



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**KONCEPCE POHONNÉHO ÚSTROJÍ HYBRIDNÍHO
MOTOCYKLU**

-

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Šmak

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lubor Zháňal, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Martin Šmak**
Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Lubor Zháňal, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Koncepce pohonného ústrojí hybridního motocyklu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je návrh a simulace hybridního ústrojí pro motocykl KTM RC 390, které by vzniklo doplněním spalovacího motoru menším elektromotorem a potřebným elektrickým příslušenstvím.

Cíle diplomové práce:

Rešerše problematiky a aktuálně používaných řešení.
Volba parametrů elektrické části požadovaného hybridního ústrojí.
Návrh uspořádání hybridního pohonu s přihlédnutím ke konstrukci motocyklu.
Návrh řídicího algoritmu pro hybridní pohon pro různé jízdní režimy.
Simulace chování jízdních režimů v oblasti podélné dynamiky.

Seznam doporučené literatury:

KREITH, F. The CRC Handbook of Mechanical Engineering. 1. vyd. 1998. ISBN 978-0-8493-0866-6.

MILLIKEN, W., MILLIKEN, D. Race Car Vehicle Dynamics. 1st edition. Warrendale: SAE, 1995. 857 s. ISBN 1-56091-526-9.

GILLESPIE, T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 519 s. ISBN 1-56091-199-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Hybridní motocykly představují potenciál ve snížení spotřeby paliva a emisí motocyklů, ale také ve zvýšení celkových výkonnostních parametrů při zachování původního hnacího agregátu.

Tato práce je zaměřena na návrh konstrukčního řešení hybridního pohonu motocyklu KTM RC 390 a jeho simulaci v různých provozních režimech. Model hybridního ústrojí je srovnáván s modelem konvenčního motocyklu a jsou sledovány rozdíly obou koncepcí pohonu.

Provedené simulace prokázaly lepší akceleraci a nižší spotřebu paliva u hybridní koncepce u většiny testů s výjimkou dálničního provozu. Největší rozdíl ve spotřebě paliva se projevil v městském provozu, kde se použití hybridního motocyklu ukázalo jako vhodné.

KLÍČOVÁ SLOVA

Motocykl, Hybrid, Simulace, Elektromotor, Spotřeba

ABSTRACT

Hybrid motorcycles represent opportunity in reducing fuel consumption and emissions of motorcycles, but also in increasing overall performance parameters while preserving the original propulsion unit.

The thesis deals with the design solution of a hybrid motorcycle and its simulation in various operating modes. The model is compared to a conventional motorcycle model, and the differences between both concepts are observed.

Simulations have shown higher acceleration and lower fuel consumption in the hybrid concept for most tests, except for highway traffic. The largest difference in fuel consumption of hybrid motorcycle was evident in urban traffic, where the use of a hybrid motorcycle proved to be suitable.

KEYWORDS

Motorcycle, Hybrid, Simulation, Electric motor, Fuel consumption

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠMAK, Martin. *Koncepce pohonného ústrojí hybridního motocyklu*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/148896>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Lubor Zháňal.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 26. května 2023

