

Ing. Bohumír Kubík, Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s., Most

## Spínaný reluktanční elektromotor - nový pohon pro těžební technologie důlních společností

Přijato: 18.5.2005, recenzováno: 25.5.2005

### Schaltreluktanzelektromotor - ein neuer Antrieb für Fördertechnik in Kohलगesellschaften

Der Artikel beschreibt das Projekt, dessen Ergebnisse ermöglichen, einen neuen modernen Antrieb zu bilden, der unter Bedingungen der Fördertechnik, z.B. für Antrieb des Schaufelrades oder Antrieb der Antriebsstrommel einer Transportbandanlage einzusetzen ist. In der Einleitung des Beitrags wird beschrieben, aus welchem Grund haben wir in VÚHU a.s. begonnen, sich mit dieser Problematik zu befassen. In den umliegenden Staaten werden solche Antriebe laufend genutzt, z.B. für die Fördertechnik mit Eimerkettenbaggern. Weiter ist beschrieben, auf welcher Art das vorgelegte Projekt gelöst werden kann.

Die Lösung eines solchen Projektes wird eine Teamarbeit sein, auf der sich mehrere Arbeitsstätten beteiligen würden. Vor allem das Institut VÚHU a.s. mit der Möglichkeit der Überprüfung technischer Voraussetzungen direkt auf den Technologieanlagen der Kohलगesellschaften, und das Team der Projektentwickler von VŠB-TU Ostrava (Bergbauhochschule bei der Technischen Universität in Ostrava). Dieses Team ist von wichtigen Fachleuten aus dem Bereich Elektromaschinen, -geräte und Antriebe sowie Fachleuten für Messung elektrischen und nichtelektrischen Größen geschaffen. Die Teilnehmer des Teams verfügen über viele theoretische Kenntnisse und praktische Erfahrungen zur Lösung des beantragten Projektes. Manche Teilnehmer des Teams lösten erfolgreich in zurückliegenden Jahren einige Projekte der Grantagentur ČR.

### Switching reluctance electric motor – a new drive for mining technologies of mining companies

The article describes a project the results of which makes possible to create a new modern drive applicable in mining e.g. for driving the wheels or driving the drive train

of a band conveyor. In the article there is written why we began to work with the issue of new drives in VÚHU a.s. Surrounding states use these drives commonly e.g. for mining by chain-bucket excavator. In another part of the article there is written how can the submitted project be solved.

Solving this project will be teamwork on which a few workplaces would participate. First of all it is VÚHU a.s. having the possibilities of verifying the theoretic presumptions directly at the mining technology of the mining company and solving team on VŠB-TU Ostrava. The team consists of important experts of the field of Electric Machines, Devices and Drives and also experts of measuring electric and non-electric values. The members of the team have enough theoretical knowledge and practical experience for solving the project. A number of the team members solved successfully some projects of GAČR.

### Включаемый электродвигатель с магнитным сопротивлением – новый привод для горнодобывающих технологий угольных компаний

Статья описывает проект, результаты которого сделают возможным создание нового, современного привода с возможностью применения в условиях горнодобывающих технологий, например для привода ротора экскаватора или приводного барабана конвейера.

В введении авторы статьи приводят причины того, что институт ВУГУ Мост а/о начал заниматься проблематикой новых приводов. В соседних странах такие приводы уже нормально используются, например для горно-транспортных технологий с многоковшовыми экскаваторами. В дальнейшей части статьи дается описание способа возможного решения проекта.

Такое решение будет коллективным делом, при участии нескольких рабочих мест – прежде всего ВУГУ а/о с

возможностью проверки теоретических предпосылок непосредственно на технологиях угольных компаний, и коллектив Технического университета в г. Острава. Острравский коллектив представляет группу выдающихся специалистов по электрическим машинам, инструментам и приводам, а также экспертов по измерениям электрических и неэлектрических величин. Члены целого коллектива обладают достаточными теоретическими знаниями и практическим опытом для решения предлагаемого проекта. Ряд его членов в прошлых годах успешно занимался решением некоторых проектов Грантового Агентства ЧР.

