



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Hybridní pohony kolejových vozidel

Hybrid powertrains of rail vehicles

Bakalářská práce

Studijní program: Strojírenství

Studijní obor: Konstruování podporované počítačem

Vedoucí práce: Ing. Josef MORKUS, CSc.

Helen HEDRICOVÁ

Praha 2016

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma "Hybridní pohony kolejových vozidel" jsem vypracovala samostatně. Použitou literaturu a podklady uvádím v seznamu Bibliografie. Jsem si vědomá následků nepravdivosti těchto údajů.

V Praze dne 25. června 2016

.....

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Josef Morkusovi, CSc. za odborné vedení práce, udělené cenné rady a vstřícnost při konzultacích a vypracování.

ANOTACE

Bakalářská práce je zaměřená na hybridní pohony, konkrétně hybridní pohony v kolejových vozidlech. V první části práce je zpracovaná rešerše o současně existujících kolejových vozidlech s hybridním pohonem s popisem, jak fungují a výčet některých jejich technických specifikací. V druhé části bakalářské práce bude posouzeno, nakolik by byla vhodná záměna diesel-elektrických kolejových autobusů za hybridní kolejové autobusy, tzn. je vypočtená práce spotřebovaná za daný jízdní cyklus a výsledné hodnoty budou v závěru porovnány.

KLÍČOVÁ SLOVA

kolejová hybridní vozidla, hybridní pohon, kolejový autobus, jízdní cyklus, rekuperace, srovnání práce vozidel

ABSTRAKT

This bachelor thesis focuses on hybrid powertrains, in specific on hybrid powertrains in rail vehicles. In the first part of the thesis a research about present existing rail vehicles with hybrid powertrains is processed, including their description and the enumeration of some of their technical specifications. In the second part of the bachelor thesis a judgment will be made on how much appropriate a substitution of the existing diesel-electric rail buses with hybrid rail buses would be, i.e. the work consumed in a specific driving cycle will be calculated following a comparison of the final values.

KEY WORDS

hybrid rail vehicles, hybrid powertrain, railbus, drive cycle, recuperation, work comparison of vehicles

OBSAH

1.	Úvod	7
2.	Historie hybridních pohonů	8
2.1	Hybridní pohony u vozidel obecně	8
2.2	Vývoj železniční dopravy.....	9
3.	Kategorizace koncepcí hybridních pohonů.....	10
3.1.	Sériový hybrid	10
3.2.	Paralelní hybrid	11
4.	Současné typy hybridních železničních vozidel	12
4.1.	Lokomotivy.....	12
	ČKD 718.501	12
	Alstom H3.....	14
	RailPower Green goat	15
	Toshiba HD300	17
4.2.	Vlaky.....	19
	NE Train KuMoYa E995-1	19
	Siemens Desiro Classic	23
	Bombardier Mitrac	26
4.3.	Tramvaje	28
	Vossloh Kiepe hybrid tram train citylink	28
	Siemens Avenio	29
	Alstom Citadis	30
	Bombardier tramvaje s Primove a mitrac technologií	32
5.	Výpočetní část.....	34
5.1	Parametry Vozidel.....	35
	Diesel-Elektrický kolejový autobus	35
	Hybridní kolejový autobus	35
	Společné parametry	36
5.2	Adhezní síly	37
5.3	Jízdní odpory	37
5.4	Výpočet zrychlení vozidla.....	38
5.5	Vykonaná práce	39
6.	Závěr.....	43

Bibliografie 44

1. ÚVOD

Hybridní pohony jsou stále více se prosazující technologií sloužící k pohonu silničních a kolejových vozidel. Jsou alternativou klasického pohonu ke zvýšení efektivity vozidla z hlediska ušetření energie, paliva a snížení emisí. Toho se obvykle docílí pomocí rekuperace. Bývá využíváno i z praktického hlediska pro možnost jízdy po různých druzích tratí (např. na elektrifikovaných i neelektrifikovaných úsecích). Ve většině kolejových vozidel se využívají baterie, které umožňují ukládání energie získané při brzdění anebo střídavé využití spalovacího motoru a elektromotoru.

V této práci budou ukázány již existující hybridní kolejová vozidla rozdělená do tří kategorií, tj. posunovací lokomotivy, vlaky a tramvaje. V každé z těchto skupin jsou důvody pro využití hybridní technologie různé, jediným společným znakem je právě úspora energie.

Kolik energie se dá uspořit pomocí hybridního pohonu má ukázat druhá část bakalářské práce, která obsahuje modelový výpočet práce potřebné pro rozjezd, rovnoměrnou jízdu a brzdění na 14 km dlouhé trati. Vzhledem k tomu, že dochází k úspoře právě během brzdění pomocí rekuperace, byl proveden výpočet s dvěma variantami vzdálenosti zastávek. Výsledky jsou uvedeny v závěru.

2. HISTORIE HYBRIDNÍCH POHONŮ

2.1 HYBRIDNÍ POHONY U VOZIDEL OBECNĚ

Samotný počátek dopravy se dá datovat již před začátek našeho letopočtu. S narůstajícím počtem obyvatel a s rozvojem měst se neustále zvětšovala potřeba najít jiný způsob osobní i nákladní dopravy, koňská doprava již přestávala být dostačující. S vynálezem parního stroje a jeho vývojem v 18. století byl konečně nalezen způsob, jak tyto potřeby uspokojit. Díky tomu byla na přelomu 20. století tato technologie již poměrně pokročilá. Využívala se jak u kolejových vozidel, tak i v automobilech a lodích. Výhodou byl tichý chod a velký točivý moment od klidového stavu. Velkou nevýhodou byla ale malá účinnost parního stroje a fakt, že se před každou jízdou musel rozpálit kotel, což znamenalo, že musel být každý provoz takového stroje již předem naplánovaný.

S objevením elektromagnetické indukce Michaelem Faradayem nastal další krok vpřed a chvíli po jeho objevu se vyvinul i první elektromotor. Jediným problémem byl fakt, že v té době ještě neexistoval způsob uchování dostatečného množství elektrické energie, a trvalo dalších pár desetiletí, než se tento problém vyřešil pomocí olověného akumulátoru. Elektrická vozidla byla pohodlná, čistá, tichá a zároveň jednoduše ovladatelná. Ale mnoho jejich výhod bylo zastíněno poměrně krátkou životností olověných baterií, což významně zvedalo cenu elektrických vozidel.

Krátce po přelomu 20. století se vývoj elektrických vozidel opět téměř zastavil. Hlavní příčinou byl příchod benzinového motoru a to z jednoho prostého důvodu: palivem motoru byl benzín, který je jednoduše přenositelný. Jako dobrý příklad se dá i uvést porovnání hustoty energie: 1 kg benzínu mělo 360 krát víc energie než 1 kg plně nabitého akumulátoru [1]. Ovšem i benzinový motor měl mnoho nevýhod. Byl hlučný, špinavý, nespolehlivý, zapáchal a nastartování motoru mělo obvykle velký zpětný ráz. Hledání řešení pak nakonec vedlo k nápadu spojit elektrický motor se spalovacím. Toto spojení umožnilo zmenšení akumulátoru, spalovacího motoru i elektromotoru a přineslo mnoho dalších výhod.

Jako první mezi hybridními vozidly je považován automobil od Porsche-Lohner, které vyvinul Dr. Ferdinand Porsche a které bylo představeno v roce 1900 na výstavě automobilů v Paříži. Vzniklo ve spolupráci s Jakobem Lohnerem a je tak součástí řady elektrických a hybridních automobilů, které při této spolupráci vznikly a jsou po svých vývojářích pojmenovány. Součástí pohonu byl spalovací motor, který byl využit k pohonu generátoru, jenž vyráběl energii pro dva nábojové motory v předních kolech. Maximální rychlost vozidla s výkonem 7 PS se pohybovala kolem 50km/h. Současně nabízel svůj vlastní hybrid i belgický výrobce Établissements Pieper z Liège, jeho hybrid ovšem pracoval na odlišném principu. Spalovací motor zde sloužil pouze k nabíjení baterie. Benzinová vozidla byla ale stále ještě levnější než hybridní či elektrická a tak s nástupem Ottova motoru opět došlo k rapidnímu poklesu zájmu společnosti o "ekologičtější"

vozidla. Celkový vývoj hybridních a elektrických vozidel vzrostl až po roce 1969 a to hlavně z důvodu znečištěného ovzduší a nemalý vliv měla i Arabská ropná krize z roku 1973. Dalším faktorem velmi důležitým pro rozvoj hybridních a elektrických vozidel byl fakt, že v minulosti baterie měly nedostatečnou kapacitu. Na využitelnosti Ni-Cd a lithiových bateriích v hybridních automobilech spolupracoval Victor Wouk. Po určité době však jejich vývoj přestaly úřady a vláda v USA podporovat a do čela se dostal vývoj čistě elektrických automobilů. Zato v jiných částech světa se začínala hybridní technologie pořádně rozvíjet.

Světoví výrobci jako Toyota, Daimler-Benz a Audi představili některé své modely na hybridní pohon. Společnost Volkswagen se dokonce ve spolupráci s Technickou Univerzitou v Curychu zabývala několik desetiletí rozvojem hybridních konceptů, které podstoupily několikaletou zkoušku funkčnosti. Po 90. letech byly technologie nutné k vývoji hybridních vozidel mnohem dále, k dispozici byly vylepšené baterie jako NiMH a velký pokrok ve výpočetní technice umožnil využívání komplexnějších algoritmů pro řízení přísunu energie. Vynález permanentních magnetů vedl k velkému navýšení účinnosti motorů a generátorů. A pokrok jde stále kupředu a v současnosti má téměř každá automobilová společnost i svou řadu hybridních či čistě elektrických vozidel.

2.2 VÝVOJ ŽELEZNIČNÍ DOPRAVY

V železniční dopravě byly důvody ke spojení elektromotoru se spalovacím zcela jiné. Do vývoje se dostala lokomotiva s dieselovým pohonem, avšak vývojáři se zde střetli s velkým nedostatkem: touto nevýhodou byla nutnost nastartování motoru v nezátíženém stavu. Po několika pokusech se však zdálo, že bylo nalezeno řešení. Dieselový motor měl pohánět generátor, ze kterého byla elektřina vedená dále k pohonu kol. Tato koncepce byla poprvé použita v Sovětském svazu a je používána dodnes. V Německu se dokázala dieselová lokomotiva prosadit až po druhé světové válce. K přenosu energie byla využita hydraulika.

V současné době se využívají dieselelektrické lokomotivy pro nákladní dopravu s výkonem více než 4400kW. Dosahují rychlost kolem 240km/h. K výhodám dieselelektrických lokomotiv patří, že nepotřebují trolejové vedení, které je velmi drahé. Proto je světový podíl dieselových lokomotiv stále větší než ten elektrických. Zejména v USA je velký podíl dieselelektrických železničních vozidel kvůli velmi malému počtu elektrifikovaných tratí. Tyto lokomotivy však nejsou zařazeny do kategorie hybridních lokomotiv. Rozvoj železničních vozidel s vlastním úložištěm energie začal teprve během posledních několika let a hybridní železniční doprava tak zůstává ještě poměrně neprozkoumaným polem.

