

Jozef Kuchta – Miroslav Fulier *

ELEKTRICKÉ PRENOSY VÝKONU MODERNIZOVANÝCH RUŠŇOV NEZÁVISLEJ TRAKCIE

ELECTRICAL TRANSMISSION OF MODERNIZED LOCOMOTIVES OF INDEPENDENT TRACTION POWER

Príspevok sa zaoberá riešením elektrických prenosov výkonu modernizovaných rušňov nezávislej - motorovej trakcie. Popisuje prístup k vývoju, konkrétne riešenie pre modernizovaný rušeň so zmiešaným striedavo - jednosmerným prenosom výkonu a projektovaný a realizujúci sa rušeň s plne striedavým prenosom výkonu. Výhodnosť a opodstatnenosť modernizácií s vyšším stupňom prenosu - predovšetkým AC/AC dokladuje výpočtom výslednej účinnosti ako aj úsporami prvotného paliva, ktoré sú potvrdené prevádzkovým sledovaním.

1. Úvod

Elektrickým prenosom výkonu rozumieme taký prenos [1], v ktorom sa mení prvotný mechanický výkon na výkon elektrický, ktorý slúži k napájaniu a regulovaniu elektrických trakčných motorov. Výhodou elektrického prenosu je možnosť prenosu veľkých výkonov na ľubovoľný počet hnacích náprav poháňaných jednotlivu alebo skupinovo, plynulá regulácia výkonu, rýchlosti a ťažnej sily s menším počtom ozubených prevodov, veľmi dobrá účinnosť, životnosť a spoľahlivosť. Voľba druhu elektrického prenosu výkonu vystupuje do popredia hlavne pri modernizácii terajších - dosluhujúcich rušňov nezávislej trakcie - hlavne dieselelektrických. Podstatou dieselelektrického trakčného prenosu je, že mechanický výkon prvotného spaľovacieho motora sa mení v dynamoelektrikom stroji (generátore) na elektrický výkon s regulovateľným napätím, ktorým sa napájajú elektrické trakčné motory. V závislosti od použitej prúdovej sústavy generátora, ktorý mení mechanický výkon na elektrický a podľa druhu elektrického trakčného motora rozoznávame prenosy výkonov

- jednosmerné - DC/DC,
- zmiešané - AC/DC,
- plne striedavé - AC/AC.

2. Základné charakteristiky jednotlivých elektrických prenosov výkonu

Základné schémy zapojenia jednotlivých elektrických prenosov výkonu sú uvedené na obr. 1a, b, c.

The contribution addresses diesel-electric power transmission of modernized locomotives for independent motor traction. It describes the approach to development; the solution of modernized locomotives with hybrid AC/DC power transmission, designed and realized locomotive with full AC/AC power transmission. Advantages and reasonability of modernization with an advanced transmission degree (namely as AC/AC) is confirmed by total efficiency calculation as well as by benefits in basic fuel savings, which have been carried out from the real operation.

1. Introduction

Electric power transmission means that the basis of mechanical power is transformed into electric power. The electric power supplies and controls electric traction motors. An advantage of electric power transmission is the possibility to convey a greater amount of power onto arbitrary number of axles, which are single or group driven. There are also advantages of smooth power, speed, and tractive force control, allowing the use of less gearboxes, to raise the entire efficiency, reliability, and total lifetime. The choosing of electric power transmission types comes forward in upgrading existing locomotives especially for independent diesel-electric traction. The origin of the mechanical power of a diesel engine is converted into electric power with variable voltage using the electric generator, and this is the basis of diesel-electric traction. The electric power supplies the traction motors. Depending on the electric traction system used, it means the type of used generators and traction motors, the following power transmissions are recognized:

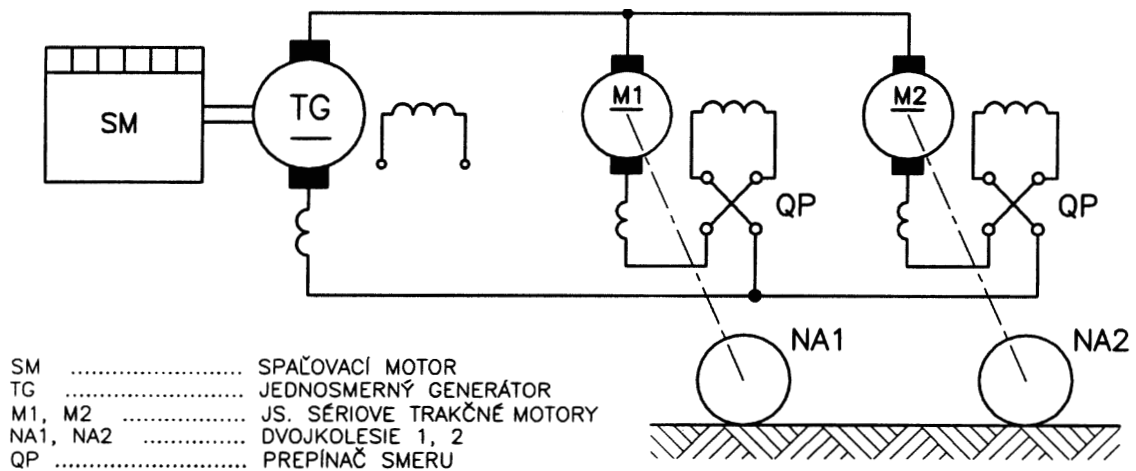
- direct one - DC/DC,
- hybrid one - AC/DC,
- alternate one - AC/AC.

2. Basic features of individual electric power transmission

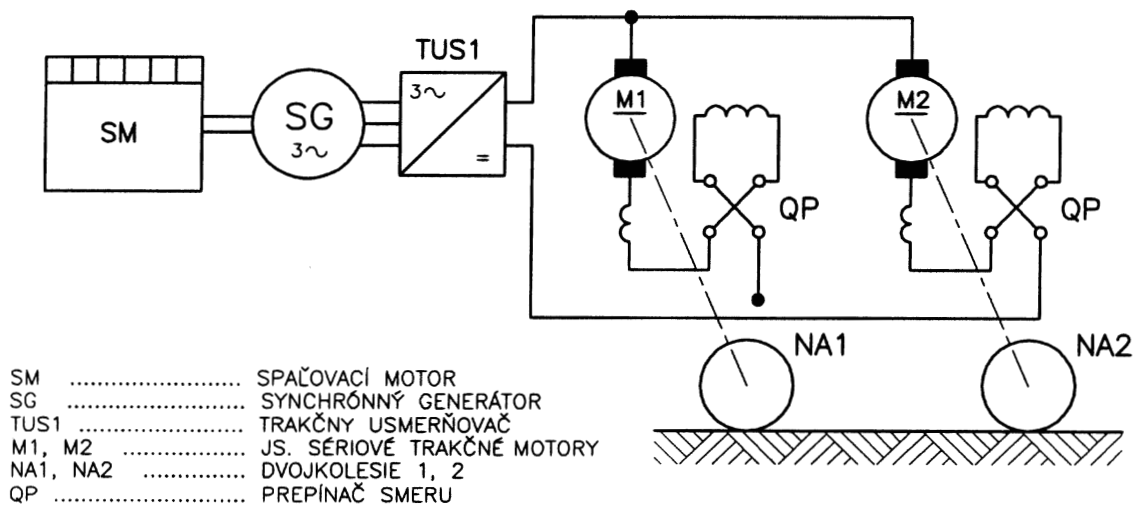
The fundamental flowchart of distinct electric power transmissions is depicted in Fig. 1 a), b), and c).