#### Spínavý reluktanční elektromotor – nový pohon pro těžební technologie důlních společností

Článek popisuje projekt jehož výsledky umožní vytvoření nového moderního pohonu použitelného v podmínkách těžebních technologií např. pro pohon kola

nebo pohon poháněcího bubnu pásového dopravníku. V úvodu článku je popsáno z jakého důvodu jsme se ve VÚHU a.s. začali problematikou nových pohonů zabývat. V okolních státech se tyto pohony již běžně využívají např. pro těžební technologie s korečkovými rýpadly. V další části článku je popsáno jakým způsobem je možné předložený projekt řešit.

Řešení takového projektu bude týmová práce, na které by se podílelo několik pracovišť. Především pracoviště VÚHU a.s. s možnostmi ověřování teoretických předpokladů přímo na technologiích těžebních společností a řešitelský kolektiv na VŠB-TU Ostrava. Ten tvoří významní odborníci z oboru Elektrické stroje, přístroje a pohony a rovněž odborníci na měření elektrických i neelektrických veličin. Členové řešitelského týmu mají dostatek teoretických znalostí i praktických zkušeností pro řešení navrhovaného projektu. Řada členů řešitelského týmu v minulých letech úspěšně řešila některé projekty GAČR.

## Úvod

Těžební společnosti vyžadují od svých technologií neustálé zvyšování výkonnosti. Tyto technologie se v současné době skládají převážně z kolesových rýpadel různých typů, dálkové pásové dopravy (DPD) a zakladačů. Zvyšování výkonnosti celé technologie se v současné době provádí především zvyšováním výkonu pohonu rypného orgánu, tj. kola. Toto zvýšení výkonu pohonu kola je však vždy spojeno s navýšením hmotnosti špičky kolesového výložníku. Jelikož navýšení hmotnosti špičky kolesového výložníku o 1 kg způsobí navýšení hmotnosti celého rýpadla o 6 až 10 kg, je cesta zvyšování výkonnosti těžební technologie zvyšováním výkonu pohonu kola, a tím navýšením hmotnosti špičky kolesového výložníku dnes již nereálná. Způsobuje totiž nutnost zpevňování ocelové konstrukce robustnějšími ocelovými nosníky apod. Z důvodu vyvážení horní stavby velkostrojů je nutné zvětšovat i hmotnost protizávaží. Tím samozřejmě dochází i k většímu namáhání kruhové dráhy velkostroje a je nutné ji dimenzovat na větší zatížení. Všechny tyto důvody vedly k hledání nového typu pohonu kola, který by nezvyšoval hmotnost špičky kolesového výložníku. V nedávné minulosti to byly například pomaluběžný bezpřevodový pohon se synchronním elektromotorem řízeným cyklokonvertorem nebo různé typy pohonů s frekvenčními měniči. Žádný z těchto pohonů neodlehčil špičku kolesového výložníku natolik, aby bylo možné zvýšit rypnou sílu a tím výkonnost celého technologického celku (TC).

Prvním typem pohonu, který by i přes zvýšení výkonu nezvyšoval hmotnost špičky kolesového výložníku, je pohon sestavený ze spínaného reluktančního elektromotoru a speciálního měniče.

Charakteristickým znakem reluktančního elektromotoru je, že na rotoru nemá žádné vinutí ani permanentní magnet. Rotor je složen pouze z vhodně tvarovaných plechů. Otáčivý moment vzniká v důsledku rozdílných magnetických odporů magnetického obvodu díky nerovnoměrné vzduchové mezeře.

V posledních letech se začíná používat reluktanční elektromotor s rozdílným počtem pólů na rotoru a na statoru. Tento typ reluktančního elektromotoru se nazývá spínaný reluktanční elektromotor (switched reluctance motor SRM).

