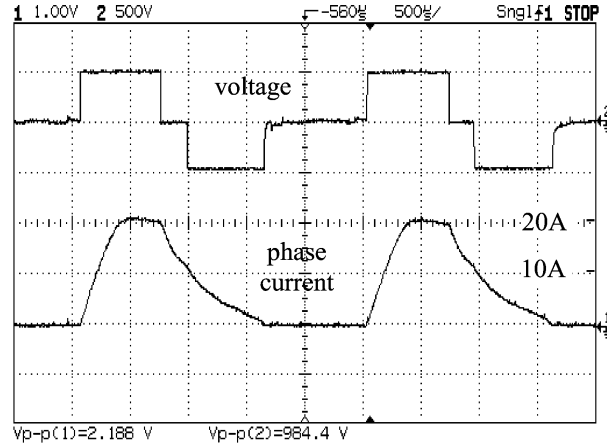
If mutual inductances are neglected, then it is possible to express a developed electromagnetic torque in this form:

$$T_{in}(\Theta, i) = \frac{i^2}{2} \frac{dL(i, \Theta)}{d\Theta} \quad (6)$$

and also



a) $n = 500 \text{ min}^{-1}$
a) $n = 500 \text{ rpm}$



b) $n = 3000 \text{ min}^{-1}$
b) $n = 3000 \text{ rpm}$

Obr. 6. Namerané priebehy napätia a prúdu
Fig. 6 Measured profiles of voltage and current

$$T_{in} - T_l = J \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

kde J - je moment zotrvačnosti všetkých rotujúcich častí a T_l je záťažový moment.

Z princípu činnosti SRM vyplýva, že potrebujeme vedieť aj aktuálnu polohu rotora, ktorá závisí od uhlovej rýchlosti rotora:

$$\Theta = \int \omega dt \quad (8)$$

Aby bolo možné vyriešiť všetky uvedené rovnice, je nevyhnutné zadať okrem svorkového napätia, odporu vinutia a momentu zotrvačnosti aj hodnoty indukčnosti, ktoré sú závislé od fázového prúdu a polohy rotora. Na zadávanie hodnôt indukčnosti je použitý prístup č. 1 popísaný v kapitole 2. Matematický model bol naprogramovaný a riešený prostredníctvom simulačného jazyka MATLAB/SIMULINK, použitím numerickej matematickej metódy na riešenie diferenciálnych rovníc Runge - Kutta. Na obr. 5 vidíme simulované priebehy fázového prúdu, napätia a spriahnutého toku pre nižšie rýchlosti (obr. 5a) $n = 500 \text{ min}^{-1}$ a pre vyššie rýchlosti (obr. 5b) $n = 3000 \text{ min}^{-1}$, keď záťažový moment bol rovný menovitému momentu 11,8 Nm. Na obr.6 môžeme vidieť namerané priebehy napätia a prúdu pre tie isté podmienky, ktoré boli použité v simulácii. Na základe dobrej zhody simulovaných a nameraných priebehov (obr. 5 a 6), môžeme využiť simuláciu aj na návrh a optimalizáciu parametrov SRM. Podrobnejšia analýza priebehov prúdov, napätí a ostatných veličín pri vyšších a nižších rýchlostiach je urobená v [7].

4. Straty a účinnosť SRM

Ako sme uviedli v úvode, pri výbere trakčného pohonu je potrebné mať na zreteli jeho účinnosť a s ňou súvisiace straty. Vo všeobecnosti sa v elektrických motoroch uvažuje o štyroch druhoch

$$T_{in} - T_l = J \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

where J - is moment of inertia of all rotating parts and T_l is load torque.

