

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Hybridní posunovací lokomotiva
Bc. Tomáš Černožorský

Diplomová práce
2009

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš ČERNOHORSKÝ**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky-Kolejová vozidla**

Název tématu: **Hybridní posunovací lokomotiva**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Návrh modernizace čtyřnápravové posunovací lokomotivy dosazením hybridního přenosu výkonu. Vypracujte:

1. Rešerši používaných hybridních systémů ve světě.
2. Návrh variant řešení trakčního obvodu lokomotivy.
3. Rozpracování projektu zvolené varianty řešení.
4. Zhodnocení zvolené varianty a srovnání s lokomotivami s klasickým přenosem výkonu (hlediska trakčních parametrů, pořizovacích a provozních nákladů, dostupnosti, spolehlivosti)

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího DP
Rozsah pracovní zprávy: 50-60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

- [1] Výrobní a provozní dokumentace ČKD a CZ LOKO, a.s.
- [2] JEFFERSON, C. M.; BARNARD, R. H.: Hybrid vehicle propulsion, WIT Press, Southhampton, 2002, ISBN 1-85312-887-2.
- [3] DANZER, J.: Elektrická trakce II., ZČU Plzeň 2001, ISBN 80-7082-814-5.
- [4] NEJEPSA, R.; ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II - 1. a 2. část, ES ČVUT Praha, 1986.
- [5] ANDREWS, H. I.: Railway Traction. Elsevier New York, Oxford, 1986, ISBN 0-444-42489-X.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Štěpánek**
CZ LOKO, a.s., Nymburk

Datum zadání diplomové práce: **20. února 2009**
Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2009**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.
vedoucí katedry

dne

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Sudicích dne 19. 5. 2009

Bc. Tomáš Černožský

Poděkování

Rád bych poděkoval kolektivu pedagogů Dopravní fakulty Jana Pernera za trpělivý přístup při předávání znalostí a zkušeností v průběhu mého celého studia, vedoucímu práce Ing. Jiřímu Štěpánkovi za poskytování cenných rad a podkladů při zpracovávání diplomové práce a také Ing. Matěji Páchovi ze Žilinské Univerzity v Žilině za konzultace k dané problematice.

Poděkování patří také mé rodině, která mi materiální a morální podporou umožnila vysokoškolské studium, tvorbu diplomové práce i přípravu na státní závěrečné zkoušky.

TITUL

Hybridní posunovací lokomotiva

ANOTACE

Práce se zaměřuje na problematiku hybridního pohonu posunovacích lokomotiv. Uvádí přehled možných typů akumulátorů energie a aplikací hybridního pohonu v kolejové technice. Zabývá se návrhem trakčního obvodu hybridního pohonu, výběrem vhodného akumulátoru energie, konstrukčním zabudováním a návrhem součinnosti zdrojů energie v provozu. V závěru jsou návrhy porovnány s konvenčními lokomotivami.

KLÍČOVÁ SLOVA

hybridní pohon, posunovací lokomotiva, akumulace energie, trakční obvod

TITLE

Hybrid shunting locomotive

ANNOTATION

The work focuses on the problems hybrid propulsion of shunting locomotives. It presents overview of available energy accumulators and applications of hybrid propulsion in a railway technics. The work deals with design of a traction circuit, choice of a suitable energy accumulator, constructional installation and design of a cooperation of devices in a service. The proposed designs are compared with conventional locomotives at the end of the work.

KEYWORDS

hybrid propulsion, shunting locomotive, energy storage, traction circuit

Obsah

1	Úvod	9
2	Důvody vedoucí k zavádění hybridního pohonu	10
2.1	Ekonomika provozu	10
2.2	Ekologie provozu	10
3	Koncept hybridního pohonu	13
3.1	Uspořádání hybridních pohonů.....	14
3.2	Sériové uspořádání	15
3.3	Paralelní uspořádání.....	16
3.4	Kombinované uspořádání.....	17
4	Akumulátory energie	18
4.1	Elektrochemická akumulátorová baterie	18
4.2	Setrvačnik	22
4.3	Superkapacitor.....	24
4.4	Hydraulický akumulátor	26
4.5	Porovnání jednotlivých typů akumulátorů energie	27
5	Přehled aplikací hybridního pohonu	28
5.1	ČKD – posunovací lokomotiva TA436.0 (718)	28
5.2	RailPower – lokomotivy GreenGoat a Green Kid.....	30
5.3	Bombardier – systém MITRAC	32
5.4	Hitachi – motorové vozy NE Train a KIHA E200.....	34
5.5	Alstom – motorová jednotka LIREX Experimental	35
5.6	General Electric – Evolution Hybrid locomotive	35
5.7	Voith – systém HydroBrid	36
5.8	MTU – hybrid powerpack.....	36
6	Elektrodynamické rekuperační brzdění	37
6.1	Cize buzená elektrodynamická brzda	37
7	Výběr vhodného vozidla na modernizaci – ř. 740	39
7.1	Technické parametry lokomotivy řady 740.....	40
7.2	Analýza provozu lokomotivy řady 740	41
8	Základní parametry rekonstrukce	43
8.1	Výkonová rozvaha	43
8.2	Trakční uspořádání.....	44
8.3	Prvky trakčního obvodu	45
9	Řešení trakčních obvodů – varianta A	47
9.1	Dimenzace trakčních zařízení	48
9.2	Navržené parametry varianty A:	51

9.3	Konstrukční řešení	52
9.4	Provoz hybridního pohonu	54
9.5	Trakční charakteristiky.....	55
10	Řešení trakčních obvodů – varianta B.....	59
10.1	Dimenzace trakčních zařízení	60
10.2	Navržené parametry varianty B posunovací lokomotivy:	63
10.3	Konstrukční řešení	63
10.4	Provoz hybridního pohonu	64
10.5	Trakční charakteristiky.....	68
11	Zhodnocení a srovnání.....	71
11.1	Porovnání s konvenčními rekonstrukcemi.....	71
11.2	Zhodnocení variant.....	74
12	Závěr	76
13	Literatura	77

1 Úvod

Provoz vozidel je v dnešní době především určován dvěma základními aspekty, ekologií a ekonomikou provozu. Ekologie provozu je ovlivňována politickým vývojem ve světě, který byl určen mezinárodní smlouvou z Kjóta. Země, které Kjótský protokol ratifikovaly, se zavazují ke snižování emisí skleníkových plynů. Je tedy vyvíjen tlak na výrobce vozidel, aby snižovali u nově vyráběných vozidel produkci škodlivin. Druhý z aspektů je výrazně ovlivňován cenou pohonných látek na trhu, která se v posledním desetiletí výrazně zvýšila. Z těchto důvodů i dopravci hledají cesty jak snížit energetickou náročnost provozu hnacích vozidel, tedy především snížením spotřeby pohonných látek, které tvoří největší část nákladů na jejich provoz. Jedná se také o spotřebu neobnovitelných zdrojů energie, proto je zde v tomto směru vyvíjen i politický tlak.

Z výše uvedených důvodů se začínají ve výrobě kolejových a především silničních vozidel prosazovat hybridní vozidla. Tento termín označuje vozidlo, pro jehož pohon je využíváno několika, ve většině případů dvou, odlišných zdrojů energie, z nichž je jeden schopen ukládat rekuperovanou energii vznikající při brzdění. Důvody, proč je hybridní vozidlo jedním z řešení ekonomických a ekologických požadavků, jsou následující:

- Snižuje cenu dopravy.
- Snižuje spotřebu fosilních paliv.
- Snižuje množství produkovaných exhalací do ovzduší.

Myšlenka kombinace více zdrojů energie ve vozidle je velmi stará. Z počátku se uplatňovala především v silniční dopravě. V tomto odvětví se využívalo výhod tehdy relativně dokonalého elektrického pohonu a velmi nedokonalého spalovacího Otto motoru. První takto vybavený automobil byl navržen již v roce 1899 americkým konstruktérem A. J. Allenem. V roce 1905 si nechal inženýr H. Piper takovýto koncept patentovat. Přes veškerou snahu o zvýšení výkonu vozidla tímto způsobem se tento směr neprosadil. Akumulátorové baterie na uchování energie byly velmi nedokonalé a po zdokonalení spalovacího motoru se vývoj hybridních automobilů dostal do pozadí. V železniční dopravě se první použití více zdrojů energie datuje do období druhé světové války, kdy ve Švýcarsku z důvodu potřeby úspory uhlí byly některé parní lokomotivy upraveny na odebírání energie z trolejového vedení.

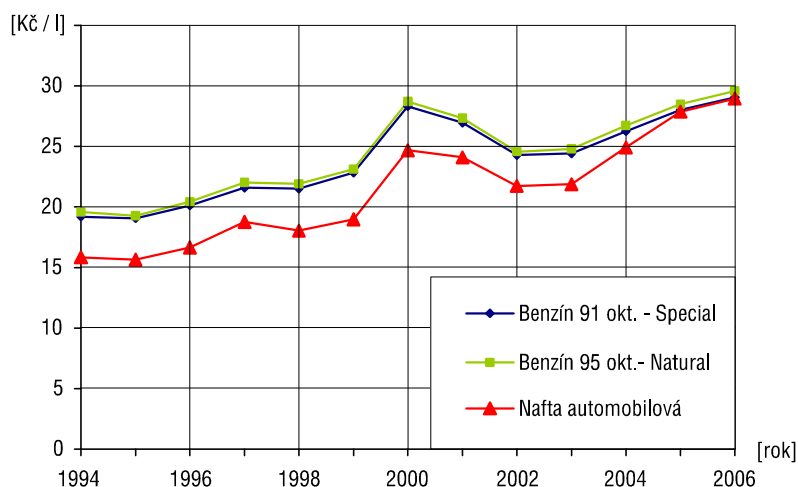
Dnes je používání hybridního řešení pohonu v železniční dopravě, obdobně jako u automobilové dopravy, prozatím okrajovou záležitostí, a to především z vysokých pořizovacích nákladů. Tento stav se však dle posledního vývoje na trhu s železničními vozidly začíná měnit a do koncepce hybridního pohonu je vkládáno mnoho nadějí na zefektivnění provozu některých typů hnacích vozidel.

2 Důvody vedoucí k zavádění hybridního pohonu

2.1 Ekonomika provozu

V posledních desetiletích dochází trvalému nárůstu cen pohonných hmot, což má za následek výrazné navyšování provozních nákladů vozidel. Tento fakt se dále promítá do cen přeprav, které jsou nabízeny zákazníkům. Na tomto pomyslném poli dochází ke střetu nabídek jednotlivých dopravců. Proto se výrobci snaží vyhovět požadavkům dopravců na nižší provozní náklady vozidel a nalézt cestu ke snížení spotřeby paliva.

Trvalý nárůst cen benzínu a nafty není zapříčiněn jen vlivem inflace. Především se jedná o zdražování z důvodu geopolitické situace v Íránu, Iráku a Nigérii. Vývoj kulminoval na jaře roku 2008, kdy ceny dosahovaly vrcholu. Následně došlo k mírnému propadu cen, které se v roce 2009 drží na konstantní hodnotě především díky dopadům globální ekonomické krize. Uvedené ceny (Obr. 1) benzínů a nafty jsou průměrné roční hodnoty vycházejících z dat ČSÚ a Celní správy [6].



Obr. 1 Vývoj cen pohonných hmot do roku 2006 (zdroj: Celní správa)

2.2 Ekologie provozu

Doprava je jedním z významných znečišťovatelů životního prostředí v České republice, především v městských zástavbách. Největším producentem exhalací je silniční doprava (individuální, nákladní i veřejná). Její podíl na emisích z dopravy po r. 1989 přesáhl 90 %. Zatímco exhalace z železniční, vodní a letecké dopravy jsou soustředěny na nepočtených trasách, exhalace z automobilů znečišťují prakticky celé území, zejména městské zástavby.

Odhaduje se, že celosvětově dosahuje produkce emisí škodlivin z výfukových plynů dopravních prostředků až na 10 miliard m³ každý rok. I přes zlepšování účinnosti spalování motorů a následnému čištění zplodin, dochází k trvalému nárůstu množství emisí, které je zapříčiněno především narůstajícím počtem dopravních prostředků. Dopravní prostředky produkují především emise NO_x, CO a CO₂ (20–40 % celosvětové produkce). Závažné

zdravotní dopady mají emise karcinogenních pevných částic PM, kterých je doprava v městských zástavbách často dominantním zdrojem [6].

Trend ve vývoji emisí se v posledních letech nijak nemění (viz Obr. 2). Jde o trvalý růst emisí skleníkových plynů (CO₂) a pokles limitovaných emisí, tj. zejména oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků. Největším problémem jsou emise PM, které vykazují meziroční nárůsty. V případě PM bilance emisí z dopravy zahrnuje pouze výfukové emise, nejsou zahrnuty emise vzniklé otěrem pneumatik a z brzdového obložení ani tzv. sekundární prašnost. Při celkovém hodnocení vlivu dopravy na životní prostředí se posuzují emise následujících škodlivin:

- CO – oxid uhelnatý
- CO₂ – oxid uhličitý
- N₂O – oxid dusný
- NO_x – ostatní oxidy dusíku
- SO₂ – oxid siřičitý
- VOC – prchavé organické látky
- PM – karcinogenní prachové částice

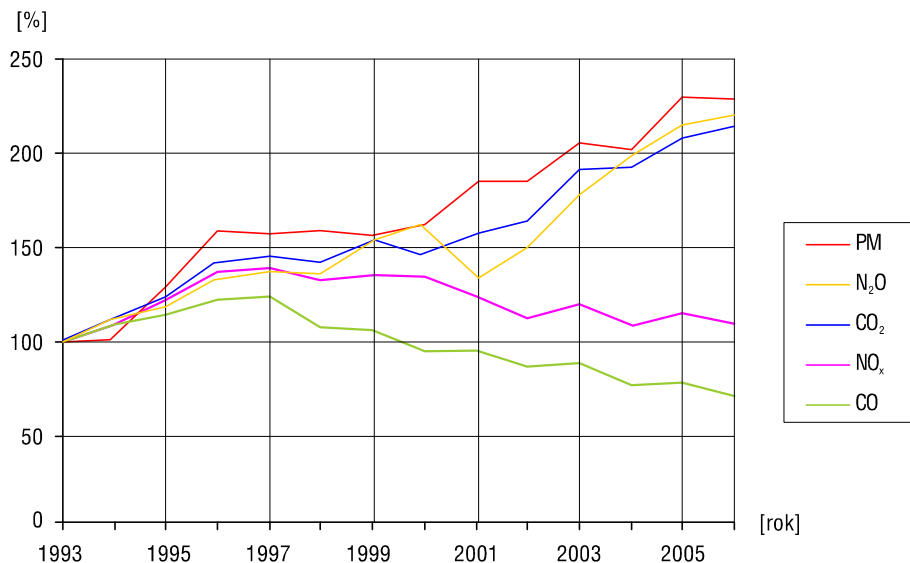
Vliv jednotlivých druhů dopravy na celkové znečištění životního prostředí můžeme porovnat s použitím emisí CO₂ na Obr. 3. Zde má dominantní postavení silniční doprava, jelikož její podíl na produkci činí více než 90 %. Avšak tento podíl je způsoben z velké části dominantním postavením silniční dopravy v přepravních výkonech. Je zde potřeba taktéž poznamenat, že do statistik není zahrnut podíl emisí z elektrické trakce železniční dopravy.

Předcházející skutečnosti vedly v mezinárodní politické rovině k přijetí Kjótského protokolu. Toto přijetí znamená významný pokrok v ochraně životního prostředí. Státům ukládá, aby do prvního kontrolního období (2008 – 2012) snížily jednotlivě nebo společně emise skleníkových plynů nejméně o 5,2% v porovnání se stavem v roce 1990.

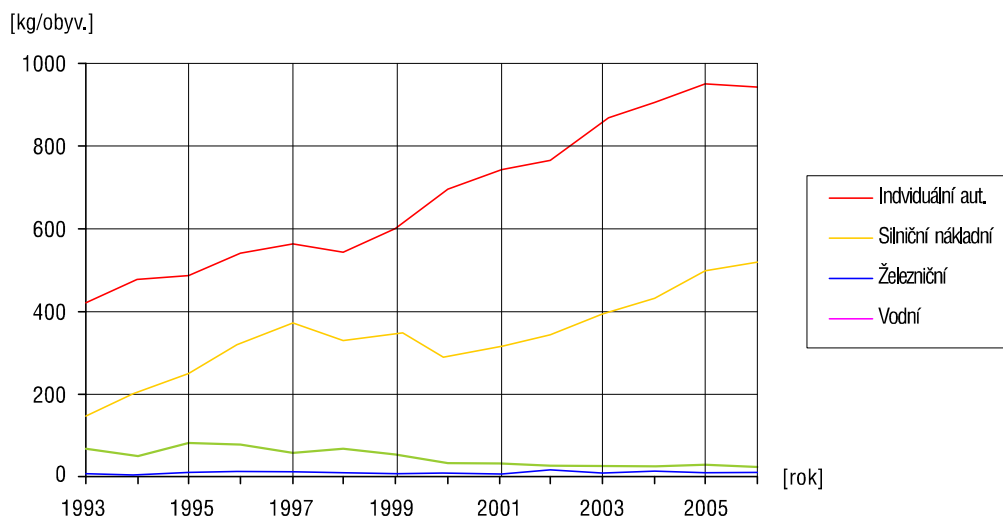
Dále Evropské společenství přistoupilo k zavádění nových emisních limitů Stage IIIA pro spalovací motory drážních vozidel, které dále zpřísňují produkci emisí (viz Tab. 1). Na Obr. 4 je znázorněn vývoj emisních limitů NO_x pro železniční vozidla. Z grafu je zřetelné sjednocení americké normy EPA Tier 3 a evropské EC Stage IIIA a také budoucí další zpřísňování emisních norem drážních spalovacích motorů normou Stage IIIB [23].

Tab. 1 Stage III A – Standardy pro spalovací motory železničních vozidel

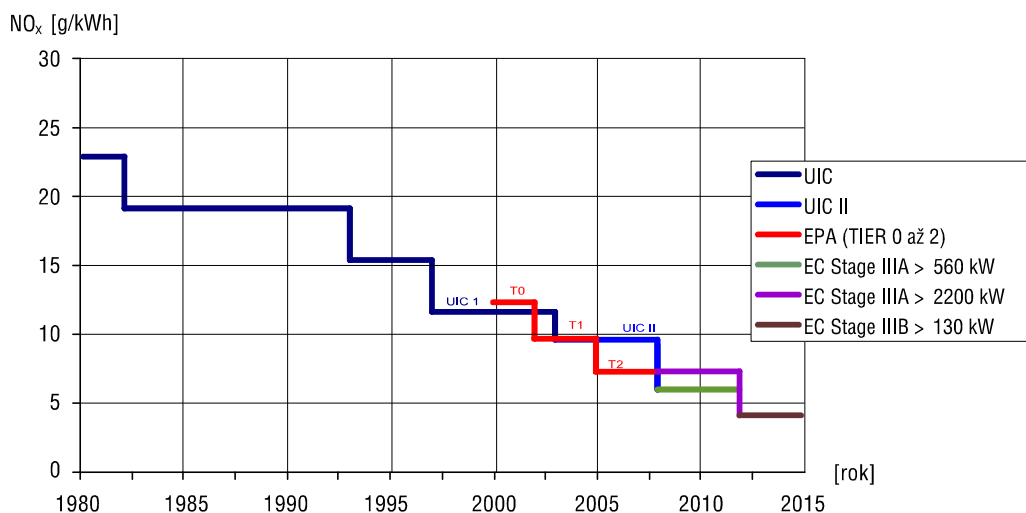
Kat.	Výkon	Datum	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM
	[kW]	(od)	[g/kWh]				
RC A	130 < P < 560	1.1.2007	3,5	-	4,0	-	0,2
RL A	560 < P < 2000	1.1.2009	3,5	0,5	4,0	6,0	0,2
RH A	> 2000	1.1.2009	3,5	0,4	4,0	7,4	0,2



Obr. 2 Index vývoje emisí z dopravy (zdroj: CDV)



Obr. 3 Měrné emise CO₂ podle druhů dopravy (zdroj: CDV)



Obr. 4 Vývoj emisních limitů NO_x (normy UIC, EPA, EC)

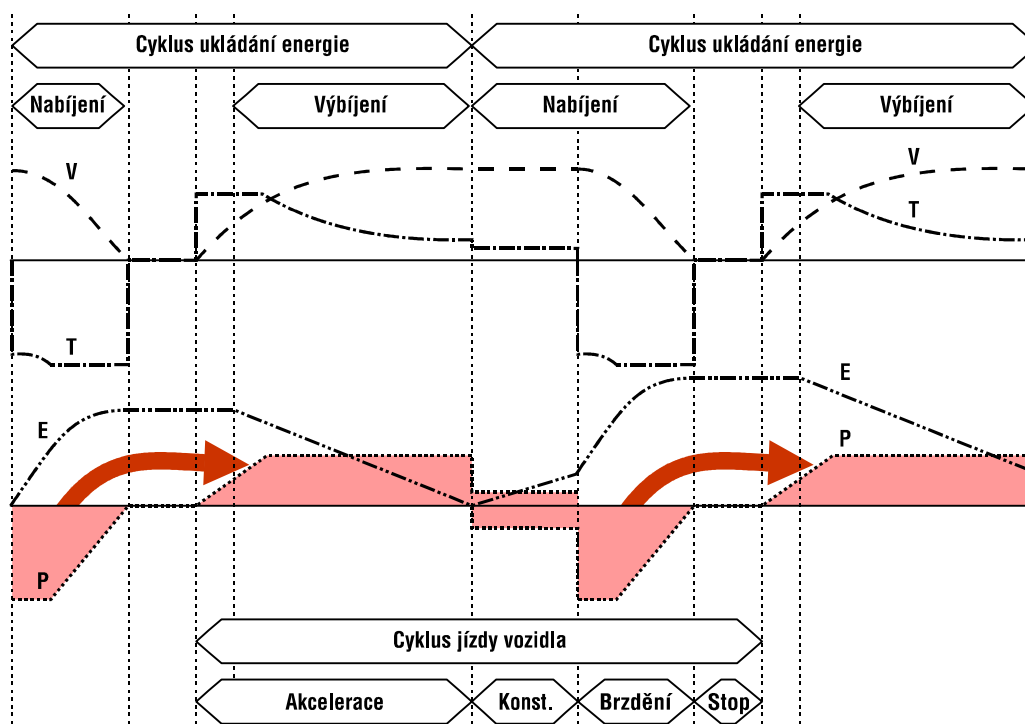
3 Koncept hybridního pohonu

Dosažení ekonomických a ekologických úspor pomocí hybridního pohonu se děje uchováváním energie vznikající při brzdění. U vozidel se spalovacím motorem také použitím typů motorů o menším výkonu, které obvykle mají menší měrnou spotřebu paliva.

Na příkladu na Obr. 5 můžeme vidět základní princip funkce hybridního pohonu. Při brzdění vozidla se energie získaná přeměnou z energie kinetické uchovává. Následně může být tato energie využita například pro zvýšení akcelerace při rozjezdu nebo také v případech kdy už výkon hlavního zdroje energie nedostačuje k udržení potřebného zrychlení. Po dosažení maximální rychlosti, kdy výkon primárního zdroje energie je vyšší, než-li je výkon potřebný k pokrytí odporu z jízdy vozidla, je možno energii vznikající přebytkem výkonu ukládat.

Uložená energie může sloužit i k dalšímu použití než jen ke zvyšování výkonu vozidla při rozjezdu. Pokud je vozidlo vybaveno systémem start/stop spalovacího motoru, který vypíná spalovací motor při stání vozidla, využívá se uložená energie k napájení pomocných pohonů vozidla. Tímto systémem se výrazně sníží spotřeba paliva a také sníží emise hluku do okolí při stání vozidla, což je také výrazný přínos k dosažení ekologického provozu.

Další otázkou je nastavení součinnosti primárního zdroje se zdrojem akumulované energie. Jednou z možností, jak už bylo výše popsáno, je použití akumulované energie až při nedostatku výkonu primárního agregátu, čímž špičkově zvyšujeme výkon vozidla. Druhou možností je ve vozidlech se systémem start/stop použití akumulované energie k rozjezdu vozidla, kde je spalovací motor uveden do chodu až při dosažení určité rychlosti.



Obr. 5 Graf vývoje jednotlivých veličin v průběhu jízdy hybridního vozidla

(V – rychlost, T – trakční síla, P – výkon, E – energie akumulátoru)

3.1 Uspořádání hybridních pohonů

Hybridní pohony můžeme rozdělit do několika kategorií podle funkce sekundárního zdroje energie v pohonu vozidla [1]:

- **Micro hybrid** – primární zdroj pro pohon vozidla, sekundární zdroj pouze pro pohon pomocných pohonů (příslušenství).
- **Mild hybrid (mybrid)** – primární zdroj pro pohon vozidla, sekundární zdroj umožňuje rekuperaci brzděné energie, je využíván k pohonu pomocných pohonů a k zvyšování výkonu vozidla.
- **Plný hybrid** – oba dva zdroje jsou používány k pohonu vozidla (samostatně či v součinnosti).

Obvykle je primární zdroj založen na čerpání energie z fosilních paliv, zatímco sekundární disponuje energií, jež může být získána třemi základními způsoby – ze zdroje na fosilní paliva, uchováním energie vznikající při brzdění nebo z externího stacionárního zdroje.

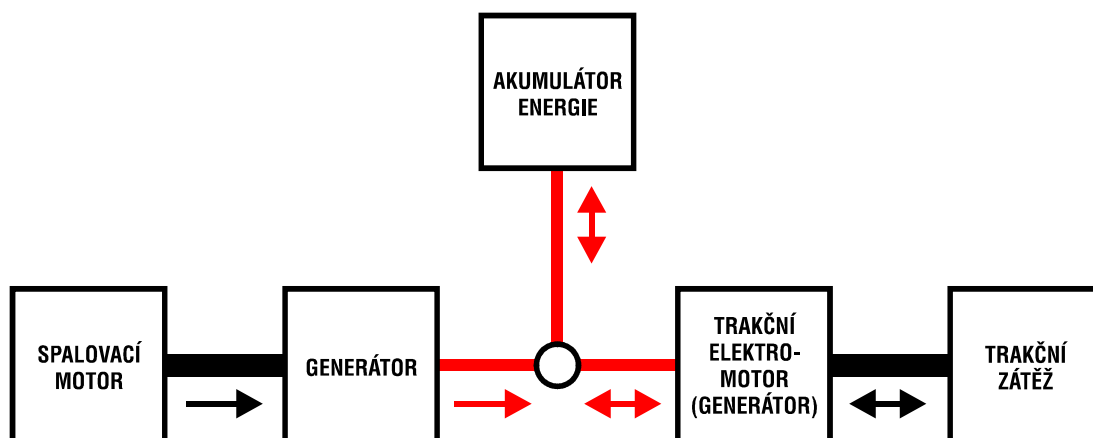
Hybridní pohony mohou mít různé upořádání prvků v energetickém toku pohonu. Odlišné uspořádání pohonů se užívají z důvodu použití různých přenosů výkonu. Dva základní řetězce uspořádání hybridního pohonu jsou sériový a paralelní, popř. třetí kombinovaný. Téměř bez ohledu na uspořádání pohonu můžeme při sestavování hybridního pohonu vybírat zdroje energie a typ přenosu výkonu z několika základních variant [1].

- **Motor** (primární zdroj / sekundární zdroj)
 - Spalovací motor
 - Palivové články
 - Plynová turbína
 - Energie z trolejového vedení
- **Akumulátor energie** (sekundární zdroj)
 - Elektrochemická akumulátorové baterie (různých typů)
 - Setrvačnik
 - Superkapacitor
 - Hydraulický akumulátor
- **Přenos trakčního výkonu** (použitelné v hybridním pohonu)
 - Elektrický
 - Hydraulický
 - Mechanický
 - Smíšený (hydromechanický, elektromechanický aj.)

3.2 Sériové uspořádání

Tento typ uspořádání byl vyvinut v roce 1970 pro elektrické vozidlo, kterému spalovací motor zvyšoval akční rádius. Uspořádání tohoto typu je tedy především vhodné pro vozidla s elektrickým přenosem výkonu. Na Obr. 6 je zobrazeno sériové uspořádání typické pro hybridní vozidla s diesel-elektrickým přenosem výkonu. Tok energie v přenosu výkonu vozidla je znázorněn šipkami. Spalovací motor zde pohání generátor, který dodává energii do akumulátoru a trakčního motoru. Veškerá trakční energie je tedy převáděna elektrickou cestou. V praxi se k pohonu vozidla využívá jednoho či více trakčních motorů dle konstrukce vozidla.

Akumulátor energie plní funkci podle typu hybridního pohonu. U mybridu slouží pouze k zvyšování výkonu vozidla, popř. napájení pomocných pohonů, naopak u plně hybridního vozidla může být použit jako jediný zdroj výkonu. V tomto uspořádání motor prostřednictvím generátoru doplňuje energii do akumulátoru přerušovaně a tedy spalovací motor může pracovat vždy v optimálním pracovním bodě. Je tedy možné použít spalovacího motoru, jehož jmenovitý výkon bude výrazně nižší oproti konvenčnímu provedení vozidla. Přesné dimenzování se však především odvíjí od použitého akumulátoru energie a provozního nasazení vozidla.



