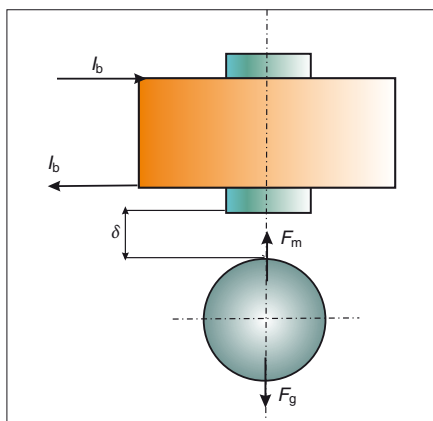


# Pokroky ve stavbě magneticky levitovaných dopravních systémů (1)

prof. Ing. Daniel Mayer, DrSc., Západočeská univerzita v Plzni

## 1. Úvod

Doprava osob, zboží a surovin hraje v moderní společnosti významnou roli. Rychlost klasické železniční a automobilové dopravy má své technické meze, které nelze překročit jejím zdokonalováním. Kromě toho požadavky na její bezpečnost, spolehlivost, energetickou úspornost a ekologičnost jsou stále přísnější. Do vývoje dopravy tedy musela vstoupit nová, netradiční dopravní technika, kterou lze integrovat do již existující automobilové, železniční a letecké přepravy. Představou vozidla, které by se vznášelo (levitovalo) nad jízdni dráhou, aniž by s ní mělo pevný kontakt, se zabývali projektanti již na počátku minulého století. Pokusy s pneumatickou levitací, kdy stlačený vzduch levitoval vozidlo a zároveň zajišťoval jeho pohon,



Obr. 1. K levitačnímu principu EMS

se pro hromadnou osobní přepravu nejevily perspektivními. Naproti tomu pokroky ve výrobě polovodičů, automatické regulaci, popř. i ve výrobě vysokoteplotních supravodivých materiálů vedly k tomu, že k levitaci i k pohonu vozidla lze výhodně využít magnetické pole [21]. Pro magnetickou levitaci bylo zavedeno zkrácené označení maglev (*Magnetic Levitation*, magnetická levitace).

V šedesátých letech minulého století byl zahájen soustavný výzkum této nové dopravní techniky, která nahrazuje mechanické systémy bezkontaktními, elektromagnetickými a elektronickými zařízeními. Výzkum pohltil nemalé finanční prostředky a dospěl ke dvěma koncepcím vozidel maglev. Jedna je založena na elektromagnetické levitaci, byla vyvinuta v Německu a vozidla takto poháněná jsou označována Transrapid. Druhá využívá elek-



Obr. 2. Transrapid 08 – celkový pohled

trodynamickou levitaci, její původ je v Japonsku a vozidla nesou označení MLU (*Magnetic Levitation Unit*, magneticky levitovaná jednotka) [21]. V současné době je výzkum v podstatě ukončen a vozidla maglev, spolu s plně automatizovaným elektronickým řízením, jsou zaváděna do provozu a plně se osvědčují. Vozidla maglev představují novou generaci dopravních prostředků a jejich vstup do společenské praxe je svým historickým významem srovnatelný snad jen se zavedením železnice na počátku devatenáctého století.

## 2. Vozidla maglev, jejich vývoj, zhodnocení a zavedení do praxe

Vozidla maglev jsou vysokorychlostní, bezpečná, ekologická a energeticky úsporná. Jejich technické vybavení vykazuje tyto základní funkce:

- levitační – vozidlo je levitováno a v této poloze je během jízdy trvale udržováno,
- stabilizační – je zajištěno, aby vozidlo udržovalo směr jízdy i při působení bočních sil (např. v zatáčkách, při působení bočního větru apod.) a
- pohonnou – je zajištěn pohyb vozidla podle předepsaného harmonogramu rychlosti.