From the principles of SRM operation follows, that it is necessary to know an actual rotor position Θ , which depends on the angular rotor speed ω :

$$\Theta = \int \omega dt \quad (8)$$

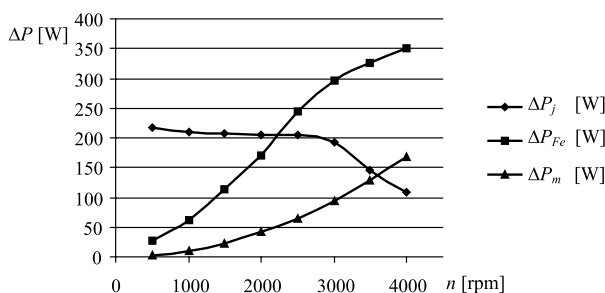
To solve all given equations, it is necessary to know terminal voltage, winding resistance and moment of inertia, and the values of inductance, depending on the phase current and rotor position. To set the inductance values, approach No. 1, described in chapter 2., has been used. A mathematical model has been solved by means of simulation language MATLAB/SIMULINK, solving differential equations on the basis of numerical mathematical method Runge-Kutta.

In Fig. 5 simulated phase current, voltage and flux-linkage profiles for lower speed (Fig. 5a), $n = 500 \text{ rpm}$, and for higher speed $n = 3000 \text{ rpm}$ (Fig. 5b), can be seen if load torque was equal to rated torque 11.8 Nm. In Fig. 6 measured voltage and current profiles for the same conditions as in simulations can be seen. On the basis of good coincidence simulated and measured values (Fig. 5 and 6), the simulation can be used also for SRM design and parameters optimization. More detailed analysis of the current, voltage and other variables profiles for higher and lower speed is made in [7].

4. SRM Losses and Efficiency

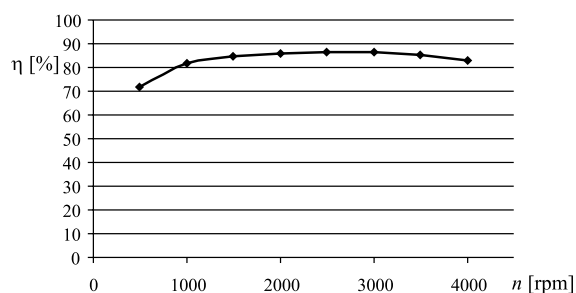
As mentioned in the introduction, in the process of the traction drive choice the losses and efficiency must be taken into account. Generally, in electrical machines four kinds of losses are

strát: straty vo vinutí (Jouleove straty) ΔP_j , straty v železe ΔP_{Fe} , mechanické straty ΔP_m a dodatočné straty ΔP_{ad} . Pre ilustráciu je na obr. 7 uvedený priebeh strát tu vyšetrovaného SRM určených pre rôzne hodnoty otáčok, pričom moment bol udržiavaný na konštantnej hodnote hysteréznym regulátorom prúdu (dvojpolohový regulátor) $T = 11,8$ Nm, pokiaľ to technické podmienky dovoľovali. Analýzu sme urobili prostredníctvom programu PC-SRD, VERSION 4., uvedeného v [5]. Z priebehov je vidieť, že pokiaľ bolo možné moment udržiavať na konštantnej hodnote (obr. 11), tak straty vo vinutí sa takmer nemenili. Boli dané tvarom prúdu, ktorý závisí nielen od záťažového momentu, ale aj od rýchlosti otáčania. Naopak, pri vyšších rýchlostiach efektívna hodnota prúdu klesne, tým klesnú aj straty vo vinutí. Straty v železe narastali so zvyšujúcimi sa otáčkami, pretože narastá aj časová zmena spriahnutého magnetického toku. Mechanické straty narastali tiež v závislosti od otáčok. Na obr. 8 je uvedený priebeh účinnosti v závislosti od otáčok, vypočítaný na základe priebehov strát z obr. 7.