Obr. 6 Sériové uspořádání pohonu

(přenos energie: černá – mechanicky, červená – elektricky)

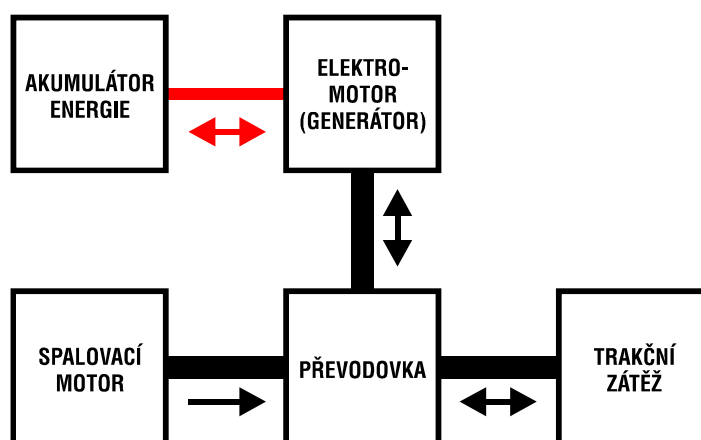
Při rekuperačním brzdění pracuje trakční motor jako generátor, jenž ukládá získanou energii do akumulátoru energie. Zde leží základní problém obecné myšlenky hybridního vozidla, jelikož záleží na schopnosti akumulátoru, jaké procento z rekuperované energie je schopen uložit. To velmi záleží na typu použitého akumulátoru energie.

V kolejové dopravě bývá sériové zapojení využíváno nejčastěji a to z důvodu relativně snadného zabudování do hnacích vozidel s elektrickým přenosem výkonu. Výhodou elektrického přenosu je jeho velmi dobrá regulace s trakční charakteristikou ve tvaru trakční hyperboly, naopak nevýhodou je jeho větší hmotnost a relativně nižší účinnost oproti jiným druhům přenosu, která je dána dvojitou přeměnou energie v řetězci přenosu výkonu.

3.3 Paralelní uspořádání

Paralelní uspořádání je používáno výhradně u vozidel poháněných spalovacím motorem s převodovkou. Jeho použití je tedy oproti sériovému uspořádání velmi rozšířeno v konstrukci automobilů. K pohonu hybridního vozidla s tímto uspořádáním pohonu je využíváno spalovacího motoru i elektromotoru (zvlášť či současně). Oba tyto motory jsou mechanicky propojeny převodovkou, která se u železničních vozidel nejčastěji používá hydrodynamická, popř. hydromechanická. Narozdíl od sériového zapojení se tedy jedná při zabudování hybridního pohonu o zásadní zásah do konstrukce přenosu výkonu vozidla. Mechanické propojení spalovacího motoru a elektromotoru dovoluje plnit elektromotoru hned několik následujících funkcí:

- startér spalovacího motoru,
- zvyšování výkonu spalovacího motoru, popř. funkce jediného zdroje výkonu,
- funkce generátoru při rekuperaci brzděné energie,
- pohon pomocný pohonů.



Obr. 7 Schéma paralelního uspořádání pohonu

(přenos energie: černá – mechanicky, červená – elektricky)

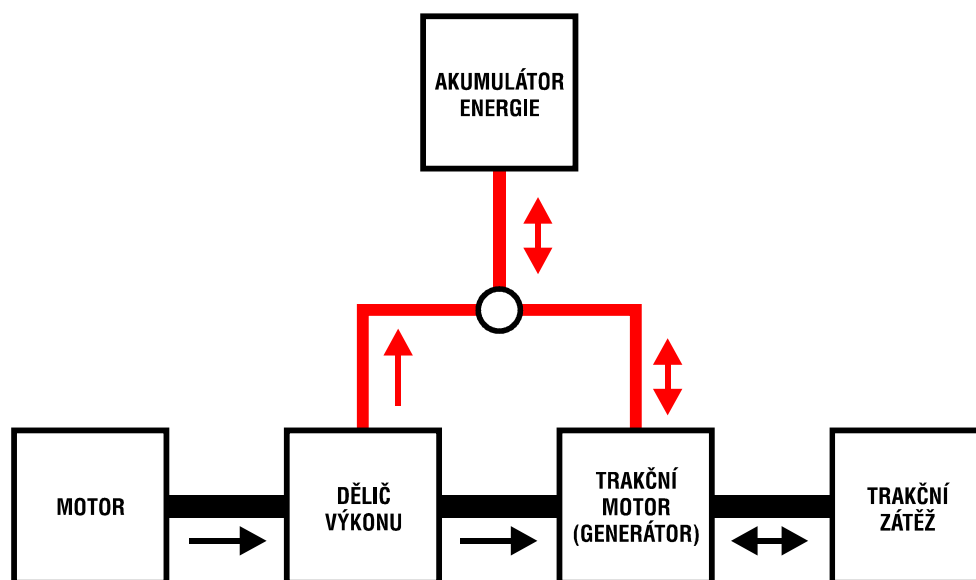
Obdobně jako u sériového uspořádání je možno u těchto vozidel spalovací motor dimenzovat s cca o 60 % menším výkonem v závislosti na typu vozidla a typu použitého akumulátoru energie. Ve všech konstrukčních řešeních nemusí být součástí paralelního pohonu elektromotor. V návrhu hybridního pohonu firmy Voith, která se výhradně zabývá hydraulickým přenosem výkonu, je použito hydraulického akumulátoru energie v součinnosti s hydrostatickým motorem.

Přestože se v dnešní době v železniční oblasti nevyužívá toto paralelní uspořádání tolik jako sériové, má své opodstatněné výhody:

- vhodné pro rekonstrukci vozidel s hydrodynamickou (mechanickou) převodovkou,
- možnost využití jakéhokoliv typu akumulátoru energie,
- relativně vyšší účinnost přenosu výkonu vozidla oproti elektrickému přenosu.

3.4 Kombinované uspořádání

Myšlenka kombinovaného uspořádání vznikla na základě elektromechanického přenosu výkonu, který kombinuje nejlepší vlastnosti obou přenosů, tj. výbornou možnost regulace elektrického přenosu a vysokou účinnost mechanického přenosu. Je tedy už z principu očekávána vyšší účinnost než u elektrického přenosu. Elektromechanický přenos výkonu si nechal patentovat dne 25.2.1936 Josef Sousedík, konstruktér přenosu výkonu na motorovém voze řady M 290 „Slovenská strela“. Dalším výzkumem a aplikací tohoto přenosu výkonu v hybridních vozidlech se v současnosti zabývají na ČVUT v Praze [12].



Obr. 8 Kombinované uspořádání pohonu

(přenos energie: černá – mechanicky, červená – elektricky)

Základním prvkem tohoto uspořádání je elektrický dělič výkonu, kterým je elektrický stroj s rotujícím rotorem a státorem. Výhodou tohoto uspořádání je opět, stejně jako u sériového uspořádání, zachování ideálního pracovního bodu spalovacího motoru. Rotor je spojen s hřídelí spalovacího motoru. Hnací moment spalovacího motoru se přes vzduchovou mezeru přenáší elektromagnetickými silami na stator. Při rozjezdu vozidla, když je jeho rychlost ještě nulová, se celý výkon spalovacího motoru přeměňuje v elektrickém děliči výkonu na elektrický výkon. V době, kdy vozidlo zrychluje, klesají rozdílové otáčky mezi rotorem a státorem děliče, snižuje se tedy přenos energie elektrickou cestou, naopak úměrně tomu stoupá podíl přenosu mechanicky. Výsledkem je snižování toku energie elektrickou cestou, resp. ztrát v elektrických strojích a tím zvýšení účinnosti celého přenosu [8].

Akumulační prvek je připojen na elektrickou větev přenosu. Pokud bychom zrušili mechanickou vazbu mezi děličem výkonu a trakčním motorem, jednalo by se o čisté sériové zapojení. Tento typ uspořádání je vhodný pro stupeň hybridizace vozidla mybrid. Kdy akumulátor energie zvyšuje výkon a ukládá rekuperovanou energii. Na experimentálním stavu ČVUT je použito superkapacitoru jako akumulátoru energie.

4 Akumulátory energie

Akumulátor je technické zařízení na opakované uchování energie. Do tohoto zařízení je tedy nejprve nutné energii vložit, poté je možno teprve energii čerpat nazpět. V dopravní technice je v současnosti nejvíce využívaným akumulátorem energie akumulátorová baterie, fungující na elektrochemickém principu. Dále se v některých zařízeních (např. UPS – záložní zdroj) používají mechanické akumulátory – setrvačníky. Velmi se rozvíjejícími akumulátory jsou superkapacity pracující na elektrostatickém principu a posledním nejméně používaným je hydrostatický akumulátor energie. Další typ akumulátorů SMES – supravodivý magnetický akumulátor se v dopravních systémech zatím nevyužívá.

Pro využití v dopravní technice jsou zapotřebí akumulátory s vysokým měrným výkonem a energií. Dále je požadována vysoká schopnost akumulování maxima rekuperované brzdné energie, dlouhá životnost, teplotní nezávislost a snadná recyklace. Skloubit všechny tyto potřebné vlastnosti do jednoho typu akumulátoru energie je však nemožné, proto je vždy nutné vybrat nejvýhodnější variantu.

4.1 Elektrochemická akumulátorová baterie

Nejstarším a nejběžnějším typem akumulátorů jsou elektrochemické akumulátorové baterie. Pracují na elektrochemickém principu, tudíž procházející proud vyvolá vratné chemické změny, které se projeví rozdílným elektrochemickým potenciálem na elektrodách akumulátoru. Z elektrod se následně dá čerpat na úkor těchto změn elektrická energie zpět. Protože jsou napětí na článcích elektrochemických baterií relativně malá (okolo 1,2–3,7 V), jsou tyto články sdružovány do sériových zapojení pro dosažení vyššího napětí. Pro využití v hybridních pohonech se elektrochemické akumulátory vyznačují nízkým měrným výkonem a dlouhými nabíjecími časy způsobenými zdlouhavou elektrochemickou přeměnou. V současné době máme možnost výběru z více druhů elektrochemických akumulátorových baterií. V následujících podkapitolách jsou uvedeny základní charakteristiky dnes nejpoužívanějších typů elektrochemických akumulátorových baterií [22].

4.1.1 Olověné akumulátorové baterie (Pb-PbO₂)

Existence tohoto typu baterie se datuje od roku 1850. Díky své jednoduchosti byly tyto baterie v minulosti masově produkovány a jsou tudíž nejrozšířenějším typem baterií. Omezení olověného akumulátoru spočívá v tom, že v případě setrvání po delší dobu ve stavu i částečného vybití, dochází na elektrodách k prakticky nevratným změnám tzv. sulfataci, která výrazně snižuje kapacitu baterie. Nejnovějším typem jsou ventilem řízené olověné baterie (VRLA). Jedná se o zapouzdržené akumulátory se zamezením ztrát elektrolytu. Jedním z typů této baterie je typ, kde je elektrolyt zahuštěn do formy gelu, tzv. gelové olověné baterie.

Konvenčně vyráběné olověné baterie jsou konstruovány na vysoký výkon (více než 750 W/kg) a jsou často upřednostňovány z důvodu své nízké výrobní ceny, vysoké bezpečnosti a spolehlivosti. Nevýhodami těchto baterií je nízká měrná energie (30 až 40 Wh/kg), malý výkon za nízkých teplot a malá životnost. Účinnost ukládání energie se pohybuje nad 80 % [1].

Proti využití tohoto typu baterie v hybridních vozidlech hovoří fakt, že při dobytí jakéhokoli množství energie, proběhne jeden dobíjecí cyklus baterie. Takovýchto cyklů vykoná hybridní vozidlo za den velmi mnoho, tudíž životnost olověné akumulátorové baterie by se počítala v řádu jednotek týdnů.

4.1.2 Nikl-kadmiové baterie (NiCd)

Nikl-kadmiové baterie jsou používány v mnoha elektronických zařízeních, přestože byly vyvíjeny pro automobilové použití. Mají vyšší měrný výkon (40 – 60 Wh/kg) a delší životnost než-li olověné akumulátory. Jejich nevýhodou je pořizovací cena, na které se také podílí cena následného recyklování kadmia, které je velmi toxické. Nepříjemným aspektem je také vysoká hodnota samovybíjení, která však například v aplikaci u hybridního pohonu není hlavním výběrovým kritériem.

Dalším problémem nikl-kadmiových baterií je jejich paměťový efekt. Ten se vyznačuje tím, že pokud dobíjíme zcela nevybitou baterii, tak se energetická kapacita baterie snižuje. Je tedy zapotřebí příležitostně nikl-kadmiovou baterii zcela vybit.

4.1.3 Nikl-metalhydridové baterie (NiMH)

Baterie NiMH jsou běžně používané ve spotřební elektronice a patří na počátku 21. století k jednomu z nejčastěji používaných typů elektrochemických akumulátorových baterií. Některé jsou také s úspěchem používány v elektromobilech a dříve také v hybridních automobilech společnostmi Honda a Toyota. Měrný výkon je obdobný jako u nikl-kadmiových baterií, avšak měrná energie je vyšší (60 – 80 Wh/kg). Rychlost nabíjení malých baterií v domácích spotřebičích je nižší než-li u NiCd baterií, avšak u trakčních baterií určených pro hybridní vozidla bylo dosaženo akceptovatelných hodnot. Další negativní vlastností je zvýšená teplotní citlivost, která v praxi při aplikaci v trakční problematice implikuje potřebu kontinuální teplotní diagnostiky [1].

Dále v porovnání s NiCd bateriemi jsou baterie NiMH výrazně méně náchylné k paměťovému efektu, ale stále nedosahují v této oblasti vlastností olověných baterií. Negativním jevem je vysoké procento samovybíjení, které dosahuje hodnoty 30-ti procent za období jednoho měsíce. Recyklovatelnost NiMH baterií je z důvodu absence kadmia o mnoho lepší než u NiCd baterií. Hlavním problémem NiMH baterií je jejich vysoká cena, srovnatelná s NiCd bateriemi, která je dána cenou vstupních komponentů, resp. především niklu.

4.1.4 Lithium-ionové baterie (Li-ion)

Další typ baterií, které jsou běžně používány ve spotřebitelské elektronice. Jsou charakterizovány vysokým měrným výkonem a energií (80 – 150 Wh/kg). Dalšími výhodami jsou vysoká účinnost, nízká hodnota samovybitení a recyklovatelnost je také akceptovatelná. Komerční využití je však stále závislé na vysoké výrobní ceně a krátké životnosti. Vývoj vedoucí k možnosti využití těchto baterií v hybridních vozidlech stále probíhá. Podobné vlastnosti mají i baterie lithium-polymerové (Li-Pol), které pracují na obdobném principu.

4.1.5 Sodík-nikl chloridové (Na-NiCl₂)

Tento typ baterií se řadí mezi vysokoteplotní baterie, tedy baterie využívající roztavenou sůl jako elektrolyt. Tento směr vývoje se zdá být velmi perspektivním ve vývoji baterií. Baterie byla vynalezena již v roce 1985 a je spíše známá pod názvem baterie ZEBRA. Teplota tuhnutí elektrolytu je 157 °C a pracovní teplota elektrolytu se pohybuje v rozmezí 270 až 350°C, což značně znesnadňuje konstrukci článků [18].

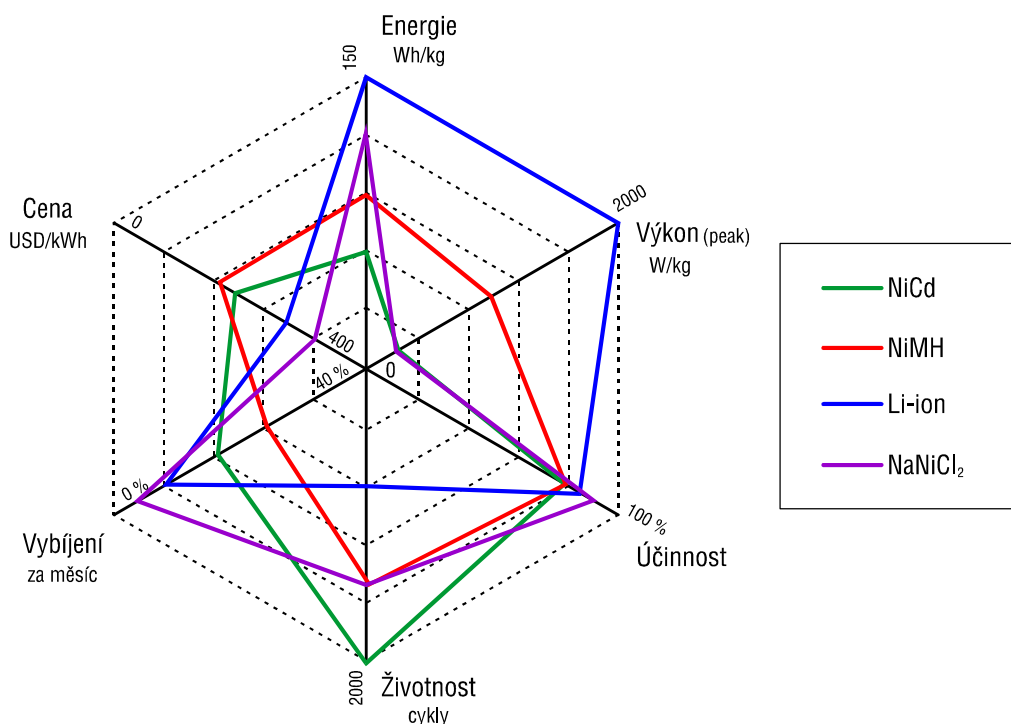
Tyto baterie se stejně jako baterie Li-ion vyznačují vysokým měrným výkonem a energií (90 – 120 Wh/kg). Předchozí parametry však kombinují s vynikající cyklovou životností, v porovnání s ostatními typy baterií, a také vysokou účinností. Nevýhodou tohoto typu je vysoká teplota elektrolytu, která snižuje bezpečnost při havárii baterie a také velmi nízká pohltivost energie při nabíjení. Přesto jde o baterie s vlastnostmi velice vhodnými pro trakční účely ve vozidlech. Jejich výrobní cena je avšak prozatím příliš vysoká.

4.1.6 Porovnání užitečných vlastností

Snaha o smysluplné porovnání výkonnosti jednotlivých typů baterií je velmi složitá. Mnoho z výše uvedených typů je stále ve fázi vývoje, takže je možno očekávat výrazné zlepšení užitečných vlastností některých typů baterií. V Tab. 2 jsou uvedeny základní hodnoty charakterizující jednotlivé typy baterií. Z ní, a předešlých kapitol, vyplývá, že pro využití v hybridním pohonu vozidla se jeví jako vhodné baterie typu NiMH, popř. Na-NiCl₂.

Tab. 2 Charakteristiky některých typů akumulátorových baterií [18]

	Pb-PbO ₂	NiCd	NiMH	Li-ion	Na-NiCl ₂
Energie [Wh/kg]	30 – 40	40 – 60	60 – 90	80 – 150	90 – 120
Trvalý výkon [W/kg]	75	120	110	220	180
Špičkový výkon [W/kg]	700	200	1000	2000	200
Vybitení za měsíc [%]	8	20	30	10	0
Životnost [cykly]	500	2000	1500	800	1500
Účinnost [%]	70	80	80	85	90
Pracovní teplota [°C]	0 – 45	0 – 50	-40 – 50	-40 – 60	270 – 350



Obr. 9 Porovnání vlastností nejpoužívanějších typů baterií [18]

4.1.7 Nabíjení elektrochemických akumulátorových baterií

V hybridních pohonech je z důvody snahy o uložení co největší části z rekuperované brzdné energie důležitým parametrem schopnost baterie rychle pohltit energii. Tato vlastnost se odvíjí od velikosti maximálního nabíjecího proudu. Ten se výrazně liší u jednotlivých typů baterií, pohybuje se od hodnoty 0,1.C (C – kapacita baterie [Ah]) přibližně do 5.C.

U olověných baterií se většinou udává hodnota nabíjecího proudu 0,2.C. Kritériem pro ukončení nabíjení je nárůst napětí na určitou úroveň, obvykle 2,3 V.

Dále u niklových akumulátorů (NiCd, NiMH) je možno použít tzv. rychlonabíjení, tj. nabíjení proudem 1.C (u NiCd i více), toto nabíjení však nezbytně vyžaduje automatické ukončení nabíjení. Většinou se pro nabíjení používá metoda typu „delta-peak“, který ukončuje nabíjení zpravidla při poklesu napětí akumulátoru cca o 50 mV (NiCd) nebo 20 mV (NiMH).

Nabíjecí zařízení baterií Li-ion musí být vybaveno řízením, jež zajišťuje, že nebude překročeno maximální povolené napětí 4,2 V na článek a maximální nabíjecí proud nepřekročí výrobci obvykle udávaných 0,7.C, v žádném případě ne více než 1.C.

Co se týče vybíjení elektrochemických akumulátorových baterií, tak vybíjecí křivka je velmi plochá, tzn. pro akumulátory je typická malá změna napětí v průběhu cca 90 % doby vybíjení. Z tohoto důvodu je velmi obtížné zjišťovat okamžitý stav akumulátoru dle měřeného napětí na člancích baterie.

4.2 Setrvačnick

Setrvačnick je elektromechanický systém akumulování energie založený na principu kinetické energie rotujících hmot. Konstrukčně se tělo setrvačnicku skládá z hřídele, na níž je integrován rotor setrvačnicku a elektrický stroj. Společně tedy rotor setrvačnicku s elektrickým strojem vytváří rotující hmotu, díky níž můžeme ukládat energii, která se převádí z elektrické na kinetickou a naopak.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot I_m \cdot \omega^2 \quad (1)$$

E_k – kinetická energie

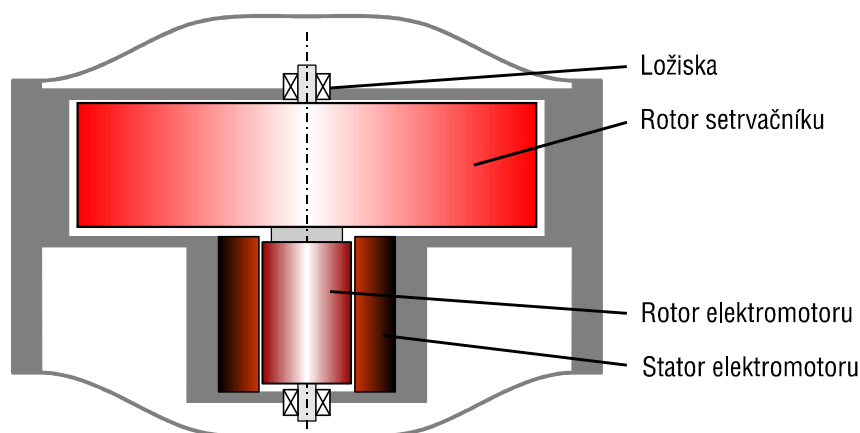
I_m – moment setrvačnosti

ω – uhlová rychlost

$$I_m = \frac{1}{2} \cdot r^2 \cdot m \quad (2)$$

r – poloměr tělesa setrvačnicku

m – hmotnost setrvačnicku



Obr. 10 Schéma setrvačnicku

Když je elektrická energie transformována na kinetickou, pracuje elektrický stroj jako elektromotor, toto nastává v případě akumulace brzděné energie. Pokud rekuperovaná energie již nestačí na další urychlení setrvačnicku, je elektromotor odpojen z obvodu. V případě potřeby akumulované energie je kinetická energie opět transformována na elektrickou, tzn. že elektrický stroj pracuje jako generátor.

Vstupní a výstupní výkon je limitován typem použitého motoru / generátoru a také použitou výkonovou elektronikou. Díky jejímu nedávnému vývoji na poli IGBT a FET tranzistorů mohou být setrvačnick použity pro akumulaci energie v pohonech s velkými výkony a výkonovými špičkami v rozsahu od kilowattů po stovky megawatt.

Rotující setrvačnick avšak postupně ztrácí svou nabytou energii díky působení odporů v ložiskách, aerodynamickému odporu aj. Proto se např. odčerpává atmosféra uvnitř setrvačnicku nebo se nahrazuje inertním plynem. Dále se mohou u stacionárních setrvačnicků

pro další snížení odporů použít elektromagnetická ložiska, která avšak u dopravních prostředků nepřicházejí v úvahu, proto je u nich užíváno valivých ložisek .

Z rovnice (1) vyplývá, že množství akumulované energie závisí kvadraticky na úhlové rychlosti rotoru setrvačnicku. Dále vyplývá z rovnice (2) taktéž kvadratická závislost momentu setrvačnosti na poloměru rotoru. Tedy hlavním parametrem setrvačnicku je rychlost rotace rotoru a také poloměr rotoru. Hmotnost rotujících částí je tedy méně významná. Samozřejmě že rovnice (2) platí pro zjednodušený případ válcového rotoru setrvačnicku, ale pro základní rozvahu je postačující.

Z předchozího vyplývá, že je důraz kladen na úhlovou rychlost a rozložení hmot. Proto je u nejmodernějších setrvačnicků rotor vyroben z karbonového kompozitu. Výhodou tohoto materiálu oproti oceli je lepší odolnost proti vzniku trhlin, která dovoluje použití vyšší úhlové rychlosti, odpovídající obvodové rychlosti cca 1,2 km/s. Nevýhodami karbonového kompozitu oproti oceli jsou relativně malá hustota a poměrně složitá výroba.

Nepříznivým jevem pro zabudování setrvačnicku do vozidla je gyroskopický efekt bránící natáčení osy rotace setrvačnicku. Z tohoto důvodu se setrvačnický dosazují do vozidel v poloze s vertikální osou rotace.

Životnost setrvačnicku se udává okolo 5 miliónů cyklů, což odpovídá přibližně 20 letům provozu v aplikaci u kolejového vozidla. Tato hodnota životnosti je desetinásobně vyšší než u dnešních superkapacitorů, popř. ještě výraznější než u akumulátorových baterií.

Hlavní parametry setrvačnicku [22]:

- materiál rotoru setrvačnicku – kompozit (karbonové vlákno / pryskyřice)
- motor / generátor – synchronní motor s permanentními magnety
- rychlost rotace rotoru – 25 000 až 30 000 otáček/min. (minimum cca 12 500 ot./min.)
- energická kapacita – 2 až 12 kWh, avšak pouze 75 % této energie lze využít
- energetická hustota – 20 kWh/m³
- ztrátový výkon při chodu na prázdno – 2,5 až 7 kW
- doba nabíjení / vybíjení – střední (mezi superkapacity a elektrochem. akumulátory)
- účinnost – větší než 90 %
- výrobci – např. Magnet-Motor GmbH Starnberg, WTZ Rosslau GmbH

Setrvačnicku (2kWh, 150 kW) se používá v městské autobusové dopravě již od roku 1988. V aplikaci v železničním provozu je možno setrvačnick uplatnit v nestacionární formě, tedy ve vozidle, především v konstrukci regionálních vozidel s frekventovaným zastavováním (Coradia Lirex), popř. by se dalo uvažovat i o aplikaci v posunovacích lokomotivách. Z komerčního hlediska je ovšem zabudování setrvačnicku stále velmi výraznou investicí. S nynějším rozvojem superkapacitorů, i přes jejich některé horší vlastnosti, je rozšíření setrvačnicků jako akumulátorů energie nepravděpodobné.

4.3 Superkapacitor

Perspektivním akumulátorem energie je superkapacitor (neboli ultrakapacitor, dvouvrstvý elektrochemický kondenzátor). Je „střední cestou“ mezi klasickými kondenzátory a elektrochemickými akumulátory. V principu jde o elektrolytický kondenzátor technicky upravený pro dosažení vysoké kapacity a krátkých vybíjecích a nabíjecích časů. Elektrody superkapacitoru tvoří práškový uhlík nanesený na hliníkovou fólii. Dvě elektrody jsou odděleny fólií z polypropylenu a prostor mezi nimi je vyplněn tekutým elektrolytem.

