

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rekuperační systémy v dopravě

Tomáš Koželuh 2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš KOŽELUH**

Osobní číslo: **E15B0066K**

Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Rekupační systémy v dopravě**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište podrobně různé způsoby rekupačních systémů využívaných v dopravě.
2. Popište druhy pohonů a baterií používaných v dopravních prostředcích.
3. Zhodnoťte ekonomickou výhodnost jednotlivých rekupačních systémů.
4. Diskutujte možnosti budoucího vývoje rekupačních systémů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Světlík


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na zorientování se v systémech rekuperace a jejich využití v dopravních prostředcích.

Práce je rozdělená na tři hlavní části.

V první části je vysvětlen základní princip rekuperace kinetické energie používaný v dopravních prostředcích. Dále je popsáno rozdělení systémů rekuperace kinetické energie podle druhu energie, ve které se ukládá do akumulátorů. A pro každý systém je uveden nějaký typový příklad využití.

Ve druhé části jsou popsány nejpoužívanější pohony a akumulátory využívané pro systémy rekuperace kinetické energie v dopravních prostředcích. Pohony i akumulátory jsou rozděleny dle jednotlivých systémů rekuperace kinetické energie.

Ve třetí části je zhodnocení ekonomické výhodnosti systémů vzhledem k současným běžným dopravním prostředkům. A také zamyšlení nad budoucím vývojem v systémech rekuperace kinetické energie.

Klíčová slova

Kinetická energie, hybridní vozidlo, setrvačnický, sériově buzený stejnosměrný motor, stejnosměrný motor s cizím buzením, asynchronní motor, synchronní motor s permanentními magnety, axiální hydrostatický motor, hydrostatický generátor, rekuperace, akumulátor, superkapacitor.

Abstract

This bachelor thesis is focused on orientation in recuperation systems and their use in transport.

The work is divided into three main parts.

The first part explains the basic principle of the recovery of kinetic energy used in means of transport. We also describe the distribution of kinetic energy recovery systems according to the type of energy in which they are stored in accumulators. And for each system, there is a type of usage.

The second part describes the most used drives and accumulators used for systems of kinetic energy recovery in transport means. Drives and accumulators are divided according to individual kinetic energy recovery systems.

The third part is an evaluation of the economic benefits of the systems in relation to the current common means of transport. And also reflection on future developments in kinetic energy recovery systems.

Key words

Kinetic energy, hybrid vehicle, flywheel, series excited DC motor, a DC motor with separate excitation, asynchronous motor, synchronous permanent magnet motor, axial hydrostatic engine, hydrostatic generator, recuperation, accumulator, supercapacitor.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.



.....
podpis
Tomáš Koželuh

V Plzni dne čtvrtek 31. května 2018

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Bohumilu Skalovi Ph.D. za trpělivost, cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

1 Obsah

1	OBSAH	8
2	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
3	ÚVOD.....	10
4	REKUPERACE KINETICKÉ ENERGIE - ÚVOD.....	11
4.1	DRUHY PŘEMĚNY KINETICKÉ ENERGIE PRO REKUPERACI.....	12
4.2	ELEKTRICKÉ SYSTÉMY REKUPERACE KINETICKÉ ENERGIE.....	12
4.2.1	Toyota Prius.....	13
4.2.2	Rekuperace kinetické energie pomocí elektromechanických tlumičů.....	15
4.3	MECHANICKÉ SYSTÉMY REKUPERACE KINETICKÉ ENERGIE.....	17
4.3.1	Volvo systém Flybird	18
4.4	HYDRAULICKÉ SYSTÉMY REKUPERACE KINETICKÉ ENERGIE	20
4.4.1	Systém CUMULO	21
5	DRUHY POHONŮ A BATERIÍ POUŽÍVANÝCH V DOPRAVNÍCH PROSTŘEDCÍCH	23
5.1	DRUHY POHONŮ	23
5.1.1	Pohony se stejnosměrnými motory	24
5.1.2	Pohony s střídavými motory.....	25
5.2	SYSTÉMY PRO UKLÁDÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE V DOPRAVNÍCH PROSTŘEDCÍCH.....	26
5.2.1	Elektrochemické akumulátory	27
5.2.2	Superkapacitory	29
5.2.3	Hydrostatické akumulátory	31
6	HODNOCENÍ EKONOMICKÉ VÝHODNOSTI JEDNOTLIVÝCH REKUPERAČNÍCH SYSTÉMŮ	34
7	ZÁVĚR – MOŽNOSTI BUDOUCÍHO VÝVOJE REKUPERAČNÍCH SYSTÉMŮ	36
8	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	38

2 Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam použitých symbolů

bar	bar (jednotka tlaku)
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
km/h	kilometrů za hodinu (jednotka rychlosti)
kW	kilowatt (jednotka výkonu)
kWh	kilowatthodina (jednotka energie)
m	metr (jednotka délky)
MPa	mega pascal (jednotka tlaku)
N	newton (jednotka síly)
NO _x	oxidy dusíku obecně
V	volt (jednotka napětí)
Wh/kg	watt hodina na kilogram (jednotka měrné energie)
W/kg	watt na kilogram (jednotka měrného výkonu)

Seznam použitých zkratek

CVT	Převodovka s plynule proměnným převodem
EDLC	Electric double-layer capacitor (kapacitor s dvouvrstvým dielektrikem)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (bipolární tranzistor s izolovaným hradlem)
KERS	Kinetic Energy Recovery System (systém rekuperace kinetické energie)
MHD	Městská hromadná doprava
Li-Ion	Lithium-iontový akumulátor
Li-Pol	Lithium-polymerový akumulátor
NeFeB	Směs neodymu, železa a boru pro výrobu permanentních magnetů
NiCd	Nikl-kadmiový akumulátor
NiMH	Nikl-metal hydridový akumulátor
PMSM	Synchronní motor s permanentními magnety
SmCo	samarium-kobalt sloučenina pro výrobu permanentních magnetů
USA	Spojené státy americké

3 Úvod

Již od počátku průmyslové revoluce na konci 18. století se vynálezci snažili o co nejvyšší účinnost strojů, ať již to byl z počátku parní stroj nebo později elektrické stroje. Postupně bylo dosaženo maximální možné efektivity elektrických strojů v závislosti na ekonomické náročnosti konstrukce, bezpečnosti případně ekologické zátěži. A zdá se, že další posouvání účinnosti zřejmě bude možné až po nějakém přelomovém výzkumu, například kdyby se podařilo zkonstruovat reálně použitelný supravodič apod. Proto se vývojové týmy na konci 20. století zaměřily na komplexní výzkum celého oboru. V rámci tohoto výzkumu se intenzivně zaměřují na vývoj a zlepšování systémů na úsporu energie.

A právě úspora kinetické energie vozidla, která se často maří při brzdění pomocí klasických třecích brzd přeměnou na teplo, je jednou z oblastí, kde nyní probíhá intenzivní výzkum a vývoj. Specializované týmy jednotlivých automobilek vyvíjí systémy, které by tuto energii znovu použily k pohonu vozidla. První fází je kinetickou energii, která by jinak byla zmařena, převést na jiný druh energie a uložit do akumulátorů nebo v případě mechanického systému přímo naakumulovat roztočením setrvačníku. A druhou fází takto uloženou energii zase převést na využitelnou energii. U celého systému se snaží dosáhnout co nejvyšší účinnosti. Zároveň ovšem naráží na cenu systémů, jelikož jsou součástí těchto systémů i vývoj velmi drahé.

Zároveň však stejně důležitou roli hraje bezpečnost a ekologie.

Cílem předkládané práce je rešerše současného stavu v systémech rekuperace kinetické energie v dopravních prostředcích v současnosti. Dále shrnutí a popis jednotlivých typů motorů a pohonů a baterií a akumulátorů využívaných v dopravních prostředcích.

4 REKUPERACE KINETICKÉ ENERGIE – úvod

Kromě svých pozitivních efektů, má doprava i řadu těch negativních. Vlastní doprava, tedy provoz dopravních prostředků, produkuje množství znečišťujících látek a zatěžuje obyvatele hlukem. Je významným zdrojem emisí, skleníkových plynů a dalších škodlivých látek – především oxidů uhlíku (CO_2 a CO) a dusíku (NO_x). Tyto škodlivé látky se negativně podílejí na zhoršování zdraví obyvatelstva i na zhoršování stavu životního prostředí. [1]

Zhoršování stavu životního prostředí způsobuje jak samotná doprava, tak i výstavba a provoz dopravní infrastruktury. Při stavbě silnic, dálnic i železničních tratí dochází k narušování ekosystémů. Doprava podstatně ovlivňuje i krajinu a její funkce, jako je např. přirozená schopnost zadržovat vodu a zajištění příznivých podmínek a biotopů pro rostlinné i živočišné druhy.

Doprava ovlivňuje stav životního prostředí zejména na komunikacích nebo ve městech. Dále však ovlivňuje životní prostředí i na globální úrovni zejména produkcí skleníkových plynů. Změny klimatu se totiž mohou nepříznivě projevit kdekoliv, tedy i tam, kde hustá doprava vůbec není.

Snaha o snižování emisí skleníkových plynů se nyní zaměřuje na snižování zbytečných energetických ztrát. Mezi největší ztráty patří maření kinetické energie. Protože možnosti pro snižování spotřeby mechanickými úpravami motoru se stále zmenšují, zaměřují se odborníci na periferie. Jednou z nejperspektivnějších úprav je inteligentní převod kinetické energie v situacích, kdy má poháněcí agregát „přebytek výkonu“, zejména při malém zatížení či brzdění motorem na jiný druh energie. Nastává tzv. **rekupera**ce, tedy přeměna části kinetické (pohybové) energie zpět na využitelnou energii. Některé systémy přeměňují mechanickou energii na elektrickou pomocí generátorů, jiné shromažďují kinetickou energii ve formě kinetické energie rotujících částí a existují i systémy, které ji přeměňují na vnitřní tlak v kapalinách – nejčastěji se používají hydraulické oleje.