Obr. 7. Priebeh strát SRM v závislosti od otáčok
Fig.7. The profile of SRM losses depending on speed

considered: winding losses ΔP_j , iron losses ΔP_{Fe} , rotational losses and additional losses ΔP_{ad} . The Fig. 7 illustrates the profile of the losses of the investigated SRM, determined for various values of speed, if torque has been kept on the constant value $T = 11.8$ Nm by means of hysteresis current controller, until technical condition allowed it. The analysis has been made by means of program PC-SRD, VERSION 4, seen in [5]. As seen in the profiles, until the torque can be kept in the constant value (Fig. 11), winding losses are not changing. The losses are given by the profiles of current, depending not only on the load, but also on the speed of rotation. In opposite, at the higher speeds the RMS value of the current decreases and, therefore, also decreases winding losses. Iron losses increase with increasing speed, because the time changing of flux-linkage also increases. Rotational losses also increase with speed. In Fig. 8 there is an efficiency/speed curve calculated on the basis of losses from Fig. 7.



Obr. 8. Priebeh účinnosti SRM v závislosti od otáčok
Fig.8. The profile of SRM efficiency depending on speed

5. Mechanická charakteristika SRM

Ako sme spomenuli v úvode, prirodzený tvar charakteristiky SRM $T = f(\omega)$ (obr. 9) sa podobá na trakčnú charakteristiku. Táto charakteristika sa skladá z troch základných častí.

V prvej časti vidíme konštantný priebeh momentu. Ten docielime tak, že fázový prúd budeme udržiavať na konštantnej hodnote vhodným druhom regulátora. Túto reguláciu je možné robiť iba v určitom rozsahu rýchlosti maximálne po bod B. Bod B, alebo rýchlosť ω_B , je maximálna rýchlosť, pri ktorej môžeme dodávať do SRM maximálny prúd pri menovitom napätí s konštantným uhlom zopnutia Θ_0 a vypnutia Θ_C (obr. 6a).

Uhol vodivosti $\Theta_D = \Theta_C - \Theta_0$ má konštantnú veľkosť.

V druhej časti mechanickej charakteristiky medzi bodmi B a P vidíme reguláciu na konštantný výkon ($P = T\omega$) až po bod P. Táto časť charakteristiky $T = f(\omega)$ sa dá docieľiť zväčšením uhlu vodivosti Θ_D . Vyvíjaný moment klesá, pretože sa znižuje hodnota fázového prúdu [7].

Ak budeme zvyšovať rýchlosť motora otáčkovým regulátorom pri menovitom napätí a uhol vodivosti bude maximálny a konštantný, tak moment bude klesať so štvorcem rýchlosti, čomu zodpovedá tretia časť charakteristiky $T = f(\omega)$ od bodu P smerom doprava. Podobne ako v druhej časti charakteristiky aj v tejto časti

5. Torque/speed characteristic of SRM

As mentioned in the introduction, the inherent form of the SRM torque/speed characteristic (Fig. 9) is similar to traction characteristic. This characteristic consists of three basic parts.

In the first part a constant torque can be seen. It can be obtained by keeping the phase current on the constant value by a suitable kind of controller. This control is possible to carry out only in the limited speed range, maximum until the point B. At point B, the speed ω_B , is the highest speed at which a maximum current can be supplied at a rated voltage, with fixed firing angles Θ_0 , and commutation angles Θ_C (Fig. 6a). The conduction angle or dwell angle $\Theta_D = \Theta_C - \Theta_0$ has constant value.

In the second part of the torque/speed characteristic, between the point B and P, the control mode on the constant power ($P = T\omega$) can be seen (till the point P). This part of the torque/speed characteristic is possible to obtain by increasing of the conduction angle Θ_D . The developed torque decreases, because the value of phase current decreases [7].

If the speed controller at the rated voltage will increase the motor speed and the conduction angle will be maximum and constant, the torque will decrease with the square of the speed, which corresponds to the third part of the torque/speed characteristic from the point P towards the right. Similar to the second part the

klesá hodnota prúdu, ktorý už nie je možné udržiavať na požadovanej hodnote danej regulátorom.