### 2.1 Fyzikální princip EMS

Princip elektromagnetické levitace – EMS (*Electro-Magnetic Suspension*, elektromagnetická levitace), jinak též levitace přitahováním či atraktivní levitace, je vyznačen na

obr. 1. Na feromagnetické těleso působí jednak gravitace silou  $F_g$ , jednak elektromagnet silou  $F_m$ . Síla  $F_m$  závisí na budícím proudu elektromagnetu  $i_b$  a na vzdálenosti  $\delta$ ,  $F_m = F_m(i_b, \delta)$ . Je-li  $F_m < F_g$ , je těleso v klidu, je-li  $F_m > F_g$ , těleso se přitáhne k jádru elektromagnetu a při  $F_m = F_g$  levituje. Tato levitace však není stabilní. Při náhodné nepatrné fluktuaci budícího proudu  $i_b$  nebo vzdálenosti  $\delta$  těleso buď odpadne, nebo se přitáhne. Stabilní levitace se dosáhne zpětnovazební regulací budícího proudu  $i_b$ . Vzdálenost  $\delta$  je sledována čidlem polohy, a jestliže se zmenšuje (tj. je-li  $F_m > F_g$ ), zmenší se proud  $i_b$ , a jestliže se zvětšuje (tj. je-li  $F_m < F_g$ ), zvětší se  $i_b$ . Regulator nastavuje takový budící proud  $i_b$ , aby v požadované vzdálenosti  $\delta$  stále platilo  $F_m = F_g$ , tj. aby těleso stabilně levitovalo.

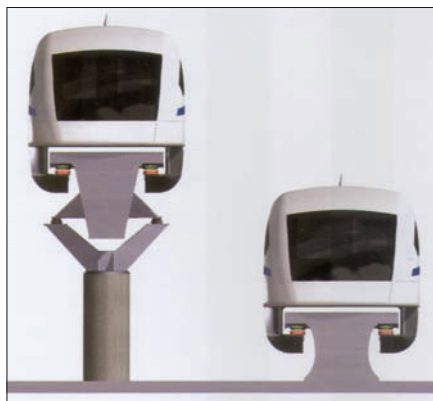
### 2.2 Stručná historie Transrapidu

- Albert A. Albertson, žijící v New Yorku, získal v roce 1902 patent na využití magnetismu v železničních vozech. Vozidlo bylo vybaveno stejnosměrnými elektromagnety, které se zdola přitahovaly ke kolejnici, a tím nadlehčovaly (tehdy ještě nikoliv levitovaly) vagon. Elektromagnety napájely baterie umístěné pod sedadly cestujících. Vagon byl tažen elektrickou lokomotivou, která se pohybovala po kolejnici (klasicky). Albertson nesestavil funkční model; jeho výroba by byla spojena s několika obtížemi, v té době ještě neřešitelnými.

- Objevitelem principu EMS a jeho využitím pro železniční dopravu je německý inženýr Hermann Kemper. V roce 1922 zaznamenal první nápad, v roce 1934 obdržel patent a v roce 1935 předvedl první funkční model železnice maglev o nosnosti 210 kg.
- 1969: z podnětu spolkového ministerstva dopravy NSR (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) byl zahájen systematický vývoj technologií vozidel maglev. Firma MBB (Messerschmidt-Bölkow-Blohm) vyrobila na principu EMS několik prototypů vysokorychlostních vozů, označovaných Transrapid.
- 1971–1975: japonská letecká společnost JAL (*Japan Air Lines*, Japonské aerolinie) zhotovila zkušební vozidlo maglev na základě výrobní technologie Transrapidu.
- 1980–1984: v severozápadním Německu u obce Lathen (Emsland) byla vybudována zkušební trať délky 31,5 km, napájená větrnými elektrárnami. Zkušební provoz superexpresu Transrapid, jehož se může zúčastnit veřejnost, tam stále probíhá.
- 1986: na Světové výstavě Expo '86 ve Vancouveru vystavila JAL nízkorychlostní vozidlo HSST-03.
- 1998: ustanoveno konsorcium firem Siemens AG a ThyssenKrupp, nazvané Transrapid International – TRI, v němž jsou nadále vyvíjeny a vyráběny superexpresy Transrapid.
- 1999: zhotoven model Transrapid 08, který splňuje veškeré náročné požadavky na osobní přepravu. Skládal se ze tří sekcí, pojal 311 cestujících a dosahoval rychlosti až  $500 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (nejvyšší dosažená rychlost byla  $513 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ).
- 2006: v Šanghaji (ČLR) byl zahájen pravidelný provoz linky Transrapidu jako prostředku veřejné hromadné dopravy na vzdálenost 31 km.