Tato energie se ukládá do zásobníku (akumulátoru) a ve vhodný okamžik je možné ji vrátit zpět do pohonné soustavy vozidla. Je to proces známý například i z elektrických a hybridních vozidel, tam je však rekuperovaná energie využívána přímo k pohonu, což s sebou přináší nutnost rozsáhlých úprav. Přitom dnes již skoro každé moderní auto umí ulehčit motoru tím, že jej alternátor bude zatěžovat pouze v určitých okamžicích. Tento systém bývá velmi často doplněn systémem start-stop.

4.1 Druhy přeměny kinetické energie pro rekuperaci

Systémy na zpětnou přeměnu kinetické energie můžeme rozdělit na 3 základní druhy:

Elektrické systémy

- Elektrický motor/generátor – je základem systému, který umožňuje přeměnu kinetické energie na elektrickou, kterou lze ukládat v zásobnících a následně ji využít v případě potřeby pro pohon vozidla.

zásobníky:

- chemické akumulátory
- superkapacitory

Mechanické systémy

- setrvačnick – je u mechanických systémů přímo zásobníkem kinetické energie, využívá se jeho momentu setrvačnosti. Při brzdění se setrvačnick roztáčí a při akceleraci se naopak jeho energie odebírá pro pohon. Setrvačnick může v systému pracovat čistě mechanicky nebo ve spojení s elektromotorem.

Hydrostatické systémy

- hydromotor (hydrogenerátor) – rotační hydromotory převádí hydraulickou energii - tj. tlak a průtok, na mechanickou energii - tj. moment a otáčky a také na hydraulickou energii. Ve spojení s akumulátory jsou stále častěji využívány pro rekuperaci energie.

zásobníky:

- závažové akumulátory
- pružinové akumulátory
- plynové akumulátory

4.2 Elektrické systémy rekuperace kinetické energie

Pravděpodobně nejpoužívanějším způsobem rekuperace kinetické energie vzniklé při brzdění nebo zpomalování vozidla v dopravních prostředcích je systém převodu na elektrickou energii a její ukládání do zásobníků – nejčastěji akumulátorů nebo superkapacitorů.

Vozy vybavené regenerativním brzděním jsou kromě spalovacího motoru, vybaveny i elektromotorem, který zároveň slouží jako velmi výkonný generátor. Inteligentní řídicí jednotka ve voze rozhoduje o režimu práce motor/generátor.

Když chce řidič začít brzdit, tak při sešlápnutí pedálu brzdy pedálu nezačnou brzdit klasické třecí brzdy, ale je aktivováno brzdění rekuperací – generátorový režim, motor přejde do záporné momentové charakteristiky a začne převádět kinetickou energii na elektrickou, která se ukládala dříve do akumulátorů, dnes čím dále častěji do superkapacitorů. Energie potřebná ke generování elektrického proudu v konečném důsledku zpomaluje vozidlo. Hybridní a elektrická vozidla jsou vybavena i klasickými třecími brzdami, které fungují jako záložní

systém pro případ, že regenerativní brzdění nepostačuje k zastavení vozidla. Elektronické systémy a palubní počítač vozu určují, kdy použít běžný systém třecích brzd nebo jestli aktivovat reverzní chod motoru.

Regenerativní brzdění je řízeno řídicí jednotkou brzd. Řídicí jednotky jsou elektronická zařízení, která prostřednictvím dálkového ovládání určují, kdy začne a skončí brzdění, stejně jako rychlost brzdění. Podobně jako řídicí jednotka ABS, která monitoruje vzájemnou rychlost otáčení kol, dokáže řídicí jednotka brzd vypočítat, jak velký moment je k dispozici pro výrobu elektrické energie, a zároveň monitorovat rychlost kol. [2]

Následně při rozjezdu nebo akceleraci vozu se využívá elektrická energie uložená v akumulátorech pro napájení elektromotoru, ten vytváří točivý moment a společně s momentem spalovacího motoru se přenáší přes převodovku na hnací nápravu vozu. Celý proces je řízen řídicí jednotkou.

Výsledkem je, že vznikne spojení elektromotoru se spalovacím motorem. Oba motory se doplňují co do účinnosti, takže pro dosažení stejné dynamiky je potřeba méně paliva. Regenerativní brzdy fungují nejlépe při určitých rychlostech, především při jízdě s častým zastavováním a rozjížděním. Ztráta energie kvůli teplu vznikajícímu při tření je kolem 80 %. Regenerativní brzdění dokáže rekuperovat polovinu této ztracené energie a snížit spotřebu paliva o 10 až 25 %. [2]

4.2.1 Toyota Prius

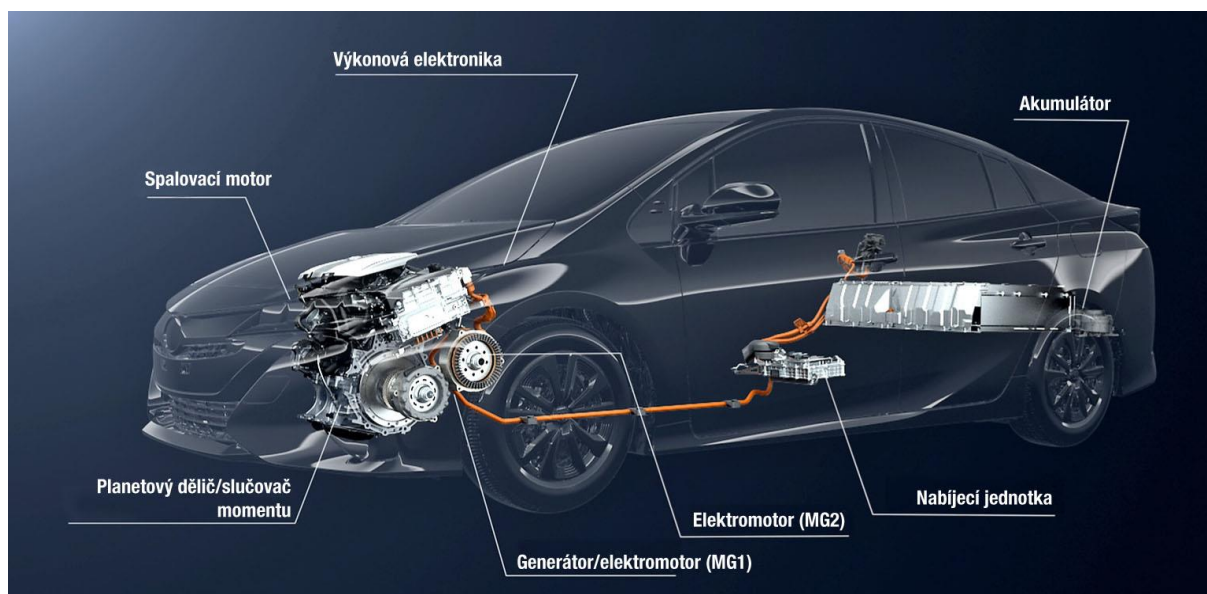
Automobilka Toyota v roce 1997 uvedla první generaci Toyoty Prius, jednalo se o jedno z prvních sériově vyráběných hybridních aut na světě. Od té doby se stal Prius ikonou ekologicky úsporné jízdy. Od roku 2012 se začal vůz vyrábět také ve verzi Plug-in Hybrid, který nabízí všechny výhody hybridního automobilu a zároveň vyšší dojezd na elektrickou energii. Nyní je v prodeji již 2. generace.

Plug-in hybridní pohon zajišťuje upravená soustava Toyota Hybrid System, jejímž srdcem je zážehový čtyřválec 1,8 litru s Atkinsonovým pracovním cyklem. Spalovací motor je s dvojicí elektrických motorů spojen planetovým soukolím, jež má funkci děliče a slučovače výkonu a pro řidiče se projevuje jako bezstupňová převodovka. Plug-in hybridní verze má také posílenou elektrickou část hnacího ústrojí. Toyota tohoto zesílení dosáhla tím, že s pohonem je připraven pomoci i druhý elektrický motor, jenž běžně slouží především jako generátor. Jeho výkon činí 22,5 kW (31 k). Se zbytkem hnací soustavy je spojen nově vyvinutou jednosměrnou zubovou spojkou. Díky této změně je plug-in hybridní Prius schopen jízdy čistě na elektřinu až do

rychlosti 135 km/h a současně v běžném provozu poskytovat dostatečnou dynamiku. Na rozdíl od standardního Priusu je plug-in hybridní provedení vybaveno lithium-iontovým akumulátorem s kapacitou 8,8 kWh. V souvislosti s akumulátorem byl také zvýšen dobíjecí výkon, ze 2 na 3,3 kW. [3]

Poháněcí soustava se skládá z Toyota Hybrid System, kapalinou chlazený zážehový čtyřválec Toyota 2ZR-FXE, pracující v Atkinsonově cyklu, uložený vpředu napříč společně s trakčním elektromotorem a generátorem elektrické energie; kombinovaný výkon soustavy 90 kW (122 k)/5200 min⁻¹;

- a) čtyřventilový variabilní rozvod DOHC VVT-i; 1798 cm³ (ø 80,5 x 88,3 mm); 13,04:1; 72 kW (98 k)/5200 min⁻¹ a 142 N.m/3600 min⁻¹; elektronické vícebodové vstřikování paliva, EU6;
- b) MG1; střídavý synchronní elektromotor/generátor/startér Toyota s permanentními magnety 22,5 kW (31 k);
- c) MG2; střídavý synchronní elektromotor Toyota s permanentními magnety, 53 kW (72 k), 207 N.m;
- d) E-CVT; planetová elektronická plynulá převodovka s rozdělovačem točivého momentu, stálý převod 3,218, pohon předních kol;
- e) PCU; elektronická řídicí jednotka, akumulátory Li-Ion, 351,5 V (95 článků), 8,8 kWh, uložené pod zavazadlovým prostorem.