Aby sme mohli získať charakteristiku $T = f(n)$ analyzovaného SRM, je potrebné aplikovať a použiť matematický model SRM, uvedený v kapitole 3 a v blokovej schéme sa skladá z PID regulátora, matematického modelu meniča (bez uvažovania úbytkov napätia na polovodičových prvkoch), matematického modelu SRM, ktorý je rozdelený na tri bloky: blok

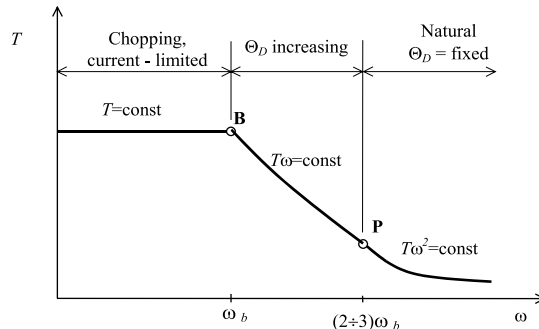
V.E. tvoria napäťové rovnice pre každú fázu (5), blok T.E. predstavuje momentová rovnica (6) a tretí blok predstavuje otáčkovú rovnicu (7) a z výpočtového bloku skutočnej polohy rotora. Ako je vidieť z obr. 9, do PID regulátora vstupuje rozdiel žiadaných a skutočných otáčok e_ω . Výstup z PID regulátora je žiadaná hodnota prúdu. V meniči sa porovnáva skutočná a žiadaná hodnota prúdu a na základe ich rozdielu a podľa polohy rotora sa pripája napätie na jednotlivé fázy. Ak chceme získať výstupné charakteristiky momentu v závislosti od rýchlosti otáčania rotora, je potrebné uvažovať s uhlom zopnutia a vypnutia fázového prúdu, pretože tvar charakteristiky $T = f(\omega)$ je závislý aj od uhla vodivosti (obr. 9), pozdĺž ktorého sa vytvára elektromagnetický moment (obr. 6a). V [1] je definovaná momentová oblasť, v ktorej je vytváraný nenulový moment danou fázou. V súmernom motore je táto oblasť určená vzťahom π/N_r . V našom prípade je to $22,5^\circ$ mechanických, pretože $N_r = 8$. Ďalej je definovaná efektívna momentová oblasť, ktorá predstavuje uhol, pozdĺž ktorého jedna fáza vytvára moment porovnateľný s menovitým momentom. Tento uhol zodpovedá tomu pólovému oblúku z dvoch prekrývajúcich sa pólov, ktorý je menší. V našom prípade je menší statorový oblúk, ktorého veľkosť je 15° mech. Preto efektívna momentová oblasť vyšetřovaného SRM je 15° mech.

current decreases because it is not possible to keep it on the required value given by the controller.

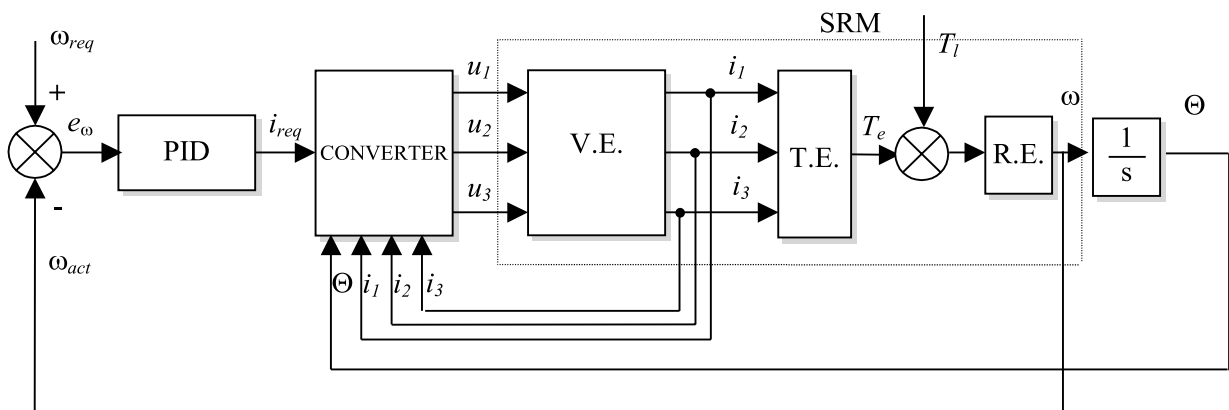
To get the torque/speed characteristic $T = f(n)$ of the investigated SRM, it was necessary to use the SRM mathematical model, shown in chapter 3 and in block diagram, in Fig. 10. The block diagram consists of: 1) the PID controller, 2) the mathematical model of the converter (the voltage drop due to semiconductor elements is not taken into account), 3) the SRM mathematical model, divided into three blocks: a) the block V.E. represents the voltage equations for each phase (5), b) the block T.E. represents torque equation (6), and c)