.....
Martin Šmak

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Luboru Zháňalovi, Ph.D. za odborné vedení a pomoc při zpracování experimentálních laboratorních měření. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Tobiášovi a Ing. Martinu Beranovi za pomoc při laboratorním měření.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Hnací ústrojí motocyklů	12
1.1 Rozdělení vratných zážehových motorů podle koncepce.....	12
1.1.1 Dvoudobé motocyklové motory.....	14
1.1.2 Čtyřdobé motocyklové motory.....	15
1.1.3 Motory s alternativním uspořádáním válců.....	16
1.1.4 Alternativní spalovací motory.....	17
1.2 Rozdělení podle způsobu chlazení motoru.....	18
1.3 Rozdělení podle přípravy paliva.....	19
1.4 Řídicí jednotky.....	20
1.5 Převodovky a přenos síly.....	20
2 Elektromotory.....	24
2.1 Typy elektromotorů.....	24
2.1.1 Kartáčové stejnosměrné motory.....	25
2.1.2 BLDC motory.....	25
2.1.3 Ostatní druhy stejnosměrných elektromotorů.....	25
2.1.4 BLAC motory.....	26
2.1.5 Asynchronní motory.....	26
2.2 Příslušenství.....	26
2.2.1 Baterie.....	27
2.2.2 Superkondenzátory.....	27
2.2.3 Balanční obvody.....	28
2.2.4 Kontrolér.....	29
2.3 Elektrická vozidla.....	29
2.4 Elektrické motocykly.....	30
3 Hybridní technologie.....	31
3.1 Komponenty hybridního ústrojí.....	32
3.2 Emisní normy.....	34
3.3 Rozdělení hybridů podle uspořádání.....	36
3.3.1 Paralelní hybridy.....	36
3.3.2 Sériové hybridy.....	37
3.3.3 Kombinované hybridy.....	38
3.4 Rozdělení hybridů podle stupně hybridizace.....	39
3.5 Rekuperace energie.....	40
3.6 Řízení hybridních vozidel.....	40
3.7 Hybridní motocykly.....	41
4 Experiment – koncepce hybridního motocyklu.....	43
4.1 Motocykl pro zástavbu hybridního ústrojí.....	43

4.1.1	Výchozí model motocyklu, specifikace	43
4.1.2	Měření vybraných parametrů motocyklu	45
4.2	Uspořádání hybridního ústrojí	47
4.2.1	Elektromotor.....	49
4.2.2	Kontrolér	52
4.2.3	Balanční obvod akumulátorového paketu	53
4.2.4	Baterie	53
4.2.5	DC/DC měnič.....	56
4.2.6	Řídicí jednotka	56
4.3	Simulace	57
4.3.1	Simulace jednoválcové motorové jednotky	57
4.3.2	Simulace konvenčního motocyklu	58
4.3.3	Simulace hybridního ústrojí	60
4.3.4	Simulace řídicího systému	61
4.3.5	Simulace jízdních testů.....	63
4.4	Srovnání koncepcí pohonu	77
Závěr.....		79
Seznam použitých informačních zdrojů.....		80
Seznam použitých zkratk a symbolů		95
Seznam obrázků a tabulek		97
Seznam příloh		99



ÚVOD

Trendem posledních let je snižování spotřeby fosilních paliv a s tím spojené snižování dopadu osobní dopravy na životní prostředí formou redukování množství vypouštěných emisí. Tyto požadavky jsou podloženy evropskými legislativními dokumenty, které udávají maximální hodnoty jednotlivých složek výfukových plynů pro vozidla jednotlivých kategorií. S neustále se zpřísňujícími předpisy je nutné vyvíjet a optimalizovat provoz dopravních prostředků. Jednou z možností snižování množství výfukových plynů je částečný nebo úplný přechod na elektrický pohon nebo zavádění vodíkových technologií.

Snaha o snižování emisí se týká kromě automobilů i motocyklů. Tato kategorie vozidel má vlastní emisní normy a dá-li se předpokládat, že vývoj emisních norem bude postupovat stejným způsobem jako u osobních a užitkových vozů, bude nutné u motocyklových hnacích ústrojí zavádět úpravy konstrukcí pohonu. Podobně jako u osobních automobilů se nabízí možnost určitého stupně hybridizace, která by umožnila snížení emisí během homologačních měření.

V současné době se na evropském trhu žádné hybridní motocykly nevyskytují, není tedy zcela jasné jejich potenciální využití.

Cílem diplomové práce je navrhnout konstrukční úpravu sériově vyráběného motocyklu a zvolit vhodné elektrické části hybridního systému tak, aby při minimálním množství složitých konstrukčních úprav a minimálních nákladech bylo možné sestavit funkční model hybridního motocyklu a nasimulovat rozdíly oproti konvenčnímu sériově vyráběnému motocyklu. Sledována bude především spotřeba paliva a akcelerace motocyklu při různých provozních režimech.