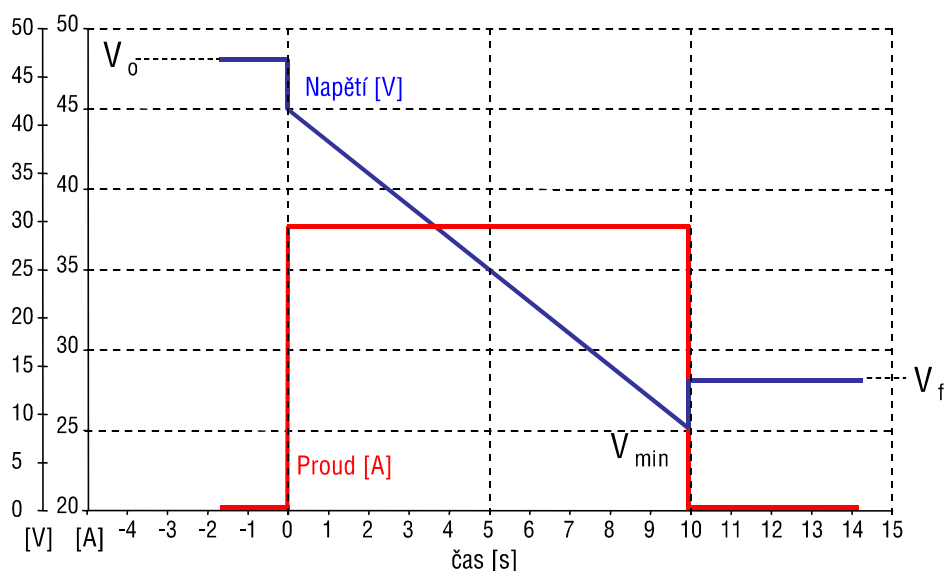
Elektrické vlastnosti superkapacitorů se dají srovnat s elektrochemickými bateriemi. Malá hodnota vnitřního odporu umožňuje rychlé vybití a nabíjení. Špičkový výkon dodaný superkapacitorem dosahuje hodnot řádu kW/kg, přibližně desetinásobek oproti bateriím. Typický nabíjecí čas u superkapacitorů je mezi 6 až 300 sekundami. Pro uložení rekuperované brzdě energie se využívají superkapacitory s maximální dobou nabíjení okolo 300 s. Elektrické parametry superkapacitoru jsou zachovány i při nízkých teplotách do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a maximální provozní teplota se pohybuje do $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Superkapacitory jsou ideální pro použití v aplikacích, kde je potřeba dodávat časově omezené špičkové proudy. Tato vlastnost je výhodná pro akumulaci energie vznikající při brzdění. Maximální napětí závisí na typu, pohybuje se v rozmezí 1,2 V až 3 V. Pro využití v trakčních obvodech vozidel je tedy potřeba, obdobně jako u baterií, spojovat prvky do sérií. Dodaná energie superkapacitorem se dá vyjádřit pomocí rovnice (3) kde rozhodujícími parametry jsou především počáteční a koncové napětí [24].

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_0^2 - U_f^2) \quad (3)$$

C – kapacita kondenzátoru

U_0 – počáteční hodnota napětí

U_f – efektivní koncová hodnota napětí (viz Obr. 11)



Obr. 11 Průběh napětí a proudu při vybíjení

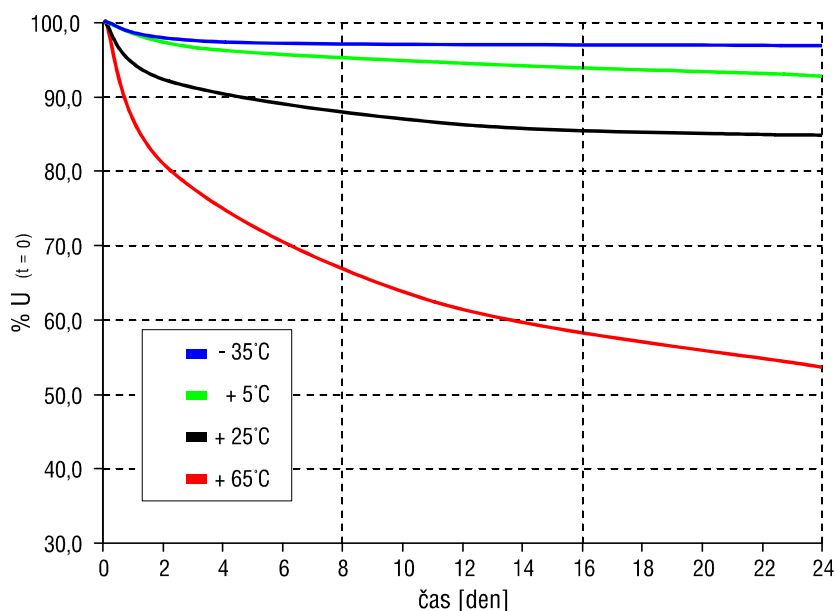
Životnost superkapacitoru je definována poklesem kapacity na 80 % jmenovité hodnoty nebo zvýšením sériového odporu na dvojnásobek jmenovité hodnoty. Tyto hodnoty se mění každým nabitím a vybitím. Životnost superkapacitorů Maxwell je nejméně 500 tisíc cyklů, nové typy mají životnost milión cyklů. Je tedy o několik řádu vyšší než u akumulátorů. Samovolné vybíjení superkapacitorů, které je kromě ceny (v roce 2006 – 270 Kč/Wh) velmi kritizovanou vlastností, není při aplikaci ve vozidlech nepříznivou vlastností. K výrazným ztrátám dochází až při vyšších teplotách, viz Obr. 12.

Hlavní parametry superkapacitorů:

- dlouhá životnost (0,5 až 1 milion cyklů)
- schopnost rychlého nabíjení a vybíjení (6 – 300 s)
- rozsah pracovních teplot (-35 °C až 105 °C)
- vysoká energetická a výkonová hustota (viz Tab. 3)
- výborná účinnost při nižších teplotách (do 20 °C)

Tab. 3 Porovnání parametrů olověné akumulátorové baterie a superkapacitoru [24]

	Olověná baterie	Superkapacitor	Běžný kondenzátor
Nabíjecí čas	1 – 5 h	0,3 – 30 s	$10^{-3} - 10^{-6}$ s
Vybíjecí čas	0,3 – 3 h	0,3 – 30 s	$10^{-3} - 10^{-6}$ s
Energie (Wh/kg)	10 – 100	1 – 10	<0,1
Výkon (W/kg)	< 1 000	< 10 000	< 100 000
Životnost	1 000	> 500 000	> 500 000
Účinnost	0,7 – 0,75	0,85 – 0,98	> 0,95



Obr. 12 Průběh úbytku napětí superkapacitoru v závislosti na teplotě [24]

4.4 Hydraulický akumulátor

Hydraulické akumulátory můžeme z jistého hlediska považovat za obdobu elektrických akumulátorů. I ony shromažďují energii, kterou v případě potřeby uvolňují do hydraulického systému. Rozdílem od elektrického akumulátoru je možnost úplného rychlého vybití akumulátoru.

Ukládání kinetické energie vozidla při brzdění se v tomto případě děje do energie potenciální. Během akcelerace se tato energie opět využívá. Toho lze docílit pomocí hydrostatického převodu vybaveného hydraulickou jednotkou napojenou na převod vozidla, která během brzdění funguje jako hydraulické čerpadlo a během akcelerace jako hydraulický motor. Práce prováděná hydraulickou jednotkou při zpomalování vozidla se ukládá ve formě stlačeného plynu či jiného média v akumulátoru. Během akcelerace tento stlačený plyn pohání hydraulickou jednotku a zrychluje pohyb vozidla [13].

Hydraulický akumulátor je v podstatě nádoba, ve které se akumulace energie děje buď stlačováním pružiny nebo plynu případně se tlak v nádobě vyvozuje pístem. Podle konstrukce jsou rozeznávány tyto akumulátory: závažové, pružinové, plynové

Plynové akumulátory pracují na pneumohydraulickém principu. Je v nich obsažen stlačitelný inertní plyn (nejčastěji dusík, jenž nezpůsobuje rychlé stárnutí oleje a je nehořlavý) sloužící k akumulaci tlakové energie kapaliny.

Plynové akumulátory dělíme [13]:

- pístové – do 400 dm³ a 35 MPa
- vakové – do 200 dm³ a do 35 MPa
- membránové – do 200 dm³ a do 35 MPa
- plynové akumulátory s přímým stykem plynu a kapaliny – pro velké objemy a tlaky až do 45 MPa

Hydraulický akumulátor energie je možno využít v pohonech vozidel silničních i železničních. Nejčastěji je využíván v mechanických pohonech nákladních automobilů. V konstrukci nákladních vozidel je dnes technologie hydraulických akumulátorů používána společností Bosch Rexroth AG, která u těchto vozidel využívá rekuperačního brzdění. Dále jsou také vybaveny funkcí motoru start/stop, která také snižuje energetickou náročnost vozidla. Společnost garantuje u takto vybavených vozidel úsporu paliva do 30 %.

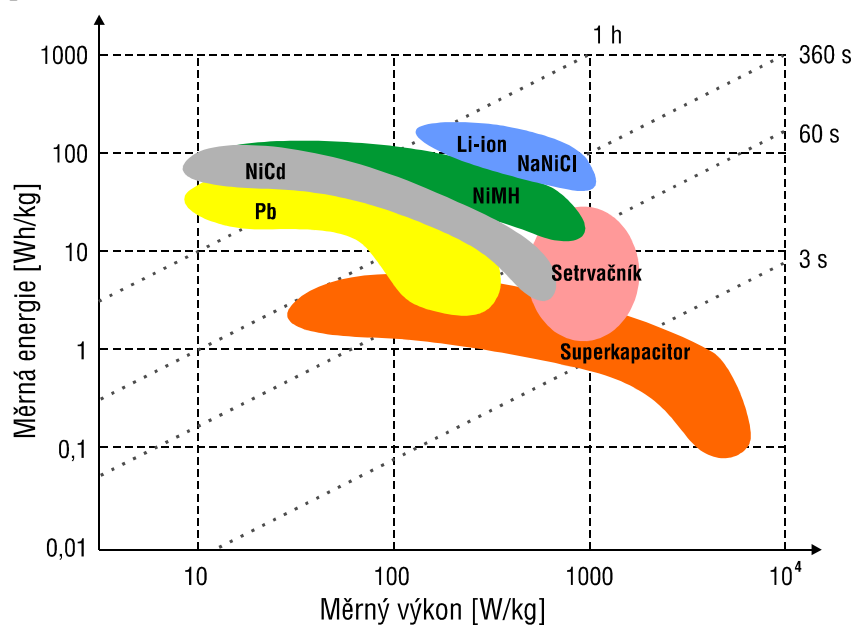
V železničním průmyslu se tímto způsobem akumulace energie a jeho využitím v hybridním pohonu zabývá společnost Voith Turbo GmbH, která se zabývá vývojem a výrobou hydrodynamických převodů a vozidel s tímto přenosem výkonu. Tato společnost vyvinula pohon EcoPack, do něhož zabudovala kromě využívání tepla spalín SteamDrive k dalšímu zvyšování výkonu, také systém HydroBrid, který umožňuje akumulaci rekuperované brzděné energie do hydraulických akumulátorů.

4.5 Porovnání jednotlivých typů akumulátorů energie

Při výběru vhodného akumulátoru energie pro danou aplikaci do kolejového vozidla je možno brát jako nejdůležitější parametry měrný výkon [W/kg] a měrnou energii [Wh/kg], viz Obr. 13. Je potřeba především, aby akumulátor svým výkonem dostával k pokrytí špičkového výkonu vozidla při jeho akceleraci, resp. při rekuperačním brzdění. Dále je na úvaze u konkrétního vozidla zdali akumulátor energie svou hmotností zhorší dynamické vlastnosti vozidla či naopak přispěje k zvýšení adhezní hmotnosti vozidla, např. u posunovacích vozidel.

Při vzájemném porovnání jednotlivých typů akumulátorů energie použitelných ve vozidle s elektrickým přenosem výkonu lze říci, že nevyužívanější elektrochemické akumulátorové baterie se sice vyznačují (podle typu) vysokou měrnou energií, ale jejich měrný výkon je podstatně nižší v porovnání se setrvačником nebo superkapacitorem. Hmotnostně lépe vychází tedy setrvačnik, kdy setrvačnik o hmotnosti 150 kg má stejnou kapacitu jako 600 kg olověných baterií. Další výhodou je dlouhá životnost. Nevýhodami setrvačniku jsou jeho výrobní náklady a problémy s ložiskováním, které mají za důsledek větší ztráty. Není ho možno tedy s konvenčními ložisky využít pro delší uskladnění energie. Jeho použití je vhodné ve vozidlech s častým střídáním rozjezdu a brzdění. Nejvýhodnějším typem akumulátoru energie pro akumulaci energie při špičkových výkonech jsou superkapacity, které mají vysoký měrný výkon, avšak při relativně nižší měrné energii. Jejich nevýhodou je především cenová hladina na niž se pohybují.

Z možných alternativ je tedy potřeba volit vždy podle dané aplikace. U posunovacích lokomotiv, je výhodná kombinace elektrochemických akumulátorových baterií, které by plnily funkci hlavního akumulátoru, se superkapacity schopnými akumulovat energii ve výkonových špičkách.



Obr. 13 Rozdělení akumulátorů energie [7], [20]

5 Přehled aplikací hybridního pohonu

Hybridní pohony jsou již několik let aplikovány v konstrukci kolejových vozidel. Jedno století stará myšlenka hybridního pohonu se tedy teprve s vývojem elektrochemických akumulátorových baterií či elektrostatických superkapacitorů stala konkurenceschopná. Dřívější akumulátory energie bojovaly s nízkou účinností, velkou měrnou hmotností na množství uložené energie a také vysokými pořizovacími náklady. Teprve s nedávným technickým pokrokem nových výkonových elektronických prvků je možná účinná regulace výkonu.

5.1 ČKD – posunovací lokomotiva TA436.0 (718)

V roce 1986 byl v ČSSR postaven prototyp čtyřnápravové hybridní posunovací lokomotivy pod označením TA436.0501 (později 718.501). Tento prototyp měl za úkol potvrdit životaschopnost principu hybridního pohonu v konstrukci posunovacích lokomotiv. Výkonové parametry lokomotivy byly navrženy odpovídající lokomotivám řady T457.0 (730), jejichž výroba právě probíhala, aby bylo možno v provozu porovnat hybridní prototyp s konvenčními lokomotivami.

Hlavní parametry lokomotivy řady 718 [14]:

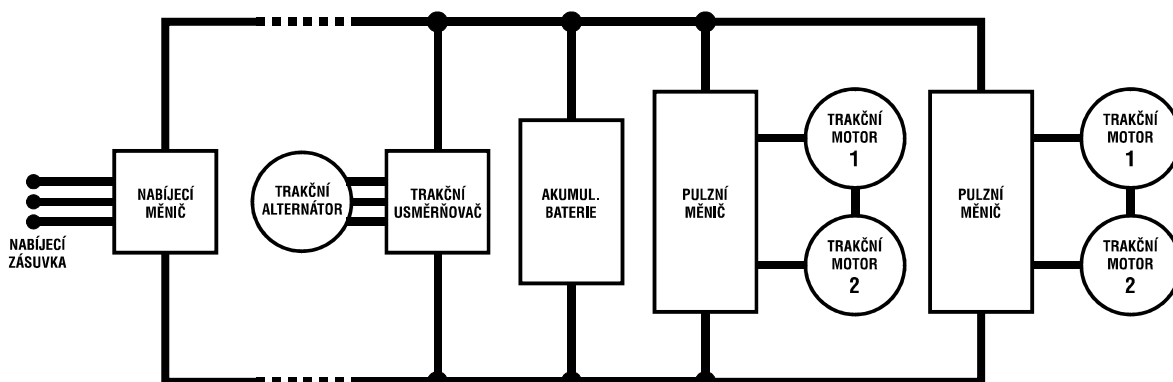
Hmotnost.....	64 t
Max. rychlost.....	60 km/h
Ekvivalentní výkon.....	600 kW
Naftový motor.....	LIAZ – M637
Výkon.....	189 kW
Trakční baterie	NKS 300
Počet článků.....	480
Druh.....	nikl-kadmiové
Výkon.....	400 kW (krátkodobě)
Energetická kapacita.....	172,8 kWh
Jmenovité napětí	576 V
Jmenovitá kapacita.....	300 Ah
Hmotnost	11,5 t

Tab. 4 Porovnání spotřeby paliva na posunech zálohy v ŽST Olomouc [14]

Druh posunu	Spotřeba paliva dm ³ /h		Poměr spotřeb
	730 (T457)	718 (TA436)	
Posun na pahrbku	14,92	13,09	0,88
Odrazy a rozvoz zátěže	13,62	10,33	0,76
Přísun k pahrbku	23,53	25,56	1,09
Přetahy zátěže	12,87	10,86	0,84

Z výsledků zkoušek v posunové službě v ŽST Olomouc se ukázalo, že trakční vlastnosti jsou obdobné s lokomotivami řady T457.0. Prototyp byl schopný krátkodobě pracovat jako diesel-elektrická lokomotiva o výkonu 600 kW. Dynamika posunu prototypu byla velmi dobrá, lokomotiva disponovala značným nárůstem síly a výkonu při rozjezdu, a to především díky vlastnostem akumulátorové baterie. Dále byl prototyp TA436.0 první posunovací lokomotivou u ČSD vybavenou elektrodynamickou brzdou, která potvrdila značné výhody elektrodynamické brzdy v provozu na posunu. Docházelo kromě značného snížení opotřebení zdrží a snadného ovládání vozidla, také ke zkrácení zábrzdných drah lokomotivy, což zefektivňovalo posun.

Lokomotiva řady TA436.0 byla schopna v provozu na posunu nahradit řadu T457.0 ve všech druzích posunu. Náhrada však nebyla efektivní v oblasti monotónního posunu na svažném pahrbku, kde se nemohly objevit výhody rekuperačního brzdění a pohon dlouhodobě pracoval v oblasti vyššího výkonu. Nejvíce se hybridní lokomotiva osvědčila při přestavovacím posunu, tedy v takovém provozu, kde se často střídaly rozjezdy s brzděním na krátké dráze. Zde byla dosahována úspora paliva až 24 %, více viz Tab. 4 [14].



Obr. 14 Trakční obvod lokomotivy TA436.0



Obr. 15 Lokomotiva 718 na brněnském výstavišti v roce 1989 [16]

5.2 RailPower – lokomotivy GreenGoat a Green Kid

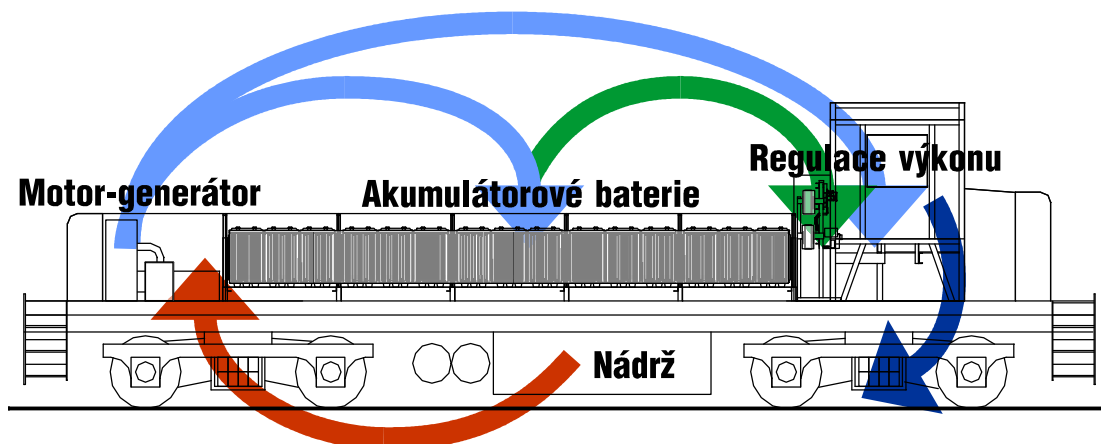
Ve Spojených státech amerických se společnost RailPower Technologies Corporation zabývá rekonstrukcemi diesel-elektrických lokomotiv, zejména posunovacích, jejichž průměrné stáří v severní Americe dosahuje 30 až 40 let. Jedná se o lokomotivy o výkonech od 500 do 2000 kW. Jedná se o radikální rekonstrukci, kdy z původní lokomotivy (GP9, GP30,...) zůstává pouze hlavní rám a pojezd. Na původní rám dochází k osazení nového hnacího spalovacího motor-generátoru, ventilem řízených olověných baterií (zapouzdřené akumulátory se zamezením ztrát elektrolytu) a výkonové elektroniky IGBT, která umožňuje individuální řízení dvojkolí. Lokomotivy také projdou kompletní rekonstrukcí kapotáže, čímž se zlepší výhledové poměry ze stanoviště strojvedoucího [26].

Hlavní parametry lokomotiv RailPower [17]:

Lokomotiva	GG20B Green Goat	GK10B Green Kid
Hmotnost	127 t.....	112,5 t
Max. rychlost.....	96,5 km/h.....	48,3 km/h
Ekvivalentní výkon	1 400 kW.....	700 kW
Naftový motor.....	Caterpillar C9.....	Deutz TD226B-6
Výkon.....	200 kW.....	90 kW
Trakční baterie		
Druh.....	ventilem řízené olověné baterie	
Akumulovaná energie.....	720 kWh	360 kWh
Jmenovité napětí	600 V	300 V
Jmenovitá kapacita.....	1 200 Ah.....	1 200 Ah

Rekonstrukcí dosažené výhody lokomotiv RailPower:

- Snížení spotřeby paliva o 40 až 60 %.
- Podstatné snížení znečištění životního prostředí, díky redukcí emisí oxidů dusíku o 80 až 90 % a prachových částic.
- Snížení hluku vozidla.



Obr. 16 Princip toku energie v lokomotivách RailPower Technologies Copr.

V letech 2004 a 2005 bylo provedeno společností IDC Distribution Service Inc. roční měření na hybridní lokomotivě GK10B Green Kid a konvenční lokomotivy EMD SW900. Lokomotivy řady SW900 byly vyráběny v letech 1953 až 1969 o celkovém počtu 260 kusů. Jsou poháněny 8-válcovým motorem EMD 567 C, který jim dává výkon 670 kW.

Oba typy lokomotiv byly nasazeny v posunové službě, kde se za roční provoz ukázala u hybridního stroje 53% úspora paliva oproti konvenčnímu stroji. V produkci škodlivin do ovzduší došlo také k jednoznačně kladnému výsledku ve prospěch hybridní lokomotivy, kde poměr činil 55 %. Další výsledky jsou uvedeny v Tab. 5. Je však otázkou nakolik jsou výsledky zkoušek ovlivněny technickou zastaralostí lokomotiv SW900 a nakolik je úspora paliva způsobena principem a provedením hybridního pohonu na lokomotivě GK10B.

Třetím kladným přínosem bylo také výrazné snížení emise hluku v posunové službě a to i přesto, že menší motor v lokomotivě GK10B byl velmi často v běhu na dobíjení baterií i při odstavení lokomotivy.

Tab. 5 Porovnání spotřeby paliva a emisí škodlivin [26]

	Standardní SW900	Hybridní GB10B Green Kid
Ujetá vzdálenost [km]	1010	1086
Doba provozu [h]	2269	2 347
Spotřeba paliva [l]	84 523	39 549
Emise CO ₂ [kg]	230 747	107 968
Emise CH ₄ [kg]	292	136
Emise N ₂ O [kg]	27 521	12 877
Celkem (ekvivalent CO ₂) [kg]	268 560	120 981



Obr. 17 Posunovací lokomotiva Green Goat společnosti NYSW (foto: Pisani R.)

5.3 Bombardier – systém MITRAC

Tento systém umožňující zefektivnit ekonomiku provozu lehkých příměstských jednotek snížením energetické náročnosti vozidla až o jednu třetinu byl vyvinut společností Bombardier Transportation. Systém MITRAC je založen na superkapacitorech jako nosičích akumulované energie. Superkapacitory jsou doplněny o prvky IGBT, které umožňují řízené nabíjení a vybíjení superkapacitorů dle provozních podmínek vozidla [27].

Testování tohoto systému probíhalo čtyři roky v městské dopravě v Mannheimu na vozidle GTN6. Systém MITRAC je umístěn na střeše vozidla a je paralelně připojen na DC obvod trakčního DC/AC měniče dvou motorů. Takto je osazena pouze polovina vozidla, aby bylo možno provést porovnání účinnosti systému MITRAC a klasické rekuperace do trolejového vedení. Akumulátor energie MITRAC u tohoto vozidla je schopen dodávat vozidlu výkon 300 kW, při hmotnosti 477 kg a rozměrech 1 900 x 950 x 455 mm. Chlazení akumulátoru MITRAC je nuceně vzduchem.

Hlavní parametry jednotky GTN6 se systémem MITRAC [10]:

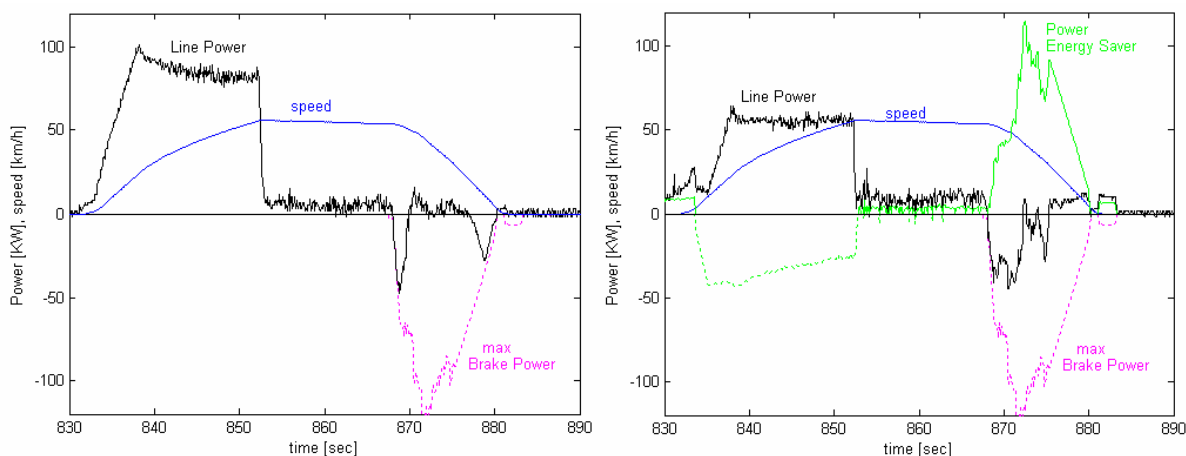
Hmotnost.....	35,8 t
Výkon motorů.....	380 kW
Parametry superkapacitorů	systém MITRAC
Počet superkapacitorů.....	640 (160 zapojených do série)
Maximální výkon	300 kW
Akumulovaná energie.....	850 Wh (využitelnost 75 %)
Jmenovité napětí	400 V
Hmotnost.....	477 kg



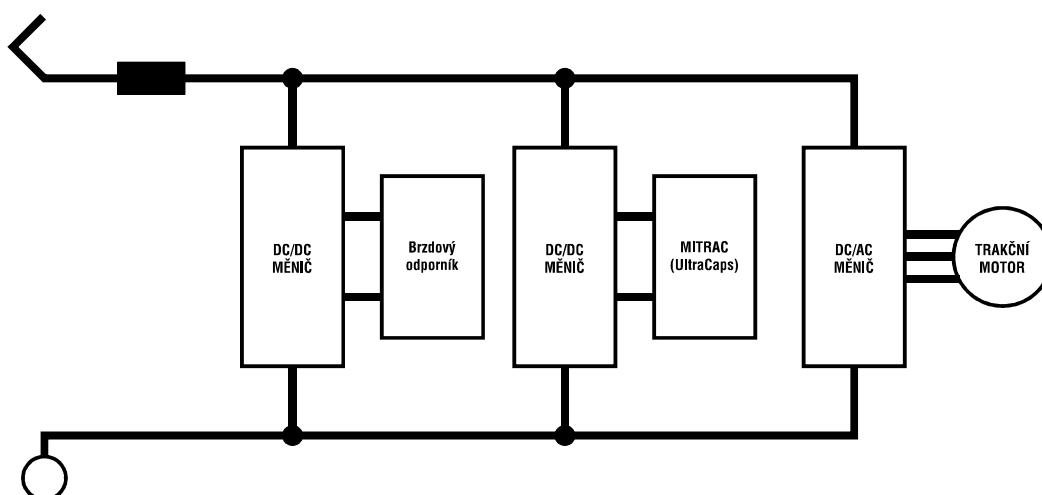
Obr. 18 Umístění systému MITRAC na střeše vozidla GTN6 [10]

Výsledky rozsáhlých zkoušek prototypu ukázaly velkou podobnost s očekávanými hodnotami. Na Obr. 19 je znázorněn průběh rychlosti a odebíraného výkonu z troleje, popř. z akumulátoru energie. Jedná se o ekvivalentní výkon na jeden trakční motor o výkonu 85 kW. V případě jízdy bez akumulátoru energie se při brzdění jen velmi malé množství rekuperované energie cca 35 % je schopno vrátit zpět do trolejového vedení. Naproti tomu vozidlo s akumulátorem energie odebírá při rozjezdu z troleje pouze okolo 50 kW (60 %), zbytek je dodán z akumulátoru. Také při rekuperaci brzděné energie je větší část energie uložena do akumulátoru a zbylá část je vrácena zpět do troleje. Dále při nezávislém běhu vozidla, tj. při staženém sběrači, bylo dosaženo na dráze 500 m rychlosti 26 km/h.

Společnost Bombardier plánuje dosadit tento systém i do nově vyráběných čtyřvozových diesel-elektrických jednotek. Systém MITRAC o kapacitě 1 800 Faradů by měl mít schopnost akumulovat 9 kWh energie při 72% využitelnosti. Cílem tohoto kroku je snížení energetické náročnosti vozidla o 25 – 40 % a zvýšení měrného výkonu z 8,2 kW/t na 9 kW/t při celkovém výkonu jednotky 2 x 662 kW. Takováto jednotka by měla být schopna dosáhnout větší akcelerace při rozjezdu přibližně o 20 %. Dále je s tímto systémem možno využít vypínání dieselového motoru např. ve stanicích za účelem snížení hluchnosti [27].