3. KATEGORIZACE KONCEPCÍ HYBRIDNÍCH POHONŮ

Hybridní pohony se dají rozdělit dle stupňů hybridizace:

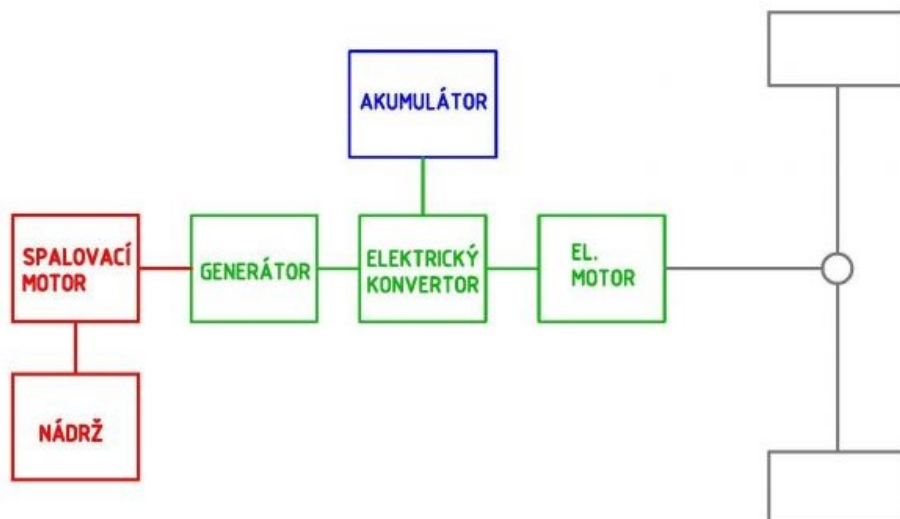
- Micro hybrid - v podstatě se nejedná o hybrid podle definice, takto je nazýván jakékoliv vozidlo, které je vybaveno start-stop systémem umožňujícím častější startování a zhasínání motoru
- Mild hybrid - obsahuje i elektromotor, který má ale nízký výkon a sloužit má pouze jako podpora spalovacímu motoru
- Full hybrid - vozidla s elektromotorem, u kterých je i samotný elektromotor schopný pohánět vozidlo alespoň na krátké trati
- Plug-in hybrid - varianta Full hybridu, který se na rozdíl od ostatních hybridů může nabíjet nejenom pomocí rekuperace, ale i přes zásuvku (=plug in)

Další rozdělení pak je podle uspořádání a kombinace základních součástí hybridních vozidel, tj. spalovací motor, elektromotor, generátor, popř. setrvačnick a převodovka. Základní uspořádání jsou

- Sériový hybrid
- Paralelní hybrid
- Kombinovaný hybrid

3.1. SÉRIOVÝ HYBRID

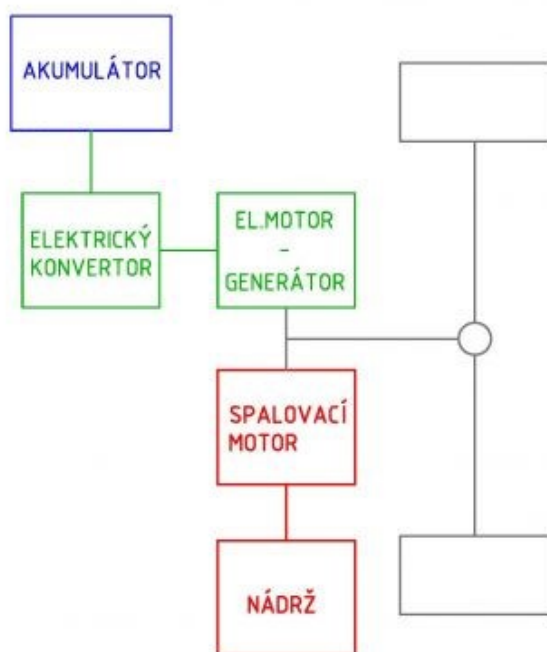
V případě sériového spojení nejsou spalovací motor a elektromotor spojeny mechanicky, ale elektricky. Komponenty jsou spojeny do série. Spalovací motor roztáčí generátor a vyrobená energie slouží jak k dobití akumulátoru, tak k pohonu elektromotoru, přičemž baterie se může nabíjet i v případě, kdy je vozidlo mimo provoz. Existuje několik konceptů, jako např. verze s jedním motorem a nápravovým diferenciálem a také verze bez diferenciálu, u kterého jsou motory přímo součástí kol. Největšími výhodami jsou možnost spalovacího motoru pracovat ve svých optimálních otáčkách a možnost vynechání převodovky.



OBRÁZEK 1 - SCHÉMA USPOŘÁDÁNÍ POHONU SERIOVÉHO HYBRIDU

3.2. PARALELNÍ HYBRID

Při tomto způsobu zapojení jsou spalovací motor a elektromotor zapojeny paralelně a ve většině případů vzájemně odděleny spojkou, která je při čisté elektrické jízdě rozpojena, aby spalovací motor nemusel být poháněn naprázdno. Toto zapojení umožňuje použití obou pohonů najednou a tím navýšení výkonu celého vozidla. Další výhodou je pak i možnost 'downsizingu' motoru, který díky spolupráci s elektromotorem může být zmenšován bez ztráty výkonů poháněcí soustavy. V obvyklém pracovním režimu pracuje hlavně spalovací motor a elektromotor se zapojuje např. v případě akcelerace.



OBRÁZEK 2 - SCHÉMA USPOŘÁDÁNÍ POHONU PARALELNÍHO HYBRIDU

4. SOUČASNÉ TYPY HYBRIDNÍCH ŽELEZNIČNÍCH VOZIDEL

4.1. LOKOMOTIVY

V mnoha zemích se v případě posunovacích lokomotiv sází na hybridní techniku. Hlavním důvodem je fakt, že u klasických dieselových posunovacích lokomotiv dochází vzhledem k jejich jízdnímu režimu (časté rozjezdy a zastavení) ke ztrátám a tyto ztráty podstatně navyšují náklady na palivo. Jsou často ve volnoběhu, ale zároveň potřebují výkonný motor. Výměna za hybridní posunovací lokomotivy dokáže uspořit palivo až o 50% [2]. Mezi výrobce patří například Alstom nebo Vossloh. Největší důraz se klade na přestavbu již existujících vozů, což je způsob, který dává této nové technologii mnohem větší šanci na úspěch.

ČKD 718.501 [3][4]



OBRAZEK 3 - LOKOMOTIVA FIRMY ČKD ŘADA 718.5

ZAJÍMAVOSTI - Jak již bylo předtím zmíněno, docházelo v 80. letech 19. století k nárůstu cen pohonných hmot. Proto byl zadán příkaz k hledání alternativního druhu pohonu i v tehdejší ČSSR. A to se skutečně povedlo, konkrétně firmě ČKD s hybridní lokomotivou pod továrním označením DA600. První provozní zkoušky probíhaly na vlečce ČKD a další pak na zkušebním okruhu

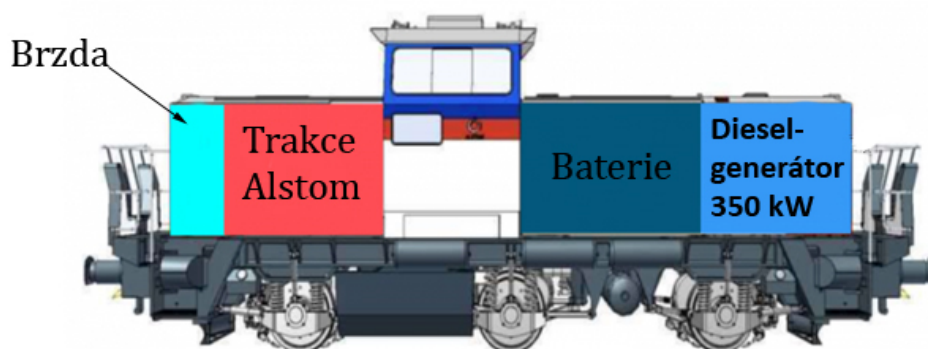
v Cerhenicích. Vyrobená byla v roce 1986 a i když se jednalo o nadčasový model mezi hybridními železničními vozidly, postaven byl pouze jediný funkční vzorek. Důvodem byla nedostatečná výrobní kapacita závodu, která pro firmu vyráběla baterie, a dovoz ze zahraničí, který byl v této době omezen. V roce 2002 byla odprodána a po roce 2006 se dostala do soukromého vlastnictví. Lokomotiva měla být opravena, k tomu ale nakonec nedošlo kvůli vysoké ceně opravy. Na začátku 90. let byly v ČKD připraveny další, výkonnější hybridy s továrním označením DA700, k jejichž sériové výrobě však opět nedošlo.

TECHNICKÉ ÚDAJE - Jedná se o čtyřnápravovou lokomotivu se dvěma dvounápravovými podvozky. Na nich jsou umístěny tlakové trakční motory, po jednom na každém soukolí. Požadovaný výkon byl přednostně brán ze spalovacího motoru. V případě vyššího odběru byla od hodnot 150 - 360 kW energie dotovaná z baterie. Celkový výkon lokomotivy činil 510 kW. K dobíjení baterií docházelo buď rekuperací nebo při stání ze spalovacího motoru. Taktéž bylo i možné dobíjení ze sítě 3x380 V. Uspořádání pohonu bylo paralelní, lokomotiva tedy mohla být poháněna jak spalovacím motorem, tak pouze baterií nebo kombinovaně. Úspora paliva činila 20-30%. Novinkou bylo i použití elektromagnetické brzdy, která se pak začala používat i v dalších lokomotivách firmy ČKD.

TABULKA 1 - ČKD 718.501

Počátek výroby	1986
Typ hybridu	paralelní
Uspořádání pojezdu	Bo-Bo
Délka	15,18 m
Šířka	3,09 m
Výška	4,39 m
Hmotnost	64 t
Motor	189 kW Diesel
Výkon baterie	360 kW
Kapacita baterie	300 Ah
Kapacita palivové nádrže	1280 l
Maximální tažná síla	161 kN
Minimální rádius oblouku	80 m
Maximální rychlost	65 km/h

ALSTOM H3 [2][5]



OBRÁZEK 4 - USPOŘÁDÁNÍ POHONU V LOKOMOTIVĚ

ZAJÍMAVOSTI - Firma Alstom začala s vývojem hybridních lokomotiv v roce 2004. Jako zkušební lokomotiva nejdříve sloužil model DR-Baureihe V100. V roce 2012 pak představila společnost koncept H3. Jedná se o projekt, který vznikl z iniciativy Eco Rail a je podporován Bavarskem. Alstom spolupracuje dlouhodobě s německou automobilovou společností Volkswagen, která začala využívat tento konkrétní model ve svém automobilovém závodě ve Wolfsburgu. Dále je začala využívat i společnost Audi, též ve svém automobilovém závodě, konkrétně v Ingolstadtu, a také Deutsche Bahn, která se snaží o nasazení hybridních železničních vozidel již delší dobu.

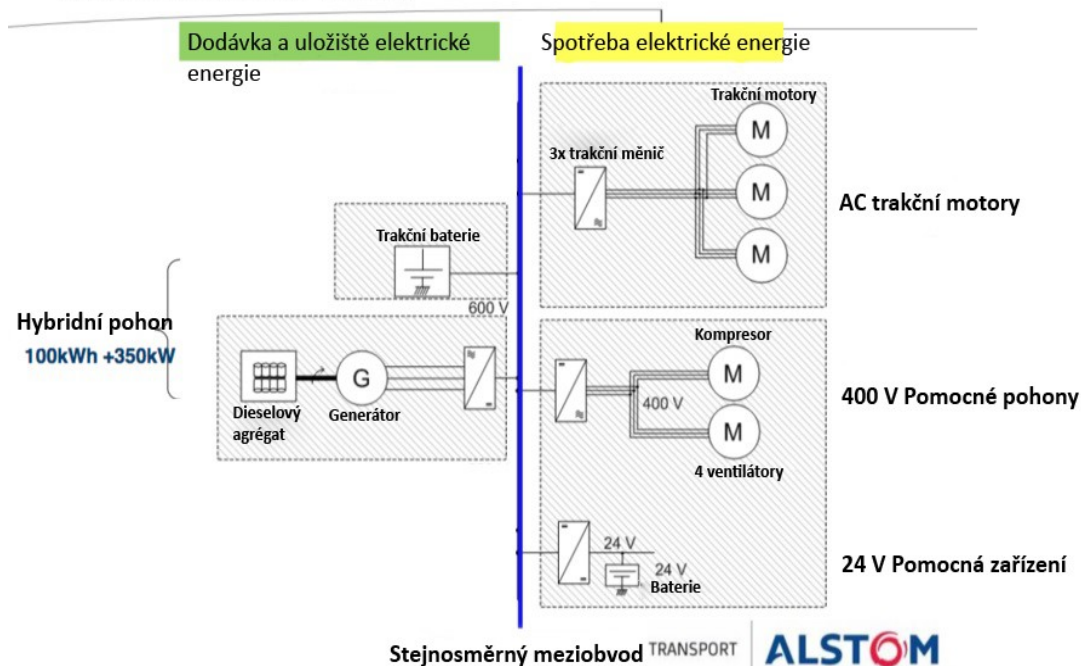
TECHNICKÉ ÚDAJE - Model H3 je sériový plug-in hybrid, který používá ke svému pohonu 350 kW dieselový generátor a 350 kW baterii, přičemž dieselový generátor umožňuje menší spotřebu paliva vůči klasickým posunovacím lokomotivám o 30-50% (spotřeba až 20l/h u běžných lokomotiv vs. maximální spotřeba 9l/h u tohoto konkrétního modelu). Zároveň produkuje díky novým technologiím až o 70% méně emisí a je podstatně tišší. Díky maximální rychlosti 100km/h je tato lokomotiva vhodná i na hlavní tratě. Tří-osový design zmírňuje opotřebení kolejnic a kol. Souhrn nejdůležitějších specifikací udává následující tabulka:

TABULKA 2 - ALSTOM H3 SPECIFIKACE

Počátek výroby	2013
Typ hybridu	sériový plug-in
Uspořádání pojezdu	A'AA'
Délka	13,80 m
Šířka	3,13 m
Hmotnost	67,5 t
Rozchod	1,435 m
Maximální axiální zátěž	22,5 t
Napájení	350 kW Diesel a NiCd baterie
Kapacita palivové nádrže	2000 l

Nominální výkon	700 kW
Minimální rádius oblouku	60 m
Maximální rychlost	100 km/h
Emisní třída	3b

Nákres elektrické trakce



OBRÁZEK 5- SCHÉMA USPOŘÁDÁNÍ Pohonu

RAILPOWER GREEN GOAT [6]

ZAJÍMAVOSTI - Railpower technologies corp je dceřinou společností firmy R. J. Corman Railroad group a zabývá se mimo jiné vývojem a výrobou nízkoemisních lokomotiv (převážně dieselové lokomotivy či hybridy). Vznikla v roce 2001. Nejznámějšími řadami jsou Green Goat a Green Kid, kterých bylo do roku 2015 již prodáno přes 100 kusů.