Výhodou tohoto reluktančního elektromotoru je výrazné snížení vlastní hmotnosti na jednotku výkonu a bezetrátová, plynulá regulace otáček. Pohon na bázi spínaného reluktančního elektromotoru nabízí příznivé podmínky pro využití v procesu dobývání a dopravy uhlí na povrchových lomech. Jeho výhody lze příkladně využít :

- pro přímý pohon kola (na velkostrojích TC 1 a TC2)
- pro přímý pohon bubnů poháněcích stanic dálkové pásové dopravy

Navrhovaný spínaný reluktanční elektromotor využívá pro svou činnost principu axiálního magnetického toku, čímž se zásadně odlišuje od klasických elektromotorů, které využívají radiální a tangenciální magnetický tok. Jeho moment je dán derivací magnetické energie podle úhlu natočení. Je-li tento úhel malý, lze uspořádat mnoho elementárních elektromagnetů po obvodu stroje a tím moment násobit. Pohon tvořený spínaným reluktančním elektromotorem dosahuje většího měrného výkonu při výrazném snížení hmotnosti v porovnání s klasickým provedením pohonu o stejném výkonu. Dle předpokladů založených na vztazích teoretických výpočtů matematického modelu lze očekávat, že hmotnost reluktančního elektromotoru při stejném výkonu činí zhruba 60 % hmotnosti klasických elektromotorů. Spínané reluktanční elektromotory mají navíc z principu schopnost plynulé změny rychlosti otáčení.

Náhrada stávajících klasických elektromotorů, převodovek, spojek, rotorových spouštěčů pomaluběžnými reluktančními elektromotory se spojitou regulací otáček by vedla k vytvoření moderního robustního pohonu, který je vlivem nízkého momentu setrvačných hmot značně odolný proti nárazům kola na překážky. U pohonů kde jsou používány převodovky s velkými setrvačnými hmotami, dochází při nárazu do překážky k výraznému rázovému přetěžování těchto převodovek, ostatních strojních součástí pohonu kola i ocelové konstrukce kolesového výložníku.

Přínosy aplikace pomaluběžného spínaného reluktančního elektromotoru pro přímý pohon kola je možno spatřovat v následujících hlavních aspektech:

- výrazné snížení zatížení špičky kolesového výložníku vlastní hmotností elektromotoru
- možnost zvýšení výkonu pohonu kola, obvodové síly kola a tím výkonnosti velkostroje
- odpadá použití převodovky, spojky, rotorového spouštěče
- minimalizace olejového hospodářství
- plynulá, téměř bezetrátová regulace otáček

Další možnost využití spínaného reluktančního elektromotoru je pro přímý pohon bubnů poháněcí stanice dálkové pásové dopravy. Hmotnost nového pohonu je mnohem menší než stávající provedení se dvěma rychloběžnými indukčními elektromotory a se dvěma převodovkami na jeden buben. Navíc se jedná o elektromotor se spojitou bezetrátovou regulací.

Nesporné výhody spínaného reluktančního elektromotoru vybízí k jeho využití při rekonstrukci velkostrojů, kde by toto řešení přineslo výrazný technický a nezanedbatelný ekonomický přínos.

Ze všech těchto výše uvedených důvodů byl ve Výzkumném ústavu pro hnědé uhlí a.s. postaven projekt, který se zabývá problematikou nového pohonu. Bylo osloveno několik partnerů, těžebních společností, vysokých škol, včetně grantové agentury ČR.

Hlavním cílem projektu je vytvoření simulačního modelu, výzkum možností a ověření parametrů nového typu elektromotoru a speciálního polovodičového měniče pro jeho řízení. V tomto projektu bude v první řadě vytvořen matematický aparát pro ověření teoretických předpokladů nutných pro ověření fungování jak nového typu elektromotoru, tak polovodičového měniče pro jeho řízení. V další části projektu bude zkonstruován plně funkční model měniče pro řízení tohoto elektromotoru. V poslední části projektu bude uskutečněna řada měření elektrických a mechanických veličin, které potvrdí správnost teoretických předpokladů.