Obr. 19 Měření bez (vlevo) a bez (vpravo) systému MITRAC do rychlosti 50 km/h [10]



Obr. 20 Trakční obvod vozidla s akumulátorem energie MITRAC [10]

5.4 Hitachi – motorové vozy NE Train a KIHA E200

Japonská společnost Hitachi, Ltd. vyvinula ve spolupráci s dopravcem The East Japan Railway Company (JR East) první hybridní motorový vůz pod názvem NE Train (New Energy Train). Základním inovačním prvkem tohoto prototypového vozu bylo dosažení hybridního pohonu založeného na sériovém uspořádání diesellového spalovacího motoru a lithium-ionových baterií.

Vozidlo NE Train prošlo v roce 2003 rozsáhlými zkouškami, při kterých najezdilo 28 000 km. Výsledkem zkoušek bylo snížení spotřeby paliva do 20 % v porovnání s konvenčním diesellovým vozidlem. Emise škodlivin vozidla NE Train do okolí byly vynikající. Došlo přibližně k 50% snížení emisí oxidů dusíků, oxidu uhelnatého a prachových částic. Vozidlo také vykazovalo nižší hlučnost, která byla dosažena vypínáním spalovacího motoru při dojezdu do stanice a jeho opětovné nastartování až při rychlosti 30 km/h.

Po zkušenostech s prototypem NE Train si dopravce JR East objednal dvoudílnou motorovou jednotku Kiha E200, u níž je hybridní pohon řešen principálně stejným způsobem. Společnost Hitachi se také dále zabývá rozvinutím myšlenky hybridního pohonu nahrazením spalovacího motoru vodíkovými palivovými články.

Hlavní parametry vozidla NE Train [21]:

Max. rychlost..... 100 km/h

Výkon naftového motoru 330 kW

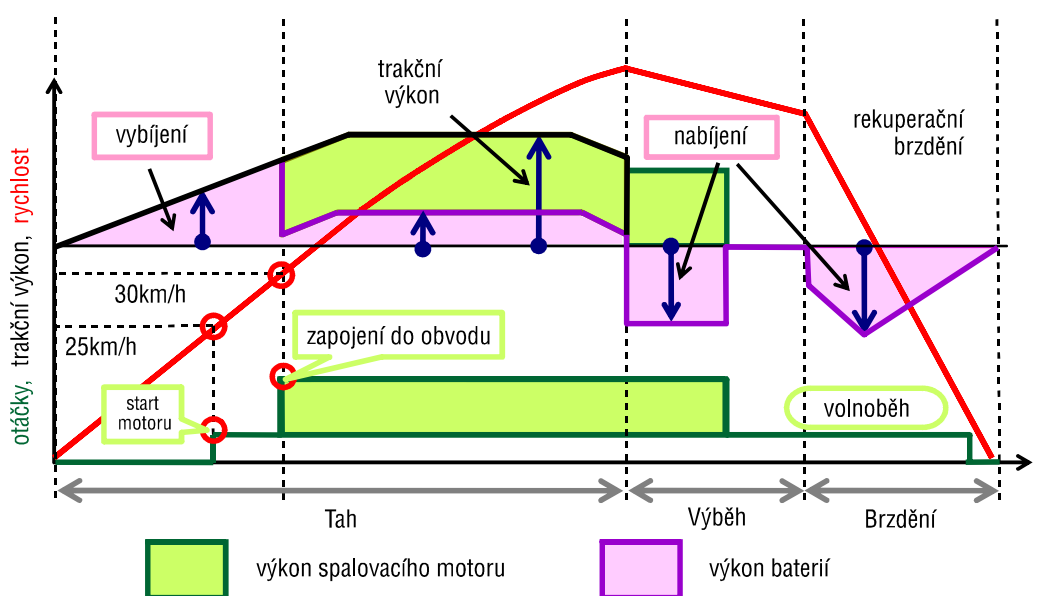
Výkon trakčních motorů 2 x 95 kW

Trakční baterie

Druh..... lithium-ionové

Maximální výkon 250 kW

Akumulovaná energie..... 10 kWh



Obr. 21 Graf režimu jízdy vozidla NE Train [21]

5.5 Alstom – motorová jednotka LIREX Experimental

Společnost Alstom v roce 2000 využila myšlenky hybridního pohonu v experimentální motorové jednotce LIREX (Light Innovative Regional Express). Tato šestidílná jednotka je poháněna dvojicí spalovacích motorů o výkonu 2 x 338 kW se střídavě elektrickým přenosem výkonu se stejnosměrným meziobvodem.

Jako akumulátoru rekuperované brzdě energie je použito setrvačníku. Setrvačnick je schopen dodávat po dobu 40 sekund výkon 350 kW. Přestože je motor umístěn ve vakuové komoře, tak se jeho ztrátový výkon pohybuje v hodnotách od 2,5 do 7 kW, což je také zapříčiněno dosažením kuličkových ložisek s olejovým mazáním na místo elektromagnetických, které jsou běžně používány u záložních centrál UPS. Zástavbové rozměry setrvačníku jsou 1900 x 1625 x 1080 mm při hmotnosti 1 300 kg.

Výsledky provozu této jednotky se nepodařilo zjistit, avšak žádná z nově vyráběných jednotek společnosti Alstom Coradia LIREX není osazena tímto systémem akumulace rekuperované brzdě energie.

Hlavní parametry jednotky LIREX Experimental [22]:

Výkon naftového motoru 2 x 338 kW

Parametry setrvačníku:

Maximální výkon 350 kW

Akumulovaná energie 6 kWh (využitelnost cca 75 %)

Typ motoru synchronní s permanentními magnety

Otáčky rotoru min. 12 500; max 25 000 ot./min.

Materiál rotoru kompozit (karbonové vlákno / pryskyřice)

Hmotnost 1300 kg

5.6 General Electric – Evolution Hybrid locomotive

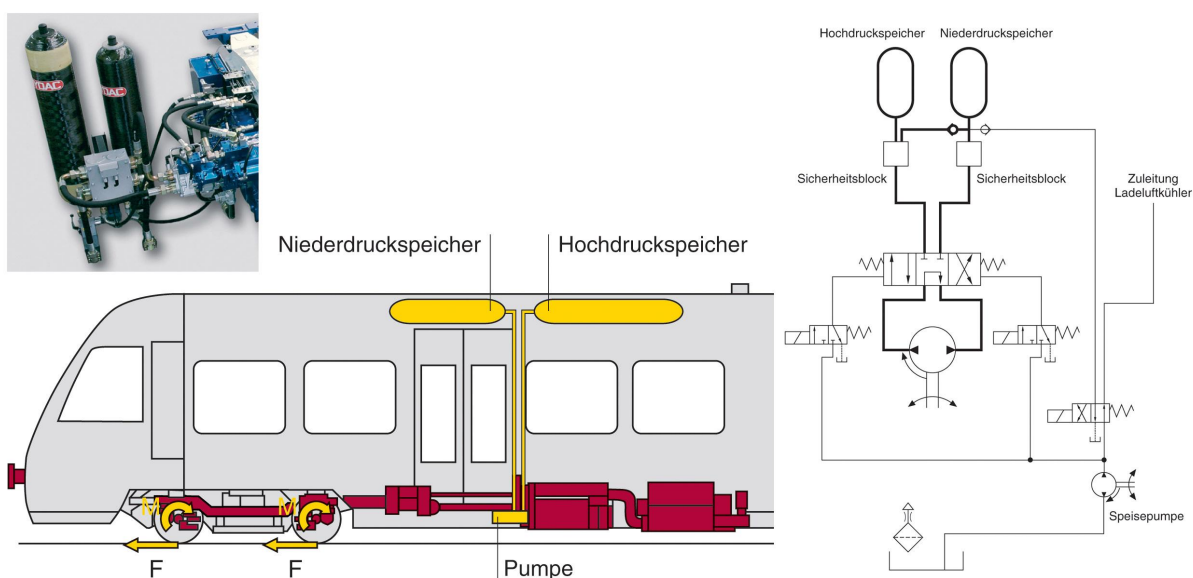
V roce 2007 americká společnost General Electric vyrobila 207 tun vážící prototyp hybridní lokomotivy poháněné spalovacím motorem o výkonu 3280 kW. K akumulaci energie je použito sodík-nikl chloridové baterie (NaNiCl₂).

Pro výběr NaNiCl₂ baterií rozhodla při konstrukci vozidla jejich nízká měrná hmotnost na jednotku akumulované energie, velký rozsah pracovních teplot okolního prostředí od -40 do 55 °C a absence samovybíjení akumulátorů. Jediný úbytek energie v baterii je způsoben faktem, že baterie dodává energii na vlastní chlazení. Baterie jsou schopny dodávat výkon 1300 kW při akumulované energii cca 1000 kWh. Při zkouškách lokomotivy docházelo až k 15% úspoře spotřeby paliva. Emise škodlivin do okolí by se měly snížit cca 10 % [29].

5.7 Voith – systém HydroBrid

Výrobce železničních komponentů společnost Voith Turbo GmbH přišel s koncepcí hybridního pohonu EcoPack představeným na veletrhu Innotrans 2006. Jeho součástí je mimo jiné i systém HydroBrid, který využívá hydrostatického akumulátoru energie k akumulaci brzděné energie.

Celý systém kombinuje funkci spalovacího motoru start/stop s akumulací energie. Vozidlu je při příjezdu do stanice vypnut motor a je zpětně nastartován až při dosažení rychlosti 30 km/h. Výrobce si od tohoto systému slibuje úsporu pohonných hmot okolo 10 až 15 % a také výrazné snížení hluku [28].



Obr. 22 Schéma hybridního pohonu HydroBrid

5.8 MTU – hybrid powerpack

Na veletrhu Innotrans 2008 představila firma MTU Friedrichshafen, stojící pod záštitou Tognum, prototyp podpodlažního hybridního pohonu pro motorové jednotky. Jedná se o sériově vyráběný model pohonného agregátu MTU 6H 180 o výkonu 390 kW. ,

Systém obsahuje akumulátor energie, který dodává energii vozidlu po dobu vypnutí motoru při funkci start/stop. Výrobce udává, že pohonný agregát je vhodný pro vozidla s vysokou frekvencí brzdění a akcelerace vozidla. Tento typ pohonu by měl dle informací výrobce snížit energetickou náročnost vozidla až o 25 %. Více informací se bohužel o tomto systému nepodařilo zjistit [30].

6 Elektrodynamické rekuperační brzdění

Snaha výrobců o zlepšení energetické bilance jízdy vlaku má za následek využívání elektrodynamického brzdění k zpětnému získávání energie. Elektrodynamické brzdění je založeno na využití trakčních motorů jako generátorů elektrické energie, která vzniká přeměnou z kinetické energie vlaku. Tato získaná energie je dnes běžně mařena v elektrických odpornících přeměnou na teplo. Základní vlastností elektrodynamického rekuperačního brzdění je snaha, takto získanou energii využít, tedy ji například dodává zpět do trolejového vedení. Druhým možným řešením je uložení energie v akumulátoru energie zabudovaném ve vozidle, což je jediné možné řešení u vozidel nezávislé trakce [3].

Výhodou, kterou sebou přináší využívání elektrodynamické brzdy, je tedy zpětné získávání energie, která by jinak byla nenávratně ztracena mechanickým brzděním vozidla. Další výhodou je snížení míry třecího opotřebení brzdového systému (špalíkový, kotoučový apod.), jelikož tohoto typu brzdění se neúčastní žádné třecí dvojice. Snížení tohoto opotřebení má za následek jak finanční, tak ekologický přínos.

6.1 Cize buzená elektrodynamická brzda

U stejnosměrného sériového stroje je pro využití elektrodynamického brzdění potřeba oddělit buzení stroje, a to jelikož řízení brzdného účinku je možné právě pouze změnou buzení. Brzdný účinek je omezen na jedné straně právě možnostmi trakčních motorů, tedy napětím, dovoleným stupněm odbuzení a maximálním proudem (především v buzení) a na druhé straně odporníkem, konkrétně jeho výkonem.

Brzdná charakteristika je složena ze dvou částí (viz Obr. 23). V části vyšších rychlostí je omezení brzdné síly stanoveno výkonem odporníku či schopností akumulátoru energie absorbovat brzdnou energii. Chceme-li udržet konstantní indukované napětí, abychom zajistili konstantní nabíjecí proud, či proud jdoucí do odporníku, je jedinou možností řízení budícího proudu, respektive jeho zvyšování. Toto zvyšování je však omezeno maximálním budícím proudem, který je dán oteplením motorů nebo možnostmi zdroje buzení. Pokud je tento maximální budící proud udržován i při poklesu rychlosti, klesá napětí i brzdná síla lineárně k nule. Pro základní určení síly lze použít následujícího vzorce [3]:

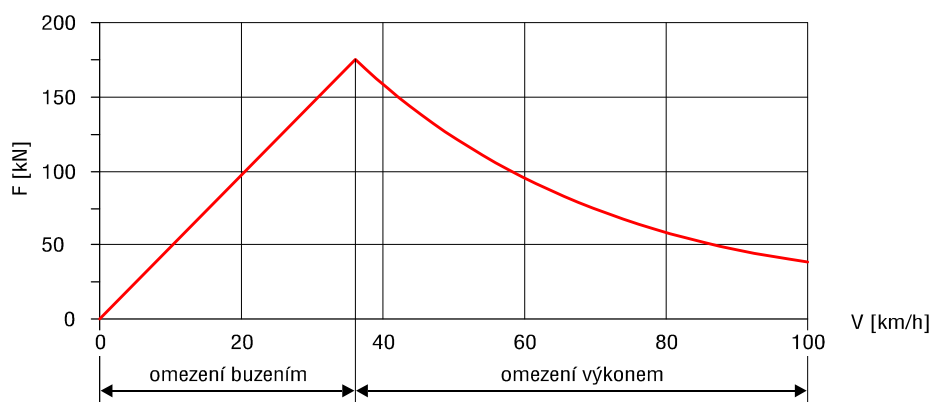
$$F_b = \frac{R \cdot I_k^2}{\eta \cdot V} \cdot 3,6 \quad (4)$$

R – odpor zahrnující odpor motoru a odpor odporníku

I_k – proud rotoru motoru

η – účinnost motoru

V – rychlost vozidla [km/h]

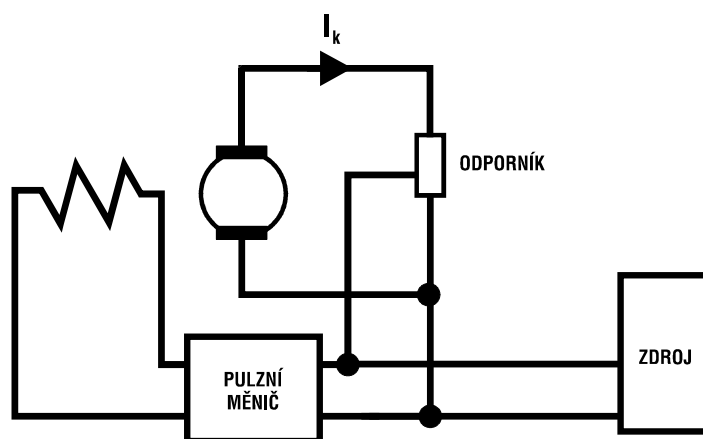


Obr. 23 Příklad brzdové charakteristiky

Brzdná síla se při elektrodynamickém brzdění přenáší adhezí. Při výpočtech brzdného účinku této brzdy se používá součinitel adheze o hodnotách 0,15 až 0,20. Což ve srovnání s používaným koeficientem adheze užívaným při výpočtu tažné síly je přibližně poloviční hodnota. Proto nelze využít nejvyšších hodnot brzdné síly. Stanovuje se tedy hodnota maximální brzdné síly, která snižuje křivku brzdné síly v oblasti jejího maxima.

Pro cizí buzení elektromotoru, které je potřebné pro regulaci brzdného účinku je zapotřebí vhodný zdroj elektrického proudu. Jako zdroje energie je možné využít vlastních elektromotorů. Běžně se s výhodou používá takové zapojení trakčního obvodu, kde z odbočky na brzdovém odporu je napájen pulzní měnič, kterým je řízena velikost budícího proudu. Pro začátek brzdění je pouze potřeba zajistit počáteční nabuzení z baterie či jiného zdroje napětí (viz Obr. 24). Další buzení v průběhu brzdění už si obstarává trakční motor sám z odbočky na odporu.

Pro úplnou nezávislost elektrodynamické brzdy je potřeba také řešit chlazení trakčních motorů při brzdění, což se týká především elektrické, závislé trakce, v případě odpojení vozidla od troleje.



Obr. 24 Cize buzená brzda s buzením z odbočky na odporu [3]

7 Výběr vhodného vozidla na modernizaci – ř. 740

Pro výběr vhodného hnacího vozidla na přestavbu na hybridní pohon přicházely v úvahu především lokomotivy řad 740 a 742, a to zejména díky svému početnému zastoupení v provozu na území České republiky. Jedná se o lokomotivy velmi podobné konstrukce, lišící se v nemnoha parametrech. Zatímco řada 742 je určena pro střední posun a lehkou traťovou službu, řada 740 je konstruována s určením pro vlečkový provoz, tedy přednostně pro posunovou službu. Tomu odpovídá především její hmotnost, která je o 8 tun vyšší oproti řadě 742.

Po úvaze bylo k modernizaci vybráno hnací vozidlo řady 740, jelikož je primárně určena pro provoz na posunu, kde se při využití hybridního pohonu čekají největší úspory provozních hmot. Dalším důvodem k výběru je dominantní postavení této řady ve vlečkovém provozu v České republice. Celkový počet vyrobených vozidel této řady v letech 1973 až 1989 je 620 kusů. Z toho 161 lokomotiv bylo pod označením T448-P dodáno do tehdejší Polské lidové republiky pro tamní průmysl.

Lokomotiva řady 740 je čtyřnápravová se spalovacím vznětovým motorem a elektrickým stejnosměrným přenosem výkonu s uspořádáním náprav typu Bo'Bo'. Lokomotiva je kapotového provedení se dvěma dvounápravovými podvozky. V každém jsou kyvně uložena dvě hnací dvojkolí, která jsou individuálně poháněna tlapově uloženými stejnosměrnými sériovými motory TE 005 E o jmenovitém příkonu 195 kW. Od IX. výrobní série T448.05 je montován trakční motor TE 015 se stejnými parametry, ovšem vyráběný novou technologií. Hnací agregát tvořený naftovým motorem K 6 S 230 DR s trakčním dynamem TD 805 a pomocnými pohony je umístěn pod přední kapotou. Nad zadním podvozkem je umístěna kabina strojvedoucího s elektrickým rozvaděčem [31].

Naftový motor pohání přírubově spojené trakční dynamo, které dodává proud pro pohon stejnosměrných sériových elektromotorů. Všechny lokomotivy mají stále serioparalelní řazení trakčních motorů, s výjimkou lokomotiv T 448.0501 až T 448.0612. U těchto lokomotiv jsou při rozjezdu (cca do 48 km/h) trakční motory spojeny serioparalelně, poté se zapojení mění pomocí stykačů na paralelní.

Trakční motory jsou chlazeny cize proudícím vzduchem, který do nich vhání dva ventilátory poháněné klínovými řemeny. Jeden je poháněn od volného konce klikového hřídele a druhý od řemenice trakčního dynama. V přední části je od volného konce poháněna mechanická převodovka pro pohon kompresoru a dvou ventilátorů chladičů vody, umístěných na střeše lokomotivy. Chladicí články jsou zabudovány do rámu přední kapoty a jsou vybaveny sklopnými žaluziemi v bočnicích skříně, od IV. série jsou žaluzie i na střeše lokomotivy [31].

7.1 Technické parametry lokomotivy řady 740

Hlavní technické parametry [31]:

Uspořádání náprav	Bo'Bo'
Hmotnost	72 t
Maximální rychlost	70 km/h
Maximální tažná síla	192 kN
Trvalá tažná síla	132 kN
Přenos výkonu	elektrický stejnosměrný
Typ trakčního motoru	ČKD TE 005 E / ČKD TE 015
Typ spalovacího motoru	ČKD K 6 S 230DR
Jmenovitý výkon motoru	883 kW
Jmenovité otáčky motoru	1250 ot./min.

Spotřeba a účinnost při jmenovitém výkonu [5]:

Měrná spotřeba	200 kg/h
Účinnost spalovacího motoru	0,369
Střední pravděpodobný příkon pomocných pohonů	66 kW
Příkon trakčního generátoru	817 kW
Účinnost trakčního generátoru	0,945
Výkon trakčního generátoru	772 kW
Účinnost trakčních motorů	0,910
Účinnost převodu (při jmenovitém výkonu)	0,980
Trakční výkon	690 kW
Účinnost lokomotivy (při jmenovitém výkonu)	0,288

Spotřeba při volnoběhu [5]:

Volnoběžná spotřeba spalovacího motoru	5,7 kg/h
Střední příkon pomocných pohonů	6,9 kW
Volnoběžná spotřeba lokomotivy	7,5 kg/h

Výkon potřebný k provozu pomocných pohonů při jmenovitých otáčkách motoru [5]:

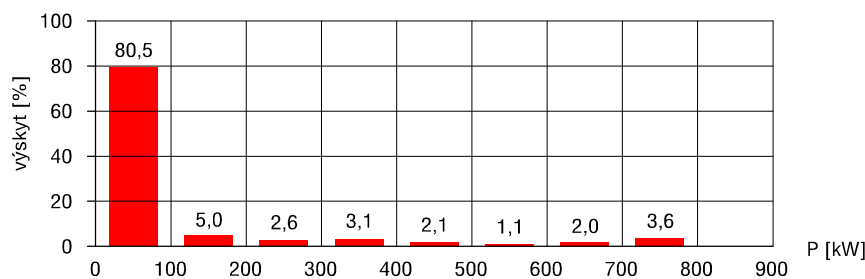
Ventilátor chlazení spalovacího motoru	44 kW
Ventilátor chlazení trakčních motorů	24 kW
Kompresor naprázdno (jmenovitý příkon 35 kW)	10 kW
Budič trakčního dynama	5 kW

7.2 Analýza provozu lokomotivy řady 740

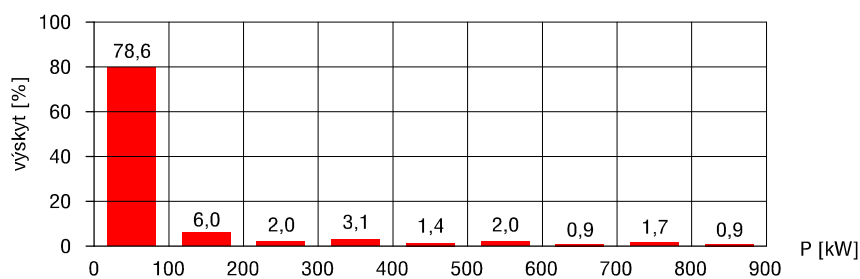
Pro určení možnosti aplikace hybridního pohonu lokomotiv řady 740 je zapotřebí určení charakteru provozu těchto lokomotiv v posunové službě. Jedním z měření prováděných v minulosti těchto řadách jsou měření uskutečněná na vlečkách NHKG Ostrava (dnes Arcelor Mittal) v roce 1988 doc. Müllerem z Vysoké školy dopravní Žilina [5].

Měření byla prováděna se zaměřením na zjištění časových průběhů výkonů, rychlosti a brzdných tlaků. Z výsledků se následně určoval procentuální výskyt výkonu vozidla, dob volnoběhu apod. Měření byla prováděna na veškerých možných typech provozu vykonávaných na vlečkách NHKG Ostrava. Celková délka měření byla cca 3,5 hodiny.

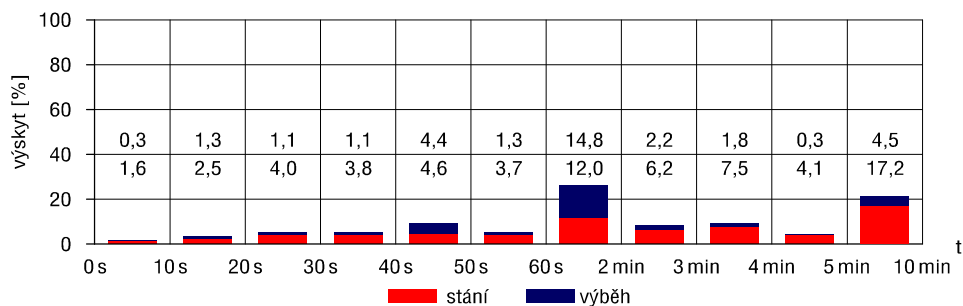
Z provedených měření bylo zjištěno, že délka volnoběhu, tedy doba nulového trakčního výkonu, zaujímá až 55 % z celkové pracovní doby spalovacího motoru. Režim práce spalovacího motoru do 100 kW je využíván v 78,6 %. Co se týče procentuálního zastoupení stání a jízdy výběhem, tak stání vozidla činí celých 67 % z celkové pracovní doby spalovacího motoru na volnoběžné otáčky (více viz Obr. 27). Nejvíce doby strávené na volnoběh je v intervalu 5 až 10 minut.



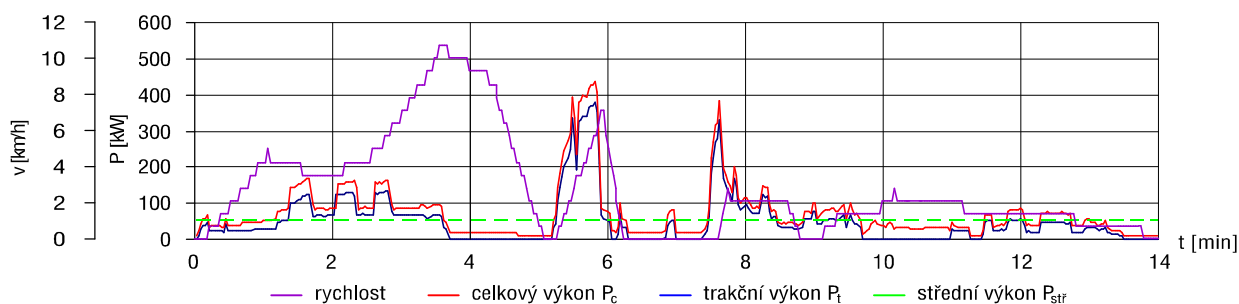
Obr. 25 Výskyt výkonu trakčního generátoru vozidla 740



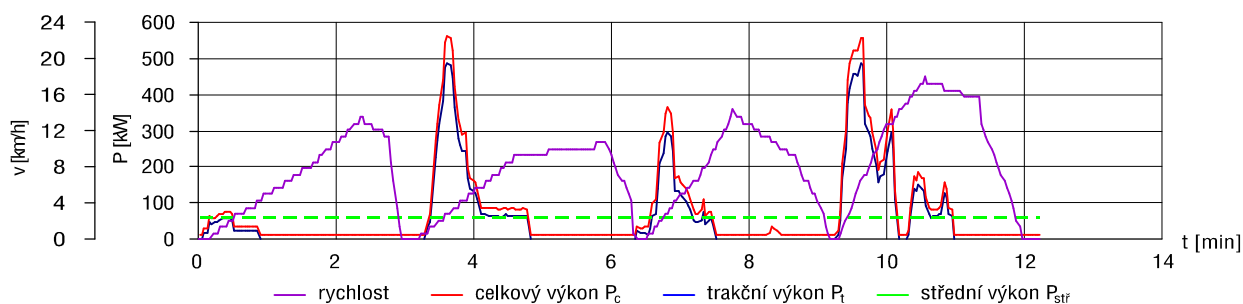
Obr. 26 Výskyt celkového výkonu vozidla 740



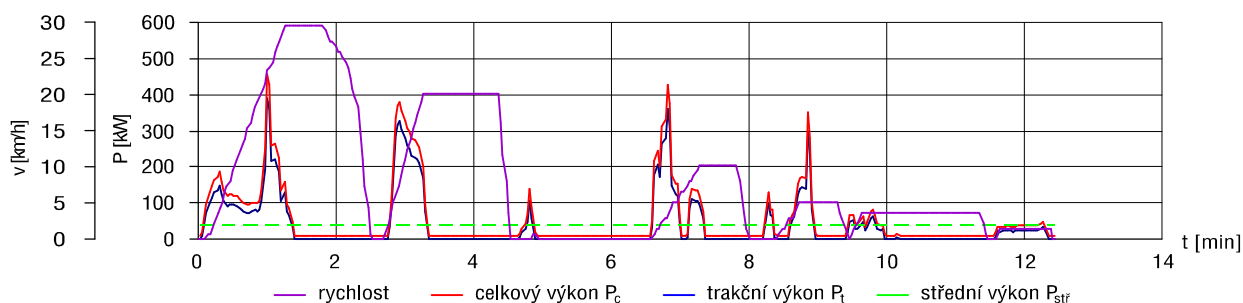
Obr. 27 Rozložení dob trvání volnoběhu spalovacího motoru vozidla 740



Obr. 28 Průběh veličin při posunu 400t zátěže



Obr. 29 Průběh veličin při posunu 188t zátěže



Obr. 30 Průběh veličin při posunu 66t zátěže

Z naměřených průběhů byl vypočten střední výkon vozidla, který se pohybuje v rozmezí 50 – 100 kW. Z průběhů také plyne, že ustálená doba výkonu je velmi krátká. Téměř v 50 % případů byl ustálený režim spalovacího motoru kratší než 4 s. Přitom časté změny režimů spalovacího motoru způsobují zvýšenou spotřebu paliva a produkci emisí škodlivin.