TECHNICKÉ ÚDAJE - Lokomotiva používá sériově uspořádaný dieselový generátor a velký zásobník baterií, ovšem generátor pracuje pouze v případě, kdy baterie potřebují nabít a konečná trakční síla je čerpána pouze z baterií. Podle údajů společnosti ušetří toto řešení 20-60% paliva a redukuje emise NO_x o 80-90%. Model GG20B Green Goat, který byl představen v roce 2004, obsahuje 6-ti válcový dieselový motor od Caterpillar s obsahem 8,8 l. Má maximální trakční výkon 1490 kW a používá zásobník olovených baterií o napětí 600V. Je v podstatě bezúdržbový a má dlouhou životnost. Navíc jeho váha zlepšuje celkovou tažnou sílu. Zajímavostí je použití technologie Plug and Play, čímž je v tomto případě myšlena možnost rychlé opravy při poruše, jelikož se veškeré nutné komponenty dají jednoduše vyměnit.

Klasická posunovací lokomotiva



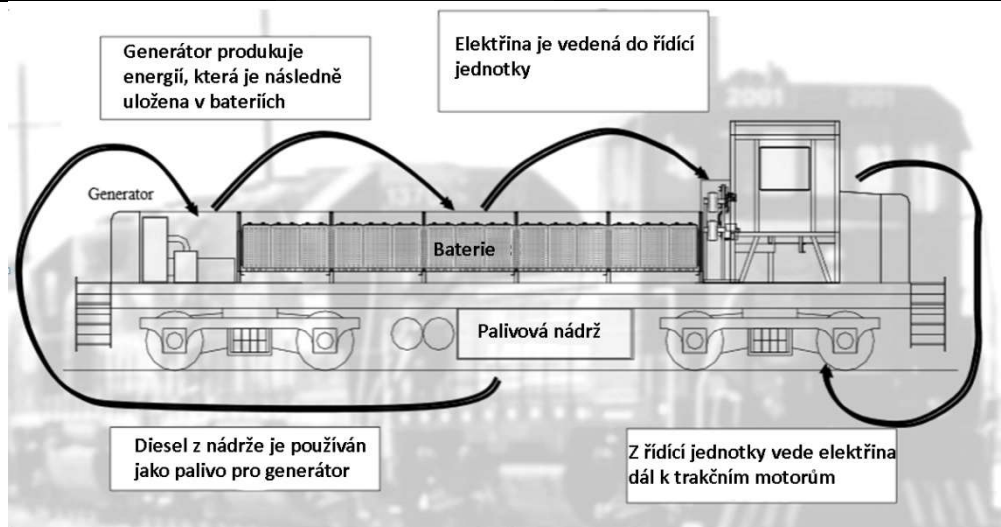
Patentovaná hybridní RailPower posunovací lokomotiva



OBRÁZEK 6 - SCHÉMA LOKOMOTIVY

TABULKA 3 - RAILPOWER GREEN GOAT HYBRID SPECIFIKACE

Počátek výroby	2004
Typ hybridu	sériový
Uspořádání pojezd	Bo-Bo
Délka	13,80 m
Šířka	3,13 m
Hmotnost	130 t
Rozchod	1,435 m
Pohon	50-147 kW V6 Diesel a NiCd baterie
Kapacita palivové nádrže	9500 l
Nominální výkon	-
Minimální rádius oblouku	60 m
Maximální rychlost	-
Emisní třída	-



OBRÁZEK 7 - ZPŮSOB FUNKOVÁNÍ Pohonu

TOSHIBA HD300 [7]



OBRÁZEK 8 - TOSHIBA HD300

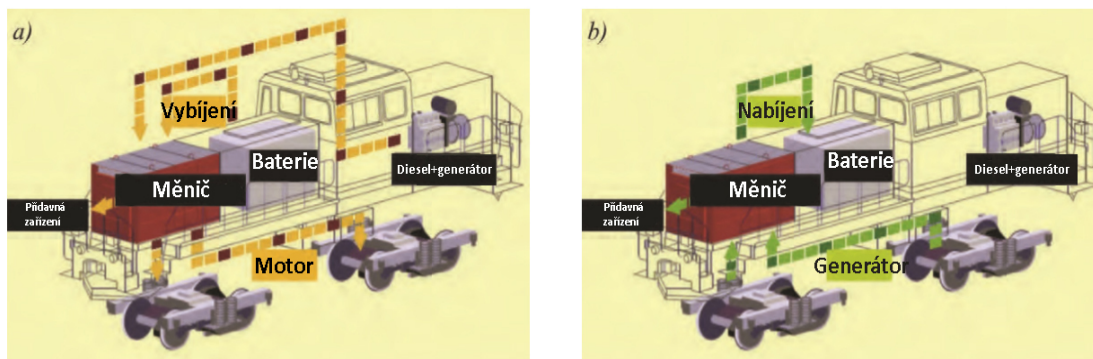
ZAJÍMAVOST - Toshiba, jež existuje již od roku 1938, je japonskou firmou prodávající velmi širokou škálu produktů od domácích spotřebičů počínaje a zdravotnickými zařízeními konče.

TECHNICKÉ ÚDAJE - Model začal být testován v roce 2010 a v roce 2012 se již začal normálně prodávat. Celá řada získala Laurelovou cenu, která je předána každý rok japonským železničním fanklubem. Hlavním úkolem při výrobě bylo snížení toxických výfukových plynů a snížení hluku, aby byl splněn princip 'ECO-Friendly, clean locomotive'. Jako obvykle uvádí výrobce snížení hodnoty emisí NO_x (=61%), snížení hluku (=22dB) a spotřeby paliva (až 36%) oproti klasickým dieselovým lokomotivám. Používá se modulární koncept pro zjednodušení budoucí údržby a zpracovatelnosti. Přesněji to znamená, že případná výměna spalovacího motoru za např. palivový článek je jednoduchou operací bez nutnosti provedení velkých změn v konstrukci struktury vozidla. Spalovací motor slouží jako jediný pohon a zároveň slouží k výrobě elektrické energie. Vůz je vybaven vysokokapacitními a vysoko-výkonovými Lithium-Iontovými bateriemi od společnosti GS Yuasa, jejichž pomocí je rozjezd lokomotivy možný i ve velmi chladných oblastech. Hlavní baterie je vybavená nadbytečným množstvím vedlejších článků (26 sériových modulu ve třech paralelních řadách), aby při výpadku jednoho z nich nebyla nijak ovlivněna funkčnost vozu. Výsledný výstupní výkon je 500kW.

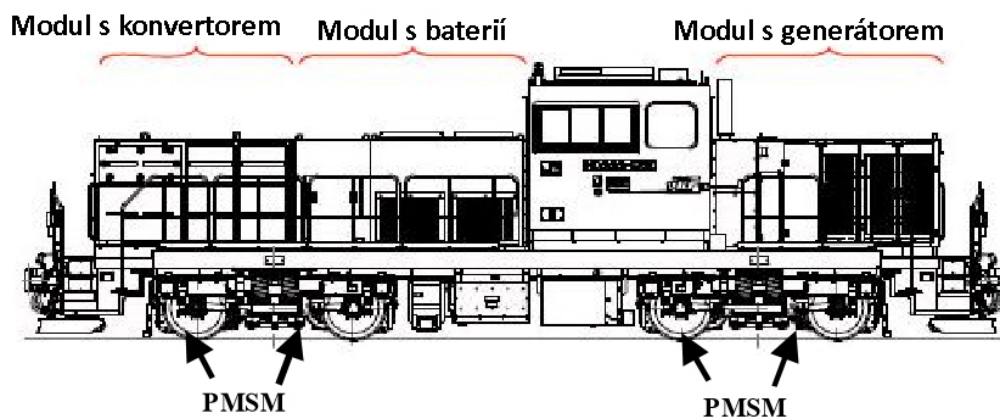
TABULKA 4 - TOSHIBA HD300 SPECIFIKACE

Počátek výroby	2010
Typ hybridu	Sériový
Uspořádání pojezdu	Bo-Bo

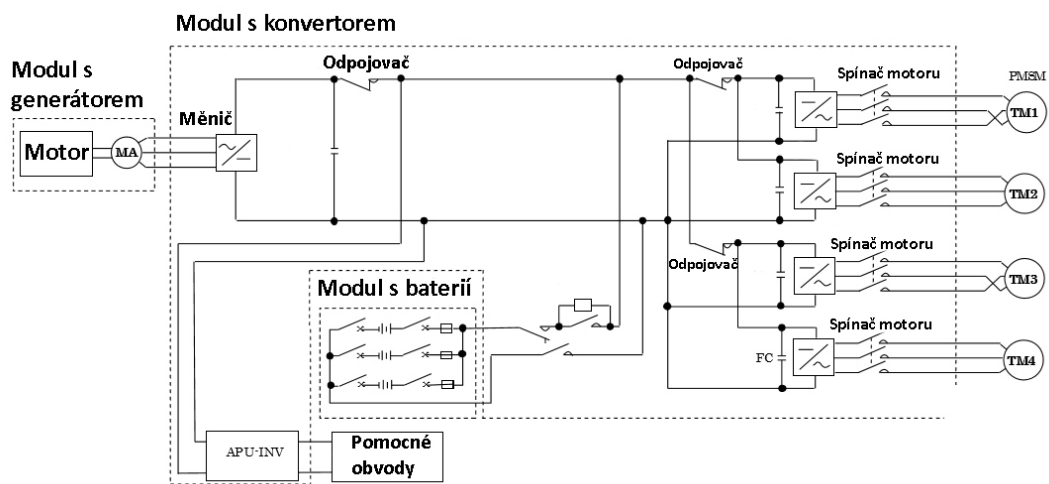
Délka	14,3 m
Výška	4,088 m
Šířka	2,95 m
Hmotnost	60 t
Rozchod	1,435 m
Akumulátory	Lithium-Iontové 67 kWh
Motor	242 kW diesel
Generátor	170 kW
Maximální rychlost	110 km/h
Trakční motor	Synchronní s permanentním magnetem



OBRÁZEK 9 - TOK ENERGIE PŘI POHONU (A) A BRZDĚNÍ (B)



OBRÁZEK 10 - USPOŘÁDÁNÍ POHONU V LOKOMOTIVĚ



OBRÁZEK 11 - SCHÉMA POHONU

4.2. VLAKY

Elektrifikace železničních tratí se v mnoha zemích stále ještě pohybuje okolo 50% (v ČR pouze kolem 30%) a využívání diesellových vlaků je často ekonomicky nevýhodné (elektrický pohon bývá levnější). Proto i v této oblasti nastupuje řešení hybridizace, kterou se zároveň často řeší i problém s dodržením emisních předpisů v místech, kde nemohou kvůli závislosti na trolejovém vedení projíždět čistě elektrické vlaky.

NE TRAIN KuMoYa E995-1 - PŘÍKLAD ZÁKLADNÍCH POŽADAVKŮ NA HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE [8]

Vývoj 'New Energy' vlaku od firmy JR East. Vlak je stále pouze prototypem, který je stále ještě předmětem zkoumání, ale jedná se o zajímavost, která stojí za zmínku. Hlavním cílem bylo navýšit účinnost diesellových vozidel a vyvinout vlak, který bude podstatně menší ekologickou zátěží pro životní prostředí. Testování prvního prototypu začalo v roce 2003, zkoumal se výkon hybridního systému a celkové zachování energie. Výběr komponent, který byl proveden podle určitých kritérií a který jsou vyjmenovány v následujících odstavcích, se dá obecně aplikovat i na výběr komponent hybridních vlaků. Podle těchto průzkumů byly postaveny vlaky, které jsou již v provozu.

Výběr typu hybridu

Vzhledem k tomu, že cílem bylo budoucí využití palivového článku namísto klasického napájecího systému, bylo použito sériového uspořádání poháněcího ústrojí, které pak v případě výměny tento zákrok velmi zjednodušuje. Dalším důvodem pro upřednostnění sériového hybridu je ten, že vlaky často jezdí dopředu i dozadu po těch samých liniích. V případě paralelního hybridu by bylo nutno použít speciálního mechanismu pro couvání. Zároveň se již známé

železniční technologie dají velmi efektivně využít v sériovém hybridním systému. Spalovací motor může běžet při stálých otáčkách a tak pracuje nejúčinněji při minimální tvorbě výfukových plynů.