### 2.3 Technické parametry Transrapidu

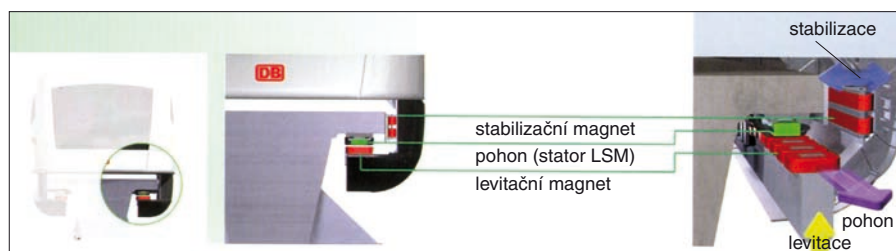
Celkový pohled na superexpres Transrapid 08 je na obr. 2. Vlak se skládá ze dvou koncových vozů se stanovištěm strojvedoucího a jednoho až osmi „vložených“ vozů. Jeho délka je omezena délkou nástupiště na terminálu.



Obr. 3. Způsoby provedení jízdní dráhy

Skříně vozidla jsou tlakotěsné, bočnice, čelnice a střecha jsou z hliníkových profilů. Interiér vozidla je vybaven sedadly pro přepravu osob, ale může být upraven pro přepravu zboží v uzavřených kontejnerech. Drážní těleso je prefabrikované [1], [12], [28]. Je uloženo na prefabrikovaných ocelobetonových nosnících, které se vyrábějí složitou technologií v délkách 12, 18, 21, 24 a 50 m. Jejich doprava na staveniště a instalace jsou nesnadné; požadovaná přesnost na jejich usazení je menší než 1 mm. Výška vozidla nad zemí je 1,25 až 2,2 m, u mostních konstrukcí 2,2 až 20 m (obr. 3).

Z obr. 4 je patrný levitační, stabilizační a pohonný systém Transrapidu 08. Provoz



Obr. 4. Levitační, stabilizační a pohonný systém Transrapidu



Obr. 5. Pohled na „dlouhý stator“ Transrapidu, uložený vespod jízdní dráhy

Transrapidu je plně automatizován (strojvedoucí pracuje jako záloha) a je řízen z velínu. Využívá digitální rádiový přenos dat OTN (*Open Transport Network*, síť s otevřeným přenosem dat) s frekvencí 38 GHz.

Levitaci na principu EMS zajišťují elektromagnety zabudované do konstrukce vozidla. Elektromagnety jsou přitahovány k paketu plechů zabudovanému do spodní části jízdní dráhy (jsou zároveň statorem pohonného lineárního motoru vozidla). Jsou napájeny proudem, který je regulován tak, aby nastala stabilní levitace vozidla při konstantní vzduchové mezeře  $\delta$  mezi elektromagnety a pakety plechů. Velikost vzduchové mezery je trvale sledována čidlem polohy a přibližně je 10 až 12 mm. Díky současné zdokonalené technice stavby drážního tě-

lesa je dosahováno větší rozměrové přesnosti, což umožňuje zmenšit vzduchovou mezeru až na  $\delta \approx 8$  až 9 mm, a tedy zmenšit magnetizační proud  $i_b$  potřebný k levitaci.