* Ing. Jozef Kuchta, Ing. Miroslav Fulier

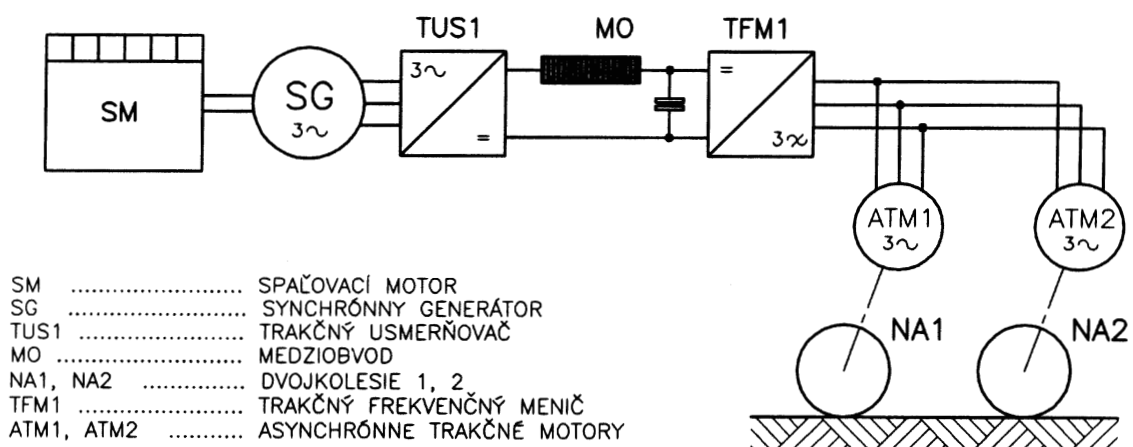
EVPU - Elektrotechnický výskumný a projektový ústav, a.s., Trenčianska 19, 018 51 Nová Dubnica, SR
Tel.: ++421-827-4432475, Fax: ++421-827-4434252; E-mail: kuchtaj@pobox.sk



Obr. 1a



Obr. 1b



Obr. 1c

Obr. 1. Princípiálne schémy zapojení sústav s elektrickým prenosom výkonu
 Fig. 1. The principal schemes of connections of the systems with electric power transmission

2.1 Jednosmerný prenos - DC/DC

Jednosmerný DC/DC prenos pozostáva - pozri obr. 1a, z jednosmerného regulačného generátora (dynamu), ktorý regulovateľným napätím napája jednosmerné sériové trakčné motory. Trakčné motory pracujú približne so stálym príkonom závislým len od prvotného spaľovacieho motora SM. Regulačný rozsah otáčiek trakčných motorov sa zväčšuje v drvivej väčšine skokovitým kontaktným spôsobom zoslabovania (šuntovania) budenia. Tento druh prenosu je zatiaľ najrozšírenejším druhom prenosu v triede motorových rušňov na ŽSR. Nevýhodou tohoto prenosu predovšetkým je, že elektrické stroje točivé s ktorými pracuje, obsahujú klzný kontakt (uhlík - komutátorová lamela), ktorý vo svojej podstate limituje: maximálne otáčky a komutáciu, vyžaduje častú a pravidelnú údržbu a nie je ich možné navrhovať (vzhľadom na obmedzenie jazdného profilu) na vyššie výkony vzhľadom na rozmery a hmotnosť.

2.2 Zmiešaný prenos - AC/DC

Zmiešaný striedavo - jednosmerný AC/DC prenos výkonu sa vyznačuje tým, že kontaktný a rozmerný trakčný generátor TG je nahradený striedavým generátorom - alternátorom (prevažne s vyjadrenými pólmi) SG - pozri obr. 1b, v poslednom desaťročí konštruovaným na bezkontaktnom princípe budenia. Takýto generátor je doplnený trakčným usmerňovačom TUS 1, ktorý usmerňuje striedavé napätie, ktorým sú následne napájané jednosmerné sériové trakčné motory M1 a M2 - pozri obr. 1b. Tento druh pohonu prevažuje v súčasnosti v SR pri realizujúcich sa modernizáciách [2], [3] pre ŽSR ako hlavného odberateľa a užívateľa modernizovaných vozidiel. Dá sa povedať, že hlavným dôvodom týchto modernizácií je v prvom rade remotorizácia, t. j. náhrada pôvodného spaľovacieho motora motorom novým (obvykle s už s nižšou mernou spotrebou paliva - nafty), inštalácia novej výzbroje charakteristickej zmiešaným prenosom výkonu (motivovaným a podmieneným súčasným „dostatkom“ pôvodných trakčných motorov), často novým konštrukčným riešením hrubej stavby a dizajnom vozidla. Prikladom takto realizovaného postupu je modernizácia motorového rušňa pôvodného označenia T669 (r. 770) na vozidlo r. 773. V tab. č. 1 uvádzame základné parametre pôvodného a modernizovaného vozidla v takom rozsahu a skladbe, aby z nej bolo možno vidieť odlišnosti a hlavné znaky modernizácie:

Pri vývoji a konštrukcii uzlov modernizovaného vozidla bol hlavne pri návrhu koncepcie elektrickej výzbroje dôsledne dodržiavaný princíp komplexnosti a zohľadňovanie nového riešenia. Koncepcia elektrickej výzbroje bola už popísaná napr. v [2], preto sa v danom príspevku obmedzím iba na ďalšiu charakteristiku komponentov výzbroje, podľa principiálnej schémy zapojenia 1-nej motorovej skupiny, ktorá je znázornená na obr. 2:

- Synchronný generátor GG1 má vinutie kotvy zapojené do 3-och samostatných hviezd, pričom každá napája usmerňovač GU, ktorý následne napája jednu trakčnú skupinu, t. j. dvojicu v sérii zapojených trakčných jednosmerných sériových motorov typu TE006. Takéto riešenie umožňuje priaznivejšie dimenzovanie

2.1 Direct transmission DC/DC

The direct transmission DC/DC consists of direct governable generator i.e. dynamo, supplying DC series traction motor with variable voltage. The traction motors operate almost with steady input power, depending on the origin diesel engine SM. The speed adjustment of DC traction motors employs field-weakening approach and is mostly performed using contact switching. This kind of electric transmission is frequently used with diesel engine locomotives by ZSR. The main disadvantage of DC motor utilization is a running contact (carbon-commutation lamella), which limits the maximum speed, and it requires often and regular maintenance. There is no possibility to design them for higher input power flow because of size, weight restrictions and terrain profile.

2.2 Hybrid AC/DC

The basic feature of mixed AC/DC electric power transmission is that the alternating generator SG with salient poles replaces the massive traction generator see fig. 1b). In the last decade semiconductor field energization is mostly applied. This generator is connected with traction rectifier TUS1 that rectify the alternating voltage. Subsequently the rectified voltage supplies DC series traction motors M1 and M2 see fig. 1b. This kind of transmission prevails in SR of renewed locomotives. The ZSR is the core customer of refurbished locomotives. The main reason of these renovations is replacing existing diesel engines by more fuel efficient ones and installing new electric equipment featuring hybrid electric power transmission, and there is availability of origin traction motors. The renovation goes with new vehicle construction and redesigned frame. There is locomotive T699 (r. 770) modernization for new vehicle r. 773 being renewed. The table 1 shows original locomotive parameters and other column discloses parameters of a renewed vehicle:

Under development and construction of a renewed vehicle was taken into account complex electric equipment approach and new design approach. The electric equipment concept was described [2], and this article discusses only the features of electric equipment components under the circuit scheme of first motor group, see Fig. 2:

- Synchronous generator GG1 consists of three individually-connected windings and each one supplies rectifier GU. Subsequently, the rectifier feeds one traction group consisting of series-connected traction DC motors. This approach simplifies the traction rectifier design, its short-circuit resistance and improves generator reliability
- Electro-dynamic brake, the part of traction circuit, includes braking resistance RB, partly switched 1:0,5:0,25 of total resistance range by thyristors labeled 146 and 147. Breaking resistor are two independent modules individually cooled by auxiliary DC motors MV2, which are fed from resistance tap. DC motor drives axial power pressure valve.