Výběr pohonu a kapacitoru

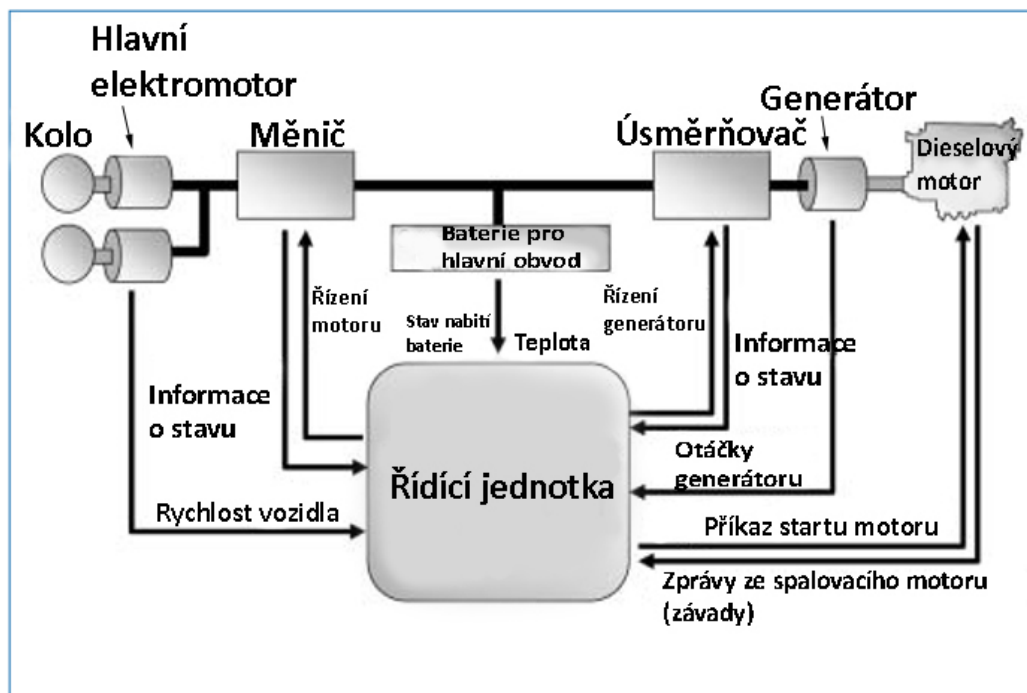
Dále jsou využity dvě hlavní motorové jednotky, každá s výkonem 95 kW. Elektrický generátor o výkonu 330 kW byl vybrán tak, aby byl při nízké kapacitě baterií stále schopný dodávat dostačující výkon. Energetická účinnost záleží na výběru akumulátoru, příkladem jsou elektrický dvojrstvý kondenzátor, setrvačnická a klasická baterie. Kvůli požadavkům na rozměry se výběr omezil na Nickelmetalhydridové a Lithium-Iontové baterie. Nakonec byla vybrána Lithium - Iontová, jejíž nevýhodou sice je vysoká cena, ale má vysoký měrný výkon. Zároveň byl také očekáván pokles ceny, protože byl tento typ baterií již tenkrát intenzivněji zkoumán. Obvykle platí, že baterie s větší kapacitou přináší i větší energetickou účinnost, nicméně kvůli mnohonásobně vyšší ceně za výdej 1kWh v porovnání se spalovacím motorem byla použita baterie s malou kapacitou, dostačující na dosažení uspokojující energetické účinnosti. Dalšími důležitými parametry při výběru akumulátoru jsou potřebná velikost pro uložení energie získané při rekuperaci (jako průměrný údaj se uvádí 1kWh pro jedno zastavení) a dále pak spotřeba energie při ujetí 5 km dráhy po rovině (uvádí se spotřeba 3kWh). V případě NewEnergy vlaku se počítalo s udržováním SOC (state of charge=stav nabití) na 20-60%, což je důležitým parametrem pro určení životnosti baterie. Konečný výběr tedy padl na baterii o kapacitě 10 kWh.

Výkonový řídicí systém

Zabývá se integrací mechanické a elektrické energie. Na tuto část se kladou následující požadavky:

- účinné ukládání regenerativní energie
- využití generátoru při optimální účinnosti

Dalším požadavkem je možnost pohonu vlaku při vjezdu a výjezdu do/ze zastávek pouze za pomoci elektromotoru (kde je zdrojem energie pouze baterie) a to z důvodu omezení hluku a výfukových plynů. Byl vyvinut unikátní řídicí systém, jehož chod a propojení jsou znázorněny na obrázku.



OBRÁZEK 12 - PŘEHLED ŘÍDÍČHO A KONTROLNÍHO SYSTÉMU

Základním úkolem řídicí jednotky je řízení výkonu motoru tak, aby suma energie generovaná pohybem vozidla a energie ukládané v bateriích byla pořád stejná. Jinými slovy to znamená, že při zrychlení vozidla se sníží podíl energie, která se ukládá v bateriích a tak s rychlostí vozidla klesá i příslušná optimální úroveň nabití baterie.

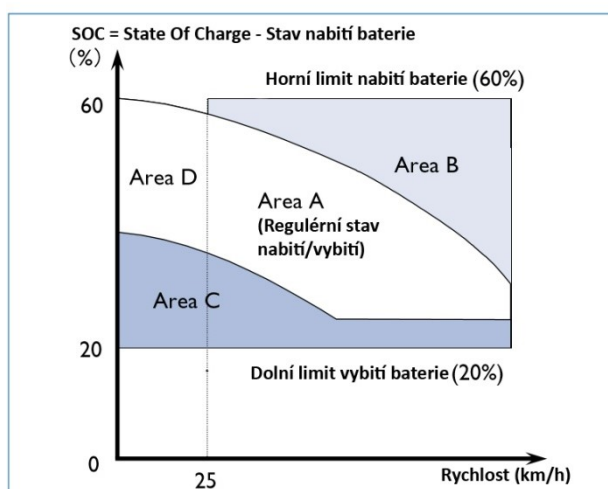
S ohledem na životnost baterií je obecně nejvýhodnější nabíjení a vybíjení v úzkém pásmu kapacity. Jak již bylo výše zmíněno, volilo se v tomto vozidle pásmo od 20-60%. Na diagramu je znázorněn koncept statusu nabití baterie v závislosti na rychlosti vozidla.

Popis oblastí:

Oblast (Area) A - Spalovací motor generuje výkon při své optimální spotřebě paliva. Systém musí být kontrolován, aby se baterie nabíjela či vybíjela.

Oblast B - Pokud by se baterie nadále nabíjela, byla by při příslušné rychlosti již nabitá příliš, proto se motor uvádí do volnoběhu a stav nabití se vrací zpátky do oblasti A.

Oblast C - Baterie je příliš vybitá a motor se začíná -



OBRÁZEK 13 - DIAGRAM ŘÍZENÍ ENERGIE

uvádět do stavu, ve kterém vyrábí svojí maximální hodnotu výstupní energie a baterie se opět vrací do oblasti A.

Oblast D - Volnoběh v rámci zastavení v zastávce se považuje za zastavení motoru.

Hlavní režimy řízení

1) Výjezd ze stanice - energie je odebrána z baterií, motor se zapíná až po rozjezdu

2) Běžná jízda - spalovací motor pracuje ve své nejvyšší účinnosti, baterie se nabíjí nebo vybíjí, což je závislé na zátěži

3) Jízda do kopce - spalovací motor pracuje při svém největším výkonu

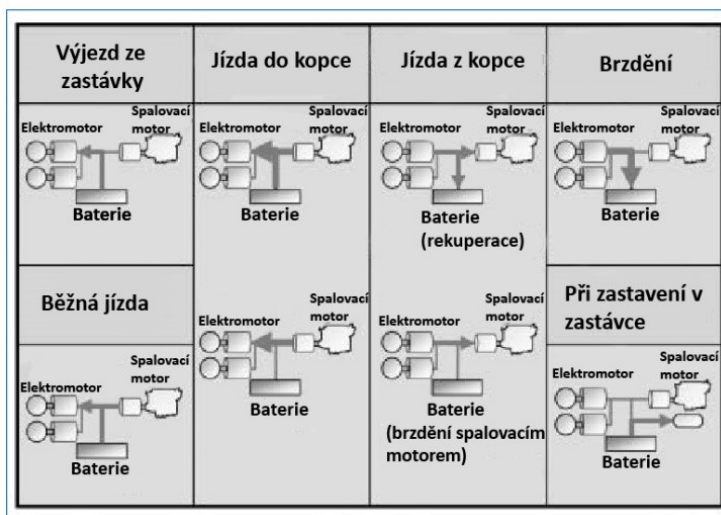
4) Jízda z kopce - baterie se nabíjí regenerativní brzdou, rychlost vozidla je kontrolována motorovou brzdou

5) Brzdění - spalovací motor nepracuje, elektromotor pracuje jako generátor a baterie se nabíjí

6) Zastavení v zastávce - spalovací motor se zastavuje, potřebná servisní energie je odebrána z baterie

Přehled testovaného vozidla

Pro efektivní využití nového vlaku byla různá používaná zařízení standardizována tak, aby byla kompatibilní s posledními modely elektrických vlaků. Skříň vlaku je z nerezové oceli a je stejná jako skříň modelu E127. Podvozek, motor a kontrolér jsou stejné jako u modelu E231, i když musely být provedeny některé modifikace elektrického napětí vzhledem k vlastnostem akumulátoru. Vůz má 2 podvozky, jeden je motorizovaný a druhý běžný. Baterie jsou umístěny na střeše.

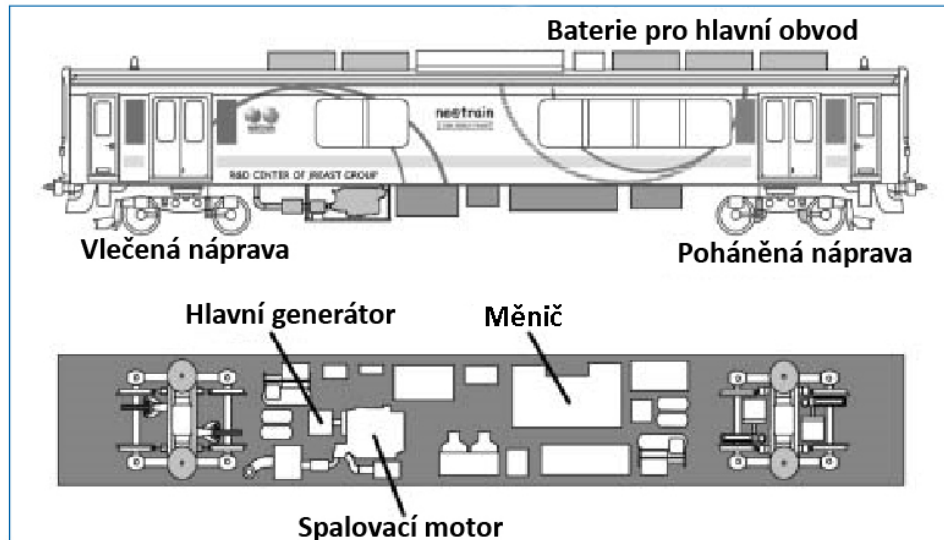


OBRÁZEK 14 - HLAVNÍ KONTROLNÍ REŽIMY

TABULKA 5 - NE TRAIN KU MoYA E995-1 SPECIFIKACE

Počátek výroby (testování)	2003
Druh hybridu	sériový
Maximální rychlost	100 km/h
Celková délka	20 m
Šířka	2,8 m
Výška	2,8 m

Vzdálenost mezi středy podvozku	13,8 m
Trakční motor	MT936 x 2 (indukční motor 2x 95 kW)
Akumulátor	Lithium-iontové baterie 10 kWh
Dieselový motor	331 kW/2100 ot/min



OBRÁZEK 15 - SCHÉMA NE VLAKU

Výsledky testu:

Vozidlo má navrhované vlastnosti, tzn. možné zrychlení/zpomalení je stejné jako u elektrického vozidla.

Vozidlo bylo schopné vyvinout rychlost 70 km/h pouze za použití baterie.