Obrázek 4.1 Uspořádání hlavních komponentů plug-in hybridní poháněcí soustavy Prius Plug-in Hybrid

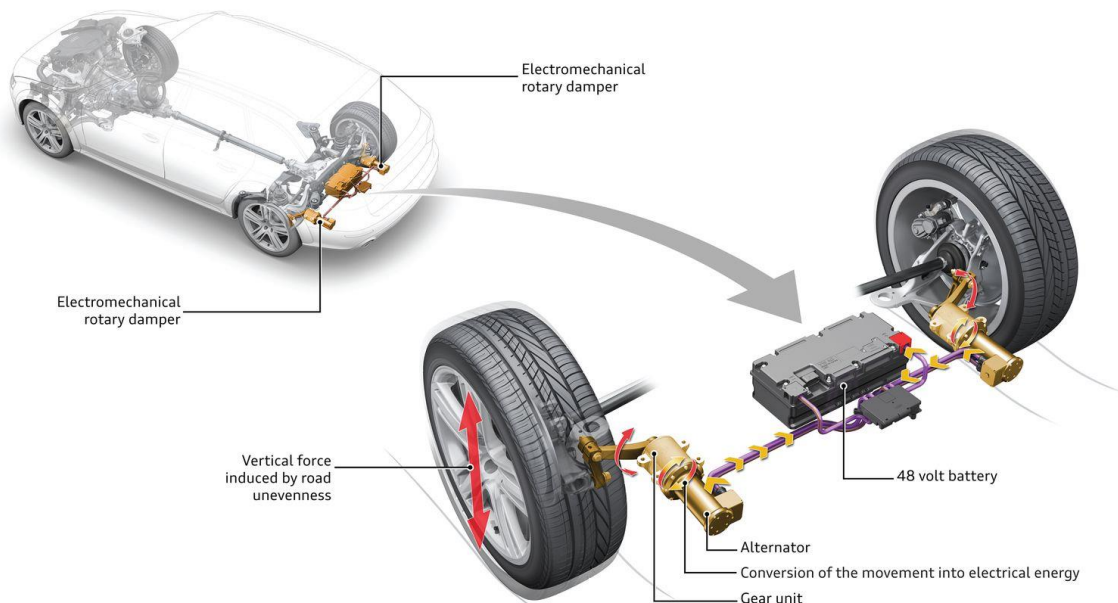
Dobíjení do plné kapacity akumulátorů trvá přibližně 2 hodiny u dobíjecí stanice, respektive až 3 hodiny a 10 minut při použití standardní domovní zásuvky. Dojezd na elektřinu činí až 50 km, přičemž maximální rychlost jízdy se samotným elektromotorem může dosahovat až 135 km/h. Nově je tento model ještě doplněn solárními fotovoltaickými články na střeše, které v průměru prodlužují dojezd o dalších 5 km denně. Tento model se má rekordně nízké emise CO₂ na úrovni 23 g/km a průměrnou spotřebu paliva 1 litr na 100 km. [3]

4.2.2 Rekuperace kinetické energie pomocí elektromechanických tlumičů

Novou cestou získávání a následného využití elektrické energie v dopravních prostředcích jsou elektromechanické tlumiče, na kterých pracují vývojáři společnosti AUDI na prototypu „eROT“. Základem je nahrazení běžných hydraulických tlumičů ve voze novým typem elektromechanických rotačních tlumičů.

Electromechanical rotary damper

08/16



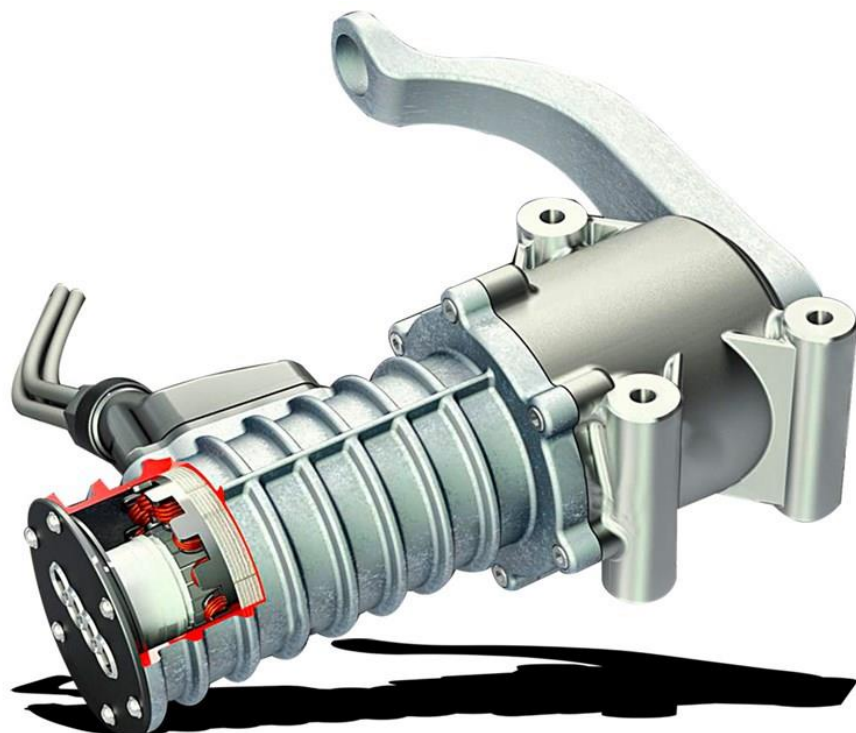
Obrázek 4.2 Schéma uložení elektromechanických rotačních tlumičů a propojení ve voze

Princip systému elektromechanických rotačních tlumičů je jednoduchý – každý výmol, každá nerovnost, každá zatáčka je zdrojem pohybové energie, která je pohlcována současnými tlumiči a přeměňována na ztrátové teplo. Tato energie se nyní bude využívat pomocí nového systému elektromechanických tlumičů, který bude součástí palubní elektrické sítě s napětím 48 V. Navíc tím pro své zákazníky získávají zcela nové možnosti pro regulaci podvozku.

System eROT reaguje rychle a s minimální setrvačností. Jako aktivně řízený systém tlumení se ideálně přizpůsobuje nerovnostem vozovky a jízděmu stylu řidiče.

Charakteristiku tlumičů lze libovolně definovat prostřednictvím softwaru, čímž se rozšiřuje rozsah funkčnosti. Přitom je vyřešen problém vzájemné závislosti mezi fázemi stlačování a roztahování tlumiče, která limituje možnosti běžných hydraulických tlumičů.

Horizontálně uložené točivé elektrické stroje nahrazují svislé teleskopické tlumiče zadní nápravy, z čehož plyne výhoda i pro zavazadlový prostor.



Obrázek 4.3 Elektromechanický rotační tlumič eROT

System eROT je navržen tak, že lze programovat charakteristiku tlumičů a zároveň dokáže přeměňovat kinetickou energii kol při vertikálním pohybu při pružení na elektrickou energii. Při jízdě je pohyb kola mechanicky zachycován ramenem a následně přenášen převodovkou do točivého elektromotoru, který ve funkci generátoru vyrábí elektrickou energii.

Během testů na německých silnicích bylo dosahováno průměrného rekupačního výkonu 100 až 150 W, přičemž hodnoty se pohybovaly od 3 W na nově vyasfaltované dálnici do 613 W na hrbolaté silnici nižší třídy. V reálném provozu zákazníků to odpovídá snížení emisí CO₂ až o 3 gramy na kilometr.

Základem nové technologie eROT je palubní elektrická síť s napětím 48 V, která poskytuje vysoký výkon, tuto elektrickou síť propojuje stejnosměrný měnič s hlavní palubní elektrickou

sítí 12 V. V prvním evolučním stupni nabízí její lithium-iontový akumulátor kapacitu 0,5 kWh a nejvyšší výkon 13 kW.

První výsledky testů technologie eROT jsou velmi slibné, a proto si lze velmi dobře představit její použití v budoucích sériově vyráběných modelech Audi. Podmínkou k tomu je 48 V palubní elektrická síť, která tvoří základ elektrifikační strategie značky Audi.

Pro rok 2017 je plánováno uvedení druhého evolučního stupně v novém modelu Audi, u něhož bude 48 V síť plnit funkci hlavní palubní elektrické sítě, která bude mimo jiné napájet výkonnou hybridní soustavu bez režimu výhradně elektrického pohonu (tzv. „mild hybrid“). Její potenciál úspory paliva činí až 0,7 litru na 100 kilometrů [4].

4.3 Mechanické systémy rekuperace kinetické energie

Setrvačnick je v principu účinným a praktickým zařízením na krátkodobé uložení energie. Tento způsob je známý již několik tisíc let. Jako příklad bychom mohli uvést hrnčířský kruh. Ve století páry pomáhal akumulovanou kinetickou energií překonávat mrtvé body klikového mechanismu parních strojů a v současné době je setrvačnick nedílnou součástí každého spalovacího motoru, kde vyrovnává nerovnoměrný chod. Tato velmi stará myšlenka uložení energie do rotující hmoty se stává v posledních letech znovu aktuální, zejména v souvislosti s plánovaným rostoucím podílem hybridních a elektrických vozidel na automobilovém trhu.

Princip uložení energie v setrvačnicku je velmi jednoduchý. Setrvačnick je v tomto systému přímo zásobníkem kinetické energie, která se přímo použije k rozjezdu nebo urychlení vozidla. Množství uložené energie je přímo úměrné hmotnosti a kvadraticky úhlové rychlosti rotujícího kola okolo osy procházející těžištěm. Princip systému je relativně jednoduchý – přes převodovku s plynule proměnným převodem (CVT) je setrvačnick napojen na hnací hřídel. V okamžiku, kdy začne vůz brzdít, setrvačnick se začne roztáčet a vůz bude brzdít. V ideálním případě budou otáčky setrvačnicku dosahovat rychlostí až 60 000 otáček za minutu. Při rozjezdu nebo akceleraci setrvačnick zpětně předává energii zpět přes převodovku na hnací nápravu.

V minulosti byl v praxi využit setrvačnick např. ve Švýcarsku, Belgii, Kongu, Švédsku nebo Číně ke stavbě gyrobusů. Na každé zastávce se připojil sběrač gyrobusu k napájecímu stožáru a proud ze sítě během výměny dopravovaných osob urychlil setrvačnick tak, že akumuloval dostatečné množství energie. [5]

Ta vystačila gyrobusu se staženým sběračem k ujetí několika kilometrů k další zastávce s nabíječkou. Těžké setrvačnick musely být z důvodů působení jejich gyroskopického momentu

umíst'ovány tak, aby osa jejich rotace byla svislá a jízdní vlastnosti tím byly ovlivněny minimálně. [5]



Obrázek 4.4 Historický gyrobus ve Švýcarsku

Samostatný setrvačník navržený jako jediný akumulátor kinetické energie se jeví jako nevýhodný, protože jeho hlavním problémem je nízký dojezd, který vozům poskytoval cca 2 km, a proto bylo nutné vytvoření sítě dobíjecích stanic. [5]

Kinetická energie hmoty setrvačníku, tedy roztočeného kola, která v systému zůstává uložena a ztrácí se jen v důsledku odporu vzduchu a ložiskovým ztrátám. Tyto ztráty se na počátku 21. století daří stále více snižovat. Rozšíření a pokles cen moderních materiálů (především uhlíkových vláken) pro výrobu velmi pevných setrvačnicků, ložisek s velmi nízkým odporem a díky jejich ukládání do vakua dnes vznikají systémy, které setrvačnicku dávají nové možnosti.