Pomocí nového typu elektromotoru bude umožněno vytvořit pohon s mnohem menší (až o 40 %) hmotností na jednotku výkonu. Bude tedy možné např. zvýšit výkon pohonu kola, aniž by bylo zvětšeno zatížení špičky kolesového výložníku. Tím bude umožněno zvětšit rypnou sílu kolesového rýpadla, a následně zvětšit výkonnost celého technologického celku.

Dalším cílem projektu je výzkum možností náhrady stávajících klasických elektromotorů, převodovek, spojek, rotorových spouštěčů pomaluběžnými reluktančními elektromotory se spojitou regulací otáček, což by vedlo k vytvoření moderního robustního pohonu s nižší hmotností na jednotku výkonu.

### **Časový harmonogram řešení projektu**

V první etapě bude uskutečněn výběr vhodných metod řízení, výběr a zajištění pasivních a aktivních součástek, simulace metod řízení na PC, návrh obvodového řešení výkonové a řídicí části měniče frekvence s moderními IGBT tranzistory, publikace některých výsledků řešení na tuzemských a zahraničních konferencích, příprava a vypracování dílčí zprávy projektu.

- rešerše pohonů z oblasti reluktančních elektromotorů,
- sběr požadavků výrobců a provozovatelů dobývací a dopravní techniky
- návrh matematického modelu popisujícího nový typ elektromotoru
- algoritmizace matematických modelů
- návrh konstrukce měniče
- doplnění měřicí aparatury o možnost komplexně sledovat elektrické a mechanické veličiny

V další části projektu bude provedeno dimenzování výkonových spínacích součástek, výběr a zajištění pasivních a aktivních součástek pro polovodičový měnič, realizace řídicích a výkonových obvodů měniče, realizace řídicího systému, ověřování vlastností řídicího systému, vývoj programových modulů řízení spínaného reluktančního motoru, realizace laboratorních modelů elektrických pohonů, odzkoušení základních funkcí laboratorních modelů elektrických pohonů, včetně měření

elektrických a mechanických veličin, publikace některých výsledků řešení na tuzemských a zahraničních konferencích, příprava a vypracování dílčí zprávy projektu.

- ověření funkce matematického modelu
- projekt a výroba funkčního modelu měniče
- návrh aplikace řešící komplexně proces sběru, analýzy a archivace měřených dat
- experimentální měření na modelu měniče
- analýza měřených dat, zpřesňování metod a úprava algoritmů

V další etapě řešení projektu bude provedeno experimentální ověřování vlastností laboratorního modelu pohonu se spínaným reluktančním motorem, publikace výsledků na tuzemských a zahraničních konferencích, příprava a vypracování závěrečné zprávy projektu.

- realizace měření na modelu nového pohonu měřicím systémem
- analýza měřených dat, zpřesňování metod a úprava algoritmů modelu
- publikace výsledků měření a zobecněných závěrů

### ***Předpokládané výstupy projektu***

- a) Metodika návrhu spínaného reluktančního elektromotoru
- b) Metodika návrhu řízení pohonu se spínaným reluktančním elektromotorem
- c) Funkční prototyp elektrického pohonu sestávající z:
  - spínaného reluktančního elektromotoru s axiální vzduchovou mezerou
  - polovodičového měniče pro napájení spínaného reluktančního elektromotoru
  - řídicího mikropočítačového systému
- d) Publikace výsledků projektu v odborných časopisech, na domácích a zahraničních konferencích

### ***Koncepční a metodické přístupy navrhované pro řešení a jejich rozbor***

Výzkumné práce budou prováděny zejména v laboratořích FEI VŠB-TU Ostrava. Zkoumané jevy a soustavy budou analyzovány a ověřovány nejmodernějšími prostředky pro modelování a simulaci jevů a soustav při použití vhodných matematických metod. Pro modelování a simulaci budou použity prostředky, které umožňují modelování víceparametrových soustav a optimalizaci navržených postupů a algoritmů. Mezi použité nástroje budou patřit softwarové systémy MATLAB se SIMULINKem a PSPICE pro simulaci elektromechanických systémů. Budou navrženy a vyrobeny laboratorní modely střídavých elektrických pohonů, na nichž se budou výsledky výzkumu ověřovat.