SIEMENS DESIRO CLASSIC [10][23]



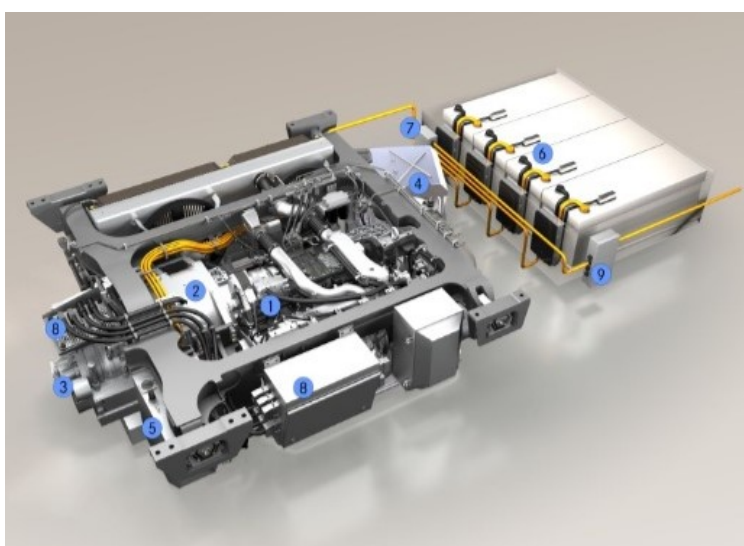
OBRÁZEK 16 - SIEMENS DESIRO CLASSIC

ZAJÍMAVOSTI - Celá řada Siemens Desiro classic existuje již od roku 1998, ale přestavba existujícího modelu VT 642 na hybrid se uskutečnila až na základě projektu z roku 2011, samotná přestavba proběhla o rok později. Tento projekt byl využíván ke zkouškám funkčnosti při přestavbě klasických dieselových vlaků na hybridní. Velkou výhodou přestavby je možnost nečekat na konec životnosti již používaných součástí, což celý proces hybridizace urychlí. Tento konkrétní model od Siemensu je vůbec prvním hybridem, který se využívá pro přepravu osob.

TECHNICKÉ ÚDAJE - Hybridní vlak z řady VT 642 prošel velmi důkladnou přestavbou. Přešl dvě 6-ti válcové řadové dieselové motory, každý o výkonu 275 kW, byly nahrazeny dvěma "Powerpakety" s výkonem 315 kW od výrobce motorů MTU. Jedná se o paralelní spojení dieselového motoru s elektromotorem, tzn., že může vlak být poháněn i samostatně, buď spalovacím motorem, nebo elektromotorem. MTU tím vlastně přináší technologii, která je již běžná v hybridních automobilech. Vlak recykluje energii pomocí rekuperace, kdy při každém zpomalení dochází k pohonu generátoru, který mechanickou energii převádí na energii elektrickou. Rekuperací získaná elektřina se ukládá v Lithium-iontových akumulátorech, které mají tu výhodu, že i při poměrně malých rozměrech nabízí vysokou úložnou kapacitu. Tyto akumulátory jsou hojně využívány v mobilních telefonech a laptotech, ale i v některých elektromobilech. Umístěny jsou na střeše vlaku a to z praktických důvodů: akumulátory jsou tak při jízdě chlazeny vzduchem proudícím kolem akumulátorů. Rekuperovaná energie je pak dále využívána k rozjezdu či zrychlení vlaku a je též zdrojem energie pro palubní síť. Takto dochází k úspoře paliva až o 25% a tím tomu odpovídajícím snížením emisí.

TABULKA 6 - SIEMENS DESIRO CLASSIC HYBRID SPECIFIKACE

Počátek výroby (přestavba)	2011
Typ hybridu	paralelní
Uspořádání pojezdu	B'(2)B'
Délka	41,70 m
Šířka	2,83 m
Hmotnost	70 t
Rozchod	1,435 m
Napájení	2x 315 kW Diesel a Li-Iontové baterie
Kapacita palivové nádrže	1200
Minimální rádius oblouku	125 m
Maximální rychlost	120 km/h
Emisní třída	3b



OBRÁZEK 17 - SCHÉMA POHONU

- 1 - Diesellový motor
- 2 - Elektromotor/
Generátor
- 3 - Převodovka
- 4 - Zpracování
výfukových plynů
- 5 - AdBlue® nádrž
- 6 - Lithium-Iontový
akumulátor
- 7 - Trakční měniče
- 8 - Řídící systém
- 9 - Palubní napájení

BOMBARDIER MITRAC [12]



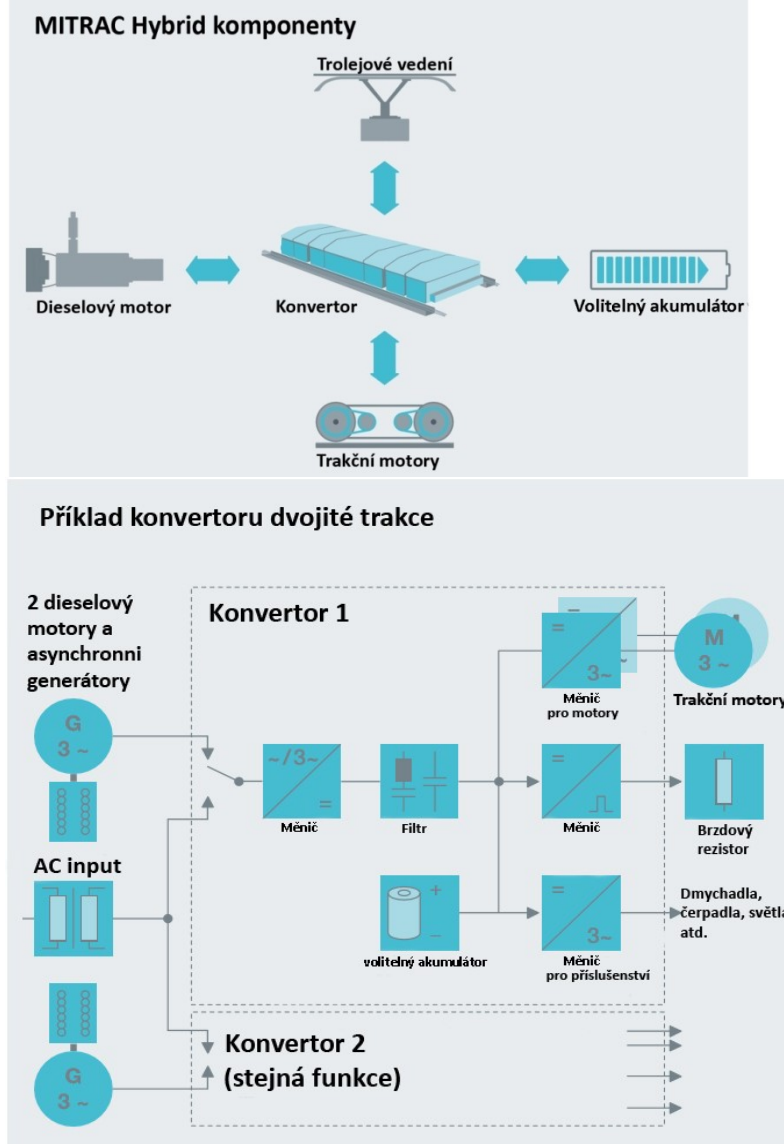
OBRAZEK 18 - VLAK SPOLEČNOSTI BOMBARDIER S TECHNOLOGIÍ MITRAC

ZAJÍMAVOSTI - Bombardier Transportation je oddělením kanadské firmy Bombardier, která se zabývá výrobou železničních vozidel a je nejen ve Francii jedním z jejich hlavních výrobců. Existuje od roku 1974 a byla založena poté, co firma Bombardier dostala velkou zakázku na výrobu 423 vozidel pro metro v Montrealu. Řada vlaků MITRAC vznikla v rámci ECO4, což je produktové portfolio, které se zaměřuje na udržitelnost přeprav a do něhož spadá patnáct různých výrobků šetřících energii. Mají optimalizovat spotřebu energie, minimalizovat CO₂ emise, zvýšit ekonomickou hodnotu a zlepšit celkovou účinnost a výkon vlaků.

TECHNICKÉ ÚDAJE - Firma byla první, která představila jako řešení dual-mode (elektrický a dieselový pohon) a dual-voltage (1500 DC a 25000V AC) systém, který je schopen se neomezeně pohybovat po celé železniční síti a má přístup k elektrině z jakéhokoli zdroje. Toto řešení šetří čas při plánování trasy vlaku a je zároveň výhodnější pro cestující, pro které minimalizuje nutnost přestupů mezi jednotlivými spoji. Tento systém byl zkonstruován pro využití jak městskou, tak i meziměstskou dopravu. Jeho modulární pohonný systém může být nainstalován na střeše vozidla, pod jeho podlahou nebo ve strojně. Bombardier nabízí též regenerativní brzdový systém, který ukládá energii ve velkokapacitních akumulátorech, které budou navrženy dle požadavků. Poháněn může být buď čistě elektricky, pomocí spalovacího motoru nebo kombinací obojího. Výhodami řady jsou redukce emisí a až o 40% nižší spotřeba paliva. Vzhledem k tomu, že se nejedná o model vlaku, ale o systém do vlaků dodávaný, mohou se některé konečné údaje od těch níže uvedených lišit.

TABULKA 7 - BOMBARDIER SNCF B82500 SPECIFIKACE

Rok výroby	2004-2011
Uspořádání pojezdu	Bo'2'2'2'Bo'
Rozchod	1,435 m
Délka	72,8 m
Výška	4,02 m
Šířka	2,95 m
Hmotnost (naprázdno)	152 t
Maximální rychlost	160 km/h
Výkon elektromotoru	1300 kW
Typ elektromotoru	PMSM
Kapacita palivové nádrže	2x1500 l
Napájecí soustava	1,5 kV DC 25 kV 50 Hz AC
Výkon dieselového motoru	2 x 588 kW @ 1800 ot/min



OBRÁZEK 19 - MITRAC HYBRID KOMPONENTY A PŘÍKLAD USPOŘÁDÁNÍ Pohonu

4.3. TRAMVAJE

Primární důvody hybridizace tramvají jsou jiné než u vlaků či posunovacích lokomotiv. Ve městě jsou kvůli znečištění ovzduší klasické motorové tramvaje velmi nežádoucí a většina tramvajových tratí je elektrifikována. A nevýhodou elektrifikovaných tratí je používané trolejové vedení, které kazí vzhled historických částí města. Dalším důvodem je nástup tzv. "tram-trainů", tj. vlako-tramvají, které se pohybují jak ve městech, tak i mimo ně. U mimoměstských tratí je elektrifikace znatelně nižší a tak vzniká poptávka po technologiích, které umožňují jízdu po obou druzích trati.

VOSSLOH KIEPE HYBRID TRAM TRAIN CITYLINK [16][17]



OBRÁZEK 20 - VOSSLOH KIEPE HYBRID TRAM TRAIN CITYLINK

ZAJÍMAVOSTI – Celkem osm tramvají bylo dodáno španělskými společnostmi Vossloh Kiepe a Vossloh Rail Vehicles saskému dopravci Verkehrsverbund Mittelsachsen GmbH. Tříčlánková jednotka pochází z řady Citylink. Jedná se o "vlako-tramvaj", která funguje jak s elektrickým, tak i s dieselovým pohonem a může tak fungovat i mimo elektrifikované tratě. Z Chemnitzu má jezdit i do okolních měst jako je Burgstädt, Mittweida a Hainichen, měla by být provozována na cca. 226 km dlouhé trati. Realizace se má uskutečnit do roku 2020.

TECHNICKÉ ÚDAJE - Tramvaj je z 80% nízkopodlažní a poskytuje dvě místa pro vozíčkáře. Energie pro pohon může být čerpána buď trakčním vedením 600/750 V DC nebo šestiválcovým vodou chlazeným dieselovým generátorem o výkonu 390 kW. Dieselový generátor je produkt firmy MTU/Rolls Royce Power Systems a využívá technologii AdBlue. Jedná se o speciální technologii, která při

spalování nafty vstřikuje speciální roztok močoviny do výfukových plynů a slouží ke snížení emisí oxidů dusíku.

TABULKA 8 - VOSLOH KIEPE HYBRID TRAM TRAIN CITYLINK SPECIFIKACE

Délka	37,2 m
Šířka	2,65 m
Maximální výška	3,85 m
Minimální rádius oblouku	25 m
Hmotnost	68 t
Maximální rychlost	100 km/h
Trolejové napětí	DC 600/ 750 V
Elektromotor	4 x třífázový 145 kW
Typ elektromotoru	asynchronní
Dieselový motor	2 x 390 kW 6-válcový Diesel

SIEMENS AVENIO (QUATAR EDUCATION CITY PEOPLE MOVER SYSTEM) [18][19]



OBRÁZEK 21 - SIEMENS AVENIO (PRO QUATAR)

ZAJÍMAVOSTI - Tramvaj byla distribuována pro univerzitní kampus v Doha-Katar. Celkem bude z Wildenrathu dodáno do tohoto pouštního města devatenáct vozidel, termín dodání byl měl být do konce roku 2016. Vozidlo muselo být přizpůsobeno extrémním podmínkám, jakými jsou např. denní teploty kolem 50°C, vysoká vlhkost vzduchu, vysoká prašnost a intenzivní srážky. Vozidla budou jezdit bez použití trolejí a dobíjení bude zajištěno v každé stanici na celkem 12 km dlouhém úseku. Každá tramvaj je rozdělena do tří sekcí, má celkem 60 míst k sezení a 162 míst ke stání. Vzhledem k vysokým teplotám panujícím ve městě bylo nutné vozy vybavit i velmi silnou klimatizací.