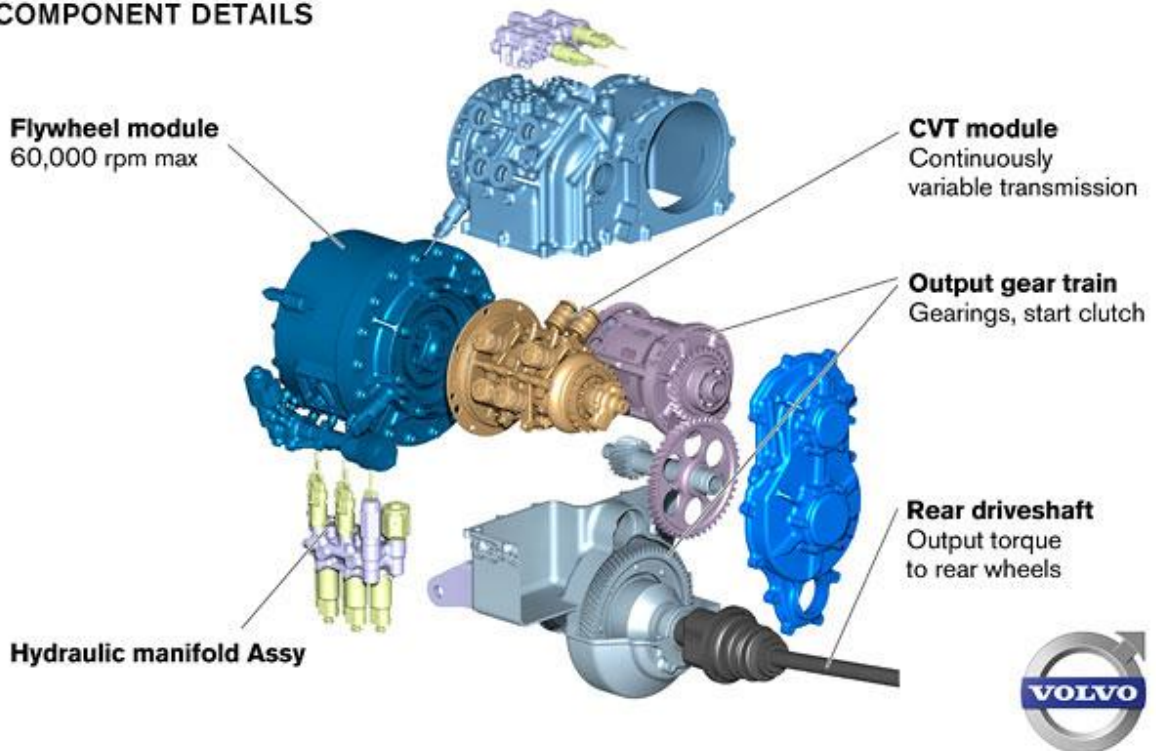
4.3.1 Volvo systém Flybird

Automobilka Volvo plánuje, že po roce 2020 začne do svých vozů montovat setrvačnicku, které budou sloužit jako krátkodobá úložiště energie. Při brzdění vašeho vozu se se bude kinetická energie ukládat – roztáčet setrvačnicku.

Systém by měl podle současných představ fungovat tak, že auto začíná šetřit palivo už v okamžiku, kdy řidič sešlápne brzdový pedál: automaticky ihned vypne spalovací motor a „brzdí setrvačnickem“ s pomocí brzd v případě, kdy je zastavení velmi ostré. Díky tomu může v ideálních (tedy vlastně těch nejhorších možných) podmínkách, třeba při jízdě v koloně nebo ve městě, hlavní pohonná jednotka, motor, zůstat až polovinu jízdní doby vypnutá, tvrdí dnes Volvo. [6]

FLYWHEEL KERS

COMPONENT DETAILS



Obrázek 4.5 Blokové schéma systému Flybird

Švédská značka vyvíjí systém Flybrid KERS (Kinetic Energy Recovery System), využívající ve Spojeném království navržený setrvačnickový systém, jenž dokáže snížit spotřebu vozu střední třídy o více než 25 %. Jádrem systému rekuperace energie odvozeného od zařízení KERS vozů formule 1 je setrvačnick o průměru zhruba 20 centimetrů, váží zhruba sedm kilogramů a aby byl dostatečně pevný a při otáčkách se nerozpadl, je vytvořený z uhlíkových vláken. Může dosahovat rychlosti 60 tisíc otáček za minutu a točí se ve vakuu, protože jinak by takové zařízení jednoduše ani fungovat nemohlo, ztráty by byly příliš veliké. Dohromady se vším nutným vybavením váží systém KERS zhruba 60 kilogramů, což je na systém rekuperace ve skutečnosti relativně malá hmotnost. Momentálně má být testován na zadní nápravě sedanu

S60 T5, kde kromě zmíněné úspory paliva přináší též zlepšení zrychlení z nuly na 100 km/h o 1,5 s!

Setrvačnick má maximální otáčky 60.000/min a může poskytnout navíc výkon přibližně 60 kW. Díky tomu, že se otáčí ve vakuu, dokáže si uchovat získanou energii až po dobu 20 minut, než se začne postupně ztrácet. Kapacita setrvačnicku umožní jízdu s 60kW výkonovým bonusem až po dobu 10 s a opětovně jej naplno roztočí brzdění po dobu 8 s.

Ocelový setrvačnick v 10 mm silném obalu z uhlíkového kompozitu roztáčí kola zadní nápravy prostřednictvím převodovky s plynule měnitelným převodem (CVT) a celý systém váží pouze 60 kg, tedy výrazně méně než klasické bateriové hybridy. Produkční model, jenž by se měl začít prodávat kolem roku 2020, by už měl mít setrvačnick na přední nápravě.

Setrvačnick bude pochopitelně efektivnější v městském provozu než na dálnici, při vyšších rychlostech ale prý budou "nabíjení" setrvačnicku zajišťovat motorem roztáčená kola. Vzhledem k tomu, že k udržení rychlosti 110 km/h je třeba výkon jen přibližně 20 kW, zvládne jet touto rychlostí Volvo s Flybird KERS až 800 m s vypnutým spalovacím motorem a počítá se tedy s možným jízdním režimem 800 m na KERS a 800 m na spalovací motor, během kterých se setrvačnick opět naplno roztočí [7].

4.4 Hydraulické systémy rekuperace kinetické energie

Další možností, jak lze snižovat spotřebu paliva a hladiny emisí u vozidel, je ukládání kinetické energie vozidla vznikající při brzdění do formy energie tlakové. Pístový axiální motor-generátor při brzdění pracuje v režimu generátoru – čerpadla kinetickou energii převádí na tlak kapaliny a tento tlak následně ukládá do tekutinového akumulátoru. Během rozjezdu, případně akcelerace se motor generátor přepne do motorického režimu a naakumulovanou energii využívá pro pohon vozu.

Celý systém je vždy řízen softwarem, jehož hlavním úkolem je optimalizovat jednotlivé jízdní režimy a zajišťovat maximální možnou efektivitu využívání tlaku kapaliny v kapalinovém akumulátoru, v přenosu zpět na kinetickou energii, případně doplňování tlaku v kapalinovém akumulátoru. Tím se v maximální možné míře snižuje spotřeba energie.

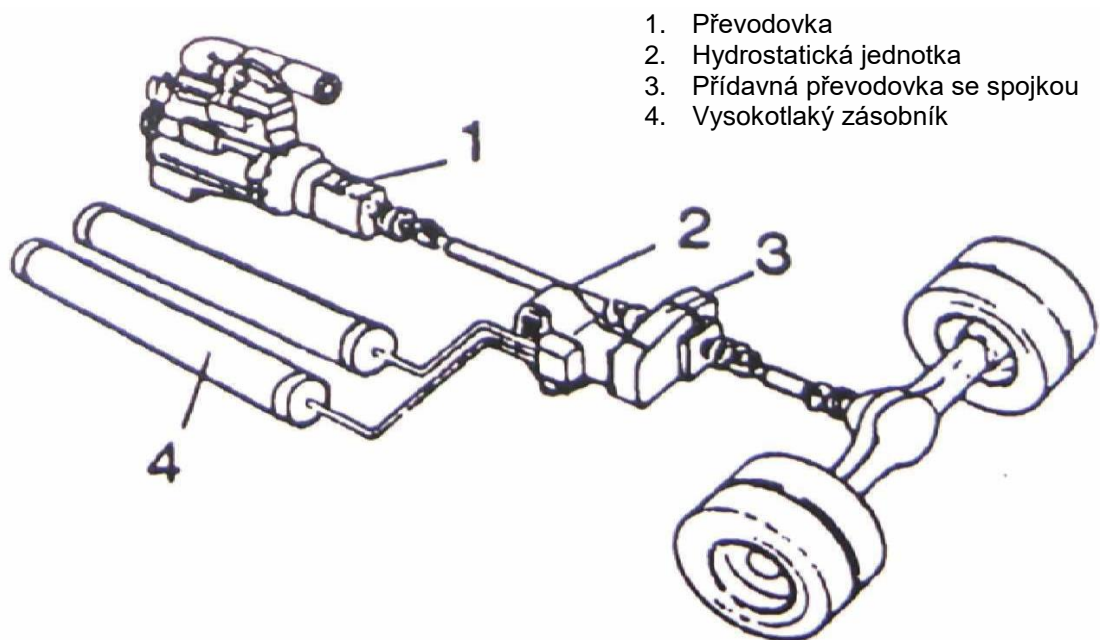
Výhoda hydrostatického systému rekuperace kinetické energie je velký točivý moment. Nevýhodou je cena, omezená možnost regulace a vysoká hmotnost systému. [8]

Budoucnost účinného brzdění spočívá v hydraulických hybridech a brzdovém systému Hydraulic Power Assist (HPA). U hydraulických hybridů jsou elektrické motory a akumulátory

nahrazeny motorovými čerpadly a zásobníky. Systém HPA zpomaluje vozidlo tím, že využívá jeho kinetickou energii k pohonu reverzního čerpadla, které dopravuje hydraulickou kapalinu z nízkotlakého zásobníku do vysokotlakého. Tlak se získává stlačováním plynného dusíku v zásobníku při čerpání kapaliny do prostoru, který předtím zabíral dusík. Snížení hydraulického tlaku v motorovém čerpadlu pomáhá vozidlo zpomalit. Hydraulické hybridy mají potenciál snížit spotřebu paliva o 25 až 45 %. [2]

4.4.1 Systém CUMULO

Praktické využití hydraulického systému s rychloběžným hydrostatickým axiálním pístovým strojem a statickým hydraulickým zásobníkem vyvinula firma Volvo.