the block represents speed equation (7), and from the block for calculation of the real rotor position. As it is seen in Fig. 10, the difference between required and real speed e_ω enters the PID controller. The output of the PID controller is the required value of the current. In the converter the real and required values of current are compared, and on the basis of their difference and according to the rotor position the voltage is applied to the individual phases.

If the output torque/speed characteristic is required, it is necessary to take into account the firing angles and commutation angles, because the profile of the torque/speed characteristic depends also on the conduction angle (Fig. 9), along which an internal torque is developed (Fig. 6a). In [1] an absolute torque zone is defined, in which a non-zero torque is produced by the given phase. In a symmetrical motor this zone is given by the value of the ratio π/N_r . In here investigated SRM it is $22,5^\circ$ mechanical, because $N_r = 8$. Further it is defined an effective torque zone, which represents an angle, along which one phase produces a torque comparable with the rated one. This angle corresponds to this pole arc from the both overlapping poles, which is smaller. In this case the smaller is a stator pole, and its value is 15° mech. Therefore, the effective torque zone of here investigated SRM is 15° mech.



Obr. 9. Prírodná charakteristika $T = f(\omega)$ SRM
Fig. 9. General torque/speed characteristic of SRM



Obr. 10. Blokova schéma pohonu so SRM
Fig. 10. Block diagram of the SRM drive

Na obr. 11 vidíme $T = f(\omega)$ charakteristiku SRM pre uhol vodivosti 22.5° a 15° .

Tieto charakteristiky sú výstupom zo simulácie. Pre porovnanie bolo urobené meranie, pričom uhol vodivosti bol nastavený (výrobcom) v meniči na 15° a záťažový moment bol menovitý. Otáčky vyšetrovaného SRM boli obmedzené meničom, a preto sa pri meraní nedali zvýšiť na také otáčky, aké boli použité v simulácii. Ako môžeme vidieť z priebehov na obr. 11, tvar charakteristiky $T = f(\omega)$ sa podobá na trakčnú charakteristiku a zodpovedá prirodzenej charakteristike na obr. 9. Pre konkrétnu trakčnú aplikáciu je potrebné prepočítať moment na trakčnú silu s uvažovaním všetkých jazdných odporov a otáčky prepočítať na rýchlosť trakčného vozidla.

Na záver uvádzame porovnanie niektorých parametrov SRM a indukčného motora podľa [9], ktoré sú uvedené v tab. 1. Boli porovnávané motory s rovnakým menovitým výkonom a rovnakými menovitými otáčkami, ktorých katalógové údaje sú: $m = 3$, úplne uzavreté, chladené ventilátorom, trieda izolácie F.