Tab. 1

Parameter	T 669.0,1	r. 773
Hmotnosť vozidla [t]	111/114	107/112 ±3%
Výkon spaľovacieho motora - P _N [kW]	993	1 305
Typ a výrobca spaľovacieho motora	K6S 310 DR ČKD Praha	CATERPILLAR 3512 DITA/2-USA
Merná spotreba paliva pri P _N [g/kWh]	227,6	225,9
Maximálna ťažná sila [kN]	290	340
Trvalá ťažná sila [kN]	198	200
Dĺžka x šírka x výška vozidla [mm]	17 220 × 3 150 × 4 635	17 300 × 3 080 × 4 600
Výška kapotáže [mm]	2 835	1 600
Maximálna rýchlosť [km/h]	90	100
Typ trakčného generátora	Jednosmerný - DC	Striedavý - AC
Výkon trakčného generátora [kW]	885	1 380 kVA
Hmotnosť trakčného generátora [kg]	4 795	5 350
Trakčný usmerňovač - druh	–	3 x neriadený, môstkový, vzduchom chladený
Hmotnosť [kg]	–	145
Elektrodynamická brzda - výkon [kW]	–	1 350
Režim EDB	–	spádový/ zastavovací
Odbudovanie	Kontaktné, stykačové	Bezkontaktné, plynulé
Pomocné pohony	Mechanicko- elektrické	plne elektrické

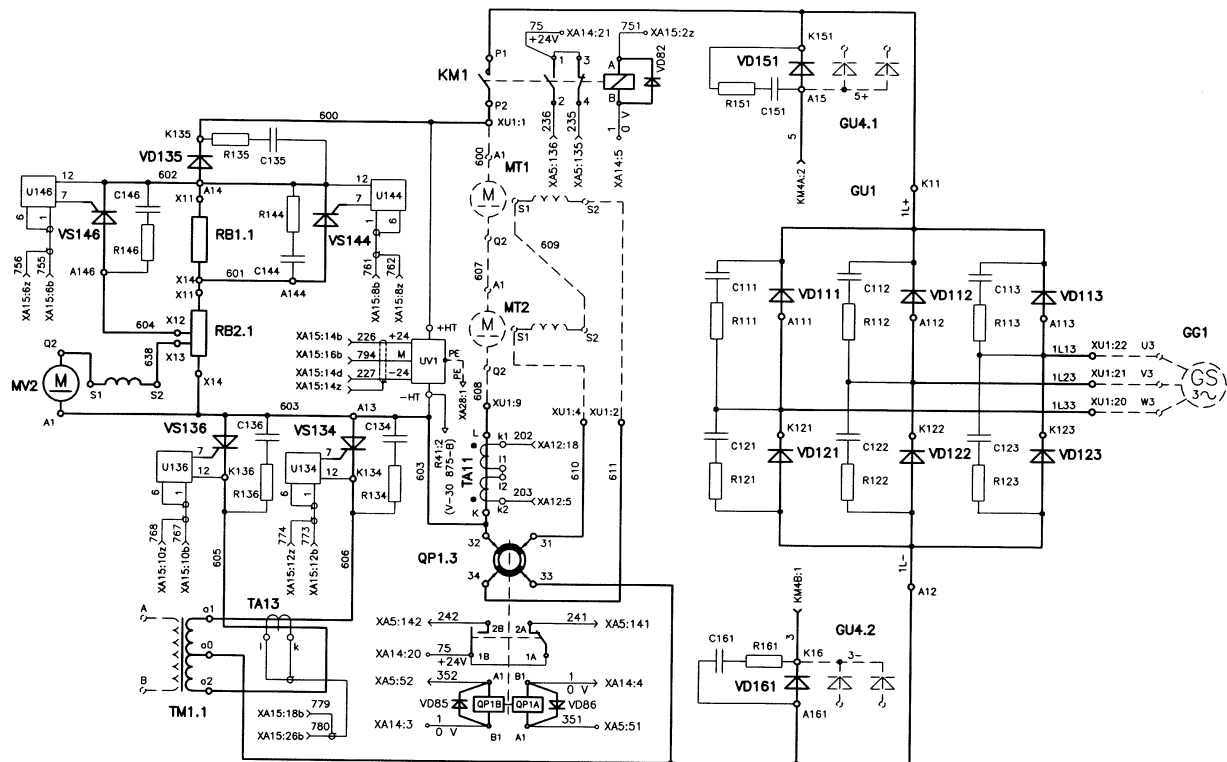
trakčného usmerňovača, jeho skratovú odolnosť a prispieva aj k zvyšovaniu spoľahlivosti generátora.

- Súčasťou trakčného obvodu (-ov) je obvod elektrodynamickej brzdy (EDB), tvorenej odporníkom RB, spínaným bezkontaktnými tyristormi (VS 144, 146) v podiele 1:0,5:0,25 celkovej ohmickej hodnoty odporníka. Odporníky sú riešené ako 2 moduly, každý chladený jednosmerným motorom (MV2) napájaným z odbočky odporníka poháňajúcim výkonným axiálnym pretlakovým ventilátorom.
- Zapojenie disponuje novým plynulým, bezkontaktným zoslabovaním budenia trakčných motorov v režime „JAZDA“ a cudzím budením trakčných motorov (MT1 a MT2) v režime „EDB“. K tomuto účelu slúži paralelný menič (VS 134, VS 136) pracujúci v 1. prípade ako invertor (rekuperujúci energiu budiacich vinutí cez pomocný transformátor TM1 do pomocného generátora GG2 (na obr. 2 nie je znázornený). V prípade EDB pracuje menič ako riadený usmerňovač, ktorý napája budiace vinutia motorov regulovateľným napätím z transformátora TM.
- Súčasťou elektrovýzbroje - v časti trakcie je aj zapojenie pre núdzový pojazd vozidla z akumulátorovej batérie vozidla (24 V js). Toto zapojenie umožňuje z batérie napájať buď 1-nu, resp.

Table 1

Parameters	T699.0,1	r. 773
Weight of vehicle [t]	111/114	107/112 ±3%
Power diesel engine - P _N [kW]	993	1300
Type and the producer of the combustion engine	K6S 310DR ČKD Praha	CATERPILLAR 3512 DITA/2-USA
Specific fuel consumption at P _N [g/kWh]	227,6	225,9
Maximum tractive force [kN]	290	340
Steady tractive force [kN]	198	200
Length/width/height [mm]	17220 × 3150 × 4635	17300 × 3080 × 4600
Faire height [mm]	2835	1600
Maximum speed [kmh ⁻¹]	90	100
Traction generator	DC	AC
Power [kW]	885	1380 kVA
Weight [kg]	4795	5350
Traction rectifier	–	3 × uncontrolled bridge / air cooling
Weight [kg]	–	
Electro-dynamic brake-power [kW]	–	1350
Regime EDB	–	Downhill/ Stopping
Shunting	Relay switch	Semiconductor
Auxiliary drives	Mechanical	Electric

- the circuit possesses a new way of connection for smooth, contactless field weakening of traction motor in DRIVE motoring mode and separate excitation of traction motors MT1, MT2 in EDB mode. Parallel converters VS134, VS136 serve for this purpose. In the first situation the converter performs as an inverter, which regenerates electric power of field windings into auxiliary generator GG2 (is not depicted) over auxiliary transformer TM1. In EDB mode, the inverter performs as controlled rectifier feeding field winding of motors with variable voltage from transformer TM.
- In the traction section as part of electric equipment there is an involvement for an emergency running down of vehicle. The 24 V battery feeds either one traction group only or all of them. Under no operation of diesel engine, can the vehicle run at 2,5 kmh-1 speed.
- Auxiliary drives are fully electric powered. The electric power source is auxiliary generator GG2, which is driven, by main generator GG1 using belt transmission. This generator supplies four static frequency converters that subsequently feed:
 1. Converter feeds induction motors of a new spiral compressor and fans of compressor cooling (30kW, 1,5kW)
 2. Converter feeds two induction machines for cooling diesel engine (2 × 22kW) in frequency range 0 ÷ 28 (36) Hz.