1. Převodovka
2. Hydrostatická jednotka
3. Přídavná převodovka se spojkou
4. Vysokotlaký zásobník

Obrázek 4.6 Systém CUMULO do společnosti VOLVO

Firma MAN vyvinula systém SHL založený na využití hydrostatické jednotky systému CUMULO.

U systému SHL je použita automatická převodovka Ecomat HP 500 s příslušnými vedlejšími pohony a vypínatelným hydrodynamickým měničem. Vznětový motor má výkon 180 kW. Při brzdění, stání, rozjezdu je vznětový motor odpojen z hnacího ústrojí a hydrostatické zařízení pracuje jako čerpadlo k doplnění zásobníku, a to proti tlaku plynu a zmenší rychlost až na 0 km/h. K rozjezdu je využit tlak ze zásobníku k pohonu hydrostatického zařízení, které v tomto případě je zapojeno jako motor. Tlakový olej proudí zpět do nízkotlakého zásobníku. Hydrostatické stroje pracují plynule a bez rázů. Veškerá činnost je

řízena centrálním elektronickým systémem, v závislosti na ovládní plynového a brzdého pedálu a sensorově řízenými informacemi z pohonu.

Při brzdění je zvýšen hydraulický tlak v zásobníku plynu ze 150 na 400 barů. Při následujícím rozjezdu je tato energie vrácena zpět na zadní hnací nápravu, uložení energie do pracovní hydrauliky je též možné. Úspora paliva je kolem 15 %. Tato koncepce byla testována u městských autobusů a vozidel pro odvoz odpadků. [9]

5 Druhy pohonů a baterií používaných v dopravních prostředcích

5.1 Druhy pohonů

Jak jsem již popsal výše v článku 4.1 tak, jak jsou rozděleny systémy přeměny a ukládání kinetické energie, stejně se rozdělují pohony, které uloženou energii převádí zpět na kinetickou. Základními požadavky na jejich vlastnosti jsou velký záběrný moment již při rozběhu, regulace otáček v co největším rozsahu, velká provozní spolehlivost, dlouhá životnost a v ideálním případě možnost práce v režimu pohonu i v režimu generátoru. Vedle těchto požadavků je ještě samozřejmě ekonomické hledisko – co nejlevnější výroba a údržba.

Elektrické pohony

Prvními pohony byly pohony se stejnosměrnými motory pro jejich jednoduchost a snadnou možnost regulace a směru otáček. V posledních letech s rozvojem výkonové polovodičové techniky se stále častěji používají i pohony se střídavými motory, které jsou sice ekonomicky a technicky náročnější, ale významným způsobem snižují nároky na údržbu.

V pohonech pro moderní tramvaje a trolejbusy Škoda jsou asynchronní motory s klecovou kotvou nebo synchronní motory buzené permanentními magnety doplněné trakčními měniči VVVF (Variable Voltage Variable Frequency – proměnlivé napětí, proměnlivá frekvence) využívají pro dosažení vysokého dynamického výkonu tramvají nejnovější technologické prvky IGBT se širokým výkonovým rozsahem. Asynchronní motory mají většinou vlastní ventilaci, ale podle konstrukce podvozkových prvků je možné i chlazení nuceným oběhem vzduchu nebo kapalinové. Pro synchronní motory buzené permanentními magnety s přímým pohonem náprav se používá kapalinové chlazení. [10]

Mechanické pohony

Jak jsem psal již v odstavci o rozdělení jednotlivých systémů rekuperace je setrvačnický u mechanických systémů přímo zásobníkem kinetické energie. Využívá se jeho momentu setrvačnosti. Při brzdění se setrvačnický roztáčí a při akceleraci se naopak jeho energie odebírá pro pohon. Setrvačnický může v systému pracovat čistě mechanicky nebo ve spojení s elektromotorem.

Hydrostatické systémy

Hydromotory jsou výkonné prvky hydraulického systému, schopné vyvinout i značné momenty zpravidla ve velkém rozsahu otáček. Jsou využívány v průmyslových i mobilních systémech včetně systémů pojezdů. Svým konstrukčním principem jsou téměř totožné s čerpadly stejného typu.

Vstupními veličinami hydromotorů jsou tlak a průtok, výstupními pak moment a otáčky – opačně než u čerpadel.

Ve srovnání s jinými principy motorů (například elektromotory) se hydromotory stejných parametrů vyznačují velmi nízkou hmotností, malým setrvačným momentem a snadnou říditelností.

5.1.1 Pohony se stejnosměrnými motory

Stejnoseměrné motory se sériovým buzením

V minulosti byly nejpoužívanější stejnosměrné motory se sériovým buzením pro pohon lokomotiv, a vozidel MHD pro jejich momentovou charakteristiku, kdy při malých otáčkách mají nejvyšší záběrný moment, ale se zvyšujícími otáčkami se záběrný moment rychle snižuje. Další velká výhoda těchto motorů jsou dobré vlastnosti při paralelním chodu více motorů. Tento typ pohonu se ale dlouho nemohl použít pro brzdění rekuperací. Až s rozvojem moderních výkonových polovodičů je to možné.

Stejnoseměrné motory s cizím buzením

Mnohem výhodnější je použití pohonů se stejnosměrnými motory s cizím buzením. Pohony s motory s cizím buzením se používají nebo používaly v elektrických lokomotivách a ve vozech MHD, v hybridních automobilech a elektromobilech. Efektivní využívání tohoto typu motoru opět umožnil rozvoj výkonové polovodičové techniky, který umožnil efektivní rozběh a řízení otáček motoru pomocí změna napětí kotvy.

Rozběh stejnosměrného motoru s cizím buzením se provádí buď postupným zvyšováním napájecího napětí kotvy, nebo postupným vyřazováním předřadných odporů zapojených do obvodu kotvy – tato možnost se v moderních pohonech v dopravě nepožívá pro plýtvání energií mařené v předřadných odporech.

Výhody stejnosměrných motorů s cizím buzením jsou zřejmé, lze jednoduše řídit rychlost otáček pomocí změny napětí kotvy nebo budícího proudu, mají velký záběrný moment i při

nízkých otáčkách, snadná změna smyslu otáčení změnou polarit napětí kotvy nebo změnou polarit budícího proudu, snadné přizpůsobení provozních charakteristik požadavkům poháněných mechanismů pomocí řízení budícího proudu a lze snadno využít možnost brzdění rekuperačí.

Nevýhody stejnosměrných motorů s cizím buzením jsou maximální rychlost je omezena komutací a komutátorem a komutátor vyžaduje zvýšenou údržbu. A právě komutátor je důvod, proč se v poslední době stejnosměrné motory v pohonech dopravních prostředků stále častěji nahrazují střídavými motory.

Moderní pohon se stejnosměrným cize buzeným motorem je soustava tvořená stejnosměrným motorem, řízeným zdrojem stejnosměrného napájecího napětí, regulátorem a potřebnými čidly [11].

5.1.2 Pohony se střídavými motory

Asynchronní motor

Asynchronní motor je dnes nejpoužívanější motor v pohonech v dopravě. Je to především pro jeho jednoduchou konstrukci, která zaručuje dlouhou provozní spolehlivost a tím nižší náklady na údržbu. Asynchronní motory lze vyrábět ve velkém rozsahu výkonů a mají dobré provozní vlastnosti.

Pro efektivní regulaci rychlosti otáček a rozběh je u asynchronního motoru potřeba kvalitní zdroj proměnného napětí a kmitočtu. Tím je některý typ měniče výkonové elektroniky s poměrně složitou výkonovou i řídicí částí. Možnost prakticky bezztrátového řízení rychlosti otáček představuje u většiny aplikací úsporu stále se zdražující elektrické energie.

Při elektrickém brzdění asynchronního motoru se buď kinetická energie setrvačných hmot pohonu vrací zpět do napájecího zdroje rekuperačním brzděním. Asynchronní motor je buzen z napájecí sítě, a proto při odpojení od napájecí sítě nemůže bez zvláštních opatření pracovat jako generátor.

Asynchronní motor je konstrukčně tvořen dvěma vícefázovými, nejčastěji třífázovými, systémy vinutí na statoru a na rotoru.

Synchronní motor s permanentními magnety PMSM

Rotor stroje je tvořen permanentním magnetem, stator, na nějž je přiveden střídavý proud, vytváří rotující magnetické pole. Rotor se snaží uchovat si svoji konstantní polohu vůči otáčivému magnetickému poli vytvářenému průchodem střídavého proudu ve statoru, drží se

v synchronismu až do kritického točivého momentu. Kvůli konstantnímu magnetickému poli v rotoru nelze použít asynchronní rozběhové vinutí pro spuštění. Tyto motory vyžadují startovací zdroj s proměnlivou frekvencí.