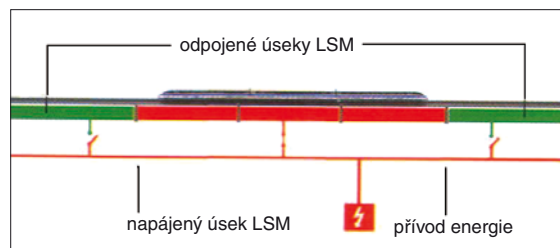
Boční stabilitu zajišťují elektromagnety, taktéž zabudované do podvozku vozidla. Automaticky kompenzují vliv boční síly na vozidlo (např. působení větru nebo síly při projíždění zatáčky).

Energie k buzení levitačních a stabilizačních magnetů a pro vlastní spotřebu vozidla (osvětlení, klimatizace, palubní přístroje) se u starších prototypů Transrapidu přiváděla trojeří, současná vozidla jsou – vzhledem k pevné zemi – zcela bezdotyková. Je-li vo-

zidlo v klidu nebo pohybuje-li se pomalu, dodává mu energii palubní akumulátorová baterie. Vozidlo, které je v klidu, může takto levitovat asi jednu hodinu. Při rychlosti vozidla nad  $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  dodává energii IPS (*Inductive Power Supply*, indukční zdroj energie), což je lineární generátor, který hraje vlastní spotřebu a zároveň dobíjí baterie. Bylo navrženo několik systémů IPS [2], [6], [16], [24]. Při výpadku napájení z lineárního generátoru bude vlak odebírat energii z baterie, bude nadále levitovat a dojede až do předem určeného odstavného prostoru.

Při selhání levitace Transrapidu dosedne vozidlo na skluznice. Při velkých rychlostech jsou tribologické poměry na třecích plochách velmi náročné (teplota je větší než  $1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Testy ukázaly, že je lze zvládnout, jsou-li na povrchu skluznic keramické prvky ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) s povlakem na bázi polyuretanu [20].

Pohon vozidla je proveden jako lineární synchronní motor „s dlouhým státorem“ – LSM. Stator tvoří již zmíněné pakety plechů, které jsou zabudovány do spodní části jízdní dráhy po celé její délce. Pakety jsou opatřeny drážkami, do nichž je vloženo třífázové vinutí; cívky jsou z kabelových vodičů (obr. 5). „Rotorem“ lineárního motoru



Obr. 6. Napájení úseku „dlouhého statoru“ LSM, jímž právě projíždí superexpres

jsou levitační magnety. Třífázové vinutí indukuje běžící (postupné) magnetické pole, které prostřednictvím levitačních magnetů unáší vozidlo. Rychlost Transrapidu se reguluje frekvencí třífázového proudu, který napájí „dlouhý stator“. Ten je rozdělen na úseky, jejichž délka je jen o málo větší než délka soupravy, a postupně se napájí pouze ten úsek, jímž projíždí souprava (obr. 6). Tím se snižuje ztráty elektrické energie. Jednotlivé úseky jsou s napájecími stanicemi spojeny kabelovým vedením. Signál k zapnutí úseku dává rádiový systém zjišťující polohu. Ovládají se jím měniče tranzistorů IGB, které napájejí příslušné sekce statorového vinutí. Výkon měničů, které jsou napájeny ze sítě 110 kV, je 15 MV·A, s frekvencí proměnnou od 0 do 215 Hz. Napájecí stanice jsou rozmístěny podél tratě ve vzdálenosti 10 až 45 km.

Transrapid je provozován v režimu centrálního automatického řízení, podle naprogramovaného harmonogramu jízd. Vozidlo a stacionární řídicí objekty komunikují digitálním rádiovým přenosem dat OTN s kmitočtem 38 GHz. Signalizační technika vylučuje lidský faktor zodpovědnosti za bezpečnost provozu, strojvůdce pouze sleduje provoz a při mimořádných událostech komunikuje se stacionárním dispečinkem. Vysoká bezpečnost řídicího systému je mj. zajištěna tím, že vozidlo v každém okamžiku přijímá signály dvěma anténami, a to ze dvou nezávislých vysílacích antén, umístěných na stžárech podél trasy.