Aplikace hybridního pohonu při konstrukci posunovací lokomotivy je podle výše uvedeného měření vhodná. Doba, po kterou spalovací motor nepodává trakční výkon a zásobuje pouze pomocné pohony, má významný podíl na celkové době provozu. Po tuto dobu by mohl být u hybridní vozidla spalovací motor vypnut a pomocné pohony poháněny z akumulátoru energie. Tento princip běhu motoru (start/stop) se v konstrukci vozidel uplatňuje s technicky se zdokonalujícími spalovacími motory stále více, jelikož start motoru již není tak energeticky náročný. Dále lze využít faktu nízkého trvalého výkonu a dimenzovat spalovací motor na nižší hodnoty výkonu. Výkonové špičky při rozjezdech lze pokrýt z naakumulované energie. Dobíjení baterií by mohlo být realizováno v časově rozsáhlých prostojích vozidla. Je však nutno brát na zřetel, že závěry vycházejí z měření provedeno ve vlečkovém provozu, jenž se vyznačuje specifickými podmínkami.

8 Základní parametry rekonstrukce

Návrh základních parametrů rekonstrukce lokomotivy řady 740 není závislý na typu použitého akumulátoru energie, ani na velikosti poměru výkonu spalovacího motoru a akumulátoru. Modernizace bude odpovídat modernizacím lokomotiv řady 740 na řadu 724.5 až 724.8. Tyto lokomotivy byly modernizované pro společnosti Třinecké železárny, Unipetrol Doprava, Sokolovská uhelná aj. Vždy se bude jednat o celkovou modernizaci spočívající ve výměně spalovacího agregátu, pomocných pohonů, řídicích systémů atd.

Z původní lokomotivy by při rekonstrukci bylo použito upraveného původního rámu, podvozků s kyvně uloženým dvojkolí se stejnosměrnými sériovými trakčními motory TE 015. Zbývající část lokomotivy bude provedena klasickou modulární koncepcí známou při rekonstrukcích motorových lokomotiv společností CZ LOKO, tedy dosazením jednotné kabiny strojvedoucího, bloku elektrických zařízení do malého představku atd. Dále se jedná především osazení komponentů, jakými jsou např. motory Caterpillar, alternátory Siemens, trakční odporníky MEP Postřelmov aj.

Základní parametry rekonstrukce – odpovídá řadě 724.7 [35]:

Uspořádání náprav	Bo'Bo'
Hmotnost	72 t
Hmotnost na nápravu.....	18 t
Druh přenosu	AC/DC
Délka přes nárazníky	13 820 mm
Vzdálenost otočných čepů	6 700 mm
Jmenovitý průměr dvojkolí.....	1 000 mm

8.1 Výkonová rozvaha

Dimenzace pohonných agregátů bude na celkový výkon vozidla v oblasti 500 až 600 kW. Tato hodnota jednak vychází z dříve provedených modernizací posunovacích lokomotiv řady 740 společností CZ LOKO, a.s., u kterých se výkon nově dosazovaného agregátu pohybuje u lokomotiv určených výhradně pro posun v rozmezí 400 – 700 kW. Dále také uvažovaný rozsah maximálního výkonu odpovídá naměřeným datům, kde výkonové špičky při posunu dosahovaly vrcholových hodnot v rozmezí od 400 do 600 kW v průměrné délce trvání okolo 30 s. S přihlédnutím k těmto dvěma faktům lze tedy říci, že zvolený rozsah maximálního špičkového výkonu je odpovídající potřebám lokomotivy určené pro posunovou službu.

Pro návrh a hodnocení variant pohonu je potřeba znát výkon nutný k napájení pomocných pohonů vozidla. Uvažovaný výkon na pohon jednotlivých pomocných pohonů se nebude příliš lišit od výkonu původní lokomotivy řady 740 s výjimkou výkonu potřebného k chlazení spalovacího motoru, jelikož udávaný výkon motorů Caterpillar je už snížen o výkon potřebný k chlazení spalovacího agregátu. Chladič s ventilátorem je dodáván

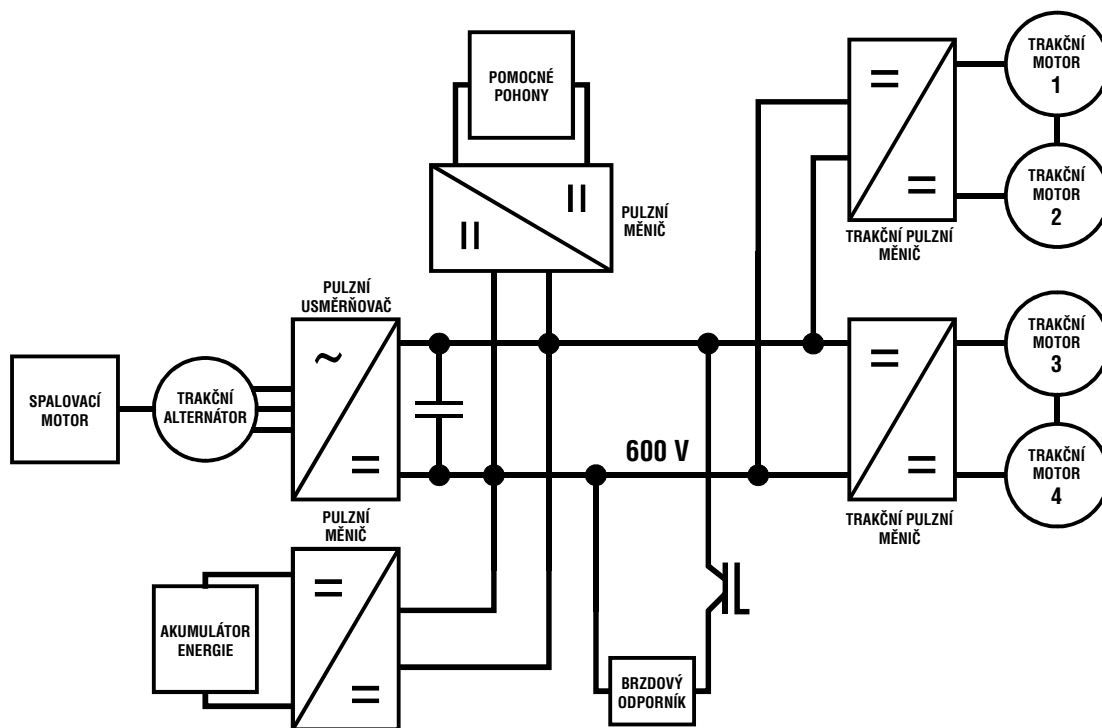
společně se spalovacím motorem Odhadovaný střední výkon potřebný k pohonu pomocných pohonů při jízdě vozidla je 35 kW. Pro stání vozidla při vypnutém spalovacím motoru je odhadovaný střední výkon roven 7 kW, což je v korelaci se středním výkonem při stání původní lokomotivy řady 740. Tento střední výkon odpovídá plnému výkonu následujících agregátů [35].

Chlazení trakčních motorů..... (2 ks)	24 kW
Kompresor.....	30 kW
Budič trakčního dynama	(1 ks) 5 kW
Topení / klimatizace.....	4 kW

8.2 Trakční uspořádání

Obecný návrh trakčního uspořádání lokomotivy bude vycházet ze sériového uspořádání hybridního pohonu, jelikož z důvodu ponechání trakčních tlakových stejnosměrných sériových motorů bude přenos výkonu lokomotivy elektrický (více viz kap 3.2).

Trakční obvod lokomotivy je zobrazen na Obr. 31. Spalovací motor zde pohání trakční alternátor, který generuje třífázové napětí. Alternátor napájí trakční meziobvod přes pulzní usměrňovač. Na tento meziobvod jsou přes pulzní měniče připojeny jak trakční motory, tak pomocné pohony. Dalšími zařízeními připojenými k meziobvodu je přes spínací prvek brzdový odporník a přes pulzní měnič akumulátor energie. Nutnost osazení brzdového odporníku i ve vozidle vybaveném akumulátorem energie je neodiskutovatelná, a to z důvodu schopnosti ukládat pouze část výkonu vznikajícího při brzdění. Trakční meziobvod bude pro jednoduchost u všech variant navržen s napětím 600 V.



Obr. 31 Schéma obecného návrhu trakčního uspořádání

Zapojení trakčních motorů bude ponecháno sérioparalelní, protože je toto zapojení výhodné z hlediska součinnosti alternátoru a trakčních motorů. Každá série bude napájena vlastním pulzním měničem, čímž se také zajistí individuální řízení jednotlivých podvozků, které bude výhodné při rozjezdech vozidla na mezi adheze. Tento fakt však vede k nutnosti dosazení tlumivky ke každé větvi trakčních motorů, která bude vyhlazovat napětí trakčních motorů. Původní zapojení stejnosměrných sériových trakčních motorů bude potřeba z důvodů zabudování elektrodynamické brzdy změnit. Minimálně v brzděném režimu budou muset mít motory oddělené buzení a napájené ze zvláštního zdroje. Zapojení se tedy změní na stejnosměrné motory s cizím buzením. Díky této změně bude možno regulovat brzdny účinek elektrodynamické brzdy.

8.3 Prvky trakčního obvodu

Nezávisle na jednotlivých variantách trakčních obvodů, resp. na použitém typu akumulátoru energie bude trakční obvod obsahovat stejné prvky jakými jsou trakční motory, trakční pulzní měniče, pulzní usměrňovač a brzdový odporník. V následujících podkapitolách budou popsány základní vlastnosti těchto prvků.

8.3.1 Trakční motory ČKD TE 015

Motor je stejnosměrný, sériově buzený čtyřpólový stroj s cizí ventilací. Konstrukčně je proveden jako tlapový, pro upevnění na hnanou nápravu s odpruženým závěsem. Tlapové ložisko je valivé s olejovým mazáním kluzných ploch. Stator motoru je ocelolitinový s odnímatelnými ložiskovými štíty. Rotor je vyroben z dynamoplechů a je usazen s komutátorem na hřídeli. Chlazení motoru je cizí, s přívodem chladicího vzduchu do statoru na straně komutátoru [35].

Základní parametry trakčního motoru TE 015:

Jmenovitý výkon	291 kW
Jmenovité otáčky	795 ot./min.
Jmenovité napětí.....	534 V
Jmenovitý proud.....	540 A
Účinnost při plném zatížení.....	0,91
Třída izolace	F
Hmotnost.....	1 750 kg
Provedení.....	tlapové
Účinnost převodovky	0,98

Při rekonstrukci lokomotivy by bylo možno využít výměny stávajících trakčních motorů TE 015 novým typem stejnosměrného sériového motoru TDM 5003 V dodávaný společností Pragoimpex a.s. Jedná se taktéž o tlapový, 4-pólový sériový motor s pomocnými póly a s cizím chlazením. Technickým vylepšením je valivé ložisko tlapového uložení na nápravě

a také nový izolační systém, díky němuž má motor zvýšen výkon na 360 kW. Tyto motory mají také deklarovanou vyšší účinnost oproti původním motorů přibližně o 2 %.

8.3.2 Brzdový odporník MEP R4V3

Odporníky R4V společnosti MEP Postřelmov jsou stavebnicové vysoko výkonové odporníky nuceně chlazené vzduchem. Podle počtu odporníkových bloků je vyráběno 5 výkonnostních typů těchto odporníků. Odporníkový blok se sestává ze čtyř základních částí – odporového pásu, keramických kostek, nosných izolovaných nosníků a bočnic. Odporový pás je zohýbán do tvaru meandru a je vyroben ze speciální slitiny, která se vyznačuje nízkým koeficientem změny odporu teplem a vysokou odolností proti žáru při zatěžování.

Chlazení odporových bloků zabezpečuje axiální ventilátor poháněný elektromotorem. Připojení kruhového průřezu ventilátoru na obdélníkový odporník je provedeno speciálním přechodovým dílem, který navíc zvyšuje účinnost ventilátoru lepším rozložením chladícího vzduchu v celém průřezu odporníkové skříně [32].

Parametry odporníku R4V6:

Maximální napětí.....	3 000 V
Maximální ztrátové výkony.....	1080 kW
Maximální pracovní teplota.....	650 – 1000 °C (dle použitého materiálu)

8.3.3 Pulzní usměrňovač Allen-Bradley PowerFlex 7000

Jedná se o 18-ti pulzní tyristorový usměrňovač s vnější (přirozenou) komutací. Usměrňovač fázově řídí hodnotu stejnosměrného proudu ve dvojité vinutém reaktoru (indukčnosti) stejnosměrného meziobvodu. Osmnácti pulzní konfigurace usměrňovače zajišťuje minimální obsah harmonických napájecího proudu tak, aby měnič vyhovoval standardům jako IEEE 519/92 nebo EN 61 000-2-4. Výkonový rozsah tohoto pulzního usměrňovače je 150 – 930 kW, při maximálním napětí 2400 V. Chlazení měniče je proudícím vzduchem. [33]

8.3.4 Trakční pulzní měnič POLOVODIČE LOKO 560 8560

Čtyřkvadrantový měnič je tvořen IGCT tyristory. Výkonové prvky pracují se spínacím kmitočtem 600 Hz, což při zvolené modulační strategii znamená zvlnění vstupního proudu 1200 Hz. Trakční motor je v režimu jízda střídavě napájen pulzními měniči z obou polovin filtru stejnosměrného meziobvodu. Měnič umožňuje použít elektrodynamické brzdění [34].

Parametry pulzního měniče LOKO 560 8560:

Maximální výstupní napětí.....	730V
Maximální výstupní proud.....	630 A
Trvalý výkon.....	420 kW
Účinnost.....	95 %
Hmotnost.....	460 kg

9 Řešení trakčních obvodů – varianta A

Základní návrh řešení trakčního obvodu byl popsán v kapitole 8.2. Jednotlivé návrhy trakčních obvodů se budou především lišit použitým typem akumulátoru energie a také poměrem výkonu akumulátoru ke spalovacího agregátu. Tento poměr je dán v první řadě ideologickou koncepcí pohonu, tedy jakému účelu bude sloužit uchovávaná energie, kdy a v jakém množství se bude odebírat.

Parametry této varianty jsou postaveny na ideji zachovat klasickou koncepcí lokomotivy s využitím akumulátoru energie k pohonu pomocných pohonů při stání vozidla a k nevelkému navýšení výkonu při rozjezdu. Jednalo by se o hnací vozidlo s relativně výkonným spalovacím motorem v rozmezí 400 – 500 kW s akumulátorem energie o minimální využitelné energetické kapacitě 1 650 Wh, která by postačovala k minutovému navýšení výkonu o 100 kW.

Tato varianta řešení je založena na supekacitoru jako akumulčním prvku, jelikož superkapacitor je schopen narozdíl od elektrochemických akumulátorových baterií vysokých nabíjecích proudů. Tím i při malé energetické dimenzaci tohoto akumulátoru je možno velký výkon ukládat i při rekuperačním brzdění. Je tedy možno v krátkém čase opět tento akumulátor dobít do plného provozního napětí. Článek superkapacitoru vybraného typu společnosti Maxwell má jmenovitou hodnotu napětí 2,7 V a kapacitu 3 000 F. Pro dosažení potřebného napětí je tedy zapotřebí spojovat články do série. Superkapacity také potřebují externí chlazení, které je zpravidla nejčastěji provedeno proudícím vzduchem, který je hnán baterií superkapacitorů a udržuje potřebnou provozní teplotu [24].

Parametry superkapacitoru Maxwell BCAP 3000 P270 T04-A01:

Kapacita	3000 F
Jmenovité napětí.....	2,7 V
Zkratový proud	4800 A
Uložená energie	5,72 Wh/kg
Špičkový výkon dodávaný do zátěže.....	13,8 kW/kg
Rozměry.....	138 mm x ø 60 mm
Hmotnost.....	550 g
Cena za článek	27 € (cca 2000 Kč)



Obr. 32 Článek superkapacitoru BCAP 3000 společnosti Maxwell

Z důvodu ideálního rozložení náboje na jednotlivých člancích se články nespojují pouze do série pomocí spojek, ale také se jednotlivé superkapacitory přemostí můstky se snímačem a elektronicky měnitelným odporem. Tímto se zajišťuje vyrovnavání napětí na člancích. Dále také s ohledem na potřebnou akumulovanou energii pro provoz hybridního pohonu je nutné přikročit k paralelnímu zapojení několika sérií superkapacitorů. Avšak superkapacitory nelze spojit do série z důvodu nerovnoměrnosti nabíjení, je tedy nutné každou sérii superkapacitorů napájet z vlastního pulzního měniče. Toto zapojení bohužel dále prodražuje tuto variantu, avšak v porovnání s cenou superkapacitorů, není tímto krokem navýšení výrobní ceny natolik markantní.

9.1 Dimenzace trakčních zařízení

9.1.1 Návrh dimenzace superkapacitorů

Jako akumulátoru energie bude tedy použito superkapacitoru Maxwell BCAP 3000 P270 T04-A01. Celkové napětí akumulátoru energie je zvoleno 600 V, což je napětí odpovídající trakčnímu meziobvodu. Za tímto krokem se skrývá snaha o zjednodušení pulzních měničů mezi akumulátorem a trakčním meziobvodem. Pro dosažení tohoto napětí je potřeba články superkapacitoru zapojit do série. Dále z důvodu nízké akumulované energie v jedné větvi je nutné tyto větve znásobit a tím dosáhnout potřebného potenciálu k akumulování energie. Po úvaze byl zvolen počet čtyř paralelních větví superkapacitorů.

Počet superkapacitorů sériově zapojených v jedné větvi.

$$n_{\text{série}} = \frac{U_{\text{celk}}}{U_{\text{článek}}} = \frac{594}{2,7} = 220 \quad (5)$$

$n_{\text{série}}$ – počet sériově zapojených superkapacitorů

U_{celk} [V] – celkové napětí

$U_{\text{článek}}$ [V] – napětí na článku

Celková kapacita superkapacitorů.

$$C = \frac{C_{\text{článek}}}{n_{\text{série}}} \cdot p_{\text{paralel}} = \frac{3000}{220} \cdot 4 = 54,56 \text{ F} \quad (6)$$

C [F] – celková kapacita superkapacitorů

$C_{\text{článek}}$ [F] – kapacita článku superkapacitoru

p_{paralel} – počet paralelních větví

Použitelná energie uložená v superkapacitorech.

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_{\text{celk}}^2 - U_{\text{min}}^2) = 0,5 \cdot 54,56 \cdot (594^2 - 297^2) = 7,219 \text{ MWs} \quad (7)$$

E [Ws] – použitelná energie

U_{min} [V] – minimální napětí superkapacitoru (50 % nominálního)

Výkon dodávaný superkapacitory po dobu 5-ti minut při plném využití uložené energie.

$$P_{5\ min} = \frac{E}{300} = 24\ \text{kW} \quad (8)$$

$P_{5\ min}$ [W] – minutový výkon

Špičkový 30-sekundový výkon dodávaný superkapacitory.

$$P_{peak} = \frac{E}{30} = 240\ \text{kW} \quad (9)$$

P_{peak} [W] – špičkový výkon při proudu 400 A

Celková hmotnost superkapacitorů (bez spojovacích a zástavbových dílů).

$$m_{celk} = m_{\text{článek}} \cdot p_{\text{paralel}} \cdot n_{\text{serie}} = 0,55 \cdot 4 \cdot 220 = 484\ \text{kg} \quad (10)$$

m_{celk} [kg] – celková hmotnost superkapacitorů

$m_{\text{článek}}$ [kg] – hmotnost jednoho článku

9.1.2 Dieselový motor Caterpillar C15

Za primární zdroj energie byl zvolen dieselový motor z nabídky společnosti Caterpillar s jejichž aplikací má společnost CZ LOKO dlouholeté zkušenosti. Tyto motory se běžně používají v zemědělských pásových vozidlech a stavebních strojích. Z tohoto důvodu je i jejich údržba a dostupnost náhradních dílů zcela bezproblémovou záležitostí. Ze škály výkonnostně odstupňovaných motorů byl zvolen dieselový motor C15. Tento motor je schopen dodávat výkon cca 400 kW v provozu střední zátěže, což ve spolupráci s navrženými superkapacitory dává navrhovaný špičkový výkon v rozmezí 500 – 600 kW.

Spalovací motor C15 je čtyřdobý dieselový řadový šestiválec. Je vybaven technologií ACERT (Advanced Combustion Emissions Reduction Technology), která vychází z jednoduchého principu – snížení emisí lze dosáhnout díky lepšímu spalování a toho je možno docílit přesným dávkováním paliva a vzduchu. Díky technologii ACERT splňuje současné evropské emisní normy Stage IIIA, popř. Tier 3 dle amerických standardů. Splnění těchto norem je dnes podmínkou pro zabudování motoru do kolejového vozidla.

Hlavní parametry spalovacího motoru C15 ACERT:

Jmenovitý výkon.....	403 kW
Jmenovité otáčky.....	1800 – 2100 ot./min.
Volnoběžné otáčky.....	600 ot./min.
Vrtání / zdvih.....	137 / 171 mm
Zdvihový objem.....	15,2 l
Průměrná měrná spotřeba.....	215 g/kWh
Volnoběžná spotřeba.....	1,4 kg/h
Hmotnost.....	1469 kg

Motory s technologií ACERT používají větší turbodmychadla s regulačním ventilem plnicího tlaku. Plnicí vzduch je nasáván přes dva bubnové filtry, které zabezpečují čistotu

plnicího vzduchu. K chlazení plnicího vzduchu je motor vybaven technologií ATAAC, která využívá k chlazení okolního vzduchu. Motor C15 ACERT využívá mechanicky poháněné, elektronicky řízené vstřikovací jednotky, tzv. MEUI (Mechanically actuated, Electronically controlled Unit Injectors), které poskytují vícenásobné vstřikování a umožňují tzv. mikroexploze paliva před a po jeho hlavním vstřiku.

Tab. 6 Výkon a spotřeba motoru C15

Otáčky [min ⁻¹]	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Kubická zátěž [kW]	92	119	152	190	233	283	339	403
Měrná spotřeba [g/kWh]	211,6	221,1	208,5	215,2	215,7	216,2	217	219,2



Obr. 33 Motor Caterpillar C15 ACERT o výkonu 403 kW

Pokud by z jakýchkoliv důvodů bylo zapotřebí zvolit motor jiného výrobce, pak dalšími možnými variantami v této výkonové řadě mohou být motory společností MTU, Cummins a také John Deere. Porovnání parametrů těchto motorů naleznete v následující tabulce. Všechny v ní uvedené motory splňují platné evropské emisní normy, tedy normu Stage IIIA.

Tab. 7 Porovnání parametrů spalovacích motorů o výkonu okolo 400 kW

Výrobce	Caterpillar	MTU	Cummins	John Deere
Model	C15 ACERT	Series 60	QSX	6135H
Jmenovitý výkon	403 kW	410 kW	399 kW	410 kW
Otáčky	2100 ot/min	2100 ot/min	2100 ot/min	2100 ot/min
Zdvihový objem	15,2 l	14,0 l	15,0 l	13,5 l
Vrtání	137 mm	133 mm	137 mm	132 mm
Zdvih	171 mm	168 mm	169 mm	165 mm
Rozměry [mm]	1496x910x1274	1455x925x1380	1443x1032x1298	1334x855x1512
Hmotnost	1566 kg	1215 kg	1451 kg	1493 kg
Hustota výkonu	3,88 kg/kW	2,96 kg/kW	3,63 kg/kW	3,64 kg/kW

9.1.3 Trakční alternátor Siemens 1FC2-401

K vybranému typu spalovacího motoru Caterpillar C15 bylo zapotřebí vybrat vhodný typ alternátoru. Tradičně jsou společnostmi CZ LOKO zabudovávány alternátory Siemens Drásov. Výkonnostně vhodným typem k motoru C15 je alternátor Siemens 1FC2-401-4B025Z. Jedná se o třífázový synchronní generátor pro nízké napětí. Třífázové vinutí je vyvedeno na čtyři svorky a zapojeno do hvězdy. Skládají se z generátoru střídavého proudu (hlavní stroj) a z budiče s rotujícím usměrňovačem. Rotory hlavního stroje a budiče se nachází společně s rotujícím usměrňovačem a ventilátorem na jedné hřídeli. Části, které slouží k regulaci napětí jsou umístěny ve svorkovnicové skříni. Všechny tyto díly tvoří spolu se svařovaným krytem a ložisky jednu stavební jednotku.

Základní parametry alternátoru Siemens 1FC2-401-4B025Z:

Jmenovitý výkon.....	420 kVA
Otáčky.....	600 – 2000 ot./min.
Jmenovité napětí	400 V
Jmenovitý proud	606 A
Účinnost.....	94,5 %
Třída izolace.....	F
Buzení	cizí

9.2 Navržené parametry varianty A:

Hlavní navržené parametry posunovací lokomotivy ve variantě A:

Spalovací motor	Caterpillar C15 ACERT
Výkon.....	403 kW
Výkonová třída.....	C (střídavý provoz)
Otáčky.....	600 – 2100 ot./min.
Alternátor	Siemens 1FC2-401-4B025Z
Superkapacity.....	Maxwell BCAP 3000 P270 T04-A01
Napětí	600 V
Počet superkapacitorů.....	880 (220 zapojených do série)
Celková kapacita	54,4 F
Akumulovaná energie.....	2 673 Wh (75% využitelnost)
5-minutový výkon.....	24 kW
30-sek. špičkový výkon	240 kW
Celková hmotnost	484 kg

9.3 Konstrukční řešení

Dalším cílem této práce byl návrh zástavby jednotlivých variant pohonu posunovací lokomotivy do kapot, jež jsou běžně používány při rekonstrukcích společností CZ LOKO. Za tímto účelem byl zpracován 3D model lokomotivy, pod jehož kapoty bylo možno umisťovat modely jednotlivých agregátů a tím získat komplexní návrh rozmístění jednotlivých agregátů pod kapotami lokomotivy. Model lokomotivy s popisem je znázorněn na Obr. 34. Z tohoto modelu byl následně zpracován typový výkres s naznačením umístění agregátů, který se nachází v příloze pod označením VAR-A-001.

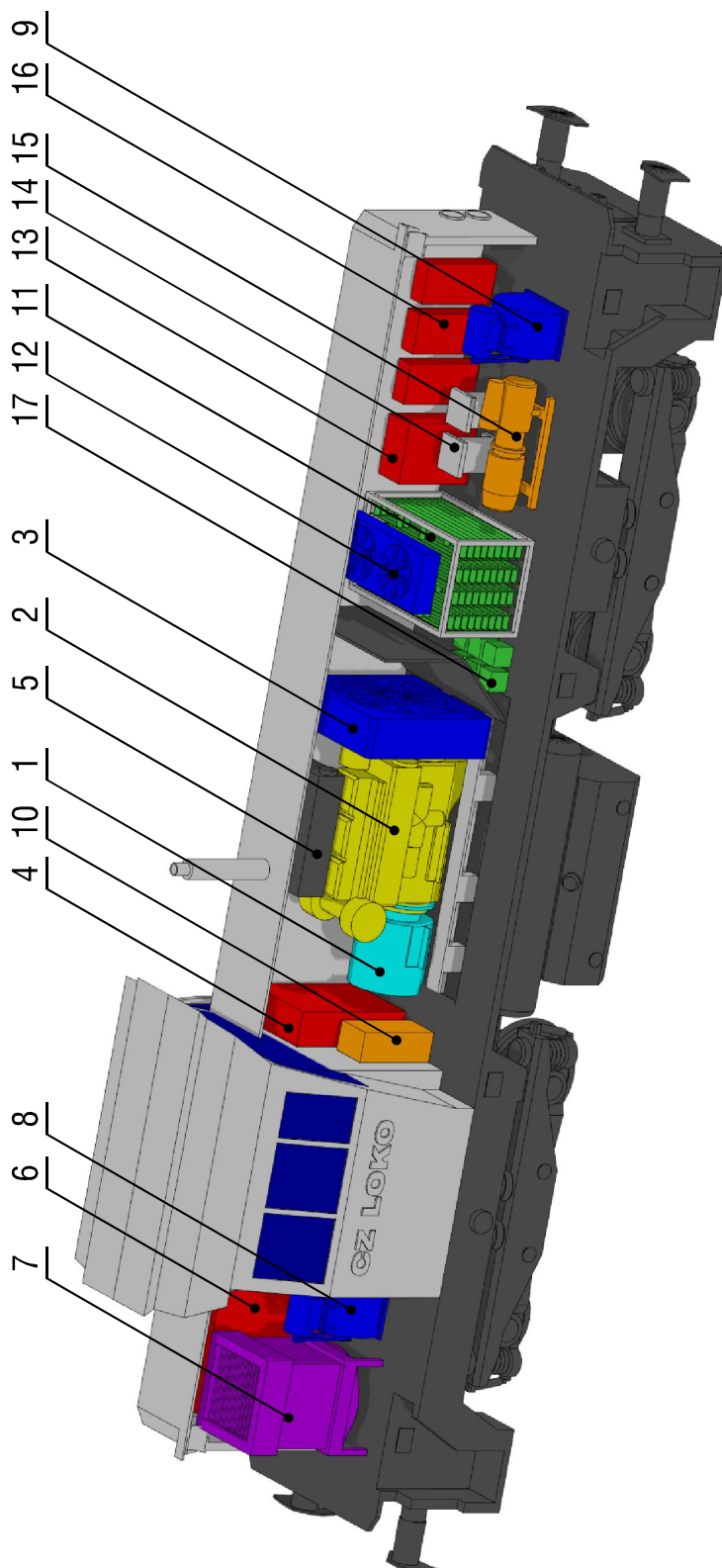
9.3.1 Popis rekonstrukce a umístění agregátů

Jedná se o rekonstrukci na posunovací lokomotivu s nízkými kapotami s kabinou strojvedoucího umístěnou nad zadním podvozkem. Rekonstrukce kapot je jedním z velkých přínosů rekonstrukce, jelikož výrazně zlepšuje výhled strojvedoucího ze stanoviště.