Hlavními výhodami trakčních PMSM jsou jejich malé objemy a hmotnosti – až třikrát menší ve srovnání s asynchronními a stejnosměrnými motory pro stejný výkon a otáčky. Tohoto zmenšení rozměrů je dosaženo použitím permanentních magnetů ze speciálních slitin NdFeB nebo SmCo s magnetickou indukcí přibližně 1 T. Trakční synchronní motory je proto možné konstruovat s dostatečně velkou hodnotou točivého momentu při dostatečně malých rozměrech. Přínosem trakčních pohonů s PMSM je možnost absence mechanické převodovky v pohonu kol nebo náprav vozidla. Pomaluběžné trakční synchronní motory se konstruují jako mnohapólové až s padesáti póly. Vlivem velké koncentrace výkonu v malém objemu motoru jsou u PMSM méně příznivé podmínky pro odvod ztrátového tepla. Proto se u trakčních PMSM větších výkonů používá zpravidla vodní chlazení.

V oblasti silničních dopravních prostředků byl trakční PMSM využit např. ve voze Toyota Prius s hybridním pohonem nebo v autobusech a trolejbusích Neoplan.

Z realizovaných kolejových vozidel s trakčními PMSM je možné jmenovat např. japonský příměstský vlak e-train s přímými pohony náprav o výkonu jednoho motoru 160 kW nebo tramvaj Citadis od firmy Alstom s výkonem jednoho motoru 100 kW.

Zajímavou aplikací trakčních PMSM jsou kolové pohony vozů metra na pneumatikách od firmy Siemens s výkonem motoru 65 kW [12].

5.2 Systémy pro ukládání elektrické energie v dopravních prostředcích

Stejně důležitým prvkem jako je motor nebo generátor v systémech pro rekuperaci kinetické energie v dopravě jsou i akumulátory, do kterých se shromažďuje a ukládá energie v různé podobě, která závisí na typu systému rekuperace. Nejdůležitější vlastnosti akumulátorů všech typů jsou:

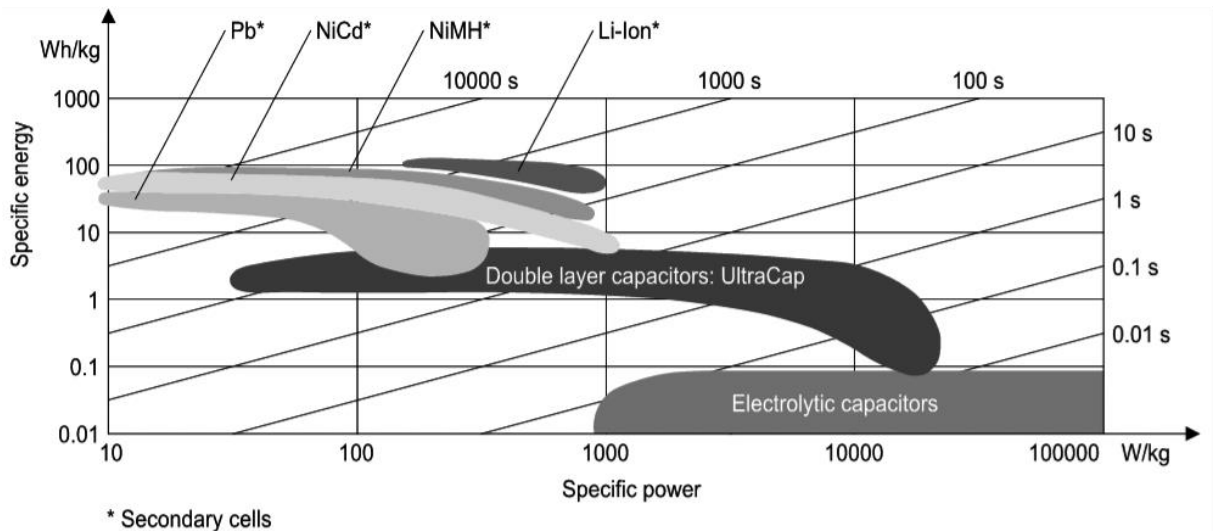
Měrná energie Wh/kg

Měrná energie vyjadřuje poměr kapacity akumulátoru k jeho hmotnosti. Kapacita baterie složené z článků je dána počtem paralelních větví. U hydrostatických akumulátorů je dána celkovým objemem akumulátoru. Kapacita setrvačnicků se počítá z momentu setrvačnosti a rozdílu úhlových rychlostí, který lze využít.

Měrný výkon W/kg

Měrný výkon je typickým výkonem akumulátoru vztaženým k jeho hmotnosti. Výkon baterie složené ze sady článků je součtem výkonu článků řazených sériově ve větvi baterie. U hydrostatických akumulátorů je dán pracovním tlakem. Měrný výkon setrvačnicků je dán přenášeným momentem a úhlovou rychlostí.

Porovnání jednotlivých typů akumulátorů z pohledu obou vlastností je uvedeno na následujícím obrázku.



Obrázek 5.1 Porovnání různých zdrojů energie s ohledem na měrnou energii a měrný výkon

5.2.1 Elektrochemické akumulátory

Elektrochemické akumulátory jsou zařízení pro ukládání elektrické energie. Akumulátor je článek, do které ho je nejprve potřeba energii uložit – nabít a následně je možné používat ho jako zdroj. U elektrochemických akumulátorů nás kromě měrné energie a měrného výkonu dále zajímají tyto vlastnosti:

- nabíjecí doba
- vybíjecí doba
- počet cyklů
- účinnost

Elektrochemické akumulátory dělíme na:

- olovené (Pb)
- niklové
 - nikl kadmiový (NiCd)
 - metal hydridový (NiMH)
- lithiové
 - lithium iontový (Li-ion)
 - lithium polymerový (Li-Pol)

Klasické olověné akumulátory (Pb)

Olověná akumulátor, který byl objeven francouzským fyzikem Gastonem Planté v roce 1859, byl prvním nabíjecím akumulátorem pro komerční využití. Navzdory své dlouhé historii jsou chemické sloučeniny na bázi olova i dnes hojně používány. Najdeme hned několik důvodů pro jejich oblíbenost; olověné akumulátory jsou spolehlivé a poměrně levné z hlediska ceny vztahované na watt. Existuje jen několik dalších baterií, které dodají velké množství energie tak levně jako olověné akumulátory, které jsou proto cenově efektivní pro automobily, golfová vozítka, vysokozdvizné vozíky, lodě a záložní zdroje. Jejich hlavní výhody jsou nízká cena, snadná výroba, pomalé samovybití, vysoké vybíjecí proudy, dobré vlastnosti při nízkých i vysokých teplotách. Naopak nevýhodami jsou špatný poměr energie ke hmotnosti, dlouhá doba nabíjení, omezená životnost, a hlavně jsou nešetrné vůči životnímu prostředí [13].

Nikl-kadmiový akumulátor (NiCd)

Akumulátor NiCd se nejčastěji vyrábí jako hermetizovaný. Výhody tohoto článku jsou vyšší odolnost proti hlubokému vybití a přebití, mohou se skladovat i nenabitě, možnost nabíjet vyššími proudy a pracují dobře i za nízkých teplot. Velkou nevýhodou je jedovatost kadmia, a proto je nezbytné je sbírat opotřebované NiCd akumulátory (stejně jako v případě Pb akumulátorů). Jmenovité napětí jednoho článku je 1,2 V. V plně nabitém stavu dosahuje napětí k 1,35 V a vybitý článek má 0,8-1,0 V.

Nikl-metal hydridový akumulátor (NiMH)

Akumulátor NiMH je druh galvanického článku, který byl na začátku 21. století jeden z nejčastěji používaných akumulátorů. V porovnání s nikl-kadmiovým akumulátorem má přibližně dvakrát vyšší kapacitu. Hlavními důvody jeho velkého rozšíření je jeho značně velká kapacita přibližně o 40 % vyšší při stejných rozměrech a schopnost dodávat poměrně velký proud ale za přijatelnou cenou. Nevýhodou je jeho malé napětí 1,2 V.

Lithium iontové akumulátory

Li-Ion akumulátor je běžně používaný ve spotřební elektronice. Kvůli vysoké hustotě energie vzhledem k objemu se výborně hodí pro přenosná zařízení. V současnosti je to v této oblasti asi nejpoužívanější typ. Jmenovité napětí Li-ion článku dané normami je 3,6 V, případně 3,7 V (USA). Skutečné výstupní napětí závisí na typu článku, stupni nabití a dalších faktorech, může se pohybovat např. mezi 4,2 a 3–2,5 V. Klesající napětí může indikovat míry vybití akumulátoru. Překročení mezního nabíjecího i vybíjecího napětí může akumulátor nevratně

zničit. Výhodou Li-Ion akumulátorů je velmi vysoká hustota energie až třikrát vyšší než u akumulátorů NiMH. Vysoká kapacita v poměru k objemu a hmotnosti, téměř žádné samovybíjení a životnost dosahuje 500-2000 cyklů. Nevýhodou naopak je, že akumulátory Li-Ion jsou citlivé na nízké pod bodem mrazu nebo vysoké teploty, při těchto teplotách akumulátor stárne a ztrácí svoji kapacitu. Ideální teplota pro provoz je 5-15°C.

Lithium-polymerový akumulátor (Li-Pol)

Li-Pol je relativně nový typ elektrického akumulátoru. Jejich konstrukce vychází Li-Ion akumulátorů a jejich vlastnosti se ještě zlepšily (nízká hmotnost, relativně vysoká kapacita, minimální samovybíjení a vysoká hustota energie). Výroba akumulátorů je technologicky i energeticky náročná. Důležitou vlastností je zvýšený rozsah pracovních teplot -10 až 50°C. Konstrukce akumulátoru umožňuje vyrobit akumulátory, které jsou schopné špičkově dodávat proud, který 20-ti až 50-ti násobek kapacity článku. Nevýhodu mimo jiné je možnost vznícení nebo výbuchu zejména při zkratu, proto je nutné použití ochran a také vyšší pořizovací cena.

V oblasti akumulátorů založených na Lithiu v současné době probíhá intenzivní výzkum a vývoj při kterém se vědci soustředí na další zlepšování vlastností těchto akumulátorů.

5.2.2 Superkapacitory

Superkapacitor (superkondenzátor) představuje v principu elektrolytický kondenzátor vyrobený speciální technologií, která umožňuje dosažení obrovské kapacity řádu až stovek či tisíců Faradů.

Tato technologie je založena na tzv. elektrochemické dvouvrstvě, proto se superkapacitory označují také zkratkou EDLC (Electrochemic Double Layer Capacitor). Energie je v superkapacitoru uložena stejně jako u klasického kondenzátoru.