1 HNACÍ ÚSTROJÍ MOTOCYKLŮ

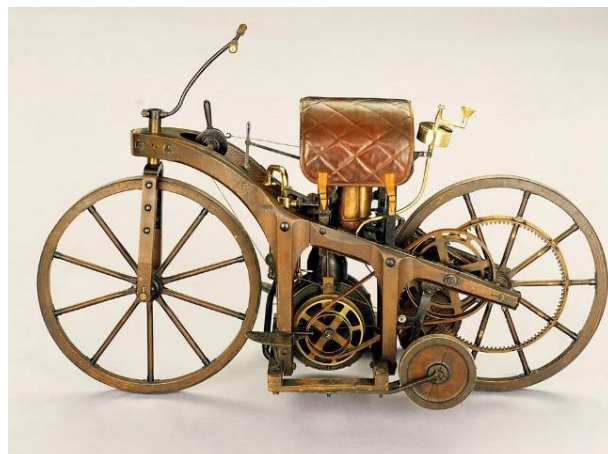
Na motocyklové motory jsou kladeny specifické nároky, jako například nízká hmotnost, vysoký měrný výkon, rozměrová kompaktnost nebo bezproblémový chod i v relativně velkých náklonech. Tato kritéria vedou ke konstrukčním odlišnostem oproti automobilovým motorům, a to například integrovanou spojkou a převodovkou přímo v klikové skříni nebo bloku motoru. Z důvodu relativně nízké hmotnosti převažují motory zážehové s hliníkovou konstrukcí. Jednotlivé konstrukce motocyklových motorů se liší podle jejich využití. Historicky se běžně používaly motory dvoudobé i čtyřdobé, zřídka rotační, v současné době jsou to již téměř výhradně čtyřdobé.

Historicky nejstarší vozidlo, které lze považovat za předchůdce motocyklu bylo Michaux-Perreaux z roku 1868. Lihový parní stroj poháněl přes dva řemeny zadní kolo, čímž bylo možné dosáhnout rychlosti až 14,5 km/h (*Obr. 1*). Další parní motocykly byly postupně vybaveny brzdou a regulací výkonu (Roper steamers). [1]

V roce 1885 byl postaven, ve spolupráci G. Daimlera a W. Maybacha, první motocykl Reitwagen, poháněný 264 cm³ benzínovým motorem s Ottovým cyklem. Motocykl byl vybaven primitivní spojkou, brzdou na zadním kole a postranními stabilizátory (*Obr. 2*). [3]



Obr. 1 Michaux-Perreaux 1868 [1]



Obr. 2 Reitwagen 1885 [2]

V následujících letech byla u motocyklů zavedena například převodovka (Maybach 1886), trubkový rám (Mannesmann 1886), pryžová pneumatika (Dunlop 1887), vačková hřídel (Crossley 1888), dvoudobý bezventilový motor (Day 1889), desmodromický ventilový rozvod (Daimler-Benz 1889), tryskový karburátor (Maybach 1891), cívkové zapalování (Bouton 1893), valivá ložiska do středů kol (Timken 1898), odpružená vidlice (Truffault 1898) nebo vidlicový dvouválcový motor (Princeps 1902). [3–5]

1.1 ROZDĚLENÍ VRATNÝCH ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ PODLE KONCEPCE

Z vratných pístových motorů s vnitřním spalováním jsou v současné době používány převážně čtyřdobé motory, ale výjimečně se stále objevují i motory dvoudobé.