Pod přední kapotou (dlouhou) lokomotivy jsou umístěny především primární a sekundární zdroj energie, tedy spalovací motor Caterpillar C15 s generátorem a baterie superkapacitorů se svými chladiči. Dále se zde nachází pomocné pohony, tj. kompresor, ventilátor trakčních motorů předního podvozku, blok topení/klimatizace, tlumivky, gelové baterie VRLA a také další drobnější komponenty jako brzdový rozvaděč, které nejsou v modelu znázorněny. V neposlední řadě jsou pod touto kapotou umístěny elektrotechnické komponenty, kterými jsou – pulzní usměrňovač, pulzní měniče superkapacitorů, jednotlivé pulzní měniče pomocných pohonů a baterie. Pod zadní kapotou se nachází elektrický rozvaděč, odporník elektrodynamické brzdy a ventilátor chlazení trakčních motorů zadního podvozku.

Motor, generátor i příslušný chladič jsou umístěny na společných nosnících. K těmto nosníkům je motor i generátor připojeny pomocí speciálních podložek s výškovým stavěním. To dovoluje nejprve ustavit generátor a posléze k němu souose připojit spalovací motor takovým způsobem, aby se eliminovaly veškeré nežádoucí odchylky. Celek je poté mírně zapuštěn do rámu lokomotivy z důvodu výšky zástavby a usazen na rám lokomotivy pomocí silentbloků, které tlumí přenos vibrací ze spalovacího motoru na rám lokomotivy.

Baterie superkapacitorů je umístěna v rámu neboli kontejneru, který umožňuje snadné vyjmutí celé baterie. Pro údržbu či výměnu poškozených článků je konstrukce tohoto kontejneru uzpůsobena tak, že je možné vyjmout jednotlivé série superkapacitorů. Avšak není předpoklad častých údržbových zásahů, proto není zabezpečen snadný přístup k jednotlivým článkům. Tato baterie superkapacitorů je chlazená proudícím vzduchem, který udržuje superkapacitory v optimální provozní teplotě. Proudění vzduchu vytváří dvojice ventilátorů umístěných nad baterií, které nasávají vzduch bočními plochami kapoty a vyfukují ohřátý vzduch směrem vzhůru na kapoty.



Obr. 34 Návrh uspořádání agregátů ve variantě A

Legenda: 1 – generátor; 2 – motor; 3 – chladič motoru; 4 – pulzní usměrňovač; 5 – výfuk; 6 – rozvaděč; 7 – odporník brzdy;

8, 9 – ventilátory trakčních motorů; 10 – topení/klimatizace; 11 – baterie superkapacitorů; 12 – chlazení superkapacitorů;

13 – pulzní měniče superkapacitorů; 14 – trakční tlumivky; 15 – kompresor; 16 – pulzní měniče pomocných pohonů; 17 – baterie VRLA

9.4 Provoz hybridního pohonu

Pro optimální funkci hybridního pohonu je nutné stanovit provozní režimy jednotlivých zdrojů energie, tedy spalovacího motoru a superkapacitorů. Z hlediska definice této varianty jako hybridního vozidla se jedná o stupeň hybridizace vozidla mild hybrid, tedy mybrid. Akumulátor energie je používán k navýšení výkonu primárního zdroje (spalovacího motoru) a k napájení pomocných pohonů. Dovoluje také akumulaci rekuperované energie, což je jednou z hlavních vlastností hybridního pohonu.

9.4.1 Stání vozidla

V tomto režimu bude spalovací motor vypnut, veškeré zásobování vozidla energií, tedy napájení pomocných pohonů, bude ze superkapacitorů. K vypnutí motoru dojde po třech minutách volnoběhu spalovacího motoru, aby se eliminovala možnost automatického vypnutí motoru při jízdě výběhem. Doba tří minut je odvislá od měření dob volnoběhu motoru uvedených v kapitole 7.2. Druhou možností vypnutí motoru je manuálně dle uvážení obsluhy podle potřeby v provozu.

Délka schopnosti superkapacitorů dodávat potřebnou energii je závislá na příkonu těchto zařízení. Odhadovaný střední výkon pomocných pohonů při stání vozidla je 7 kW. Superkapacity by tedy mohly dodávat energii pro tento pohon přibližně po dobu 17 minut, pokud by se využila jejich plná kapacita.

Avšak při poklesu napětí na superkapacitorech pod stanovenou hranici, přibližně při vyčerpání z 90 % uložené energie by automaticky nastal start motoru. Motor by pak opětovně nabíjel superkapacity, které by při výkonu spalovacího motoru 150 kW, při kterém motor vykazuje nejmenší měrnou spotřebu 208 g/kWh, byly nabity přibližně za 50 s. Poté by bylo možno motor opět vypnout. Pro případ startu vozidla s plně vyčerpanými superkapacity je vozidlo vybaveno gelovými bateriemi VRLA, které jsou schopny uvést spalovací motor za pomoci budiče do chodu.

9.4.2 Rozjezd vozidla

Z důvodu malé energetické kapacity nelze provést kombinaci zdrojů energie, při které by v prvních sekundách rozjezdu byly trakční motory poháněny ze superkapacitorů a zároveň by byl nastartován spalovací motor. Proto je nejprve nutné nastartovat spalovací motor a teprve poté by mohl spalovací motor dodávat výkon, resp. energii trakčním motorům, které by uvedly vozidlo do pohybu. Toto ideologické řešení spolupráce agregátů snižuje částečně operativnost vozidla, avšak přináší ekonomické úspory při stání vozidla. Veškeré výhody a nevýhody by se odvíjely od doby nastartování motoru a množství spáleného paliva při tomto startu.

9.4.3 Jízda a brzdění vozidla

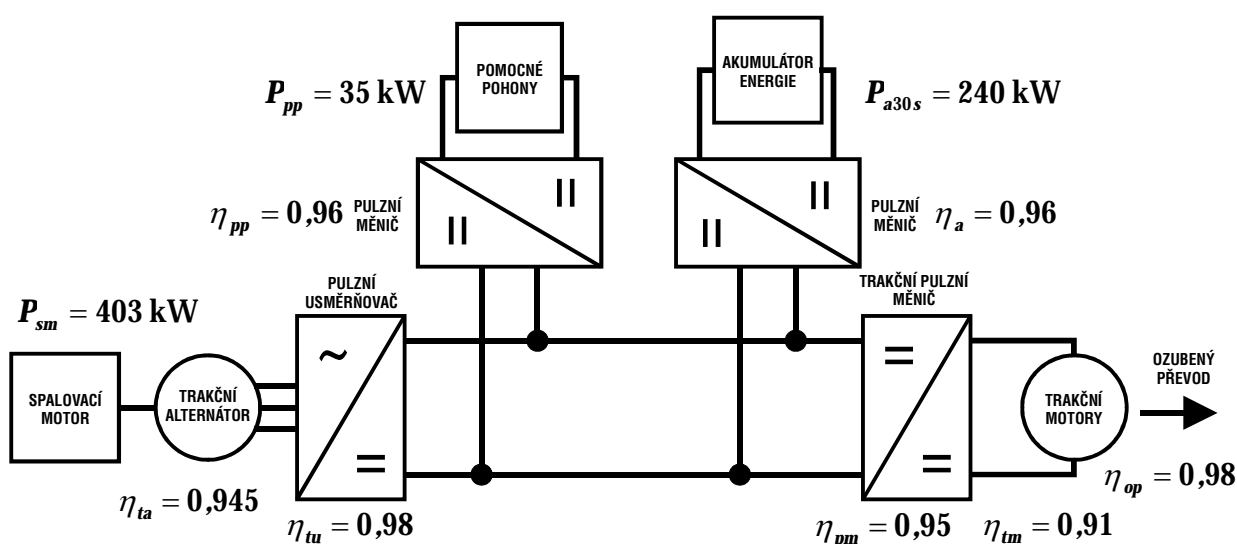
Při jízdě vozidla by byl primárně využíván k pohonu vozidla i pomocných pohonů spalovací motor. Superkapacity by se využívaly ke zvýšení výkonu nad výkonovou mez spalovacího motoru, která je 403 kW jmenovitého výkonu. Toto zvýšení je omezeno využitelnou energetickou kapacitou baterie superkapacitorů, která je 7,219 MWs. Tato kapacita postačuje ke špičkovému půlminutovému zvýšení výkonu o 240 kW. Při nižším výkonu se úměrně tomu prodlužuje doba, po kterou je možno ze superkapacitorů energii dodávat.

Z měření výkonu lokomotivy při posunu na vlečce uvedeného v kapitole 7.2 vyplývá, že maximální doba špičkového výkonu překračujícího hranici 400 kW, je právě v rozmezí 30 až 60 sekund. Z tohoto plyne, že navržené superkapacity budou schopny dodávat tento výkon potřebný nad rámec výkonových možností spalovacího motoru. Dobíjení superkapacitorů by probíhalo při přebytku výkonu spalovacího motoru při jízdě vozidla, avšak ne nezbytně ihned po vyčerpání energie. Je zde totiž dle měření jistá pravděpodobnost následného elektrodynamického brzdění, při kterém je možné část získané energie uložit zpět do superkapacitorů. Ukládání energie je možné maximálně do nabíjecích proudů 800 A, což odpovídá výkonu 480 kW, který je však možné ukládat pouze omezenou dobu cca 15 s. Přebytek energie vznikající při brzdění, který nejsou schopny superkapacity přijmout, je mařen v odporcích.

9.5 Trakční charakteristiky

9.5.1 Výpočet výkonu na obvodu kol

Pro výpočet trakční charakteristiky hnacího vozidla je nejprve nutné zjistit, jaké ztráty jsou při přenosu výkonu na obvod kol vozidla. Z této veličiny následně dostáváme tažnou sílu vozidla na obvodu kola pro danou rychlost.



Obr. 35 Blokové schéma přenosu výkonu s jednotlivými hodnotami výkonu a účinností

Výpočet maximálního trakčního výkonu na obvodu kol při příkonu pouze ze spalovacího motoru:

$$P_o = \left(P_{sm} \cdot \eta_{ta} \cdot \eta_{tu} - \frac{P_{pp}}{\eta_{pmpp}} \right) \cdot \eta_{pm} \cdot \eta_{tm} \cdot \eta_i =$$

$$= \left(403 \cdot 0,945 \cdot 0,98 - \frac{35}{0,96} \right) \cdot 0,95 \cdot 0,91 \cdot 0,98 = 285 \text{ kW} \quad (11)$$

P_o [kW]	- výkon na obvodu kol
$P_{sm} = 403$ kW	- výkon spalovacího motoru
$P_{pp} = 35$ kW	- střední příkon pomocných pohonů
$\eta_{pp} = 0,96$	- účinnost měniče pomocných pohonů
$\eta_{ta} = 0,945$	- účinnost trakčního alternátoru
$\eta_{tu} = 0,98$	- účinnost trakčního usměrňovače
$\eta_{pm} = 0,95$	- účinnost trakčního pulzního měniče
$\eta_{tm} = 0,91$	- účinnost trakčních motorů
$\eta_{op} = 0,98$	- účinnost ozubeného převodu

Maximální trakční výkon na obvodu kol při příkonu ze spalovacího motoru a příkonu ze superkapacitorů při půlminutovém vybíjecím proudu 400 A:

$$P_o = \left(P_{sm} \cdot \eta_{ta} \cdot \eta_{tu} + P_{a30s} \cdot \eta_a - \frac{P_{pp}}{\eta_{pmpp}} \right) \cdot \eta_{pm} \cdot \eta_{tm} \cdot \eta_i =$$

$$= \left(403 \cdot 0,945 \cdot 0,98 + 240 \cdot 0,96 - \frac{35}{0,96} \right) \cdot 0,95 \cdot 0,91 \cdot 0,98 = 480 \text{ kW} \quad (12)$$

P_o [kW]	- výkon na obvodu kol
$P_{a30s} = 240$ kW	- výkon superkapacitorů po dobu 30 s
$P_{pp} = 35$ kW	- střední příkon pomocných pohonů

9.5.2 Výpočet trakční charakteristiky

Trakční charakteristika je diagram znázorňující průběh závislosti tažné síly hnacího vozidla na jeho rychlosti. Je možno udávat tažnou sílu na obvodu kol, popř. na háku vozidla. Obvyklým způsobem zobrazení této závislosti, je zobrazení v prvním kvadrantu kartézských souřadnic. Na svislou osu je vynášena tažná síla a na podélnou osu rychlost hnacího vozidla. Velikost tažné síly je shora omezena maximální adhezní silou, kterou je schopna lokomotiva při svém rozjezdu přenést v kontaktu kolo – kolejnice. Zprava je trakční charakteristika omezena maximální konstrukční rychlostí vozidla.

Tažná síla vozidla na obvodu kol

$$F_0 = \frac{P_o \cdot 3,6}{V} \quad (13)$$

F_0 [N] – tažná síla na obvodu kol

P_o [W] – výkon na obvodu kol

V [km/h] – rychlost

Měrný vozidlový odpor lokomotivy řady 740 [5]

$$o_{HV} = 3 + 0,03 \cdot V + 0,0007 \cdot V^2 \quad (14)$$

o_{HV} [N/kN] – měrný vozidlový odpor

V [km/h] – rychlost

Tažná síla na háku

$$F_H = F_0 - M_{HV} \cdot g \cdot \frac{o_{HV}}{1000} \quad (15)$$

F_H [N] – síla na háku vozidla

M_{HV} [kg] – hmotnost hnacího vozidla

Svislá kolová síla

$$Q = \frac{M_{HV} \cdot g}{2 \cdot n} \quad (16),$$

Q [N] – svislá kolová síla

n – počet náprav vozidla

Součinitel adheze dle Curtius-Knifflera:

$$\mu_{C+K} = \frac{7,5}{V + 44} + 0,161 \quad (17)$$

μ_{C+K} – součinitel adheze

V [km/h] – rychlost

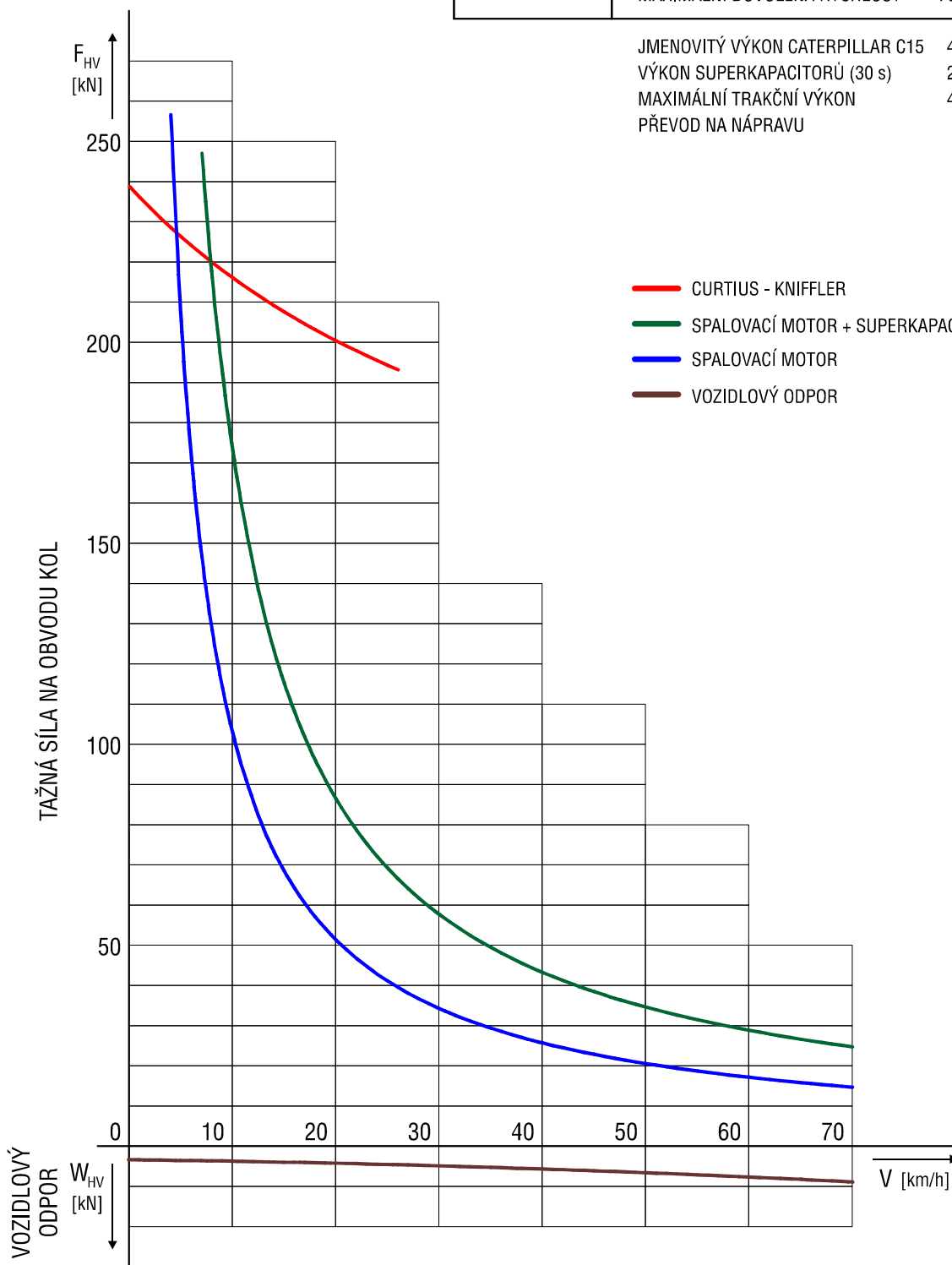
Adhezní síla vozidla

$$F_A = Q \cdot n \cdot \mu_{C+K} \quad (18)$$

F_A [N] – adhezní síla

var. A	HMOTNOST VE SLUŽBĚ	72 t
	PRŮMĚR STŘEDNĚ OJETÝCH KOL	965 mm
	DĚLKA PŘES NÁRAZNÍKY	13,58 m
	MAXIMÁLNÍ DOVOLENÁ RYCHLOST	70 km/h

JMENOVITÝ VÝKON CATERPILLAR C15	403 kW
VÝKON SUPERKAPACITORŮ (30 s)	240 kW
MAXIMÁLNÍ TRAKČNÍ VÝKON	480 kW
PŘEVOD NA NÁPRAVU	78:15



Obr. 36 Trakční charakteristika hybridního vozidla varianty A

10 Řešení trakčních obvodů – varianta B

Druhá varianta řešení vychází z myšlenky zabudování spalovacího agregátu o výkonu přibližně dvojnásobku až trojnásobku středního výkonu. Střední výkon vozidla se při posunu pohybuje v rozmezí 50 – 100 kW. Určení tohoto středního výkonu bylo provedeno z měření uvedeného v kap. 7.2. provedeného na vlečkách patřící dnes společnosti Arcelor Mittal. Vozidlo by tedy obdobně jako ve variantě A využívalo motor nejenom k trakčním účelům, popř. k napájení pomocných pohonů, ale také k dobíjení akumulátorů při přebytku výkonu spalovacího motoru při jízdě vozidla.

Výkon spalovacího motoru by se měl pohybovat v relaci 200 – 250 kW. K takto dimenzovanému spalovacímu motoru by měl akumulátor energie zajistit zvýšení výkonu minimálně o 200 kW po dobu výrazně delší dobu než tomu bylo v předchozím případě u superkapacitorů. K určení potřebné energetické kapacity by bylo zapotřebí provést simulaci posunu vozidla. Z dřívějších aplikací by se dalo usuzovat na velikost akumulované energie okolo 150 kWh. Tento fakt však lze přičíst použití méně vhodných akumulátorových baterií, které nebyly schopny rychlého nabíjení. S použitím dnešních typů baterií se bude energetická kapacita návrhu pohybovat okolo 50 kWh.

K akumulaci energie vzniklé při brzdění vozidla bylo po vyhodnocení poměru cena / výkon jednotlivých typů baterií zvoleny baterie NiMH. Další použitelnou variantou jsou dražší baterie typu Li-ion, které se díky své spolehlivosti využívají ve vojenských hybridních vozidlech. Popřípadě také nový typ baterií NaNiCl₂, které však jsou ještě velmi málo odzkoušeným typem a také jejich cena díky malé produkci je vyšší než-li u baterií NiMH. Nevýhodou baterií NiMH je nemožnost zapojení do paralelních větví a tím získání větší celkové energetické kapacity. Maximální dobíjecí proudy u tohoto typu baterií se pohybují mezi jedním až dvojnásobkem hodnoty kapacity baterie.

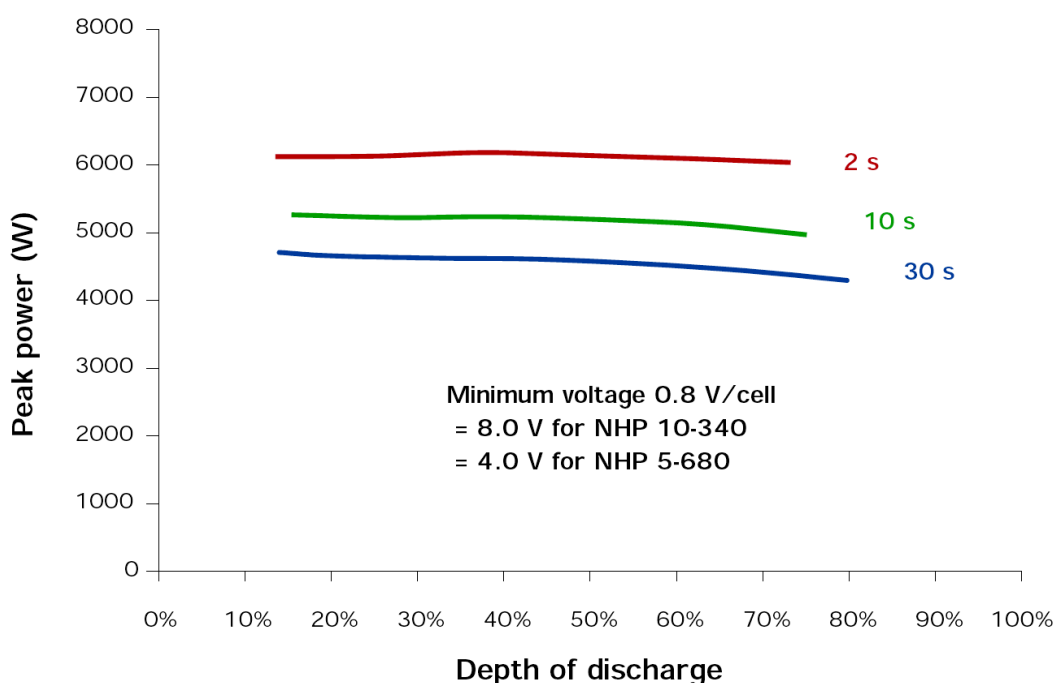
Vybraná elektrochemická akumulátorová baterie je vyrobená francouzskou společností Saft. Jedná se tedy o baterii typu NiMH, která je bezúdržbová, plně recyklovatelná a odolná proti poškození. Baterie je zatavena s integrovaným uzavřeným kapalinovým chlazením. Tato baterie je určena primárně pro hybridní vozidla, jelikož se vyznačuje vysokým měrným výkonem a měrnou energií.



Obr. 37 Elektrochemická akumulátorová baterie NiMH Saft NHP 5-680

Parametry akumulátorové baterie NiMH Saft NHP 5-680 [25]:

Kapacita baterie	68 Ah
Jmenovité napětí.....	6 V
Maximální 5-ti minutový proud	400 A
Maximální 30-ti sekundový proud	1000 A
Uložená energie	50 Wh/kg
Špičkový výkon dodávaný do zátěže.....	520 W/kg
Rozměry (VxŠxD)	165 x 169 x 173 mm
Hmotnost	9 kg
Cena za baterii	1641 € (cca 43 000 Kč)



Obr. 38 Vybíjecí křivka baterie NiMH Saft NHP 5-680 při teplotě 25 °C

10.1 Dimenzace trakčních zařízení

10.1.1 Dimenzace elektrochemických akumulátorových baterií

Za akumulací prvek v této variantě byla tedy zvolena elektrochemická akumulátorová baterie NiMH Saft NHP 5-680. Celkové napětí akumulátoru energie bylo opět zvoleno 600 V, což je napětí odpovídající trakčnímu meziobvodu. Za tímto krokem se skrývá snaha o zjednodušení pulzních měničů mezi akumulátorem a trakčním meziobvodem.

Pro dosažení napětí 600 V je potřeba články baterie zapojit do série. Tento typ baterií avšak nelze spojit do paralelních větví, ale pouze obdobným způsobem jako superkapacity, a to tak že každá paralelní větev je oddělena vlastním měničem.

Počet sériově zapojených baterií.

$$n_{\text{serie}} = \frac{U_{\text{celk}}}{U_{\text{článek}}} = \frac{600}{6} = 100 \quad (19)$$

n_{serie} – počet sériově zapojených baterií

U_{celk} [V] – celkové napětí

$U_{\text{článek}}$ [V] – napětí na článku

Použitelná energie uložená v bateriích NiMH.

$$E = Q \cdot U_{\text{celk}} \cdot \eta_p = 68 \cdot 600 \cdot 0,8 = 32,64 \text{ kWh} = 117,5 \text{ MWh} \quad (20)$$

E [Ws] – použitelná energie

Q [Ah] – kapacita baterie

η_p – využitelnost uložené energie

Výkon dodávaný bateriemi po dobu 5-ti minut při 60% využití uložené energie.

$$P_{5 \text{ min}} = U_{\text{celk}} \cdot I_{5 \text{ min}} = 600 \cdot 400 = 240 \text{ kW} \quad (21)$$

$P_{5 \text{ min}}$ [W] – 5-ti minutový výkon

$I_{5 \text{ min}}$ [A] – maximální 5-ti minutový proud 400 A

Špičkový 30-sekundový výkon dodávaný bateriemi.

$$P_{\text{peak}} = U_{\text{celk}} \cdot I_{30 \text{ s}} = 600 \cdot 1000 = 600 \text{ kW} \quad (22)$$

P_{peak} [W] – špičkový výkon

$I_{30 \text{ s}}$ [A] – maximální proud 1000 A po dobu 30 sekund

Celková hmotnost superkapacitorů (bez spojovacích a zástavbových dílů).

$$m_{\text{celk}} = m_{\text{článek}} \cdot n_{\text{serie}} = 100 \cdot 9 = 900 \text{ kg} \quad (23)$$

m_{celk} [kg] – celková hmotnost baterií

$m_{\text{článek}}$ [kg] – hmotnost jednoho článku

10.1.2 Parametry spalovacího motoru Caterpillar C9

Za primární zdroj energie byl zvolen opět dieselový motor z nabídky společnosti Caterpillar. Ze škály výkonnostně odstupňovaných motorů byl zvolen dieselový motor C9. Tento motor je schopen dodávat maximální výkon cca 240 kW v provozu střední zátěže, což ve spolupráci s navrženými elektrochemickými akumulátorovými bateriemi NiMH dává navrhovaný špičkový výkon v rozmezí 500 – 600 kW.

Jedná se o čtyřdobý dieselový řadový šestiválcový motor. Motor je jednou přepřehovaný turbodmychadlem poháněným výfukovými plyny s mezichladičem plnicího vzduchu typu vzduch – vzduch (technologie ACAAT). Splňuje současné evropské emisní normy Stage IIIA, popř. Tier 3 dle amerických standardů. Tyto standardy je schopen splňovat díky technologii ACERT, která je více popsána v kapitole 9.1.2.