Tab. 1

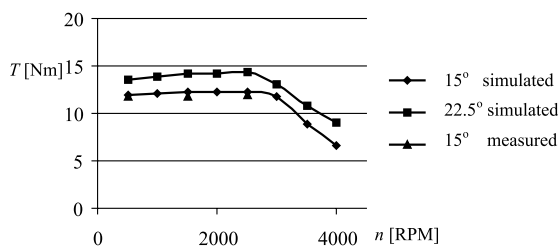
Údaje motora	SRM	IM
Výkon	7.5 kW	7.5 kW
Rýchlosť otáčania [min^{-1}]	1500 - 3000	1500 - 3000
Magnetizačný prúd (1500 RPM)	13.1 A	8.0 A
Vonkajší priemer statora	210 mm	122 mm
Merný výkon na hmotnosť	0.115 kW/kg	0.141 kW/kg
Hmotnosť motora	65 kg	53 kg
Počet zubov: stator/rotor	12/8	48/36
Dĺžka železa	193 mm	135 mm
Moment zotrvačnosti rotora	0.0195 kgm^2	0.024 kgm^2
Priemer rotora	120 mm	122 mm
Straty v Fe / mechanické straty	200/165 W	265/55 W
Straty vo vinuti: stator/rotor	595/0 W	650/350 W
Účinnosť motora	89.8 %	85.5 %
Účinnosť meniča	96.6 %	97.0 %
Účinnosť pohonu	86.7 %	82.6 %

Z porovnania vyplýva, že aj napriek vyššiemu magnetizačnému prúdu SRM má vyšší hmotný výkon a účinnosť pohonu so SRM je o 4 % vyššia ako účinnosť pohonu s IM.

6. Záver

Článok sa zaoberá vyšetrovaním parametrov a vlastností SRM z hľadiska jeho využitia v elektrickej trakcii. Popísané sú parametre

In Fig. 11 the SRM torque/speed characteristics for the conduction angles of 22.5° and 15° can be seen. These characteristics have been given as outputs of the simulation. For the comparison a measurement has been made, at which the conduction angle set in the converter by the producer was 15° , and the load torque was rated one. The converter has limited the speed of the investigated SRM, and therefore, it was not possible to increase them in the values used in simulation. As seen in Fig. 11, the profile of the SRM torque/speed characteristic is similar to the traction one and corresponds to its general characteristic shown in Fig. 9. For the certain traction application it is necessary to convert the torque on



Obr. 11. Charakteristiky SRM $T = f(n)$

Fig. 11. SRM torque/speed characteristics

the traction effort, taking into account all traction resistances and the angular or rotating SRM speed convert to the speed of the traction vehicle.

In the end a comparison of some SRM and IM parameters are shown in the table 1., according to [9]. The motors with equal rated power and rated speed have been compared. Their catalogue data are as follows: $m = 3$, totally closed, cooled by the fan, the insulation class F.

Table 1.

Motor's data	SRM	IM
Output power	7.5 kW	7.5 kW
Speed [RPM]	1500 - 3000	1500 - 3000
Magnetising current (RMS)	13.1 A	8.0 A
Output stator diameter	210 mm	122 mm
Power density	0.115 kW/kg	0.141 kW/kg
Motor weight	65 kg	53 kg
Tooth number	12/8	48/36
Stack length	193 mm	135 mm
Rotor moment of inertia	0.0195 kgm^2	0.024 kgm^2
Rotor diameter	120 mm	122 mm
Iron / friction & windage losses	200/165 W	265/55 W
Joule loss	595/0 W	650/350 W
Motor efficiency	89.8 %	85.5 %
Inverter efficiency	96.6 %	97.0 %
Drive efficiency	86.7 %	82.6 %

It can be seen from the comparison that in spite of the higher magnetizing current and lower power density, the SRM efficiency is raised by 4 % in comparison with the IM drive.

6. Conclusion

The paper deals with the SRM parameters and performance investigation from the point of view of its application in electrical

náhradnej schémy, najmä $L, \psi = f(\Theta, i)$, pre konkrétny motor. Bol zostavený matematický model, ktorého rovnice sú riešené v MATLAB/SIMULINKU. Výsledné časové priebehy prúdov a napätí sú porovnané pre nízke a vyššie rýchlosti s meranými priebehmi. Na základe blokovej schémy a matematického modelu boli vypočítané charakteristiky $T = f(n)$ pre rôzne uhly vodivosti a porovnané s meraním. V článku je popísaný vzájomný súvis medzi charakteristikami $T = f(n)$ SRM a trakčnou charakteristikou. Na záver je uvedené porovnanie niektorých parametrov SRM a indukčného motora. Z výsledkov vyplýva, že SRM je vhodný na trakčné aplikácie a môže nahradiť v súčasnosti používané IM.