Obr. 2. Schéma zapojenia trakčných obvodov 1. motorovej skupiny

Fig. 2. 1st motor class traction circuits layout

všetky trakčné skupiny, čo umožňuje manévrovať s vozidlom pri nebežiacom spaľovacom motore rýchlosťou do cca $2,5 \text{ kmh}^{-1}$.
- Plne elektrické sú pomocné pohony. Zdrojom elektrickej energie je pomocný alternátor GG2, ktorý je poháňaný remeňovým prevodom od hlavného generátora GG1. Z tohoto generátora sú napájané 4 ks statických meničov frekvencie, ktoré postupne napájajú:

1. menič napája asynchrónne motory nového - skrutkového kompresora a ventilátor chladenia kompresora (30 kW a 1,5 kW);
2. menič napája 2 asynchrónne motory chladenia chladiča spaľovacieho motora ($2 \times 22 \text{ kW}$), napájané v rozsahu frekvencie 0 až 28 (36) Hz;
3. menič napája 2 asynchrónne motory poháňajúce ventilátory generujúce chladiaci vzduch pre chladenie trakčných motorov ($2 \times 18,5 \text{ kW}$) a jeden asynchrónny motor ventilátora (0,55 kW) chladenia trakčného usmerňovača a spínačov EDB a odbudzovania;
4. menič napája motory klimatizácie kabíny rušňovodča.

Súčasťou pomocných pohonov je aj nabíjačka akumulátorovej batérie a prípojka na verejnú sieť umožňujúca (pri stojacom SM) zásobiť vozidlo stlačeným vzduchom a dobiť batériu vozidla.

Celá, hore uvedená a popísaná výzbroj bola realizovaná v 5-tich kusoch modernizovaných rušňov r. 773 a v rokoch 1999 - 2000 daná do užívania v RD Zvolen. V súčasnosti (3/2001) končí výroba ďalších 5-tich kusov. Ostáva poznamenať, že celá trakčná výzbroj a elektronika pomocných pohonov je rozmiestnená v kontajneri

3. Converter feeds two induction machines of fans for electric traction motors ($2 \times 18,5 \text{ kW}$) and one induction motor of fan (0,55 kW) for traction rectifier, field weakening and EDB thyristors.
4. Converter feeds air-conditioning motor of driver cockpit.

The charger of accumulator batteries is the part of electric equipment and the electric plug. The plug of public electric supply network allows external charging of vehicle batteries and supplying the vehicle with pressure air.

The aforementioned description of the entire electric power equipment was realized for five renewed r. 773 locomotives in the years 1999-2000 for RD Zvolen. Five other locomotives are being finished by 3/2001. Complete electric power equipment and electronics of auxiliary drives are arranged in a container placed behind the driver's cockpit. The size is $2511 \times 1737 \times 1708 \text{ mm}$ and total weight 3250 kg. The vehicle and mechanical parts completion producer is ZTS-KV, a. s., Dubnica nad Váhom.

2.3 AC/AC transmission

Under electrical power transmission, the electric traction motor plays a key function for the following reasons:

- Size and weight
- Traction and control capabilities
- Maintenance

umiestnenom za kabínou s rozmermi $2\,511 \times 1\,737 \times 1\,708$ mm a s celkovou hmotnosťou cca 3 250 kg (vrátane kapotáže). Ostáva poznamenať, že finalistom vozidla a kompletátorom mechanickej časti je ZTS-KV, a. s., Dubnica nad Váhom.

2.3 Plne striedavý prenos – AC/AC

Pri elektrickom prenose výkonu zohráva trakčný motor rozhodujúcu úlohu z hľadiska

- rozmerov a hmotnosti,
- trakčných a regulačných vlastností,
- obsluhy a údržby,
- celkového vplyvu trakčného motora na dynamiku jazdy a zvršku (vplyv nevypružených hmôt).

Snaha o odstránenie nedostatkov jednosmerného trakčného motora viedla k voľbe iného druhu elektrického motora – motora bezkontaktného – asynchrónneho, s kotvou nakrátko (ATM). Okrem ATM sú známe realizácie trakčného pohonu aj so synchronnými – ventilovými motormi (bývalé ZSSR, Japonsko, Francúzsko), avšak v počte realizovaných vozidiel neprevýšili asynchrónny typ. Nakoniec prvý realizovaný rušeň s plne striedavým prenosom výkonu bol predstavený v r. 1970 [4] firmou HENSCHEL – BBC. Je nutné poznamenať, že popredné európske firmy cca od r. 1980 vyrábajú vozidlá už iba s plne striedavým prenosom výkonu [5]. O potrebe modernizácie vozidiel s takýmto typom prenosu sa zatiaľ nepodarilo presvedčiť budúcich užívateľov – ŽSR. Základná principiálna schéma plne striedavého prenosu je na obr. 1c. Oproti zmiešanému prenosu sa vyznačuje ďalšími uzlami: – jednosmerným medziobvodom – MO a trakčným frekvenčným meničom TMF1, napájajúcim asynchrónne trakčné motory ATM. Z hľadiska typu TMF1 uvažujeme v súčasnosti v podmienkach EVPÚ a. s. už iba s meničmi napäťového typu so sinusovou ŠIM, realizovaných na IGBT prvkoch. Snaha o realizáciu modernizácie vozidla odvodeného z vozidla r. 773 s plnými AC/AC prenosom za viac ako 2,5 ročné úsilie nenašla u zodpovedných pracovníkov ŽSR odzvu.

2.3.1 Projekt vozidla r. 774 AC

Vďaka dlhoročnému pôsobeniu EVPÚ a. s. v oblasti polovodičovej techniky, bol v spolupráci so ZTS – Výskum a vývoj, a. s. Dubnica nad Váhom spracovaný projekt rušňa s výkonom 1 500 kW, s AC/AC prenosom výkonu. Projektantom a budúcim dodávateľom prevažnej časti elektrickej výzbroje by bolo EVPÚ a. s. Konceptne projekt vozidla vychádza z vozidla r. 773 (nezmenený tvar, rovnaké kapotáže, spaľovací motor tých istých rozmerov ale zvýšeného výkonu, rozmerovo rovnaký trakčný generátor) a obsahuje novú výzbroj AC/AC typu. Principiálna schéma zapojenia trakčných a pomocných pohonov rušňa je na obr. 3 a jeho pracovné typové označenie je 774 AC. Zdrojom prvej energie je spaľovací motor firmy Caterpillar 3512B s výkonom 1 566 kW pri otáčkach 1 880 min⁻¹. Merná spotreba paliva tohto motora pri menovitom výkone činí 193,2 g/kWh. Trakčný generátor je z radu 1FC2, 6-pólový, s bezkontaktným budením od firmy Siemens, s.r.o. Napätie generátora je usmernené trakčným usmerňovačom GU1, výstup ktorého

- Overall traction motor influences on drive dynamics and coping (non-elasticity mass)

There was always an effort to replace the DC motor by selecting another kind of electric motor. The squirrel cage induction machine is usually chosen; however, some countries such as France, former USSR, Japan attempted to use synchronous motors without any significant achievements. The HENSCHEL-BBC Corporation introduced the first diesel-electric locomotive with AC/AC transmission in 1970 [4]. Since the 1980s, leading European companies manufacture the traction vehicle with only AC/AC power transmission. The ZSR Corporation didn't find the aspects to operate the locomotives with AC/AC power transmission in spite of the general conviction of their usefulness. The fundamental schematic of fully AC/AC power transmission is depicted in Fig. 1c). Attention is given to hybrid power transmission, the AC/AC features DC link MO, and traction rectifier TMF1 supplying asynchronous traction motors. Concerning the type of traction converter, EVPU considers only the voltage source inverter with sinusoidal PWM on IGBT basis. Although for almost 2.5 years there has been a tendency to modernize a chosen vehicle derived from the vehicle type 773 equipment with AC/AC transmission, it has not been positively accepted by top managers of the Slovak Railways.