Rozdílem tohoto motoru oproti typu C15 použitého ve variantě A jsou hydraulicky poháněné elektronicky řízené vstřikovací jednotky tzv. HEUI, které poskytují vícenásobné vstřikování a umožňují tzv. mikroexploze paliva před a po jeho hlavním vstřiku. Tímto krokem se snaží výrobce zjednodušit údržbu motoru a zvýšit jeho spolehlivost. Chladicí soustava motoru je kapalinová s chladičem umístěným na čele motoru.

Hlavní parametry spalovacího motoru C9 [35]:

Jmenovitý výkon.....	242 kW
Jmenovité otáčky.....	1800 – 2100 ot./min.
Volnoběžné otáčky.....	600 ot./min.
Vrtání / zdvih.....	112 / 149 mm
Zdvihový objem	8,8 l
Průměrná měrná spotřeba	214,4 g/kWh
Volnoběžná spotřeba.....	0,9 kg/h
Hmotnost.....	776 kg

Tab. 8 Výkon a spotřeba motoru C9

Otáčky [min ⁻¹]	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Výkon [kW]	171	187	202	218	225	232	238	242
Měrná spotřeba [g/kWh]	225,6	220,0	215,3	211,2	209,7	208,5	207,6	209,9



Obr. 39 Motor Caterpillar C9 ACERT o výkonu 242 kW

10.1.3 Trakční alternátor Siemens 1FC2-284

K vybranému typu spalovacího motoru Caterpillar C9 bylo zapotřebí vybrat vhodný typ alternátoru. I k tomuto typu je společností CZ LOKO vybrán typ alternátoru Siemens Drásov. Výkonnostně vhodným typem k motoru C9 je alternátor Siemens 1FC2-284-4. Jedná se o třífázový synchronní generátor pro nízké napětí. Třífázové vinutí je vyvedeno na čtyři svorky a zapojeno do hvězdy. Skládají se z generátoru střídavého proudu (hlavní stroj) a z budiče s rotujícím usměrňovačem. Rotory hlavního stroje a budiče se nachází společně s rotujícím usměrňovačem a ventilátorem na jedné hřídeli. Části, které slouží k regulaci

napětí jsou umístěny ve svorkovnicové skříni. Všechny tyto díly tvoří spolu se svařovaným krytem a ložisky jednu stavební jednotku.

Základní parametry alternátoru Siemens 1FC2-248-4 [35]:

Jmenovitý výkon.....	250 kVA
Otáčky.....	600 – 2000 ot./min
Jmenovité napětí	400 V
Jmenovitý proud	360 A
Účinnost.....	94,5 %
Třída izolace.....	F
Buzení	cizí

10.2 Navržené parametry varianty B posunovací lokomotivy:

Hlavní navržené parametry posunovací lokomotivy ve variantě A:

Spalovací motor	Caterpillar C9 ACERT
Výkon.....	242 kW
Výkonová třída.....	C (střídavý provoz)
Otáčky.....	600 – 2100 ot./min.
Alternátor	Siemens 1FC2-284-4
Akumulátorové baterie.....	Saft NHP 5-680
Typ	NiMH
Napětí	600 V
Počet baterií.....	100
Akumulovaná energie.....	40 800 Wh (80% využitelnost)
5-minutový výkon.....	240 kW
30-sek. špičkový výkon	600 kW
Celková hmotnost	900 kg

10.3 Konstrukční řešení

Za účelem návrhu zástavby jednotlivých agregátů do kapot rekonstruované lokomotivy byl opět zpracován 3D model lokomotivy s návrhem rozmístění jednotlivých agregátů pod kapotami lokomotivy. Model lokomotivy s popisem je znázorněn na Obr. 40. Z tohoto modelu byl taktéž jako u předešlé varianty hybridního pohonu zpracován typový výkres s naznačením umístění agregátů, který se nachází v příloze pod označením VAR-B-001.

10.3.1 Popis rekonstrukce a umístění agregátů

Jedná se o rekonstrukci na posunovací lokomotivu s nízkými kapotami s kabinou strojvedoucího umístěnou nad zadním podvozkem. Rekonstrukce kapot je jedním z velkých přínosů rekonstrukce, jelikož výrazně zlepšuje výhled strojvedoucího ze stanoviště. Rozmístění agregátů pod kapotami je až na výjimky shodné s variantou A (popsáno

v kapitole 9.3.1). Základní rozdíly jsou v použitém typu motor-generátorového soustrojí a záměně superkapacitorů za baterie NiMH. Baterie NiMH zaujímají srovnatelný objem s blokem superkapacitorů, z tohoto důvodu není zapotřebí zásadních změn v uspořádání agregátu pod kapotami.

Upevnění motoru, generátoru i příslušného chladiče je taktéž shodné, tedy na společných nosnících. K těmto nosníkům je motor i generátor připojeny pomocí speciálních podložek s výškovým stavěním. To dovoluje nejprve ustavit generátor a posléze k němu souose připojit spalovací motor tedy takovým způsobem, aby se eliminovaly veškeré nežádoucí odchylky. Celek je poté mírně zapuštěn do rámu lokomotivy z důvodu výšky zástavby a usazen na rám lokomotivy pomocí silentbloků, které tlumí přenos vibrací ze spalovacího motoru na rám.

Baterie NiMH jsou umístěny ve třech rámech, které umožňují v případě potřeby snadný přístup k jednotlivým bateriím za pomoci vyjmutí celého rámu. Vzhledem k výrobcem deklarované bezúdržbovosti je však tento případ velmi málo pravděpodobný. Baterie NiMH jsou chlazeny proudícím vzduchem, který je udržuje v optimální provozní teplotě. Proudění vzduchu vytváří dvojice ventilátorů umístěných nad baterií a nasávají vzduch bočními plochami kapoty a vyfukují ohřátý vzduch směrem vzhůru na kapoty.

10.4 Provoz hybridního pohonu

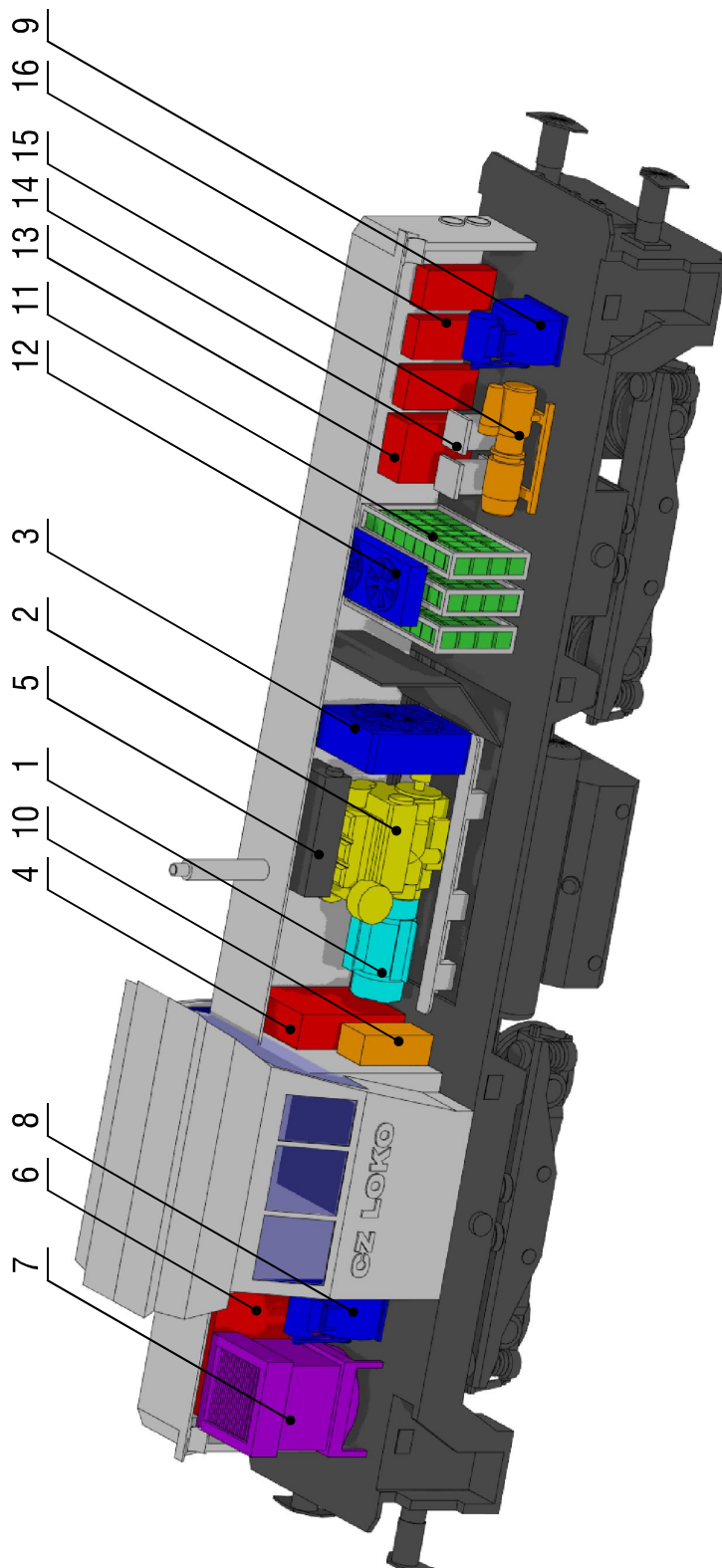
Z hlediska definice této varianty jako hybridního vozidla se jedná o mezistupeň hybridizace vozidla mezi mybridem a plným hybridem. Vozidlo totiž je schopno provozu na oba zdroje energie, avšak při provozu z akumulátoru energie, nelze mluvit o plnohodnotném nasazení, z důvodu malé energetické kapacity akumulátoru.

10.4.1 Stání vozidla

V tomto režimu bude spalovací motor vypnut, veškeré zásobování vozidla energií, tedy napájení pomocných pohonů, bude ze elektrochemických akumulátorových baterií NiMH. K vypnutí motoru dojde po jedné minutě volnoběhu spalovacího motoru, aby se eliminovala situace automatického vypnutí motoru při posunu. Pokud obsluha sama vyhodnotí provozní situaci za vhodnou pro vypnutí motoru před tímto časovým limitem, bude možno manuálně motor vypnout.

10.4.2 Rozjezd vozidla

Rozjezd vozidla může mít dva odlišné průběhy spolupráce spalovacího motoru a baterií a to podle stavu spalovacího motoru na počátku rozjezdu. V prvním případě, je-li spalovací motor v chodu, se jedná o klasický rozjezd hybridního vozidla s maximálním využitím výkonu spalovacího motoru a pouze výkon, který už spalovací motor není schopen dodat, tedy v případě potřeby výkonu nad 240 kW, je další potřebný výkon odebírán z baterií.

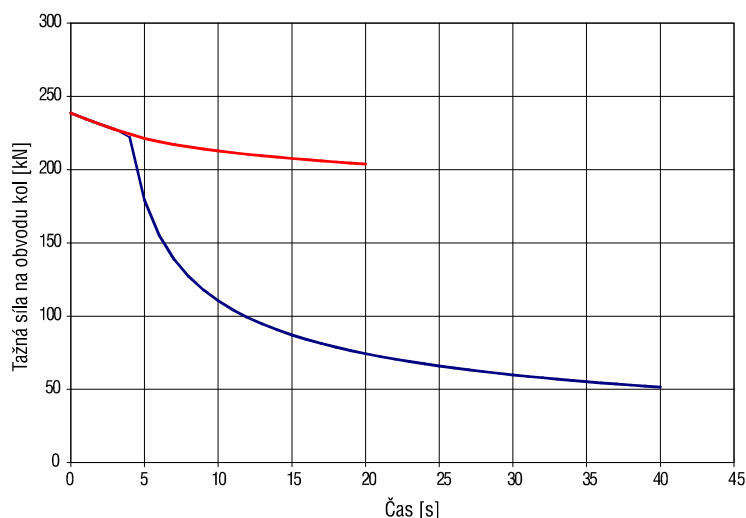


Obr. 40 Návrh uspořádání agregátů ve variantě B

Legenda: 1 – generátor; 2 – motor; 3 – chladič motoru; 4 – pulzní usměrňovač; 5 – výfuk; 6 – rozvaděč; 7 – odporník brzdy; 8, 9 – ventilátory trakčních motorů; 10 – klimatizace/topení; 11 – elektrochemické baterie; 12 – chlazení baterií; 13 – pulzní měnič baterií; 14 – trakční tlumivky; 15 – kompresor; 16 – pulzní měnič pomocných pohonů

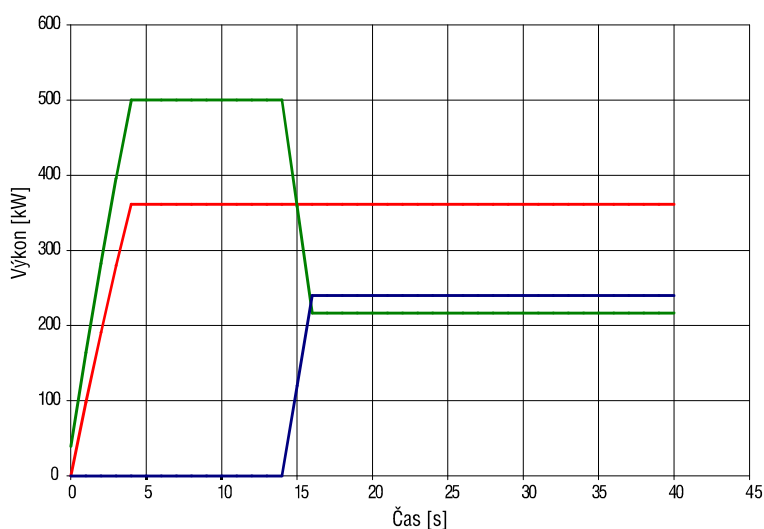
Druhým případem je rozjezd, kdy jeho na počátku je spalovací motor vypnut. V tomto případě by prvních 15 sekund bylo vozidlo hnáno pouze bateriemi. Během těchto patnáct sekund by došlo k nastartování spalovacího motoru. Další chod hybridního pohonu už by byl stejný jako v předešlém případě, tedy primárním zdrojem by byl spalovací motor a pouze navýšení výkonu by zprostředkovaly baterie NiMH. Pro zjištění energetické náročnosti takového rozjezdu byl proveden výpočet.

Tento výpočet měl zjistit jaká bude energetická náročnost jednoho rozjezdu vozidla při maximálním celkovém výkonu obou agregátů 500 kW. Tato výkonová hranice byla zvolena z důvodu nepřekročení vybíjecího proudu baterií, který při tomto výkonu činí 830 A. Nachází se tedy pod hranicí maximálního 30-ti sekundového proudu 1000 A. Spolupráce agregátů je znázorněna na Obr. 42, kde je zřetelně vidět průběh výkonů jednotlivých zdrojů energie, především postupný nástup výkonu spalovacího motoru okolo 15-té sekundy.



Obr. 41 Průběh tažné síly při rozjezdu se zátěží 500 t

(červená – max. adhezní síla, modrá – trakční síla omezena max. výkonem)



Obr. 42 Průběh výkonů jednotlivých zdrojů energie

(červená – trakční výkon, zelená – baterie NiMH, modrá – spalovací motor)

Hlavním bodem tohoto výpočtu však bylo zjištění energetické náročnosti. Bylo vypočteno, že při rozjezdu výkonem 500 kW trvajícím po dobu jedné minuty je zapotřebí odebrat přibližně 16,5 MWh energie z baterií, což odpovídá 13,5% vyčerpání uchované energie v bateriích. Tento úbytek energie je možno zpětně dobít za 3 minuty při dobíjecím proudu 150 A (přibližně odpovídající hodnotě dvojnásobku kapacity baterie [25]), resp. výkonu 90 kW. Energie by mohla být získána dobítím při elektrodynamickém brzdění, popř. při přebytku výkonu spalovacího motoru v průběhu jízdy či při stání.

10.4.3 Jízda a brzdění vozidla

Při jízdě vozidla by byl, stejně jako ve variantě A, použit k pohonu vozidla primárně spalovací motor. Baterie by byly použity v případě nutnosti vyššího výkonu než-li 242 kW, což je jmenovitý výkon spalovacího motoru. Energetická náročnost těchto navýšení by však byla značná. Při špičkovém půlminutovém navýšení výkonu o 600 kW, tj. při maximálním proudu 1000 A, by se spotřebovalo 15 % uložené energie, což odpovídá přibližně uvedené spotřebě při rozjezdu. Tedy opětovné získání této energie by opět trvalo 3 minuty. Avšak pokud bychom uvažovali obdobně jako ve variantě A výkonové špičky celého vozidla okolo hodnoty 600 kW v délce maximálně půl minuty, by byl výkon odebíraný z baterií 360 kW, což by snížilo uloženou energii o 10,8 MWh, tedy cca o 9 %.

Z měření uvedeného v kapitole 7.2 vyplývá, že výkonové špičky překračující výkon 240 kW nejsou časté, resp. časové mezery mezi nimi poskytují dostatek času k opětovnému dobíjení baterií do plné hodnoty. Z toho lze soudit, že navržená kapacita baterií by mohla být dostačující pro provoz lokomotivy v posunové službě.

Při elektrodynamickém brzdění, které by mělo tvořit hlavní výhodu hybridního pohonu, je vozidlo schopno zpětně ukládat pouhých 90 kW z celkového brzdného výkonu. Toto omezení je dáno maximálním nabíjecím proudem 150 A. Větší část brzdného výkonu by se mařila v brzdových odporcích dimenzovaných na 1080 kW.

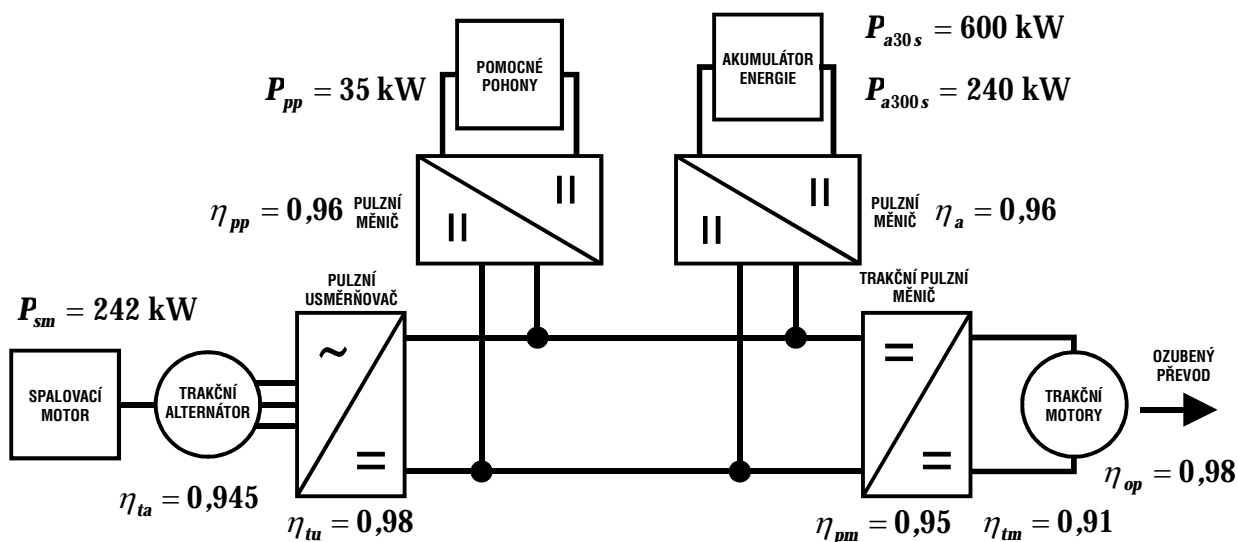
K automatické sepnutí dobíjení elektrochemických akumulátorových baterií by došlo v případě poklesu akumulované energie pod 30 %. Pokud by k takovému poklesu došlo a spalovací motor disponoval v danou chvíli přebytkem výkonu, automatický by bylo započato v dobíjení baterií tímto přebytkem.

10.4.4 Jízda pouze za použití baterií NiMH

Pro jízdu samostatné lokomotivy by bylo možné využít rozdíl od varianty A pouze baterií. Jejich naakumulovaná energie by postačovala při středním výkonu 100 kW k přibližně 20-ti minutovému provozu. Tento režim by se spouštěl manuálně dle uvážení obsluhy, popř. by bylo možno uvažovat o zavedení do systému, který by při nastavení daného režimu zjišťoval za pomoci akcelerometrů počáteční zrychlení lokomotivy a podle vyhodnocení průběhu jeho velikosti by určoval, zda je zapotřebí uvést do chodu spalovací motor či nikoliv.

10.5 Trakční charakteristiky

Pro výpočet trakční charakteristiky hnacího vozidla je nejprve nutné zjistit, jaký výkon je možno dodat k trakčnímu využití a jaké ztráty jsou při přenosu výkonu na obvod kol vozidla. Výkon na obvodu kol je veličina ze které následně dostáváme tažnou sílu vozidla na obvodu kola pro danou rychlost.



Obr. 43 Blokové schéma přenosu výkonu s jednotlivými hodnotami výkonu a účinnosti

Výpočet maximálního trakčního výkonu na obvodu kol při příkonu pouze z maximálního výkonu spalovacího motoru:

$$\begin{aligned}
 P_o &= \left(P_{sm} \cdot \eta_{ta} \cdot \eta_{tu} - \frac{P_{pp}}{\eta_{pp}} \right) \cdot \eta_{pm} \cdot \eta_{tm} \cdot \eta_i = \\
 &= \left(242 \cdot 0,945 \cdot 0,98 - \frac{35}{0,96} \right) \cdot 0,95 \cdot 0,91 \cdot 0,98 = 158 \text{ kW}
 \end{aligned} \tag{24}$$

P_o [kW]	- výkon na obvodu kol
$P_{sm} = 242$ kW	- výkon spalovacího motoru
$P_{pp} = 35$ kW	- střední příkon pomocných pohonů
$\eta_{pp} = 0,96$	- účinnost měniče pomocných pohonů
$\eta_{ta} = 0,945$	- účinnost trakčního alternátoru
$\eta_{tu} = 0,98$	- účinnost trakčního usměrňovače
$\eta_{pm} = 0,95$	- účinnost trakčního pulzního měniče
$\eta_{tm} = 0,91$	- účinnost trakčních motorů
$\eta_{op} = 0,98$	- účinnost ozubeného převodu

Maximální trakční výkon na obvodu kol při maximálním příkonu ze spalovacího motoru a příkonu z baterií NiMH při půlminutovém vybíjecím proudu 1000 A:

$$P_o = \left(P_{sm} \cdot \eta_{ta} \cdot \eta_{tu} + P_{a30s} \cdot \eta_a - \frac{P_{pp}}{\eta_{pmpp}} \right) \cdot \eta_{pm} \cdot \eta_{tm} \cdot \eta_i =$$

$$= \left(242 \cdot 0,945 \cdot 0,98 + 600 \cdot 0,96 - \frac{35}{0,96} \right) \cdot 0,95 \cdot 0,91 \cdot 0,98 = 647 \text{ kW} \quad (25)$$

P_o [kW] – výkon na obvodu kol

$P_{a30s} = 600$ kW – výkon baterií NiMH po dobu 30 s

$P_{pp} = 35$ kW – střední příkon pomocných pohonů

Maximální trakční výkon na obvodu kol při příkonu ze spalovacího motoru a příkonu z baterií NiMH při pětiminutovém vybíjecím proudu 400 A:

$$P_o = \left(P_{sm} \cdot \eta_{ta} \cdot \eta_{tu} + P_{a300s} \cdot \eta_a - \frac{P_{pp}}{\eta_{pmpp}} \right) \cdot \eta_{pm} \cdot \eta_{tm} \cdot \eta_i =$$

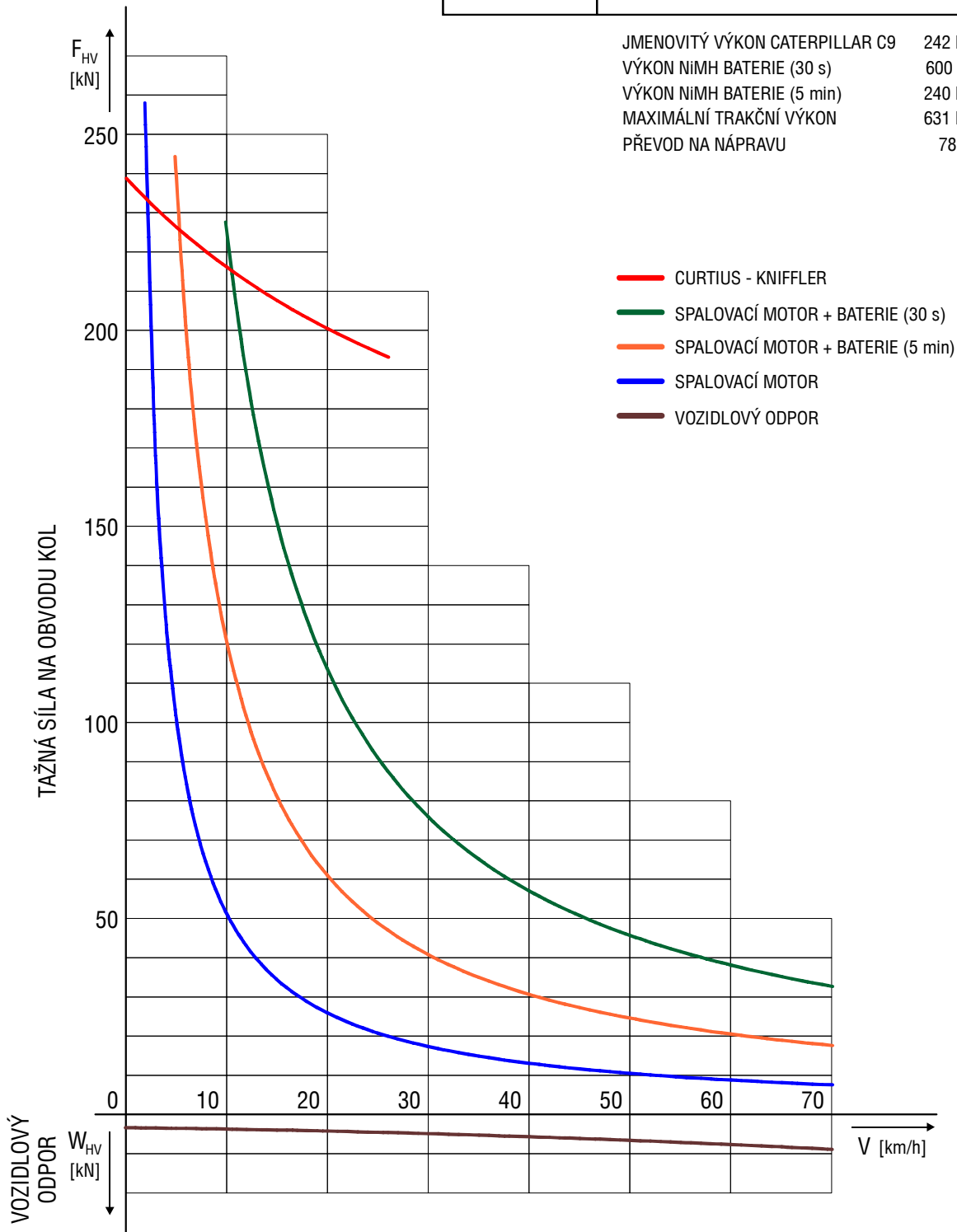
$$= \left(242 \cdot 0,945 \cdot 0,98 + 240 \cdot 0,96 - \frac{35}{0,96} \right) \cdot 0,95 \cdot 0,91 \cdot 0,98 = 354 \text{ kW} \quad (26)$$

P_o [kW] – výkon na obvodu kol

$P_{a300s} = 240$ kW – výkon baterií po dobu 30 s

$P_{pp} = 35$ kW – střední příkon pomocných pohonů

var. B	HMOTNOST VE SLUŽBĚ	72 t
	PRŮMĚR STŘEDNĚ OJETÝCH KOL	965 mm
	DĚLKA PŘES NÁRAZNÍKY	13,58 m
	MAXIMÁLNÍ DOVOLENÁ RYCHLOST	70 km/h



Obr. 44 Trakční charakteristika hybridního vozidla varianty B

11 Zhodnocení a srovnání

Tato kapitola si klade za cíl srovnání variant A a B s konvenčními rekonstrukcemi posunovací lokomotivy řady 740. Dále také celkové zhodnocení výhod či nevýhod navržených variant a určení výhodnější z obou variant.

11.1 Porovnání s konvenčními rekonstrukcemi

Navržené varianty je pro celkové zhodnocení nutné porovnat s již provedenou rekonstrukcí lokomotiv řady 740. Byly vybrány rekonstrukce na řadu 724.6 a 724.7, jelikož svými parametry, tedy především jmenovitým výkonem spalovacího motoru 403 kW, resp. 627 kW, nejvíce odpovídají navrženým variantám A a B.

11.1.1 Zástavba pod kapoty

První z oblastí, ve které budou navržené varianty porovnávány s konvenčními rekonstrukcemi, je zástavba agregátů pod kapoty lokomotivy. Z tohoto pohledu jsou obě varianty naprosto rovnocenné se svými konvenčními protějšky, jelikož se zástavbou akumulátorů pod kapoty využívané i u konvenčních rekonstrukcí nebyl žádný konstrukční problém.