Podakovanie

Za podporu ďakujeme grantom udeleným v rámci projektov VEGA 1/6111/99 a 1/8259/2001

Výšetrovanie prostredníctvom PC-SRD bolo vykonané na Katedre elektrických pohonů a trakcie, FEL, ČVUT, Praha. Autori ďakujú kolegom na uvedenej katedre za ochotu a láskavosť pri spolupráci.

The methods of the important equivalent circuit parameters investigation are presented, mainly $L, \psi = f(\Theta, i)$. A mathematical model has been created, the equations of which are solved in the MATLAB/SIMULINK program. The time profiles of the current and voltage for low and higher speed have been compared with measured ones. On the basis of block diagrams and mathematical model, the torque/speed characteristics $T = f(n)$ for various conduction angles have been calculated and compared with the measured ones. The paper has shown a mutual correspondence between SRM torque/speed and traction characteristics. In the end, a comparison of some SRM and IM parameters have been given. From the results it can be said that SRM is suitable for traction application and can replace at present used IM.

Acknowledgement

The authors wish to thank the Slovak Grant Agency for the support of this research, which was carried out within the VEGA projects 1/6111/99 and 1/8259/2001.

The investigation by means of PC-SRD was done at Department of Electrical Drives and Traction, FEL, ČVUT, Prague. The authors are grateful to the colleagues at this department for help and the possibility to use the program mentioned above.

Literatúra - References

- [1] MILLER, T. J., E.: *Switched Reluctance Motors and their Control*, Magna Physics Publishing, Oxford 1993.
- [2] BAUSCH, H., GRIEF, A., NICKEL, A. B. A.: *A 30kW/9000RPM Switched Reluctance, Drive for Traction Application ICEM '98*, Turkey.
- [3] RAY, W. F., DAVIS, R. M., LAWRENSON, P. J., STEPHENSON, J. M., FULTON, N. N. and BLAKE, R. J.: *Switched reluctance motor drives for rail traction: a second view*, IEE Proceedings, Vol. 131, Pt. B, No. 5, September 1984.
- [4] HRABOVCOVÁ, V., RAFAJDUS, P., WIAK, S.: *Finite Element Analysis and Test Results Characteristics of Switched Reluctance Motor*, ISEF '97, September 25-27, 1997, Gdansk, Poland, p. 102-105.
- [5] Manuál programu PC-SRD.
- [6] HRABOVCOVÁ, V., RAFAJDUS, P., FERKOVÁ, Ž.: *Test and Simulation Results of Switched Reluctance Motor Characteristics*. ED&PE, 1-3.October 1996, The High Tatras, Slovakia, p. 516-520, Volume 2.
- [7] HRABOVCOVÁ, V.; RAFAJDUS, P.; LIČKO, M.; JANOUŠEK, L.: *Modelling of The Dynamic Operation of The Switched Reluctance Drive by Simulink*, SPEEDAM '98, Sorrento, June, 3rd-5th 1998, Italy, p. P1-61 - P1-66.
- [8] RAFAJDUS, P., HRABOVCOVÁ, V.: *Switched Reluctance Motor and its Torque Production*, TRANSCOM '97, Volume 2, Žilina 25-26. 6. 1997, Slovak Republic, p. 157-160.
- [9] BINDER, A.: *Switched Reluctance Drive and inverter - fed Induction Machine - a comparison of design parameters and drive performance*, Electrical Engineering 82 (2000) p. 239-248.
- [10] KLUG, L.: *Computer Hardware Drives and Other Special Drives*, PEMC 1998, Prague, 8-10. September 1998, p. 3.81-3.84.