2.3.1 Vehicle No. 774 of series

Due to EVPU experiences in power electronics, the R&D team developed the locomotive project of 1500kW power with AC/AC transmission. EVPU was supposed to be the designer and major manufacturer of electric power equipment. Prime conceptual design is taken from r. 773 vehicle with renewed electric power equipment but using the same frame, diesel engine with higher output power remaining the size, and the same traction generator in size. The basic locomotive schematic of traction and auxiliary drives is shown in Fig.3 labeling 774AC. As mentioned before, the original power source is diesel engine Caterpillar 3512B with output power 1566kW, 1880 min⁻¹. Specific consumption of this engine at nominal power is 193.2 g/kWh. The traction generator is 1FC2 machine of Siemens with 6 poles and contactless field energization. Traction rectifier GU1 rectifies the electric generator output voltage, which leads to a DC link circuit. The DC link MO supplies the traction frequency converters TMF1 ÷ 6, each of these converters feeds the traction motors individually. The complete electromagnetic and mechanical design of mentioned traction motor was made in the project framework, and its rated parameters are as follows:

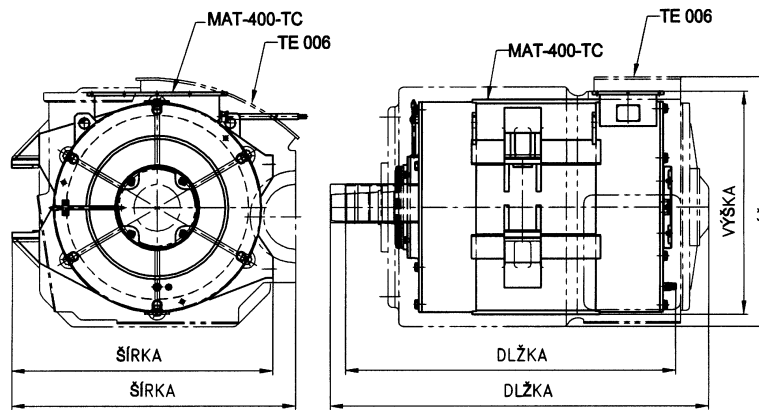
Type: MAT 400 – TC	power factor: 0.902
Number of poles: 6	efficiency [%]: 94.7
Torque: 3894 Nm	temperature level: H
Voltage: 3 × 950 V	Isolation/cooling: IP23/external air
Current: 284 A	revolution: 981 min ⁻¹
Rated/maximum voltage frequency: 50/140Hz	
Motor assembly: paw location, improved bearing	
Weight: 1450 kg	

požiadavky boli zohľadňované aj pri projekte rušňa 774 AC.

Trakčné obvody obsahujú aj obvod elektrodynamického brzdy s odporníkmi (BR1 až BR4), chladenými axiálnymi pretlakovými ventilátormi poháňajúcimi js. motormi napájanými z odbočiek podporníkov.

Zdrojom energie pomocných pohonov (ktoré sú plne elektrické, tvorené frekvenčnými meničmi MPP1 až 4 a asynchrónnymi motormi M1 a M10 – pozri obr. 3 vpravo), je statický menič MJN1 typu DC/DC. Tento menič upravuje meniace sa napätie jednosmerného medziobvodu na konštantné jednosmerné napätie pre napájanie jednosmerných medziobvodov frekvenčných meničov MPP1 až 4. Pomocné obvody obsahujú ešte nabíjačku batérie napájanú z vozidla (MJN2), resp. siete (TR1, GU2).

Pre porovnanie uvádzame v tab. č. 2 zaručované vypočítané a konštrukčné parametre rušňa r. 774 AC v porovnaní so špičkovým vozidlom firmy Adtranz a GE Transportation System postaveným v Kasseli (SRN) v r. 1996 s označením „Blue Tiger“ – DE-AC33C a plne striedavým prenosom [5]:



MOTOR typ	ŠÍRKA (mm)	VÝŠKA (mm)	DĹŽKA (mm)	HMOTNOSŤ (kg)
TE 006	936	885	1246	2650
MAT-400-TC	862	725	1085	1450

Obr. 4. Porovnanie obrysových rozmerov asynchrónneho trakčného motora MAT-400-TC s jednosmerným trakčným motorom TE 006

Fig. 4. Comparison of outline dimensions of asynchronous motor MAT-400-TC with a direct-line motor TE 006

Tab. 2

Parameter	r. 774AC	Blue Tiger
Rozchod	1 435/1 524	1 435/1 067
Usporiadanie náprav	Co'Co'	Co'Co'
Hmotnosť [min/max]	107/114 t	108/132 t
Výkon spaľovacieho motora	1 566 kW	2460 kW (1640, 3285kW)
Maximálna ťažná sila	340 kN	517/370 kN
Dĺžka vozidla [mm]	17 220	22 000
Šírka vozidla [mm]	3 150	2 800
Výška vozidla [mm]	4 667	4 080/3 710
Maximálna rýchlosť	100 kmh ⁻¹	120 kmh ⁻¹ (nákl. Verzia)
Typ trakčného generátora	Striedavý – AC	Striedavý – AC
Trakčný usmerňovač	Neriadený	Neriadený
Trakčné frekvenčné meniče	IGBT	GTO
Trakčný motor	Asynchrónny	Asynchrónny
Zdroj pomoc. pohonov	statický – IGBT	AC pomoc. Generátor
Motory pomoc. pohonov	Asynchrónne, štandard.	asynchrón., integr. koňšt.
Meniče pomoc. pohonov	frekvenč. – plynulá reg.	stupňovitá, frek. regul.

2.3.2 Projekt a realizácia vozidla DI 2201

Vývoj komponentov pre striedavý prenos výkonu v EVPÚ a.s. podnietil EVPÚ a.s. a ZTS – Kolajové vozidlá, a. s. Dubnica nad

Table 2

Parameter	r. 774AC	Blue Tiger
Track gauge [mm]	1435/1524	1435/1067
Wheel arrangement	Co'Co'	Co'Co'
Weight [min/max]	107/114 t	108/132 t
Diesel engine power	1566 kW	2460 kW(1640, 3285 kW)
Maximum tractive force	340 kN	517/370 kN
Length of vehicle [mm]	17220	22000
Width of vehicle [mm]	3150	2800
Height of vehicle [mm]	4667	4080/3710
Maximum speed	100 kmh ⁻¹	120 kmh ⁻¹
Traction generator	AC	AC
Traction rectifier	Uncontrolled	Uncontrolled
Traction frequency converters	IGBT	GTO
Traction motor	Induction motor	Induction motor
Auxiliary drive source	Static IGBT	AC aux. Generator
Motor of auxiliary drives	IM, standard	IM, integral
Converters of auxiliary drives	Freq. (smooth control)	stepped-freq. control

2.3.2 DL 2201 project and its completion

Development of AC power transmission components of EVPU a. s. and cooperation between EVPU and ZTS-KV opened an idea