Na toto pak budou navazovat měření a vyhodnocování elektrických veličin (napětí, proudy, magnetické toky) a veličin mechanických (otáčky, momenty, síly) a jejich vzájemné závislosti s cílem optimalizovat vlastnosti pohonu jako celku.

V první etapě řešení projektu bude provedena rešerše našich a mezinárodních realizací v oblasti reluktančních elektromotorů. Na základě této rešerše bude navržen matematický model nového pohonu a provedena jeho analýza.

Do souhrnu veličin, které budou podrobeny analýze, budou zahrnuty i veličiny navržené výrobcí a provozovateli těžební techniky.

Ve druhé etapě řešení projektu se výzkumný tým soustředí na vývoj algoritmů sběru, analýzy a vyhodnocení vytípaných veličin. Předpokládáme návrh využití nejmodernějších prostředků na bázi virtuální instrumentace.

Extrémní podmínky nasazení pohonů v podmínkách povrchových dolů budou vyžadovat vyřešení mnoha specifických aspektů. Měřicí systém zahrnující sběr, analýzu a prezentaci měřených veličin bude využívat nejmodernější SW technologie grafického programování. Ve spolupráci s provozovateli dobývací a dopravní techniky budou vytípana kritická místa nového elektromotoru a pracovní režimy pro komplexní analýzu měřených dat.

Ve třetí etapě budou závěry prezentovány na domácích i zahraničních konferencích a v odborné literatuře.

### ***Předpokládaný výsledek projektu a jeho využití***

Výsledek projektu bude především v představení a částečném ověření nového elektromotoru a měniče pro jeho řízení. Měřeními elektrických a mechanických veličin budou ověřeny teoretické předpoklady fungování spínaného reluktančního elektromotoru a bude tak vytvořen základ pro konstrukci prototypu nového elektromotoru. Možnosti využití nového elektromotoru jsou všude tam, kde je vhodné použití bezpřevodového pohonu s nízkou hmotností. V technologiích těžebních společností je to především pohon kola a pohony bubnů pásových dopravníků.

Přínosy aplikace pomaluběžného spínaného reluktančního elektromotoru pro přímý pohon kola je možno spatřovat v následujících hlavních aspektech:

- výrazné snížení zatížení špičky kolesového výložníku vlastní hmotností elektromotoru
- zvýšení výkonu pohonu kola, obvodové síly kola a tím výkonnosti velkstroje
- odpadá použití převodovky, spojky, rotorového spouštěče
- minimalizace olejového hospodářství
- plynulá, téměř bezetrátová regulace otáček

Další možnost využití spínaného reluktančního elektromotoru je pro přímý pohon bubnů poháněcí stanice dálkové pásové dopravy. Hmotnost nového pohonu je mnohem menší než stávající provedení se dvěma rychloběžnými indukčními elektromotory a se dvěma převodovkami na jeden buben. Navíc se jedná o elektromotor se spojitou bezetrátovou regulací.

Nesporné výhody spínaného reluktančního elektromotoru vybízejí k jeho využití při rekonstrukci velkstrojů, kde by toto řešení přineslo výrazný technický a nezanedbatelný ekonomický přínos.

## **Význam projektu pro praxi**

Úspěšné řešení tohoto projektu potvrzením teoretických předpokladů položí základ pro výrobu prototypu a získání dalších poznatků o spínaném reluktančním elektromotoru. Nasazení nového pohonu do praxe bude mít nesporné technické výhody a nezanedbatelný ekonomický přínos. Např. při použití nového elektromotoru pro pohon kola bude umožněno zvětšit výkon elektromotorů, aniž by bylo zvětšeno zatížení špičky kolesového výložníku. Tím bude moci být zvětšena rypná síla velkostrojů a následně výkonnost celého technologického celku. Získáním nových poznatků o fungování spínaného reluktančního elektromotoru bude možné konstruovat obecně pohony pro jakoukoli technologii, kde je třeba lehký bezpřevodový pohon.