Po přivedení vnějšího napětí dochází k přesunu kladných iontů v elektrolytu směrem k záporné elektrodě a k přesunu záporných iontů ke kladné elektrodě. Jednu z nejdůležitějších komponent superkapacitoru představuje vrstva aktivního uhlíku, která je nanesena na vnitřní stranu hliníkových elektrod, které jsou tvořeny hliníkovou fólií. Aktivní uhlík ve formě prášku je tvořen velmi malými částicemi, které v celém objemu vytvářejí velice pórovitý povrch, jehož plocha je obrovská. Výrobci uvádí hodnotu až 2000 m² na jeden gram prášku. Aktivní uhlík je tvořen uhlíkovým aerogelem. Jde o pevný materiál s nízkou hustotou vzniklý nahrazením tekuté složky gelu vzduchem. Dalším používaným materiálem jsou uhlíkové polymery. Materiálem budoucnosti jsou uhlíkové nanotrubičky, které ještě podstatně zvyšují povrch částic.

Elektrody kondenzátoru jsou odděleny separátorem (polypropylenová fólie) a jsou obklopeny elektrolytem, který je tekutý nebo ve formě gelu. Tloušťka dielektrika (el. dvouvrstvy) je velmi malá, řádově 10^{-10} m. Právě díky kombinaci obrovské plochy a velmi tenké dvouvrstvě se dosahuje velké schopnosti vázat náboj, a tedy vysoké kapacity superkapacitoru při malém sériovém odporu. Určitou nevýhodou, vzhledem k vlastnostem elektrolytu a možnému průrazu elektrické dvouvrstvy, je nízké provozní napětí, jehož hodnota se pohybuje v rozmezí 2,3 – 2,7 V případě velmi používaného organického elektrolytu. Pro větší napětí je nutné řadit superkapacity do série, což ovšem vyžaduje použití ochranných balančních obvodů.

Vliv vlhkosti

Superkapacitor je schopen fungovat i při velké vlhkosti. Musíme ovšem zabezpečit, že nedojde během jeho činnosti ke kondenzaci par. Superkapacity se během skladování běžně zavírají do vakuových kontejnerů. Důsledkem toho je, že se na kontaktech superkapacitoru nevytváří koroze.

Vliv tlaku

Pokud je superkapacitor vystaven mírnému podtlaku, nejedná se o problém, protože nedochází k žádným negativním účinkům na funkci superkapacitoru. Tlak vyšší než atmosférický se ovšem projevuje negativními účinky, a to v podobě deformace nanostruktur u elektrod. V některých případech mohou být poničeny superkapacity jako celek.

Vliv teploty

Elektrické parametry superkapacitoru jsou zachovány i při nízkých teplotách okolo -40°C . A maximální mezní teplota je okolo 60°C , při jejím dosažení by měl být superkapacitor odpojen, aby nedošlo k jeho poškození nebo zničení. Při opakovaném vybíjení a nabíjení s periodou cca 10 s se teplota superkapacitoru zvýší cca o 15°C . Při návrhu nové aplikace se superkapacitorem se doporučuje měření oteplení superkapacitoru, aby se zabránilo přehřátí elektrolytu, jeho bod varu je 83°C .

Vliv otřesů a vibrací

Superkapacity jsou stejně jako kondenzátory odolné vůči vibracím nebo otřesům.

V současné době již vědci dokázali vyřešit konstrukci kondenzátorů tak, aby bylo možné vyrobit nové „superkapacity“ s kapacitou ne jednotek, ale rovnou desítek, stovek až tisíců faradů a velmi malým vnitřní odporem. Tyto superkapacity se již vyrábí a s úspěchem nasazují.

Superkapacitory svými parametry vyplňují prostor mezi elektrochemickými zdroji proudu (akumulátory) a klasickými kondenzátory. Poskytují nyní asi 10–25 x méně energie na jednotku hmotnosti než elektrochemické zdroje, na druhou stranu jejich životnost při podobném zhoršení parametrů (nejčasněji se uvažuje ztráta 10 % kapacity) dosahuje desítek let a zcela nesrovnatelná je opakovatelnost použití. Zatímco akumulátory typicky přežijí 100 až 1000 úplných cyklů, kondenzátory jich zvládají i 1 000 000, přitom nabít je lze během několika sekund a účinnost uchování energie je až 95 %. Další vývoj vypadá velmi slibně, u vývojových vzorků se již podařilo dosáhnout podobné hustoty energie jako mají současné lithiové akumulátory.

5.2.3 Hydrostatické akumulátory

Do hydrostatických akumulátorů shromažďujeme energii, kterou v případě potřeby můžeme opět využít pro pohon. Na rozdíl od elektrického akumulátoru, můžeme hydraulický akumulátor vybit bez nebezpečí úplně, a to značnou rychlostí.

Hydrostatický akumulátor je v podstatě nádoba, ve které se akumuluje energie buď stlačováním pružiny nebo plynu případně se tlak v nádobě vyvíjí tlakem pístu.

Podle konstrukce dělíme tyto akumulátory na závažové, pružinové a plynové.

Závažové akumulátory

Závažový akumulátor sestává z válce, do něhož se ponořuje plunžr o ploše S . Akumulace energie spočívá v tíhové energii závaží o hmotnosti m . Je to nejstarší typ akumulátoru, který se dříve používal hlavně u tvářecích strojů. Jedinou jeho předností je možnost odebírat kapalinu o konstantním tlaku v celém rozsahu užitečného zdvihu. Proto se ještě dnes používá u speciálního laboratorního zařízení pro kalibraci tlaků. Nevýhodou jsou velké rozměry a hmotnost a z ní vyplývající setrvačnost. Kromě toho se musí montovat ve svislé poloze [14].

Pružinové akumulátory

U pružinového akumulátoru je energie akumulována v deformační práci mechanické pružiny. Tlak odebíraný z akumulátoru již není konstantní, nýbrž se mění v závislosti na charakteristice pružiny [14].

Výhodou pružinového akumulátoru je možnost montáže v libovolné poloze. Kromě toho může pracovat i při velmi nízkých teplotách [14].

Pružinový akumulátor má také řadu nevýhod. Poměrně malá deformační práce pružiny limituje použití akumulátoru pro vyšší tlaky, protože velké pružiny neúměrně zvyšují rozměry

akumulátoru. Charakteristika pružiny se také časem mění a seřízení akumulátoru na určitý tlak je obtížné a složité. Kromě toho pružiny občas praskají, což snižuje spolehlivost zařízení. Proto se pružinové akumulátory používají zřídka, a to pouze pro nižší tlaky a výkony [14].

Oba výše uvedené typy akumulátorů mají tak tolik nevýhod, že nedošlo k masivnímu rozšíření. Velkého rozšíření dosáhly pouze hydropneumatické (plynové hydraulické) akumulátory.

Plynové akumulátory

Plynové akumulátory pracují na hydropneumatickém principu, ve kterých stlačitelný inertní plyn (nejčastěji dusík) slouží k akumulaci tlakové energie kapaliny. Plynové akumulátory jsou tlakové nádoby s plynným prostředím. Plyn se v uzavřeném prostoru akumulátoru chová jako dokonalá pružina a jeho stlačování probíhá podle zákonů termodynamiky [14].

Hydropneumatické akumulátory podle způsobu oddělení plynu a kapaliny rozdělujeme na pístové, vakové, membránové

Hydropneumatické pístové akumulátory

Pístové akumulátory mohou být dodávány v širokém rozsahu provedení, s těsněním vhodným pro nízké a vysoké tlaky a teploty a také pro speciální kapaliny. Materiály všech komponentů mohou být zvoleny pro konkrétní aplikaci a tato velká flexibilita je výhodou pístových akumulátorů. Obecně nejsou tyto typy akumulátorů vhodné pro tlumení a jsou citlivější na úroveň znečištění pracovní kapaliny. Jejich výhodou však je možnost použití při velkých teplotních rozdílech a velkých změnách tlaku. Umožňují také snímání polohy pístu a tím i zpětnou kontrolu nad stavem kapaliny v akumulátoru. Často se také používají ve spojení s přidavnými tlakovými dusíkovými lahvemi.

Hydropneumatické vakové akumulátory

Spolehlivost, široká nabídka vyráběných velikostí a pracovní tlak až 330 bar (zakázkově i více) jsou hlavní předností těchto hydraulických akumulátorů. Robustní a rozebíratelná konstrukce zaručuje vysokou životnost a umožňuje případnou výměnu poškozeného pryžového vaku. Vakové akumulátory je možno doporučit pro nepřetržitý provoz v těch nejtěžších podmínkách. U těchto akumulátorů lze kombinovat různé materiály vaků a povrchových úprav tlakových nádob, což umožňuje použít tyto výrobky i pro speciální aplikace.

Hydropneumatické membránové akumulátory

Jejich výhodou je jednoduchá a lehká konstrukce, malé rozměry, relativně nízká cena, široký rozsah pracovního tlaku – poměr plnicího a maximálního pracovního tlaku činí až 1:8. Jsou zvláště vhodné pro nasazení v mobilní hydraulice. Dále se používají především u obráběcích a tvářecích strojů [15].

Závěrem lze konstatovat, že pružinové akumulátory jsou vhodné pro malé objemy, řádově dm^3 a pro tlaky od 3 do 5 MPa. Pístové akumulátory jsou vhodné pro objemy do 400 dm^3 a tlaky do 35 MPa. Vakové a membránové akumulátory jsou pro objemy do 200 dm^3 a tlaky do 35 MPa. Pro velké objemy a tlaky až do 45 MPa jsou konstruovány plynové akumulátory s přímým stykem plynu a kapaliny, které musí být z bezpečnostních důvodů plněny zásadně inertním plynem (nejčastěji dusíkem), který má jednak menší absorpční schopnost do minerálního oleje, nezpůsobuje rychlé stárnutí oleje jako vzduch a je nehořlavý [14].

6 Hodnocení ekonomické výhodnosti jednotlivých rekuperačních systémů

V práci jsem popsal základní rozdělení systémů na rekuperaci kinetické energie. Každý systém má své výhody a nevýhody. V oblasti výroby osobních automobilů jsou zatím patrně pouze dva vhodné rekuperační systémy. Elektrický systém a mechanický systém, zatím co hydrostatický systém je navrhován téměř výhradně pro nákladní automobily a MHD.