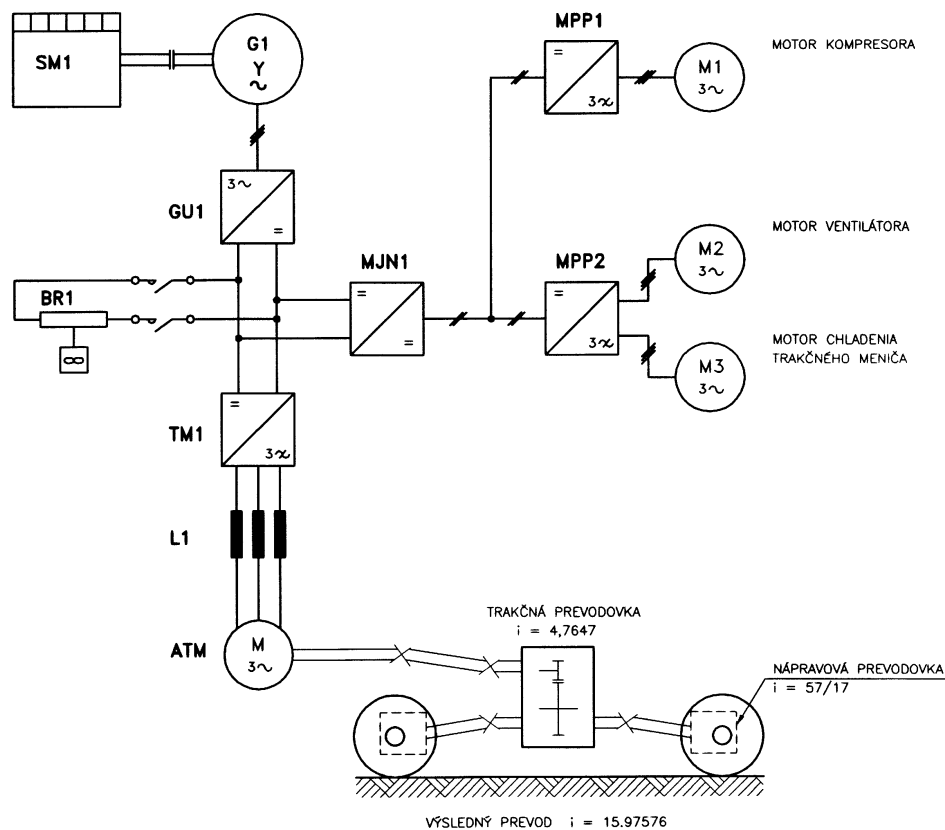
Váhom realizovať projekt modernizácie dvojnápravového rušňa pôvodného označenia T211.0. Pôvodný rušeň sa využíval v závodnej doprave a bol technicky opotrebovaný. Z hľadiska trakcie bol vybavený sériovo vyrábaným automobilovým motorom TATRA, s následným mechanickým prenosom výkonu cez 4-stupňovú prevodovku a následné prevodovky umiestnené v hnacích nápravách.

Modernizovaný rušeň po skúškach v závodnej doprave sa bude používať aj v traťovej službe ŽSR.

Modernizovaný rušeň zakladá na použití nového spaľovacieho motora CATERPILLAR, typ 3406DI-TA, s menovitým výkonom 257 kW, pri otáčkach $650 \div 1800 \text{ min}^{-1}$. Základná schéma zapojenia trakčných a pomocných obvodov rušňa je na obr. 5. Spaľovací motor SM1 poháňa cez pružnú spojku trojfázový bezkontaktný alternátor G1. Výstupné napätie generátora je usmernené trakčným usmerňovačom GU1. Výstupné usmernené napätie je privádzané na vstup do trakčného frekvenčného meniča TM1, ktorý generuje napätie premenlivej frekvencie určené pre napájanie asynchrónneho trakčného motora ATM. Motoru je priradená tlmička L1 zvyšujúca rozptylové reaktancie motora a obmedzujúca komutačné špičky spínačov IGBT. ATM poháňa cez kardanový hriadeľ trakčnú prevodovku s prevodom $i = 4,76$; z prevodovky sú na obe strany poháňané nápravové prevodovky s pôvodným prevodom $i = 57/17$. Pomocné pohony sú podobne ako pri predchádzajúcich rušňoch plne elektrické. Zdrojom energie pomocných pohonov je menič MJN1 typu DC/DC, ktorý z meniaceho jednosmerného

of the project for renewing two-axle locomotive previously labeled as T211.0. This railway engine was rather obsolete. From a traction point of view, batch-produced diesel engine of TATRA Corporation powers two-axle bogie over four level gearboxes. Modernized locomotive after tests in factory transport will also be used in the track service of the Slovak railways.

Upgraded locomotives are based on the Caterpillar diesel engine of 3406DI-TA type with output power 257 kW corresponding $650 \div 1800 \text{ min}^{-1}$. The basic schematic of traction and auxiliary circuits is shown in Fig. 5. Diesel engine drives three-phase contact-less generator G1 through slipping clutch. Traction rectifier GU1 rectifies the output voltage of generator G1, which goes to traction converters TM1 terminals. A traction converter makes voltage of adjustable frequency for supplying asynchronous traction motor. Leakage reactance limits commutation peaks of IGBTs and is connected in series with the motor. Traction motor ATM drives the gearbox ($i = 4.76$) over universal axle, and it drives both bogie gearboxes of $i = 57/17$. Auxiliary drives are very similar with the aforementioned ones and are fully electric powered. The energy source of auxiliary drives is MJN1 converter of DC/DC type, which adjusts variable DC voltage into a constant one. This constant voltage is used for the converter DC link supply of MPP1 and MPP2. MPP1 converter feeds the motor of compressor, and MPP2 feeds induction machine of traction motor fan and the fan



Obr. 5. Základná schéma zapojenia trakčných a pomocných obvodov rušňa DL 2201 s AC/AC prenosom

Fig. 5. The basic connection diagram of traction and auxiliary drives of the locomotive DL 2201 with AC/AC transmission

napätia vyrába konštantné jednosmerné napätie pre napájanie medziobvodu striedačov MPP1 a MPP2. Striedač MPP1 poháňa motor kompresora, striedač MPP2 poháňa asynchrónny motor ventilátora trakčného motora a asynchrónny motor ventilačného agregátu trakčného striedača TM1. Vozidlo obsahuje aj odporník elektrodynamickéj brzdy pre zastavovací režim s celkovým výkonom 100 kW.

Celá výzbroj obsahujúca trakčný usmerňovač, trakčný menič, menič MJN1 a meniče MPP1 a MPP2 včítane istiacich prvkov je umiestnená v samostatnom rozvádzači v rozmeroch ($\xi \times h \times v$) $\sim 1\,780 \times 595 \times 1\,400$ mm.

Pre porovnanie uvádzame niektoré základné parametre pôvodného a modernizovaného vozidla:

Tab. 3

	T211.0	DL2201
Usporiadanie dvojkolí	B	B
Výkon spalovacieho motora	118 kW	257 kW
Maximálna rýchlosť - Vmax	40 km/h	40 km/h
Hmotnosť plne vyzbrojeného rušňa	22 000 kg \pm 3 %	22 000 kg \pm 3 %
Ťažná sila na medzi adhezie	55,4 kN	71,7 kN
Trvalá ťažná sila	25,1 kN	58 kN
Trvalá rýchlosť	9,82 km/h	12 km/h
Ťažná sila pri Vmax	9,6 kN	18 kN

V dobe spracovania tohoto príspevku končila montáž prvého prototypu a začali sa skúšky jednotlivých agregátov.

3. Porovnanie účinnosti prenosových systémov DC/DC - AC/DC - AC/AC rušňov jednej kategórie

Pre posúdenie a porovnanie účinnosti jednotlivých prenosových systémov bola v [6] uskutočnená analýza reťazcov energetickej premeny jednotlivých druhov prenosu rušňa tzv. „jednej kategórie“, tzn. pôvodného vozidla r. 770(T669) s DC/DC prenosom, modernizovaného r. 773 s AC/DC prenosom a projekčne pripravovaným vozidlom s označením 774AC s plne striedavým prenosom AC/AC. Vzhľadom na zameranie predmetného príspevku, obmedzíme sa iba na tzv. bod menovitého chodu, pre ktorý boli stanovené aj účinnosti jednotlivých uzlov prenosu. Výsledné reťazce pre všetky tri druhy elektrického prenosu rušňa jednej kategórie sú na obr. 6. Vpravo od každého uzla je uvedená vypočítaná, resp. nameraná jeho účinnosť v menovitom bode. Cieľom tejto analýzy okrem iného je aj dokázať užívateľom vozidiel, že akákoľvek vyššia modernizácia rušňov tejto kategórie má zmysel a opodstatnenie vtedy, ak sa dosiahne vyššia účinnosť prenosu a z toho plynúca úspora prvotného paliva. Výsledkom výpočtu je tabuľka č. 4, ktorá uvádza výsledné účinnosti vozidla η_c a účinnosti prenosu výkonu η_{pr} .

Konkrétny výpočet účinnosti prenosov pre jednu „kategóriu“ rušňa ukazuje a potvrdzuje skutočnosť, že najvyššou účinnosťou

of traction converter TM1. The vehicle contains brake resistance of electro-dynamic brake of 100 kW.

The entire electric power equipment includes traction rectifier, traction converter, converter MJN1 and MPP1, MPP2 are placed in a container-like box in size of $1780 \times 595 \times 1400$ mm.