Pracoviště VÚHU a.s., se dlouhodobě zabývá pohony těžebních technologií, jejich modernizací. Ve svých závěrech a doporučeních, ve studiích a odborných posudcích, dlouhodobě prosazuje modernizace pohonů pro plynulou změnu rychlosti otáčení pomocí polovodičových měničů různých typů. Zmiňovaný spínaný reluktanční elektromotor je již z principu plně regulovatelný. Jeho nízká hmotnost a absence převodovky jej předurčuje pro využití v náročných provozech těžebních společností. Pro tyto závěry a doporučení využívá výsledků měření uskutečněných na všech typech pohonů těžebních technologií, které provádí nejmodernější měřicí technikou. Ta je v některých případech ojedinělá i v zemích EU.

Členové řešitelského týmu se dlouhodobě zabývají výzkumem moderních elektrických regulačních pohonů a jejich jednotlivých částí, které mohou být aplikovány v různých oblastech. Řešitelský kolektiv na VŠB-TU Ostrava tvoří významní odborníci z oboru Elektrické stroje, přístroje a pohony a rovněž odborníci na měření elektrických i neelektrických veličin. Členové řešitelského týmu mají dostatek teoretických znalostí i praktických zkušeností pro řešení navrhovaného projektu. Řada členů řešitelského týmu v minulých letech úspěšně řešila některé projekty GA ČR.

Pro úspěšné řešení projektu mají členové řešitelského týmu na VŠB-TU Ostrava k dispozici laboratoře, které byly v rámci úspěšně řešených projektů GAČR, MŠMT, MPO vybavené moderní měřicí a výpočetní technikou, např.:

- laboratoř elektrických strojů
- laboratoř elektroniky
- laboratoř výkonové elektroniky
- laboratoř mikropočítačové techniky
- laboratoře pohonů se zatěžovacími stanovišti
- laboratoře měření

Tyto laboratoře disponují speciální měřicí technikou:

- digitální osciloskopy Hameg, Agilent, Hewlett-Packard, LeCroy LT264 350 Mhz
- výkonový analyzátor LEM Norma D6000 s příslušným softwarem
- měřicí notebooky s měřicími kartami pro sběr dat
- měřicí zařízení s rychlými snímači proudu a napětí LEM SA pro měření rychlých změn proudů a napětí
- měřicí zařízení pro měření momentu na hřídeli elektromotoru
- různé typy Dynamometrů, max. 40 Nm, 10 000 ot/min

## **Literatura**

1. Kubík, B.: Měření harmonických na pohonech s frekvenčními měniči na nově zprovozněných technologiích v provozech DNT. In: Protokoly o měření, VÚHU, a.s., Most 2002
2. Kubík, B.: Energetické porovnání PD 103 a PD 1600. Porovnání klasického pohonu s kroužkovými elektromotory a nového moderního pohonu s frekvenčním měničem. In: Technická zpráva, VÚHU, a.s., Most 2001
3. Kubík, B.: Spínaný reluktanční elektromotor, nový pohon pro těžební technologie Úvodní studie I, TO-153/2003, VÚHU, a.s., Most 2003
4. Kubík, B., Strakoš, K.: Spínaný reluktanční elektromotor, nový pohon pro těžební technologie. Úvodní studie II, TO-009/2004, VÚHU, a.s., Most 2004
5. Brandštetter P.: Střídavé regulační pohony - moderní způsoby řízení. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1999, ISBN 80-7078-668-X
6. Neborák, I.: Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů. Monografie, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2002, 172 stran, ISBN 80-248-0083-7