TECHNICKÉ ÚDAJE - Jízda bez trolejí je zajištěna pomocí "Sitras hybridního úložiště energie", taktéž vyrobeného firmou Siemens a pomocí Lithium-Iontových baterií. Hybridní úložiště obsahují dvouvrstvé kondenzátory, které se na každé zastávce nabijí během několika vteřin a baterie pro ukládání energie rekuperované během brzdění. Výrobce díky tomu slibuje snížení spotřeby energie až o 30% a zároveň až o 80 tun méně CO₂ emisí. Vzhledem k tomu, že se v kampusech vyskytuje hodně chodců a cyklistů, bude maximální rychlost vozidla omezena na 40 km/h.

TABULKA 9 - SIEMENS AVENIO (PRO QATAR) SPECIFIKACE

Uspořádání pojezdu	Bo' 2' Bo'
Délka	27,7 m
Šířka	2,55 m
Maximální výška	3,6 m
Minimální rádius oblouku	--
Hmotnost	--
Maximální rychlost	40 km/h
Trolejové napětí	Pracuje bez troleje
Elektromotor	240 kW na podvozek
Typ elektromotoru	--
Diesellový motor	Bez motoru

ALSTOM CITADIS [21][22]



OBRÁZEK 22 - ALSTOM CITADIS TRAM TRAIN

ZAJÍMAVOSTI – Alstom Citadis je další řada železničních vozů vyrobených firmou Alstom, které byly vyvinuty za účelem zlepšení městské a meziměstské

dopravy a které se staly součástí mnoha projektů pro obnovu měst. Firma se může pochlubit poměrně velkým odbytem svých nízkopodlažních tramvají, každá čtvrtá nízkopodlažní tramvaj pochází právě od nich. Nové modely mají být více prostorné, flexibilní a rychlejší, čímž mají navýšit celkový možný objem převážených cestujících. V současné době (k roku 2016) jich je v provozu 1500 a dalších 1800 kusů je objednáno. Dalším vylepšením je použití nových technologií pro snížení spotřeby energie, kterého je dosaženo pomocí elektromotorů s permanentními magnety. Technické inovace snižují náklady na údržbu až o 11%. Toho je docíleno např. pomocí optimalizovaného monitorovacího systému, který shromažďuje informace během provozu, které pak mohou být kdykoliv staženy z jednotného přístupového bodu.

TECHNICKÉ ÚDAJE - U hybridní verze Citadis se jedná o klasickou tramvaj řady Citadis (dodávanou ve třech velikostech), rozšířenou pouze o Citadis Ecopack. Ten byl primárně vyvinut kvůli požadavku na zvýšení účinnosti provozu tramvají a možnosti jízdy bez trolejového vedení. Na střeše jsou umístěny superkapacity sloužící k ukládání energie. Mohou se dobít během zastavení vozidla v zastávce za cca. 20 vteřin nebo pomocí rekuperace během brzdění. Firma byla spolu s RATP (Régie autonome des transports parisiens - firma provozující síť metra, tramvají, autobusů atd. v Paříži) první, která zkoumala využití superkapacitoru u tramvají určených k přepravě osob. Podle tohoto výzkumu snižuje tato technologie spotřebu energie až o 30%. Dojezd tramvaje bez nutnosti trolejového vedení je cca. 1,2 km.

TABULKA 10 - ALSTOM CITADIS TRAM TRAIN SPECIFIKACE

Uspořádání pojezdu	--
Délka	min. 24 m - max. 45 m
Šířka	2,4 nebo 2,65 m
Maximální výška	3,6 m
Minimální rádius oblouku	20 m
Hmotnost	47-78 t
Maximální rychlost	70 nebo 80 km/h
Napájecí napětí	750 V (DC)
Elektromotor	--
Typ elektromotoru	2x PMSM
Dieselový motor	není



OBRÁZEK 23 - TRAMVAJ SPOLEČNOSTI BOMBARDIER S PRIMOVE A MITRAC TECHNOLOGIÍ

ZAJÍMAVOSTI - Nejedná se přímo o model tramvaje, ale o technologii, která může být integrována do tramvajových konstrukcí. Firma Bombardier úspěšně zakončila zkušební provoz tramvaje Bombardier Flexity 2 na 41,6 km dlouhém úseku bez trolejového vedení, tento úsek se nachází v německém Mannheimu. Tramvaj byla vybavena technologií PRIMOVE v kombinaci s technologií Bombardier MITRAC Energy saving system (rekuperace brzdě energie a optimalizace zásobování energií). Obě technologie zvyšují účinnost využití energie a jsou řešením vhodným nejen pro tramvaje, ale i pro autobusy, nákladní vozy či automobily. U tramvajů je základem řešení zdroj energie, který je veden pod zemí a energie induktivně přenášena do systému tramvaje, čímž odpadá potřeba trolejového vedení. Baterie jsou dobíjeny bezdrátově během přepravy osob, a to buď při zastavování či zrychlování tramvaje anebo v klidovém stavu v zastávkách. Při pokusu byla konkrétně využita PRIMOVE baterie 50 (nikl-mangan-kobalt Li-Ion baterie), která pracuje s napětím 532 V DC a je použita ve dvou sadách o kapacitě 49 kWh. Samotný pohon je sestaven ze čtyř trakčních elektromotorů, každý s výkonem 120 kW s napájením 750 V DC, pomocným pohonem a řídicí jednotkou MITRAC 500, která se stará o plnou rekuperaci energie získané při brzdění a o její uložení do baterie a zároveň se stará o optimální teplotní režim. Životnost baterie je odhadována na 10 let, což je dvojnásobek životnosti baterií obvykle používaných v těžkých elektrických vozidlech. Konstrukčně je Bombardier Flexity 2 velmi podobná tramvajím vyráběným čínskou firmou CRRC Puzhen podle Bombardier licencí. V Číně též již od roku 2014 používají tuto dvoukombinaci na 8 km dlouhé trase se třinácti zastávkami, které jsou z 90% bez trolejového vedení. Provoz této tramvaje na této trase ukázal, že je tento pohonný systém celosvětově vhodný pro jakoukoliv tramvajovou trasu.

KOMPONENTY PRIMOVE TECHNOLOGIE



OBRÁZEK 24 - KOMPONENTY PRIMOVE TECHNOLOGIE

Bezdrátové nabíjení PRIMOVE je tvořeno dvěma skupinami komponentů: komponenty uloženými na trase pod zemí a komponenty umístěnými na tramvaji a přizpůsobenými jejímu tvaru.

Charging segment - napájecí segment - Primární napájecí segmenty jsou uloženy pod povrchem tratě a zajišťují dodávku energie do vozidla.

Vehicle detection - detektor vozidla – Rozpoznává, zda se nad segmentem vyskytuje vozidlo vybavené technologií PRIMOVE a v případě, že ano, segment se zapíná. V opačném případě každý segment zůstává neaktivní a brání tak elektromagnetickému rušení, které by mohlo nastat v běžném vozidle.

Pick-up - Konvertuje magnetické pole z primárního vinutí na střídavý proud.

Onboard sending device - Palubní vysílací zařízení - Detekuje segmenty vodičů a řídí jejich zapínání a vypínání.

Inverter - Konvertuje střídavý proud z "Pick-upu" na stejnosměrný proud, který napájí a elektrifikuje vozidlo.

PRIMOVE battery system - PRIMOVE systém baterií - Extra lehký systém baterií s kapacitou 50 kWh.

PRIMOVE propulsion system - PRIMOVE pohonný systém - Spolehlivý pohon Bombardier MITRAC 500.

5. VÝPOČETNÍ ČÁST

Již v předchozích kapitolách bylo zmíněno, že velké procento železničních tratí ČR stále není elektrifikováno. Elektrifikace je ale finančně velmi náročná a vyvstává tak nastat otázka, nelze-li nalézt finanční úsporu a nižší ekologickou zátěž v nasazení hybridních železničních vozidel. O kolik může být hybridní vozidlo lepší alternativou než dosavadní diesel-elektrická vozidla a zda vůbec, si klade za úkol výpočet na následujících stránkách. Bude proveden modelový výpočet energetické náročnosti diesel-elektrického kolejového autobusu a hybridního kolejového autobusu. Pro hybridní kolejové vozidlo bude uvažován sériový pohon. Výpočet bude proveden pro trať o délce 14 km a pro jízdu po otevřené a přímé trati se zastávkami:

- a) po 2 km
- b) po 3,5 km

Pro hybridní kolejový autobus bude uvažována vyšší hmotnost způsobená součástkami navíc, jako je například baterie, ale zároveň bude započítána energie získaná rekuperací. Výsledné hodnoty budou porovnány a bude vyhodnoceno, která z variant je vhodnější pro každodenní provoz.

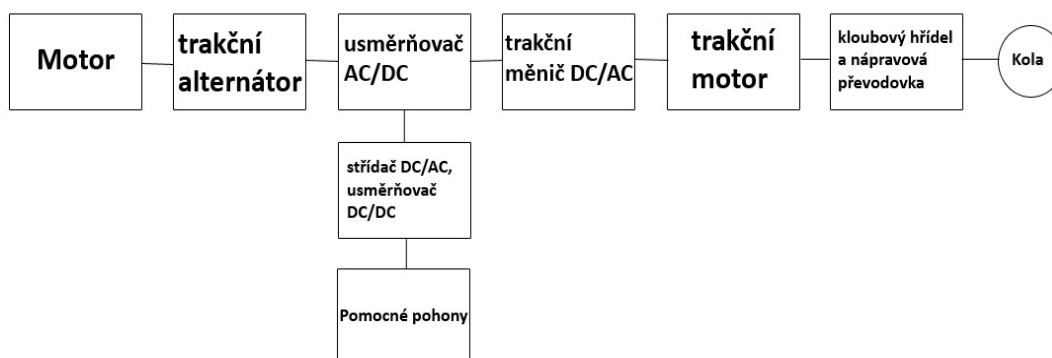


OBRÁZEK 25 - MAPA ELEKTRIFIKOVANÝCH TRATÍ ČR (2015)

5.1 PARAMETRY VOZIDEL

Následující parametry byly čerpány z diplomové práce pana Bc. Hříbala [9].

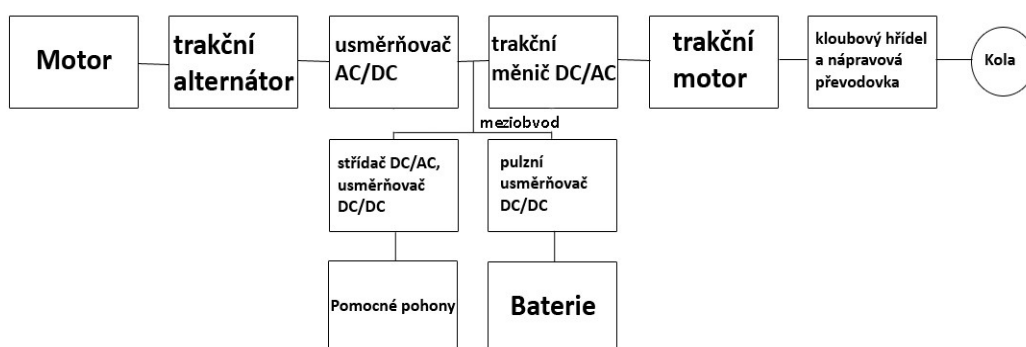
DIESEL-ELEKTRICKÝ KOLEJOVÝ AUTOBUS



OBRÁZEK 26 - SCHÉMA Pohonu DIESEL-ELEKTRICKÉHO KOLEJOVÉHO AUTOBUSU

Hmotnost vozidla m_{kD-E}	20 052 kg
Pohon m_{pD-E}	4536 kg

HYBRIDNÍ KOLEJOVÝ AUTOBUS



OBRÁZEK 27 - SCHÉMA Pohonu HYBRIDNÍHO KOLEJOVÉHO AUTOBUSU

Hmotnost vozidla m_{kH}	20 626 kg
Pohon m_{pH}	5110 kg
Účinnost pulzního usměrňovače DC/DC	98%

Účinnost baterie	80%
------------------	-----

SPOLEČNÉ PARAMETRY

Hmotnosti:

Užitečné zatížení $m_{už}$	4400 kg
----------------------------	---------

Ekvivalentní hmotnost rotačních hmot m_{rot}	1982 kg
--	---------

Trakční motor:

Maximální výkon P_{max}	120 kW
---------------------------	--------

Maximální moment M_{max}	850 Nm
----------------------------	--------

Maximální otáčky n_{max}	3000 ot/min
----------------------------	-------------

Účinnost motoru η_M	96,3%
--------------------------	-------

Brzdny výkon P_{maxB}	256 kW
-------------------------	--------

Maximální brzdny moment M_{maxB}	1785 Nm
------------------------------------	---------

Spalovací motor:

Maximální výkon P_{ICEmax}	310 kW
------------------------------	--------

Trakční generátor:

Výkon	280 kW
-------	--------

Příkon	302 kW
--------	--------

Účinnost η_G	92,8%
-------------------	-------

Ostatní účinnosti:

Usměrňovač AC/DC	98%
------------------	-----

Střídač a usměrňovač	96%
----------------------	-----

Trakční měnič DC/AC	96%
---------------------	-----

Převod	93%
--------	-----

Další parametry:

Stálý převod i_p	69/16
--------------------	-------

Průměr opotřeбенých kol d_{kol}	770 mm
-----------------------------------	--------

Součinitel odporu f	0,0016 N/N
-----------------------	------------

Součinitel adheze pro rozjezd μ_{roz}	0,25
---	------

Součinitel adheze pro rozjezd μ_{br}	0,15
--	------

Maximální zrychlení a_{\max}	1,3 m/s ²
Maximální brzdné zrychlení b_{\max}	1,4 m/s ²
Maximální rychlost v_{\max}	120 km/h
Hustota vzduchu ρ_{vzduch}	1,25 kg/m ³
Čelní plocha S x aerodynamický součinitel c_x	0,6x10 m ²

5.2 ADHEZNÍ SÍLY

Pro následující výpočty budou na ukázkou použity hodnoty diesel-elektrického autobusu. Při výpočtu sil potřebných pro jízdu vycházíme z omezení vyplývajících z adhezní síly působící na vozidlo, díky kterému je výkon vozidla na kolech omezen. Tato adhezní síla je dána hlavně hmotností vozidla. Pro výpočet adhezních sil působících na kola vozidla byl použit následující vztah:

$$F_{adh} = m_v * g * \mu_{adh} \quad (1)$$

kde μ_{adh} je součinitel tření mezi koly a kolejnicemi, g gravitační zrychlení a m_v celková hmotnost vozidla. Celková hmotnost vozidla je složena z hmotnosti nezátíženého vozidla, užitečného zatížení, kde jsou zahrnuti cestující (počet míst*průměrná hmotnost člověka) a hmotnost pohonu, která je u hybridního pohonu vyšší. Adhezní síly se musí počítat jak pro rozjezd, tak pro brzdění:

$$F_{adh-rozjezd} = (20052 + 2200 + 4536) * 9,81 * 0,25 = 65697,57 \text{ N} \quad (2)$$

$$F_{adh-brzdění} = (20052 + 2200 + 4536) * 9,81 * 0,15 = 39418,54 \text{ N} \quad (3)$$

5.3 JÍZDNÍ ODPORY

Síly působící proti pohybu vozidla se dále dělí např. do skupin pasivních odporů vozidla, kam patří odpor na ložiskách $O_{lož}$, odpor valení kol O_f , odpor mechanismu O_{mech} a aerodynamický odpor O_{vzduch} . Dále pak jsou to síly na překonání traťových odporů, kam patří odpor z jízdy tunelem O_{tunel} , odpor z oblouku O_{oblouk} a odpor ze sklonu O_s , který ale nemusí být nutně oproti ostatním silám ztrátový. Samostatnou skupinou jízdního odporu je pak odpor ze zrychlení O_a , který opět, stejně jako odpor ze sklonu, nemusí být ztrátový, neboť mění velikost kinetické energie vozidla. Potřebná síla na kolech pro překonání odporů je uvedena v následující rovnici:

$$F_{1,2kol} = O_f + O_{vzduch} + O_a + O_s + O_{mech} + O_{lož} + O_{tunel} + O_{oblouk} \quad (4)$$

Zde bude uvažovaná jízda po přímé, otevřené, a rovinné trati. Proto zde budou zcela zanedbány síly na překonání traťových odporů. Odpory v ložiskách a odpory mechanismů jsou oproti ostatním odporům malé a budou pro zjednodušení výpočtu taktéž zanedbány.

$$F_{1,2kol} = O_f + O_{vzduch} + O_a \quad (5)$$

$$F_{1,2kol} = m_v * g * f + \frac{1}{2} * \rho_{vzduch} * v^2 * c_x * S + m_{red} * a \leq F_{adh} \quad (6)$$

$$a > 0 \quad (7)$$

$$m_{red} = m_k + m_{už} + m_p + m_{rot} = 31544 \text{ kg} \quad (8)$$

Při brzdění kolejového autobusu dochází ke změně smyslu sil na kolech. Jízdní odpory při brzdění naopak vozidlu napomáhají k zastavení:

$$F_{1,2kol} * m_v * g * f + \frac{1}{2} * \rho_{vzduch} * v^2 * c_x * S + m_{red} * a = 0 \quad (9)$$

$$a < 0 \quad (10)$$

5.4 VÝPOČET ZRYCHLENÍ VOZIDLA

Neznámou veličinou je zrychlení vozidla. Zrychlení získáme z následujících rovnic, ze kterých budou nejdříve určeny maximální možné síly na kolech pro různé podmínky a z těchto bude vybrána ta nejmenší a dosazena do rovnice (13) pro zjištění zrychlení vozidla. Jako první bude vypočtena hnací síla vozidla, která je omezena maximálním výkonem trakčního motoru. Uvažujeme kolejový autobus s pohonem na dvou nápravách:

$$P_{TM} = \frac{F_{1,2kol} * r_{kol} * \omega_{kol}}{\eta_p * 2} \leq P_{max} \quad (11)$$

Pro zjištění úhlové rychlosti kol ω_{kol} je nutné zvolit rychlostní krok Δv a provést výpočet pro jednotlivé rychlosti do dosažení maximální rychlosti. Bude uvažována jízda po vedlejších tratích, a proto bude zvolena menší maximální rychlost $v_{max}=80$ km/h. $R_{kol}=385$ mm je poloměr opotřebovaných kol. Po vyjádření je získán vztah pro zjištění síly na kolech v závislosti na rychlosti vozidla a s ohledem na maximální možný výkon trakčního motoru. Pro ukázkou výpočtu bude zvolena rychlost $v=70$ km/h, která odpovídá $v=19,44$ m/s:

$$F_{1,2kol} \leq \frac{2 * P_{max} * \eta_p}{v} = \frac{2 * 120000 * 0,93}{19,44} = 11481,48 \text{ N} \quad (12)$$

Dalším omezením je maximální moment trakčního motoru. Síla na kolech je dána momentem motoru, poloměrem kol r_{kol} , účinností převodu η_p a stálým převodem na nápravách i_p . Pro dvě poháněné nápravy platí:

$$M_{TM} = \frac{M_{kol}}{i_p * \eta_p * 2} = \frac{F_{1,2kol} * r_{kol}}{i_p * \eta_p * 2} = \frac{P_{TM}}{\omega_{TM}} \leq M_{max} \quad (13)$$

Maximální moment trakčního motoru je $M_{max}=850$ Nm. Vyjádřením se opět získá:

$$F_{1,2} = \frac{2 * M_{max} * i_p * \eta_p}{r_{kol}} = \frac{2 * 850 * 4,31 * 0,93}{0,385} = 17709,25 \text{ N} \quad (14)$$

Z předchozích vztahů je zřejmé, že omezení při rychlosti 70 km/h je výkonové s hodnotou $F_{1,2kol}=11481,48 \text{ N}$. Se znalostí minimální hodnoty $F_{1,2kol}$ je již možné vypočítat příslušná zrychlení. Příklad výpočtu zrychlení:

$$a = \frac{F_{1,2kol} - (m_v * g * f + \frac{1}{2} * \rho_{vzduch} * v^2 * c_x * S)}{m_{red}} \quad (15)$$

$$= \frac{5739,43 - (29562 * 9,81 * 0,0016 + \frac{1}{2} * 1,25 * 19,44 * 0,6 * 10)}{31544}$$

$$= 0,304 \text{ m/s}^2$$

Výpočet pro brzdné zrychlení je obdobný, a proto již nebude dopodrobna uveden. Rozdíly jsou pouze v hodnotě maximálního výkonu a momentu, kde místo předchozích hodnot musí být dosaženy hodnoty pro brzdění, tedy maximální brzdny výkon $P_{maxB}=256 \text{ kW}$ a maximální brzdny moment $M_{maxB}=1785 \text{ Nm}$.

Při rovnoměrné jízdě je $a=\text{konst.}$ a odpadá odpor ze zrychlení. Postup se tak značně zkrátí a výpočet sil na kolech je:

$$F_{1,2kol} = m_v * g * f + \frac{1}{2} * \rho_{vzduch} * v^2 * c_x * S = 2306,85 \text{ N} \quad (16)$$

5.5 VYKONANÁ PRÁCE

Se znalostí zrychlení a sil v kolech je již možné zjistit kolejovým autobusem vykonanou práci. Pro nahrazení integrálu bude u jednotlivých intervalů použita střední hodnota zrychlení. Pro zrychlení z 69 km/h na 70 km/h:

$$a_{stř} = \frac{a_1 + a_2}{2} = \frac{0,316 + 0,304}{2} = 0,31 \text{ m/s}^2 \quad (17)$$

A pomocí střední hodnoty zjištěna doba, za kterou vozidlo zrychlí o 1 km/h:

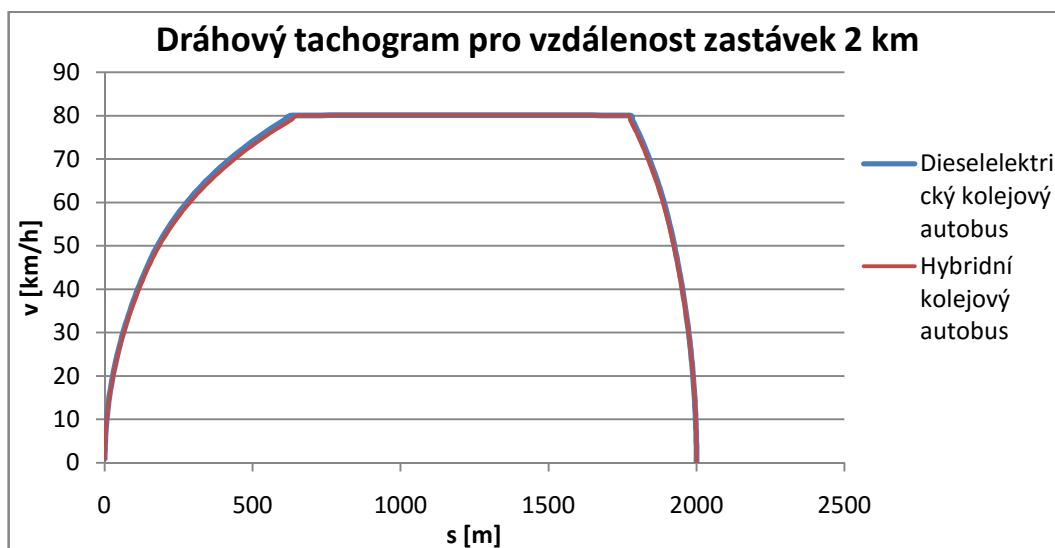
$$\Delta t = \frac{\Delta v}{a_{stř}} = \frac{1}{0,31 * 3,6} = 0,896 \text{ s} \quad (18)$$

To znamená, že vozidlo zrychlí z rychlosti 69 km/h na 70 km/h za 0,9 s. Dále pak vzdálenost, kterou za tu dobu ujede:

$$\Delta l = \frac{1}{2} * \left(\frac{v_1}{a_1} + \frac{v_2}{a_2} \right) * \Delta v = \frac{1}{2} * \left(\frac{69}{0,316 * 3,6} + \frac{70}{0,304 * 3,6} \right) * \frac{1}{3,6}$$

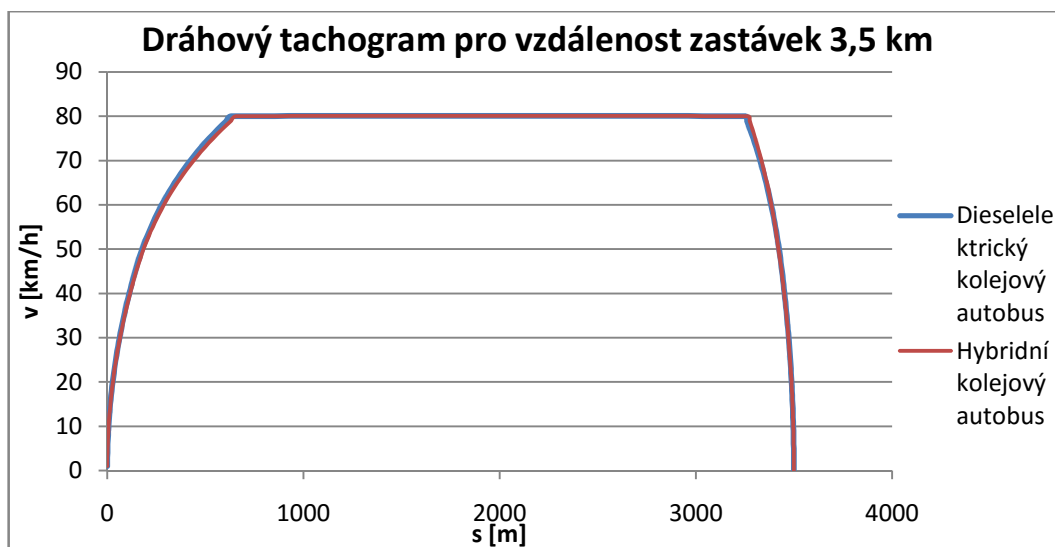
$$= 17,31 \text{ m} \quad (19)$$

Dráha potřebná k tomuto zrychlení je tedy 17,31 m. Pomocí výše uvedených vzorců byl sestaven dráhový tachogram. Výsledný graf pro 2 km úsek:



GRAF 1 - DRÁHOVÝ TACHOGRAM PRO VZDÁLENOST ZASTÁVEK 2 KM

A pro 3,5 km úsek:



GRAF 2 - DRÁHOVÝ TACHOGRAM PRO VZDÁLENOST ZASTÁVEK 3,5 KM

Na grafech výše je vidět nepříliš velký vliv větší hmotnosti hybridního vozidla na jízdní průběh, diesel-elektrické kolejové vozidlo má mírně rychlejší rozjezd i dobu, za kterou se z rychlosti 80 km/h dostane na 0 km/h. Elektromotory nebyly při rozjezdu v tomto výpočtu přetíženy, proto vychází u obou vozidel poměrně dlouhý rozjezd, který se pro diesel-elektrický kolejový autobus rovná $l_{RD-E}=633$ m a pro hybridní kolejové vozidlo $l_{RH}=657$ m. Při maximální rychlosti 120 km/h činí rozdíl mezi vozidly při rozjezdu $\Delta l_R=126$ m a při brzdění $\Delta l_B=25$ m.