The following table 3 compares some basic features of the previous and renewed traction vehicle:

Table 3

	T211.0	DL2201
Wheel arrangement	B	B
Diesel engine power	118 kW	257 kW
Maximum speed	40 kmh ⁻¹	40 kmh ⁻¹
Weight of fully equipped loco	22 t \pm 3 %	22 t \pm 3 %
Starting tractive effort	55.4 kN	71.7 kN
Continuous tractive effort	25.1 kN	58 kN
Steady speed	9.82 kmh ⁻¹	12 kmh ⁻¹
Tractive effort for Vmax	9.6 kN	18 kN

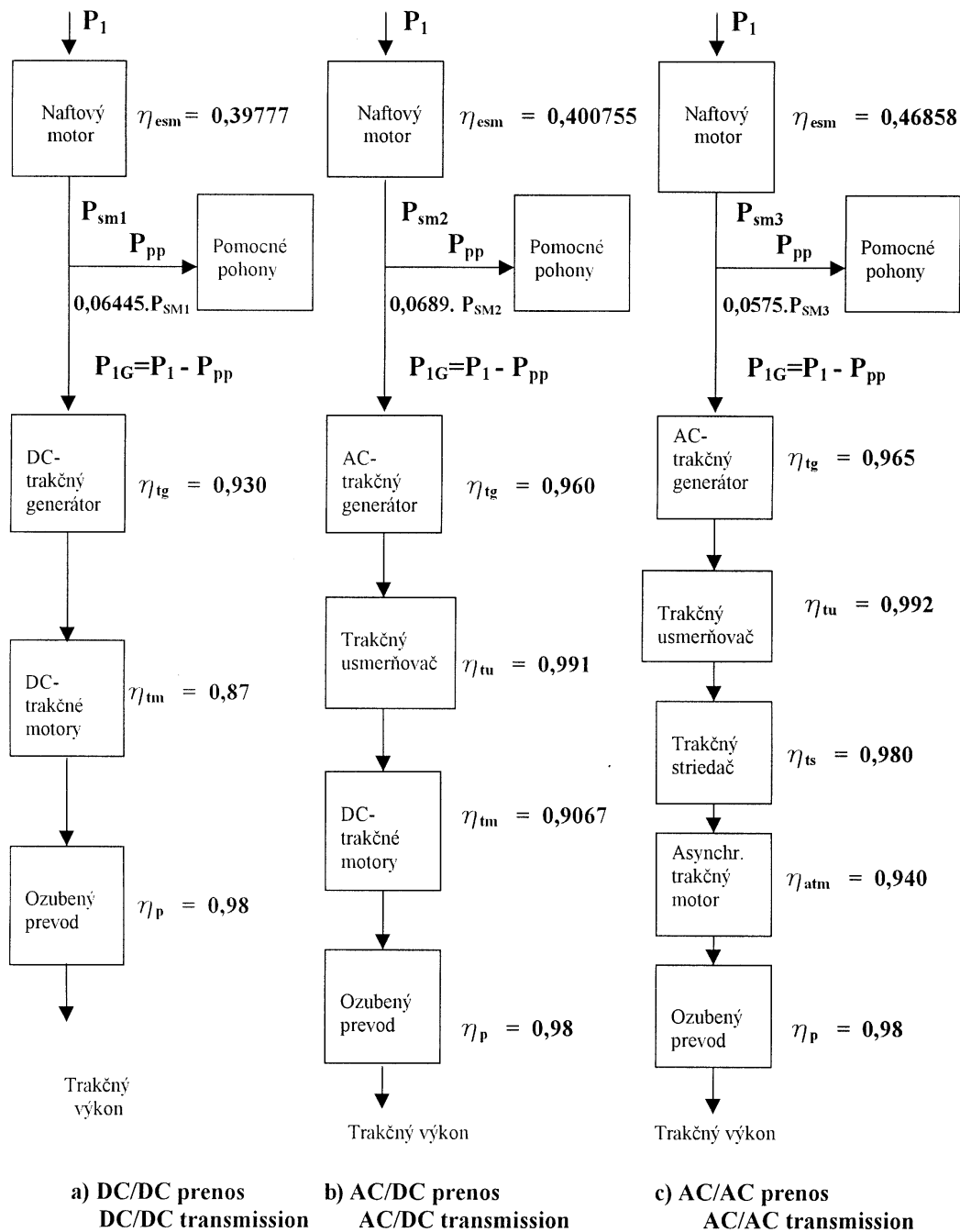
During the process of this paper the assembly of the first prototype was finished and testing of each aggregate of the system has been started.

3. Efficiency comparison of DC/DC - AC/DC - and AC/AC transmission systems of one-category locomotives

The analysis of energetic transformation chains of each type of transmission was done for comparison of their efficiency [6], at the one-category locomotive, original vehicle type 770 (T669) of DC/DC transmission, modernized type 773 with AC/DC transmission and project-prepared vehicle type 774AC. Due to the dedication of this paper, it will just refer to rating point operation, for that the efficiency of aggregate has been settled. All the schemes for all three types of electric transmission of one-category locomotive are depicted in Fig. 6; right to each aggregate, the calculated and/or measured efficiency for rate working point is given.

The aim of this analysis (besides others) is to show vehicle users that any advanced modernization of this category locomotives is necessary in the case if the higher efficiency of the transmission is reached and that means saving of the primary fuel. The resulting calculated efficiencies of vehicle and of power transmission are given in table 4.

The given calculation of the one-category locomotive transmission efficiency shows the real fact that maximum efficiency is presented just by AC/AC power transmission, which is can be reached by:



Obr. 6. Reťazce energetickej premeny na trakčom vozidle r. 770, 773, 774AC s rôznymi druhmi elektrického prenosu výkonu
Fig. 6. Chains of energetic change in the traction vehicle r. 770, 773, 774AC with various kinds of electric power transmission

sa môže prezentovať iba AC/AC prenos výkonu, ktorý je dosiahnuteľný:

- aplikáciou spaľovacieho motora s nízkou mernou spotrebou paliva, umocňovanou nízkymi emisími limitmi;
- inštaláciou elektrických agregátov prevažne striedavého typu a polovodičových zariadení s výrazne vyššou prevádzkovou účinnosťou (ktorá musí byť požadovaná od jednotlivých dodávateľov);

- application of combustion motor with low specific fuel consumption requested by low emission limits;
- installment of electric aggregates, mostly of AC type and semiconductor equipment with highly higher operational efficiency (which must be required for individual suppliers);
- design and realization of fully electric auxiliary drives denoted by higher efficiency.

- návrhom a realizáciou plne elektrických pomocných pohonov vyznačujúcich sa vyššou účinnosťou.

Tab. 4

Druh prenosu	DC/DC	AC/DC	AC/AC
Účinnosť vozidla η_c	0,2951	0,3154	0,3817
Účinnosť prenosu výkonu η_{pr}	0,7929	0,8453	0,86421

Ďalšou analýzou v [6] zameranou na pomer merných spotrieb paliva pre rôzne druhy elektrického prenosu sme zistili výsledok, ktorý je uvedený v nasledujúcej tabuľke č. 5 (spotreba DC/DC prenosu je vzatá ako jednotková):

Tab. 5

Druh prenosu	DC/DC	AC/DC	AC/AC
Merná spotreba $[q/q_{DC}]$	1	0,9311	0,7788

Výčíslenie úspor pohonných hmôt už iba zvýrazní rozdiel medzi jednotlivými druhmi prenosu značnou prevahou v prospech AC/AC prenosu.