11.1.2 Trakční parametry

Základní srovnání trakčních parametrů lokomotiv jednotlivých variant je uvedeno v Tab. 9. Z něho vychází, že navržené varianty svým dostupným výkonem jsou zcela v mezích již dříve prováděných rekonstrukcí, tedy by měly být schopny jim konkurovat v posunové službě, a to především rekonstrukcím na řadu 724.6.

Tab. 9 Srovnání trakčních parametrů navržených variant s konvenční rekonstrukcí

Rekonstrukce	Var. A	Var. B	724.6	724.7
Spalovací motor	CAT C15	CAT C9	CAT C-15	CAT 3412 E
Výkon spalovacího motoru	403 kW	242 kW	392 kW	627 kW
30s výkon akumulátoru	240 kW	600 kW	0 kW	0 kW
5min výkon akumulátoru	24 kW	240 kW	0 kW	0 kW

11.1.3 Pořizovací cena

Pořizovací cena je spolu s provozními náklady hlavním parametrem, který určuje konkurenceschopnost, popř. životaschopnost navržené rekonstrukce. Nejdůležitější je otázka, zda vyšší pořizovací náklady, které jsou na počátku vloženy do rekonstrukce lokomotivy s hybridním pohonem oproti rekonstrukci lokomotivy s konvenčním pohonem, se v provozu hybridního stroje projeví snížením provozních nákladů, tedy převážně snížením spotřeby provozních hmot, jež by v důsledku znamenalo ekonomickou výhodnost hybridního pohonu v porovnání s konvenčním pohonem.

Cenové srovnání pořizovacích nákladů je provedeno pouze procentuálně na přání zadavatele diplomové práce, společnosti CZ LOKO, a.s. Za základ 100 % je brána hodnota rekonstrukce na řadu 724.7. Z Tab. 10 vyplývá, výrazný rozdíl pořizovacích nákladů u varianty B, osazené bateriemi NiMH. Varianta A se zdá být finančně zajímavá, jelikož zvýšení pořizovacích nákladů není oproti konvenčním lokomotivám velmi výrazné. Je zde předpoklad, že by snížením provozních nákladů mohla tato varianta toto navýšení kompenzovat. Provozními úsporami se budou zabírat další kapitoly.

Tab. 10 Srovnání pořizovacích nákladů navržených variant s konvenční rekonstrukcí

Rekonstrukce	Var. A	Var. B	724.6	724.7
Spalovací motor	CAT C15	CAT C9	CAT C-15	CAT 3412 E
Poměr cen pohonných agregátů	~ 133 %	~ 188 %	~ 60 %	100 %
Poměr cen rekonstrukcí lokomotiv	~ 104 %	~ 111 %	~ 95 %	100 %

11.1.4 Provozní náklady

Porovnání provozních nákladů jednotlivých variant je velmi obtížné, ne-li na poli spotřeby provozních hmot také zcela nemožné. Srovnání spotřeby provozních hmot, tak jak vyplývá z měření na lokomotivě TA436.0 uvedeného v kap. 5.1, se velmi mění v závislosti na typu provozu, ve kterém je hybridní lokomotiva nasazena.

Pro přibližný nástin spotřeby provozních hmot jednotlivých variant hybridního pohonu, popř. určení nejefektivnějšího nasazení daného typu, by bylo vhodné provést simulaci provozu hybridního pohonu podle dat průběhů výkonů, které by byly naměřeny přímo v určitém typu provozu, resp. v tomto případě posunu. Alespoň velmi hrubý odhad některých předpokládaných úspor ze spotřeby paliva navržených variant pohonu je uveden následujících kapitolách.

11.1.5 Úspora paliva při stání vozidla

Tato úspora je jednou ze dvou základních výhod navržených hybridního pohonu. Výpočet úspor se bude vztahovat k lokomotivě 724.7 s motorem Caterpillar 3412 E, který má volnoběžnou spotřebu 2,2 kg/h a průměrnou měrnou spotřebu paliva 215 g/kWh. Tato lokomotiva byla zvolena z toho důvodu, jelikož se svými výkonovými parametry nejvíce blíží navrženým variantám. Pro výpočet volnoběžné hodinové spotřeby paliva je potřeba znát příkon pomocných pohonů a jak již bylo uvedeno, odhadovaný příkon pomocných pohonů, které je potřeba napájet při stání vozidla, je cca 7 kW.

$$b_s = b_0 + \frac{g \cdot P_{pp}}{1000} = 2,2 + \frac{215 \cdot 7}{1000} = 3,70 \text{ kg/h} = 3,03 \text{ l/h} \quad (27)$$

b_s [l/h] – spotřeba motoru při stání vozidla

b_0 [kg/h] – volnoběžná spotřeba motoru

g [g/kWh] – průměrná měrná spotřeba motoru

Finanční úspora při každém zastavení a stání s vypnutým motorem po dobu 15 minut, je při použití aktuální maloobchodní ceny nafty 24 Kč přibližně 26 Kč. Interval 15-ti minut byl stanoven s ohledem na maximální dobu, po kterou jsou schopny u varianty A superkapacitory dodávat energii, a také s ohledem na skutečnost, že se v provozu předpokládá při delší odstavení lokomotivy vypnutí veškerých pohonů.

$$\mathit{úspora}_{15 \text{ min}} = b_s \cdot c_{\text{nafta}} \cdot t_{15 \text{ min}} = 3,03 \cdot 24 \cdot 0,25 \cong 26 \text{ Kč} \quad (28)$$

b_s [l/h] – spotřeba motoru při stání vozidla

$c_{\text{nafta}} = 24$ Kč/l – cena nafty

$t_{15 \text{ min}} = 0,25$ – koeficient upravující cenu na z 1 hodiny na 15 minut

Přičemž pokud interval 2 až 10 minut stání vozidla činil dle měření 40 % celkové doby volnoběžného chodu motoru, který zaujímal 67 % z celkové doby chodu spalovacího motoru, je možné zhruba říci, že 25 % z provozu lokomotivy by byla hybridní lokomotiva napájena z akumulátoru.

Při celkové denní provozní době 16 hodin je tedy možné počítat s 4 hodinami denně, po které by se využívalo k napájení pomocných pohonů superkapacitorů. Při výpočtu lze dále uvažovat průměrný počet pracovních dnů 252 dní v roce. Z těchto údajů je možné vypočítat odhad roční finanční úsporu ze spotřeby paliva, která činí 56 500 Kč.

$$\mathit{úspora}_{\text{rok}} = \mathit{úspora}_{15 \text{ min}} \cdot n_{15 \text{ min}} \cdot n_{\text{den}} = 26 \cdot 16 \cdot 252 \cong 105 \text{ 000 Kč} \quad (29)$$

$n_{15 \text{ min}} = 16$ – počet 15-ti minutových intervalů ve čtyřech hodinách

$n_{\text{den}} = 252$ – průměrný počet pracovních dní v roce

Při předpokládané životnosti rekonstrukcí 15 let, je tedy možné očekávat úsporu nákladů ve výši cca 1,5 milionu Kč. Touto úsporou se stává rekonstrukce vozidla na hybridní variantu A finančně výhodnější, než-li konvenční rekonstrukce na řadu 724.7.

11.1.6 Úspora paliva z navýšení výkonu akumulátorem

Tato úspora nelze jednoduše odhadnout jako předcházející. V provozu bude výrazně záležet na průběhu odebíraného výkonu a také na možnostech pohonu rekuperovat brzdovou energii. Velmi hrubý odhad by mohl vést k roční finanční úspoře ve výši 150 000 Kč. Avšak pro přesnější zjištění by bylo zapotřebí již zmiňované simulace hybridního pohonu, která by velmi přesně vyčíslila možné finanční úspory.

11.1.7 Údržbové náklady

Údržbové zásahy na navržených variantách by se vzájemně nelišily, jelikož se v obou případech jedná zařízení, u něhož výrobce garantuje jeho bezúdržbovost. Tedy i z hlediska následného srovnání s vozidly konvenčního typu, nevyžadují varianty A a B zvláštní přístup v údržbě.

11.1.8 Ekologické přínosy

Mezi ekologické přínosy navržených hybridních lokomotiv patří v první řadě použití spalovacího motoru o menší kubatuře, tedy motorů s relativně nižšími hodnotami exhalací. Další výhodou je vypínání motoru při stání, což má za následek snížení spotřeby paliva a také snížení hlučnosti celé lokomotivy. U lokomotivy navržené varianty B se tato výhoda uplatňuje také při posunu v režimu jízdy na akumulátory.

Z pohledu následné recyklace použitých zařízení při rekonstrukci nejsou navržené varianty nikterak znevýhodněny oproti konvenčním lokomotivám, jelikož typy použitých akumulátorů neobsahují žádné toxické látky a tedy nevyžadují speciální přístup při konečné recyklaci.

11.1.9 Dostupnost, spolehlivost a životnost

Při návrhu variant nebylo použito žádného běžně nedostupného zařízení. Byla použita řada zařízení, která jsou běžně v nabídkách společností, ať už šlo o akumulátory energie, generátory či spalovací motory. Je zde řada zařízení, která by bylo potřeba vyrobit přesně „na míru“ těmto rekonstrukcím, mezi něž patří pulzní měniče, pulzní usměrňovač, tlumivky apod. Avšak tato skutečnost se vyskytuje i u rekonstrukcí lokomotiv s konvenčním pohonem, proto se nejedná o výraznou překážku při úvaze o realizovatelnosti variant rekonstrukcí s hybridním pohonem.

Co se týče spolehlivosti, tak se opět v porovnání s konzervativními rekonstrukcemi nejedná o žádný výrazný, ať už kladný či záporný, posun ve spolehlivosti lokomotivy, a to především vzhledem k výrobcí deklarované bezúdržbovosti akumulčních zařízení, tedy z tohoto předpokládané vysoké spolehlivosti.

Délka života navržených variant bude různá. Předpoklad životnosti u varianty A je stejný jako u konzervativních rekonstrukcí, jelikož superkapacity svou životností nijak neovlivní celkovou dobu života rekonstrukce lokomotivy. U varianty B už je otázkou cyklová výdrž baterií NiMH. Jejich životnost bude záviset na typu provozu, ve kterém bude lokomotiva provozována, ale je zde předpoklad kratší životnosti, než-li je předpokládaná doba života celé rekonstrukce.

11.2 Zhodnocení variant

Cílem této kapitoly je výsledné zhodnocení navržených variant. K zhodnocení bude použito jednoduché metody, jež je založena na kvalitativním ohodnocení jednotlivých variant rekonstrukcí lokomotiv řady 740. Stupnice známek kvality bude v rozmezí 1 – 5 (1 – nejlepší, 5 – nejhorší). Dále dle předchozí kapitoly 11.1 budou vybrány hodnotící parametry, podle kterých budou jednotlivé varianty porovnávány. Váha hodnotících parametrů avšak není stejná, z tohoto důvodu je ke každému hodnotícímu parametru přiřazena jeho váha.

Celá tato metoda je založena na subjektivním posouzení hodnotitele, jedná se však o metodu, která dovoluje celkové porovnání variant rekonstrukce při uvažování kvantitativně neporovnatelných parametrů.

Tab. 11 Zhodnocení variant rekonstrukce řady 740

Hodnocený parametr	Váha parametru	Var A	Var B	724.6	724.7
Zástavbová náročnost	0,1	1	1	1	2
Trakční parametry	0,25	2	2	4	1
Pořizovací cena	0,15	3	4	1	2
Provozní náklady	0,25	1	1	3	3
Údržbové náklady	0,05	2	2	1	1
Spolehlivost	0,05	1	1	1	1
Životnost	0,15	1	2	1	1
Výsledné hodnocení		1,6	1,9	2,25	1,75

Z výsledku hodnocení můžeme usoudit, že nevýhodnější variantou rekonstrukce je navržená hybridní varianta A, která využívá k akumulaci energie superkapacitorů. U této varianty je největším přínosem možnost vypínání motoru při stání vozidla a také možnost relativně velkého ukládání energie při elektrodynamickém brzdění, což z ekonomického pohledu znamená naprostou eliminaci zvýšených pořizovacích nákladů. Dále také cyklová životnost superkapacitorů, která nijak neovlivňuje životnost celé rekonstrukce.

Varianta B zejména díky svým vysokým pořizovacím nákladům a předpokládané nižší životnosti baterií NiMH vyšla v tomto zhodnocení až jako třetí. Je však nutno podotknout, že toto zhodnocení je založeno na subjektivním pohledu, proto je zapotřebí brát na tento fakt ohled.

12 Závěr

Cílem této diplomové práce byl návrh rekonstrukce posunovací lokomotivy na hybridní pohon, resp. především návrh akumulátoru energie a trakčního obvodu. V první části práce jsou v práci popsány důvody vedoucí k dnešním úvahám o zavedení hybridního pohonu do provozu. Jsou popsány důvody především ekonomické, ale taktéž ekologické, na něž se v dnešní době klade velká váha.

Nemalou část práce zabírá teoretický úvod o funkci a uspořádání hybridního pohonu, který se dále rozšiřuje do popisu jednotlivých typů akumulátorů energie a jejich vzájemnému porovnání. Na tento úvod navazuje kapitola s uvedením příkladů aplikací hybridního pohonu v kolejové technice.

K návrhu rekonstrukce bylo nejprve potřeba vybrat vhodnou posunovací lokomotivu. Po úvaze byla zvolena lokomotiva řady 740 a to nejen díky svému primárnímu určení pro posun, ale také díky značnému rozšíření ve vlečkovém provozu na území bývalého Československa i Polska. K určení charakteru provozu se podařilo získat výsledky měření provedených na lokomotivách řady 740 ve vlečkovém provozu. Výsledky těchto měření poté sloužily jako podklad ke stanovení potřebné energetické kapacity akumulátoru energie.

V práci byly navrženy dvě varianty hybridního pohonu, lišící se zejména typem akumulátoru energie – superkapacitor nebo elektrochemická akumulátorová baterie NiMH. U obou variant byl dimenzován příslušný akumulátor energie a poté byly zpracovány konstrukční návrhy zástavby pod kapoty lokomotivy. Nejprve byl zpracován zjednodušený 3D návrh za účelem zjištění možnosti zástavby. Z tohoto modelu byl následně zpracován typový výkres s umístěním jednotlivých agregátů. K jednotlivým variantám byl také naznačen způsob součinnosti akumulátoru energie se spalovacím motorem v jednotlivých fázích jízdy vozidla.

Poslední částí diplomové práce je kapitola zabývající se srovnáním navržených variant hybridní posunovací lokomotivy s konvenčními rekonstrukcemi posunovacích lokomotiv provedených společností CZ LOKO, a.s. Z tohoto srovnání vyšla svými parametry jako konkurenceschopná varianta A vybavená superkapacitory. Tato varianta by měla být schopna své zvýšené pořizovací náklady eliminovat sníženými provozními náklady a dále pak svým výhodnějším provozem prohlubovat svou finanční výhodnost.

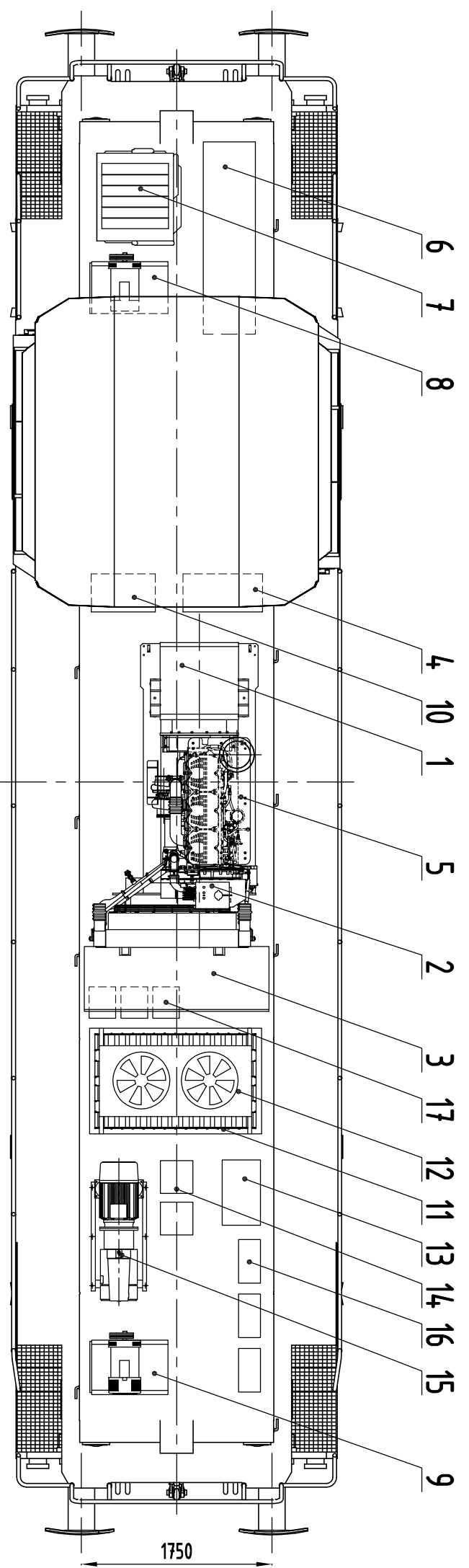
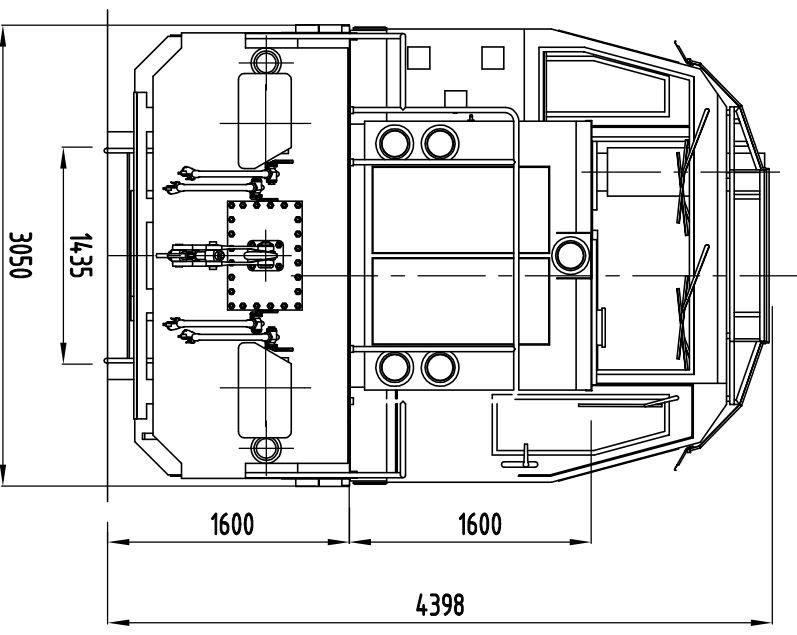
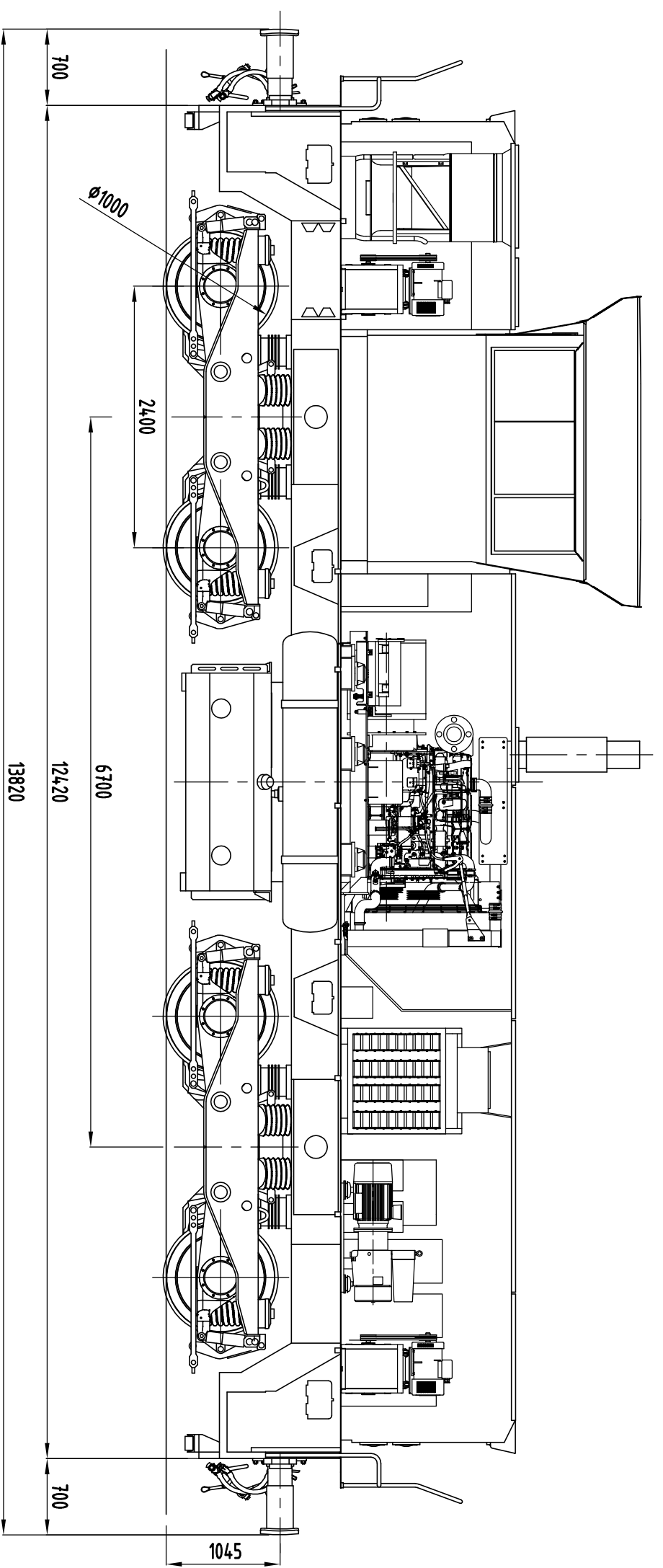
Druhá navržená varianta vybavená elektrochemickými bateriemi NiMH je znevýhodněna zejména svou vysokou pořizovací cenou a také předpokládanou nižší životností baterií NiMH oproti celkové životnosti rekonstrukce.

Další, logickým pokračováním této práce by mohla být simulace navržených variant hybridního pohonu dle naměřených dat z provozu. Touto simulací by bylo možno přesněji prokázat ekonomické výhody tohoto pohonu a také by bylo možno odladit součinnost obou zdrojů energie.

13 Literatura

- [1] Jefferson, C. M., Barnard, R. H.: Hybrid vehicle propulsion, WIT Press, Southhampton, 2002, ISBN 1-85312-887-2
- [2] Andrews, H. I.: Railway Traction. Elsevier New York, Oxford, 1986, ISBN 0-444-42489-X
- [3] Danzer, J.: Elektrická trakce I., ZČU Plzeň 2000, ISBN 80-7082-633-9
- [4] Danzer, J.: Elektrická trakce II., ZČU Plzeň 2001, ISBN 80-7082-814-5
- [5] Palko, P.: Hybridné systémy pohonov v koľajových vozidlách, Disertační práce, Žilinská univerzita v Žilině, 2008.
- [6] Jedlička, J. a kolektiv: Studie o vývoji dopravy z hlediska životního prostředí v České republice za rok 2006, Centrum dopravního výzkumu, Brno, 2007.
- [7] Hentschel, F.; Müller, K.; Steiner, M. : Energy Storage on Urban Railway Vehicles. Proceedings of the UIC Energy Efficiency Conference, Paris, 2000.
- [8] Čerovský, Z.: Trakční charakteristiky střídavého elektromechanického přenosu výkonu s elektrickým děličem výkonu, XIV. Oborový den vysokých škol, Praha, 2002.
- [9] Donnelly, F.W.; Cousineau, R.L.; Horsley, R.N.M.: Hybrid technology for the rail industry, Rail Conference, 2004, Proceedings of the 2004 ASME/IEEE Joint. ISBN 0-7918-4163-4
- [10] Steiner, M.; Scholten, J.: Energy storage on board of DC fed railway vehicles, Power Electronics Specialists Conference, 2004, PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual. ISBN 0-7803-8399-0
- [11] Akli, C.R.; Roboam, X.; Sareni, B.; Jeunesse, A.: Energy management and sizing of a hybrid locomotive, Power Electronics and Applications, 2007 European Conference, ISBN 978-92-75815-10-8
- [12] Košťál, J.: Strela se srdcem Sousedík, Elektro, ročník 2007, č. 2
- [13] Grundfest, M.: Rekuperace energie je aktuální téma současnosti, Technický týdeník, ročník 2006, č. 17.
- [14] Pohl, J.: Výsledky výzkumu hybridního diesel-akumulátorového pohonu lokomotiv, Železniční technika, ročník 1987, č. 17.
- [15] Müller, J.: Hybridní pohon a rozdělení provozních režimů posunovacích lokomotiv, Železniční technika, ročník 1983, č. 13.
- [16] Nantl, Z.; Skála, B.; Viesgäber, J.: Hybridní lokomotiva 718.501 (TA436.0501), Dráha, ročník 95, č. 9.
- [17] Bent, M.: Old Shunters With Clean New Hearts, Railvolution, ročník 2004, č. 4.

-
- [18] Parkhideh, B.: Storage Technologies for Hybrid Electric Buses, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen - Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, 2006, dostupné z http://www.euromatic.no/ZEBRA_Aug17.pdf
- [19] Kalhammer, F.,R. a spol.: Status and Prospects for Zero Emissions Vehikle Technology, Report of the ARB Independent Expert Panel 2007, dostupné z http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevreview/zev_panel_report.pdf
- [20] Schneuwly, A.; M. Bärtschi, V. Hermann, G. Sartorelli, R. Gallay, R. Koetz, Double-Layer Capacitors for Peak Power Automotive Applications, 2002, dostupné z http://ecl.web.psi.ch/Publications/cap_pub/AABC_2002.pdf
- [21] Paul Cooper, P.: Hybrid Traction System, dostupné z http://www2.theiet.org/oncomms/pn/railway/06innovation_cooper.pdf
- [22] Projekt UIC, Energy Efficient Technologies for Railway, dostupné z <http://www.railway-energy.org/>
- [23] Diesel Net, Emission Standards, dostupné z <http://www.dieselnets.com/>
- [24] Superkondenzátory Maxwell, dostupné z <http://www.maxwell.com/>
- [25] Akumulátorové baterie Saft, dostupné z <http://www.saftbatteries.com/>
- [26] RailPower Technologies Corporation, dostupné z <http://www.railpower.com/>
- [27] Bombardier Transportation, dostupné z <http://www.bombardier.com/>
- [28] Voith Turbo GmbH, dostupné z <http://www.voithturbo.de/>
- [29] General Electric, dostupné z <http://ge.ecomagination.com/site/>
- [30] MTU Friedrichshafen, dostupné z <http://www.mtu-online.com/>
- [31] Stránky přátel železnic, dostupné z <http://spz.logout.cz/>
- [32] MEP Postřelmov a.s., dostupné z <http://www.mep.cz/>
- [33] ControlTech s.r.o., dostupné z <http://www.controltech.cz/>
- [34] Polovodiče a.s., dostupné z <http://www.polovodice.cz/>
- [35] Dokumentace ČKD a CZ LOKO a.s.



17	1	CELKOVÉ BATERIE VRLA			
16	3	PULZNI NĚMČ PŘIHOVNĚ (POMĚN)			
15	1	KOMPRESOR			
14	2	TRAKČNÍ TLUMIVKA			
13	1	PULZNI NĚMČ SUPERKAPAKTORŮ			
12	1	CHLADEK SUPERKAPAKTORŮ			
11	1	BLOK SUPERKAPAKTORŮ MANWELL BLOK 2000			
10	1	BLOK KLIMATIZACE			
9	1	CHLAZENÍ TRAKČNÍCH MOTORŮ - PŘEDNÍ			
8	1	CHLAZENÍ TRAKČNÍCH MOTORŮ - ZADNÍ			
7	1	ODPORNIK EDB MĚP RAV6			
6	1	BLOK STYKAČŮ			
5	1	VÝJEK			
4	1	PULZNÍ USMĚRŇOVAČ			
3	1	CHLADEK MOTORU			
2	1	SPALOVAČÍ MOTOR CATERPILLAR C5			
1	1	GENERÁTOR SŘEŠKES 1-F2-401-4			

MĚŘITVO 150	KONSTRUKTÉR CERNOHORSKÝ	PROJEKTÁŇ ISO 2768 MK ISO 8015 NE
KONTROLOVAL NORMALIZÁTOR	SCHVÁLIL ONE	SESTAVA
TYP NÁZEV NÁVRH HYBRIDNÍ LOKOMOTIVY VARIANTA A	DATUM PODPIS INDEX	STARÝ VÝKRES ČÍSLO VÝKRESU VAR - A - 001

ZMĚNA DATUM PODPIS INDEX	PODOBŇÝ VÝKRES
-----------------------------------	----------------

LIST 1	LISTŮ 1
------------------	-------------------