Při brzdění Transrapidu se přepíná lineární synchronní motor z motorického do generátorového režimu a získaná energie se rekuperuje do sítě. Jako záložní je instalována vířivá brzda.

Tab. 1. Parametry Transrapidu 08

Rychlost (km·h <sup>-1</sup> )			
maximální	513		
provozní	400 až 500		
Rozjezd na rychlost		Za čas (s)	Na vzdálenost (km)
0 až 100 km·h <sup>-1</sup>		31	0,430
0 až 300 km·h <sup>-1</sup>		104	4,340
0 až 500 km·h <sup>-1</sup>		278	19,290
Dojezd z rychlosti		Za čas (s)	Na vzdálenost (km)
100 až 0 km·h <sup>-1</sup>		58	0,449
300 až 0 km·h <sup>-1</sup>		115	3,681
500 až 0 km·h <sup>-1</sup>		176	10,475
Příkon (MW)		Při dvou sekcích	Při šesti sekcích
při 200 km·h <sup>-1</sup>		0,9	2,2
při 300 km·h <sup>-1</sup>		2,2	5,0
při 500 km·h <sup>-1</sup>		8,2	18,7
Rozměry sekce (m)		Koncová sekce	Vložená sekce
délka		27,00	24,80
šířka		3,70	3,70
výška		4,16	4,16
Kapacita		Při dvou sekcích	Při čtyřech sekcích
počet sedadel		124 až 184	292 až 436
hmotnost cestujících (t)		28	63
hmotnost nákladu (t)		60	120
Jízdní dráha		Spotřeba (W·h/osoba·km)	
stoupání	≤10%	při 200 km·h <sup>-1</sup>	30
boční náklon	12°	při 300 km·h <sup>-1</sup>	44
poloměr zatáčení (m)		při 500 km·h <sup>-1</sup>	63
při 200 km·h <sup>-1</sup>	705	Spotřeba při 430 km·h <sup>-1</sup> , 446 cestujících a pěti sekcích	
při 300 km·h <sup>-1</sup>	1,590		
při 500 km·h <sup>-1</sup>	4,415		

Rozptylové magnetické pole Transrapidu v prostoru pro cestující je nepatrné; magnetická indukce je zde  $B < 100 \mu\text{T}$ . (Pro porovnání: zemský magnetismus  $B \approx 50 \mu\text{T}$ , televizor  $B \approx 500 \mu\text{T}$ , přímotop  $B \approx 1\,000 \mu\text{T}$  atd.)

Drážní těleso Transrapidu bylo předmětem rozsáhlého výzkumu. V uplynulých 25 letech bylo navrženo a zkonstruováno asi dvacet typů drážních těles. Byla testována a poté

hodnocena zejména s ohledem na dynamické vlastnosti (vibrace), geometrické odchylky vlivem geoteplotních dilatací, deformace a hluk při projíždění vlaku, povětrnostní podmínky (např. sníh, námraza) a požadavky na zastavenou plochu. Drážní těleso je trvale automaticky sledováno [12].

Další údaje o Transrapidu jsou uvedeny v tab. 1. (pokračování)



## PRAGOINTERIER NEW DESIGN

19. MEZINÁRODNÍ VELETRH NÁBYTKU,  
BYTOVÉHO TEXTILU, DOPLŇKŮ A DESIGNU

# 31. 1. - 3. 2. 2008

INCHEBA PRAHA spol. s r.o., Areál Výstaviště 67, Praha 7 – Holešovice  
T +420 220 103 498 E-mail: pragointerier@incheba.cz  
www.pragointerier.cz



INCHEBA  
EXPO PRAHA