Abý bolo možné dokumentovať túto úsporu, sledovali sme ju v prevádzke RD Zvolen na 5-tich kusoch modernizovaných rušňov r. 773, postupne nasadzovaných do užívania od 5/1999 do 7/2000 [7]. Za toto obdobie najazdili rušne celkom 187 445 km a prepravili 81 471 477 tkm pri celkovej spotrebe 582 950 l nafty, čo zodpovedá priemernej mernej spotrebe $q = 7,1553$ l/103 tkm. Paralelne bola sledovaná merná spotreba na vozidlách r. 770 a 771 (s prvotným DC/DC prenosom). Za rovnaké obdobie - 5/99 - 7/00 vozidlo r. 770 dosiahlo mernú spotrebu $q_{770} = 11,085$ l/10³ tkm a u vozidla r. 771 bolo $q = 9,42$ l/10³ tkm. Potom pomer

$$\frac{q_{773}}{q_{771}} = 0.64537, \text{ resp. } 64.5 \%$$

$$\text{a } \frac{q_{773}}{q_{771}} = 0.7594, \text{ resp. } 74.94 \%$$

Praktické úspory paliva v prevádzke sú teda ešte vyššie, než vyplývajú z rozboru reťazca účinností (čo možno vysvetliť nižšou súčasnosťou využitia elektrických pomocných pohonov a rekuperačným spôsobom zoslabovania budenia). Experimentálne overenie a porovnanie AC/AC prenosu voči DC/DC, resp. AC/DC zatiaľ nebolo možné realizovať, pretože takéto vozidlo nebolo ešte v podmienkach slovenskej firmy resp. ŽSR realizované (pripravuje sa). *Rozhodujúcou skutočnosťou zostáva, že potreba a opodstatnenosť ďalších modernizácií už len vo väzbe na výrazné zníženie mernej spotreby prvotného paliva rušňov tejto kategórie je preukázateľná a ekonomicky výhodná.*

4. Záver

Cieľom predchádzajúcich kapitol bolo podať určitú širšiu informáciu o prístupe k modernizáciám vybranej kategórie rušňov s jednotlivými druhmi prenosu výkonu. Príspevok sa obmedzil jednak na popis definitívnych riešení, ktoré boli výrobné overené a sú už

Table 4

Type of transmission	DC/DC	AC/DC	AC/AC
Vehicle efficiency η_c	0.2951	0.3154	0.3817
Efficiency of power transmission η_{pr}	0.7929	0.8453	0.86421

Further analysis [6] has been focused on the relation of specific fuel consumption depending on various types of electric transmission. The result found is given in table 5 (consumption of DC/DC transmission is taken as unity one):

Table 5

Type of transmission	DC/DC	AC/DC	AC/AC
Specific consumption $[q/q_{DC}]$	1	0.9311	0.7788

Calculation of fuel savings will make bigger differences between the types of transmissions advantageous for AC/AC transmission. As evidence of these savings, five modernized locomotives series of 773 in operation unit of RD Zvolen have been watched. The locomotives were in operation from May 1999 to July 2000 [7]. During this time they all ran at 187 445 km and have transferred 81 471 477 tkm at total consumption of 582 959 liters of petrol (diesel oil) and specific consumption of 7.1553 litres/10³ tkm. In this time specific consumption of vehicles of 770- and 771 series with original DC/DC transmission was watched. The specific consumption of vehicle of 770 series was 11.085 litres/10³ tkm and 9.42 litres/103 tkm of 771 series vehicle, for the same time. Thus, the relations between individual consumption of the vehicles are as follows:

$$\frac{q_{773}}{q_{771}} = 0.64537, \text{ resp. } 64.5 \%$$

$$\text{and } \frac{q_{773}}{q_{771}} = 0.7594, \text{ resp. } 74.94 \%$$

The actual savings in real operation will be even higher as mentioned, due to smaller simultaneous acting of auxiliary drives and regenerative manner of the field weakening of the motors. The experimental verification and comparison of AC/AC transmission against DC/DC- and AC/DC ones have not been yet realized because such a vehicle is not produced by Slovak firms and Slovak Railways (ŽSR), so far, but it is being prepared for the near future. The definite matter of fact is still that necessity and reasonability of further modernizations are evident and economically advantageous due to decreasing of specific consumption of primary fuel at locomotives of this category.

4. Conclusions

The aim of previous chapters has been to announce certain information regarding an approach of modernization of the chosen category of locomotives with individual types of power transmission. The paper has been concentrated on the description of defi-

dlhšiu dobu v prevádzke, a tiež na pripravované – projektovo uzatvorené riešenia s plne striedavým prenosom. Opodstatnenosť a ekonomická efektívnosť modernizácií na AC/DC a AC/AC prenos je dokladovaná stanovením účinnosti jednotlivých prenosov a preukázateľnými úsporami paliva.

Je samozrejmé, že návrh výzbroje pre AC/AC prenos je zložitá vývojovo-projekčná a experimentálna úloha, úskalí ktorej nie je možno ozrejmiť v jednom príspevku a mohli by byť námetom pre ďalšie práce a ďalšie príspevky. Z hľadiska ďalších prác a ďalšieho smerovania a zdokonaľovania kompletných výzbrojí je potrebné riešiť optimalizáciu parametrov synchrónneho generátora, obvodovo a konštrukčne zdokonaľiť trakčné frekvenčné meniče a optimalizovať návrh a konštrukciu trakčného asynchrónneho motora vo väzbe na garantovanie momentov pri vyšších frekvenciách. Úplne samostatnou problematikou, o ktorej sme sa v príspevku nezmienili, je celková koncepcia riadiaceho systému vozidla, jeho štruktúra, vlastnosti a pod. Tieto a ďalšie úlohy sú v súčasnosti predmetom riešenia ako v EVPÚ, a.s. Nová Dubnica, tak aj iných tuzemských a zahraničných firmách a inštitúciách.

Podakovanie:

Tento príspevok vznikol na základe podpory Ministerstva hospodárstva SR v rámci riešenia VTP projektu č. 98-573-V01.

Literatúra – References

- [1] JANSA, F.: *Vehicles for Independent Traction* (in Czech). NADAS Publisher, Prague (Cz.R.), 1987
- [2] KUČHTA, J.: *Conception of Electric Equipment of Modernised Locomotive of Series No. 773* (in Slovak). Proc. of PRORAIL '99 International Conf., Žilina (SR), 1999, pp. 277-283
- [3] MILO, P. – HUPIAN, P.: *Results of Modernising Activities of ŽOS Zvolen* (in Slovak). In: Proc. of PRORAIL '99 International Conf., Žilina (SR), 1999, pp. 361-369
- [4] TEICH, W.: *Diesel-Electric Locomotive with BBC Ring-less Induction Motors* (in German). Electric Railways (Elektrische Bahnen), 1972, No. 4
- [5] KINZEL, W.: *The Blue Tiger – a Modern Diesel Locomotive Family for World Market* (in German). ETR 47 (1998), H. 2 -, pp. 125-131
- [6] KUČHTA, J.: *Energetic Efficiency Analysis for DC/DC, AC/DC- and AC/AC Transmission Systems* (in Slovak). Research Report No. V009/2000of EVPÚ Research Institute for the VTP project No. 98-573-V-01, Nová Dubnica, 2000
- [7] ČERVENKA P., CHUDÍK S.: *Assessment of the locomotive 773 running test*. Division of GR ŽSR č. 331/2000-0414, Bratislava, 8/2000

nitive solutions, which are verified in production and operation, and on prepared and designed solutions of the projects for full AC transmission. Reasonability and economical effectiveness of modernization of AC/DC- and AC/AC transmission is verified by settling of efficiency for individual transmissions and by evident savings of fuel.

It's clear that design of vehicle equipment with AC/AC transmission is rather complex developing project task, which problems is not possible to explain in such a short paper and they are as themes for the future works. Regarding to those and to further aimed and advanced complex equipment there is to solve the optimization of parameters of a synchronous generator, improvement of circuit and construction of traction frequency converter. It is also important to optimize the design and construction of traction motor regarding to high torque at higher frequencies. Quite separate problematic and not mentioned in the paper, it is question of whole conception of vehicle control system, its structure, properties and so on. Such- and further similar tasks are at present the subject of solution in EVPÚ,a.s.,Nova Dubnica and also in other Slovak and foreign companies and institutions.

Acknowledge

Ministry of Economy of Slovak Republic has supported this contribution within the frame of the VTP project No. 98-573-V01.