Jelikož si každý výrobce velmi tají své know-how a většinou nezveřejňuje příliš detailů můžeme se pouze dohadovat o ceně jednotlivých řešení. Ani prodejní cena jednotlivých typů vozidel nemusí odrážet cenu použitého rekuperačního systému, protože ta může být ještě velmi ovlivněna dlouhodobou prodejní strategií výrobce.

Nejpoužívanější rekuperační řešení pro osobní automobily je dnes elektrický systém a pravděpodobně vzhledem jeho historii bude obecně jeho cena nejnižší. Některé automobilky se snaží kombinovat elektrický systém s mechanickým a tím ještě více zvyšovat efektivitu využití kinetické energie. Jak je vidět na příkladu automobilky Volvo, je využití mechanického systému rekuperace velmi nadějným směrem.

Ve vývoji nákladních se zdá, že nejlevnějším řešením by mohl být hydrostatický systém, který je zároveň i poměrně lehký, ale zatím poměrně velký.

Vozidla městské hromadné dopravy je nutné rozdělit podle typu základního pohonu. U Kolejových vozidel tedy tramvajů nebo souprav metra je rozhodně nejvhodnější elektrický systém. Již dlouho se využívá rekuperačního brzdění s vracení energie do trakčního vedení. V současné době se pouze zdokonalují vlastní akumulátory vozidel pro možnost akumulace energie v době, kdy ji z trakčního vedení neodebírání jiné vozidlo.

U trolejbusů je rozhodně nejlevnějším řešením instalace elektrických akumulátorů. Ačkoliv ještě v roce 2014 prováděl Dopravní podnik města Brna testování a analýzu doplnění části trolejbusů akumulátorem LiFePO₄ nebo superkapacitoru sestaveného z článků Maxwell Technologies, ekonomicky řešení nevycházelo dodře. Návratnost ceny doplněných akumulátorů a přírůbovacího měniče včetně celého řídicího systému byla delší než 10 let, a tedy delší než předpokládaná životnost zařízení [16].

Od roku 2016 je již možné využít dotace na pořizování hybridních trolejbusů nebo při elektrobusech. A velké zakázky na nákup elektrobusech už vyspali města Hradec Králové a České Budějovice. 16 hybridních trolejbusů s akumulátory jezdí v Plzni a další hybridní trolejbusy jezdí například v Českých Budějovicích, Opavě, Teplicích a Ostravě. Dopravní podniky

připouští, že bez dotací by to určitě nešlo, vstupní náklady jsou „brutální“. Ekonomicky se taková koupě nevyplatí, dotace je nutnost. Předpoklad je, že cena klesne se zavedením skutečně sériové výroby. Spolehlivost elektrických vozidel je však vyšší než u dieselových autobusů a běžné servisní náklady jsou dokonce nižší.

Nicméně největší přínos by rekupační systémy podle mého názoru měli v městských aglomeracích, kde se vozidlo neustále rozjíždí a opět brzdí. V takovém případě bude úspora paliva oproti klasickým vozidlům největší.

7 Závěr – možnosti budoucího vývoje rekuperačních systémů

Z hlediska všeobecného tlaku na snižování emisí a znečišťování životního prostředí obecně je rozhodně efektivnější využívání energie správná cesta.

V oblasti rekuperačních systémů může velkou změnu způsobit další výzkum superkapacitorů, který zejména v poslední dekádě zaznamenal značný rozvoj. Kapacita se stále ještě zvyšuje a až se podaří snížit jejich cenu, což určitě nastane s jejich častějším nasazování. mají perspektivu stát se nejrozšířenějším akumulátorem elektrické energie budoucnosti.

Předpokládám, že dojde k dalšímu zvyšování efektivity u mechanických systémů se setrvačnickem a tyto systémy se v následujících 5 letech stanou zcela běžné u nových vozů některých automobilek

Neumím si úplně představit, jak by se mohla zmenšit velikost hydrostatických rekuperačních systémů a proto předpokládám, že tento systém bude i nadále využívám téměř výhradně u nákladních vozů a případně vozidel MHD.

Určitě je ale jisté, že postupně bude tlak na snižování emisí základního pohonu (dnes spalovacích motorů) nebo na jeho nahrazení jiným ekologicky šetrnějším pohonem. Někaké náznaky tu již jsou.

Výhled do budoucna

Například systém nanoFlowcell využívá palivové články, do kterých se pumpuje takzvaný bi-ION elektrolyt. Ten protéká podobnými punčoškami jako v klasickém palivovém článku, reagují spolu a uvolňují se elektrony. Ty napájí elektromotory. Nabíjení elektrolytu se nalévá do nádrží vozu velmi rychle – vlastně jako benzín. Takže za několik minut se natankuje tolik elektrolytu, že stačí na dojezd 1000 km.

Vývojový tým už auto otestoval natolik, že je schopen už nyní nabídnout případným zákazníkům záruku na 50 000 provozních hodin, což v přepočtu může dělat až 2,5 miliónů kilometrů. Ale má jiný problém – jak přesvědčit veřejnost, firmy, města a státy, aby investovaly do rozvoje sítě čerpacích stanic na bi-ION a komplexní infrastruktury – od výroby, přes distribuci až po samotné tankování. Tento iontový roztok má přitom mít ohromnou výhodu – jeho výrobní cena je minimální a i „dobíjení“ vyjde na minimální peníze. Jeden litr roztoku prý vyjde asi na tři koruny [17].

Ale to už je mimo téma této práce.

8 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Vítejte na zemi. [online]. Poslední změna 2013. Dostupné z: http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=vliv_dopravy_na_zivotni_prostredi&site=do_dopra
- [2] E-konstruktor. Jaký je rozdíl mezi třecími a regenerativními brzdami u aut. [online]. Poslední změna 24.4.2016. [Cit. 10.5.2018]. Dostupné z: <https://e-konstruktor.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezitrecimi-a-regenerativnimi-brzdami-u-aut>
- [3] HANKE, Petr. Toyota Prius Plug-in Hybrid – poprvé se třemi. [online]. Poslední změna 26.4.2017. [cit. 10.5.2018]. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/svezli-jsme-se/toyota-prius-plug-in-hybrid-poprve-se-tremi_45728.html
- [4] Nový systém tlumičů Audi snižuje spotřebu paliva a zvyšuje komfort [online]. [cit. 1.4.2018]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/novy-system-tlomicu-audi-snizuje-spotrebu-paliva-zvysuje-komfort>; ISSN 1802-5323 (c) 2006–2017 Hybrid.cz vydává Chamanne s.r.o.
- [5] PLOMER, Jan. Setrvačnick, inovativní řešení pro hybridní a elektrická vozidla [online]. Poslední změna 20.12.2010. [cit. 11.5.2018] Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/clanky/setrvacnik-inovativni-reseni-pro-hybridni-elektricka-vozidla-1-dil>; ISSN 1802-5323 (c) 2006–2017 Hybrid.cz vydává Chamanne s.r.o.
- [6] Svět plný energie. Setrvačnick se valí vpřed. [online]. [cit. 11.5.2018]. Dostupné z: <http://www.svetplnyenergie.cz/setrvacniky-se-vali-vpred>
- [7] FOKT, Michal. Volvo vyvíjí systém na bázi KERS. [online]. Poslední změna 26.3.2014. [cit. 12.5.2018]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/volvo-vyvi-ji-hybridni-system-bazi-kers-80354>; ISSN 1213-8991 CZECH NEWS CENTER a.s. a dodavatelé obsahu.
- [8] GRUNDFEST, Michal. Rekuperace energie je aktuální téma současnosti. Technický týdeník [online]. 2009 [cit. 12.5.2018]. Dostupný z: <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=1211&mark=>
- [9] VLK, František. Koncepce motorových vozidel: Koncepce vozidel, alternativní pohony, komfortní systémy, řízení dynamiky, informační systémy. Vyd. 1. Brno, Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2000. ISBN 80-238-5276-0.
- [10] Pohonné a řídicí systémy. [online]. Poslední změna 2018. [cit. 16.5.2018] Dostupné z: <https://www.skoda.cz/produkty/pohonne-a-ridici-systemy/trakcni-vybaveni-pro-mestska-vozidla/#city>
- [11] KOBRLE, Pavel, PAVELKA Jiří. Elektrické pohony a jejich řízení. Vyd. 3. Praha, Česká technika – nakladatelství ČVÚT, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.
- [12] ČERNÝ, Ondřej, DOLEČEK, Radoslav, NOVÁK Jaroslav, ŠVANDA Jan. Vyšetřování harmonických v traktci. ELEKTRO [online]. 1.6.2010 [cit. 17.5.2018] Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/41260.pdf>

- [13] Battery University: *BU-201: How does the Lead Acid Battery Work?* [online]. [cit. 28.5.2018]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries
- [14] ŠKOPÁN, Miroslav. Hydraulické pohony strojů. Studijní text – sylabus. Ústav dopravní techniky, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. [online]. Vydáno 11/2009. Dostupné z: <http://www.iae.fme.vutbr.cz/userfiles/uadi/files/Hydraulické%20pohony%20strojů.pdf>
- [15] Hydropneumatické akumulátory a řídicí systémy. [online]. Poslední změna 2014. [cit. 25.5.2018] Dostupné z: <http://www.parker.cz/produkty/hydraulika/hydropneumaticke-akumulatory-olaer/>
- [16] CIPÍN, Radoslav, ČERVINKA, Dalibor, MARTIŠ, Jan, PAZDERA, Ivo, PROCHÁZKA, Petr, VOREL, Pavel. Aplikační možnosti ultrakapacitorů a akumulátorů LiFePO4 v trolejbusové síti Dopravního podniku města Brna. ELEKTRO 12/2017 [online]. [cit. 30.5.2018] Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2017/12/Elektro_12_2017/info/Elektro_12_2017.pdf
- [17] MAŠEK, František. Budoucnost dopravy není v akumulátorech, ale v elektrolytu. Obnovitelně.cz. 10.11.2017. [online]. [cit. 31.5.2018]. Dostupné z: <http://www.obnovitelne.cz/cz/clanek/206/budoucnost-dopravy-neni-vakumulatorech-ale-elektrolytu/>