Pro síly na kolech bude použit stejný postup jako pro zrychlení, tedy bude uvažována střední hodnota:

$$F_{kolstř} = \frac{F_{1kol} + F_{2kol}}{2} = \frac{11645,22 + 11478,86}{2} = 11562,04 \text{ N} \quad (20)$$

Výsledná práce vykonaná diesel-elektrickým autobusem je součtem práce na jednotlivých úsecích pro rozjezd, přičemž musí být ještě přičtena práce za rovnoměrnou jízdu bez zrychlení. Veškerá energie při brzdění se zmaří v odporu (přemění se na teplo):

$$A_R = \sum_{\Delta l} F_{kolstř} * \Delta l + A_J \quad \text{rozjezd} > 0 \quad (21)$$

$$A_B = \sum_{\Delta l} F_{kolstř} * \Delta l \quad \text{brzdění} < 0 \quad (22)$$

K výpočtu byl použit program Microsoft Excel. Hodnoty práce pro jednotlivé jízdní režimy a daný úsek jsou uvedeny v následující tabulce:

TABULKA 11 - PRÁCE OBOU VOZIDEL NA JEDNOTLIVÝCH ÚSECÍCH

	Diesel-elektrický k. autobus	Hybridní k. autobus
Rozjezd A_R [J]	8 613 223,31	8 946 102,66
Rovn. A_J [J] pro 2 km	2 636 035,64	2 580 583,09
Rovn. A_J [J] pro 3,5 km	6 096 306,89	6 067 882,85
Brzdění A_B [J]	7 975 159	8 274 779,87

U diesel-elektrického autobusu je celková práce rovna součtu práce pro rozjezd a rovnoběžnou jízdu vynásobena počtem zastávek na 14 km trase. Veškerá energie se při brzdění přemění v teplo. Zastávky po 2 km rozdělují trasu na sedm úseků a po 3,5 km na úseky čtyři. Práce při tomto množství zastávek je tedy:

$$A_{D-E} = (A_R + A_J) * p \quad (23)$$

kde p je počet zastávek. Hybridní kolejový autobus je schopen při brzdění získat část energie zpátky tak, že síla od kol začne pohánět elektromotor, jenž se přepne do generátorického režimu a brzdí kola. Takto získaná energie je uložena zpátky do baterií a může být využita při další jízdě. Část energie se ztrácí kvůli účinnosti součástek:

$$A_H = (A_R + A_J - A_B * \mu_{red}) * p \quad (24)$$

Kde μ_{red} :

$$\begin{aligned} \mu_{red} &= \mu_P * \mu_{TM} * \mu_{Tměníč} * \mu_{usměrňovač} * \mu_{baterie} \\ &= 0,93 * 0,963 * 0,96 * 0,98 * 0,8 = 0,67 \end{aligned} \quad (25)$$

Hodnoty energií získané rekuperací jsou následující:

$$A_{rekup.2} = (8 274 779,87 * 0,67) * 7 = 39 043 704,82 \text{ J} \quad (26)$$

$$A_{rekup.2} = (8 274 779,87 * 0,67) * 4 = 22 310 688,47 \text{ J} \quad (27)$$

Výsledné hodnoty pro úseky a trať:

TABULKA 12 - VÝLEDNÁ PRÁCE PRO JEDNOTLIVÉ ÚSEKY A CELOU TRÁŤ

	Diesel-elektrický k. autobus	Hybridní k. autobus
A [J] 2 km úsek	11 249 258,95	5 949 013,63
A [J] 3,5 km úsek	14 709 530,20	9 436 313,39
A [J] celkové pro 7 zast.	78 744 812,65	41 643 095,40
A [J] celkové pro 4 zast.	58 838 120,80	37 745 253,60

Rozdíl činí 37 101 717,25 J pro zastávky po 2 km a 21 092 867,20 J pro zastávky po 3,5 km.

6. ZÁVĚR

V první části práce byly uvedeny příklady současných modelů kolejových vozidel. Jedná se o poměrně novou problematiku a veškerá vozidla, až na model od firmy ČKD, pochází z období po roce 2000, tudíž bylo nalezení informací o jednotlivých modelech velmi obtížné a jsou poměrně různorodé. Důvodem pozdějšího vývoje je nejspíše největší slabina hybridních vozidel, kterými jsou baterie (jejich kapacita a životnost) a vyšší náklady spojené se součástmi specifickými pro hybridní vozidla, jež jsou nutné pro vedení energie do baterií nebo z baterií k trakčnímu motoru. Proto bývají hybridní vozidla několikanásobně dražší než vozidla obyčejná. Dalším důležitým faktorem je ekologie a fakt, zda je použití hybridních vozidel pro přírodu skutečně šetrnější. Elektromotory jsou oproti spalovacímu motoru účinnější, ale například v České Republice je elektřina vyrobena převážně spalováním uhlí a tak bývá celý proces nakonec stejně nebo dokonce méně účinný než energie vyrobená spalovacím motorem přímo. Navíc výroba několika druhů baterií a elektromotoru znamená další ekologickou zátěž.

Zdá se skutečně vyplácí investice do hybridních vozidel z hlediska financí a ekologie měl naznačit modelový výpočet v druhé části bakalářské práce, kde byla posouzena jízda dvou kolejových autobusů (diesel-elektrické a hybridní vozidlo) po 14 km trase se zastávkami po 2 km a 3,5 km dlouhých úsecích. Kvůli vyšší hmotnosti hybridního vozidla byla práce na trasách mírně vyšší. Konečný celkový rozdíl mezi vozidly činí 37 101 717,25 J pro zastávky po 2 km a 21 092 867,20 J pro zastávky po 3,5 km, což je o něco méně než polovina celkové práce diesel-elektrického vozidla na těchto tratích. S narůstající délkou vzdáleností mezi zastávkami se snižuje i množství energie získané zpět. Proto je hlavním faktorem, kdy skutečně lze uplatnit hybridní vozidlo, pracovní cyklus. Pro trať s větším množstvím zastávek může tato alternativa pravděpodobně představovat výhodné zlepšení. V reálném provozu ale ještě přibývá mnoho dalších faktorů, které však byly v případě tohoto modelového výpočtu zanedbány.

BIBLIOGRAFIE

- [1] **Pistoia, Gianfranco.** *Electric and hybrid vehicles: power sources, models, sustainability, infrastructure and the market* . místo neznámé : Elsevier, 2010.
- [2] **transport, Alstom.** Alstom. [Online]
<http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/H3%20Hybrid%20-%20Product%20sheet%20-%20EN%20-%20LD.pdf?epslanguage=en-GB>.
- [3] Prototypy. [Online] prosinec 2013. <http://www.prototypy.cz/?rada=718>.
- [4] **Charvát, Jaroslav.** Zelpage.cz. [Online]
<http://www.zelpage.cz/atlasloko.php?id=718&lang=cs>.
- [5] **Alstom.** Alstom . [Online] <http://www.alstom.com/de/products-services/product-catalogue/rail-systems/trains/products/rangierlokomotivenplattform-h3/>.
- [6] Railindustry. [Online] červenec 2002.
<http://railindustry.com/coverage/2002/2002g02a.html>.
- [7] Toshiba.co.jp. [Online]
<http://www.toshiba.co.jp/sis/railwaysystem/en/products/locomotive/hybrid.htm>.
- [8] **Company, East Japan Railway.** JR East . [Online]
http://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf_4/Tech-no.4-62-70.pdf.
- [9] **HŘÍBAL, Bc. Pavel.** *Hybridní pohon pro nízkopodlažní kolejový autobus*. Praha : autor neznámý, 2014.
- [10] **Czycholl, Harald.** Die Welt. [Online] Prosinec 2012.
<http://www.welt.de/wissenschaft/article112281574/Der-erste-Hybrid-Zug-So-gruen-kann-Bahn-sein.html>.
- [11] **Zielonka, Gernot.** dmm travel. [Online] březen 2015.
<http://dmm.travel/news/artikel/lesen/2015/03/vw-und-audi-bauen-hybridautos-und-bekommen-hybrid-loks-67420/>.
- [12] **Transportation, Bombardier.** Bombardier. [Online] 2009.
http://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/suporting-documents/BT/Bombardier-Transportation-ECO4-MITRAC_Hybrid-EN.pdf.
- [13] **Company, East Japan Railway.** JR East. [Online] Duben 2003.
<http://www.jreast.co.jp/e/press/20030401/>.

- [14] **Kache, Dr. Ing. Martin.** TU Dresden . [Online] Prosinec 2014. https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/sft/forschung/Volltexte_Forschung/ETR_12_2014.pdf.
- [15] TU Dresden. [Online] říjen 2014. https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/sft/forschung/Volltexte_Forschung/ETR_10_2014.pdf.
- [16] Vossloh Kiepe. [Online] <http://www.vossloh-kiepe.com/vkproduktordner.2008-05-14.1154367607/vkproduktordner.2008-06-04.4996610973/vkproduktordner.2008-06-26.9288679686/vkprodukt.2014-01-20.8169045412>.
- [17] Vossloh Espana. [Online] http://www.vossloh-espana.com/media/downloads/pdfs/flyer/final_Chemnitz.pdf.
- [18] RP Online. [Online] červenec 2015. <http://www.rp-online.de/nrw/staedte/wegberg/avenio-tram-von-siemens-nach-katar-unterwegs-aid-1.5264265>.
- [19] Railway Gazette. [Online] <http://www.railwaygazette.com/news/urban/single-view/view/qatars-first-education-city-tram-rolls-out.html>.
- [20] Pro Elektrotechniky. [Online] listopad 2015. <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/202.php>.
- [21] Alstom Citadis. [Online] <http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/Citadis%20X05%20-%20Product%20sheet%20-%20EN.pdf?epslanguage=en-GB>.
- [22] Alstom Citadis Ecopack. [Online] <http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/Citadis%20Ecopack%20-%20Product%20Sheet%20-%20EN.pdf?epslanguage=en-GB>.
- [23] Deutsche Bahn. [Online] http://www.deutschebahn.com/de/nachhaltigkeit/oekologie/luftreinhaltung/moderne_schienenfahrzeuge.html.
- [24] Hybridantrieb24. [Online] <http://www.hybridantrieb24.de/hybrid-schienenfahrzeuge.html>.
- [25] Hybridcar. [Online] <http://hybridcar.ws/bombardiers-battery-powered-tram-sets-range-record/>.
- [26] MTU online. [Online] Dubec 2013. http://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/technical-info/case-studies/3082572_MTU_Rail_CaseStudy_HybridPowerpack_2013.pdf.

- [27] O energetice. [Online] listopad 2015.
<http://oenergetice.cz/technologie/elektrifikace-ceskych-zeleznic/>.
- [28] PRIMOVE Bombardier. [Online]
<http://primove.bombardier.com/applications/tram.html>.
- [29] Pro Elektrotechniky. [Online] srpen 2015.
<http://www.proelektrotechniky.cz/zajimave-projekty/72.php>.
- [30] **Husain, Iqbal.** *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals* . místo neznámé : CRC Press, 2011.