Orientace motoru je odvozena od polohy klikové hřídele. Jestliže kliková hřídel vede rovnoběžně s přímým směrem jízdy (rovnoběžně s rámem), je motor podélně uložený. Je-li hřídel uložena kolmo k přímému směru jízdy, jedná se o příčně uložený motor. Mezi zřídka používané uložení patří například svislé uložení motoru. [6]

Dvoudobé motory vykonají pracovní cyklus (sání, komprese, expanze, výfuk) během jedné otáčky klikové hřídele. Jsou zde sdružené fáze sání s kompresí a expanze s výfukem. Nejjednodušší konstrukce využívá prostor nad pístem i pod pístem a hrana pístu ovládá kanály. Dále lze kanály ovládat pomocí šoupátek (válcové, kotoučové nebo ploché), jazýčkových ventilů nebo rozvodových ventilů. Často se pro dvoudobé motory používá přeplňování mechanicky poháněným dmychadlem. [6, 7]

Z důvodu využívání prostoru pod pístem není možné mazání mechanismu pomocí olejového oběhu, je tedy nutné mazat ztrátově. Dvoudobý motor má oproti čtyřdobému méně pohyblivých částí a jednodušší konstrukci (například hlava válců neobsahuje ventily). Oproti čtyřdobým motorům mají větší měrný výkon, nižší hmotnost, rychlejší reakce na změnu polohy škrťací klapky a plynulejší průběh točivého momentu. Nevýhodou ovšem je nižší termická účinnost, vyšší spotřeba paliva a oleje, což je v dnešní době zásadní problém z hlediska emisních norem (od roku 2020 musí nové motocykly splňovat emisní normu Euro 5). [6–8]

Písty dvoudobých motorů se zpravidla vyrábí ze slitin hliníku z důvodu úspory hmotnosti a vyšší tepelné kapacity. Plášť pístu je delší oproti čtyřdobým motorům z důvodu funkce ovládání kanálů. Z důvodu ztrátového mazání, které je nedostatečné pro kluzná ložiska, je třeba používat ložiska valivá. Valivé ložisko je velmi obtížně dělitelné, což neumožňuje použití děleného velkého oka ojnice. Z toho důvodu musí být kliková hřídel dělená (skládána). Kliková skříň je téměř bezvýhradně odlévána z hliníku ke snížení hmotnosti. Kliková skříň dvoudobých motorů má nejčastěji svislou dělicí rovinu. Hlava válců neobsahuje ventily, a tím je její konstrukce výrazně jednodušší. Spalovací prostor v hlavě má většinou hemisférický tvar s centrálně umístěnou svíčkou. V případě vzduchem chlazených motorů je hlava vybavena žebry pro lepší odvod tepla. [6, 7]

Čtyřdobé motory vykonají pracovní cyklus za dvě otáčky motoru. Směs paliva se vyskytuje pouze nad pístem, pod pístem koluje mazivo. Sání a výfuk jsou ovládány ventily, které mohou využívat ventilových pružin nebo vaček (desmodromický rozvod). Podle rozmístění a způsobu ovládání ventilů lze odlišit základní typy ventilových rozvodů SV, OHV a OHC a z nich další odvozené. Pro každý válec musí být minimálně dva ventily (sací a výfukový), běžně je k vidění dvouventilová nebo čtyřventilová technika. Chlazení čtyřdobých motorů lze provádět vzduchem, chladicí kapalinou nebo jejich kombinací. Mazání pohyblivých komponent zajišťuje mazací okruh, poháněný čerpadlem. Přímé mazání umožňuje použití kluzných ložisek, která vykazují nižší třecí ztráty. U zážehových motorů lze palivo připravovat pomocí karburátoru, vstřikováním do sacího potrubí (nepřímý vstřik) nebo přímo do válce (přímý vstřik). Čtyřdobé motory lze přeplňovat mechanicky poháněnými dmychadly i turbodmychadly, poháněnými výfukovými plyny. [6, 9]

Písty čtyřdobých motorů bývají zpravidla nižší než u motorů dvoudobých. Spalovací prostor je tvořen hlavou válce (nejčastěji střechovitou nebo hemisférickou) a dnem pístu. Písty bývají vyrobeny ze slitin hliníku, někdy s ocelovou nebo litinovou vložkou. U pístů je žádoucí nízká hmotnost ke snížení setrvačných sil. Kluzná ložiska a jejich snadná dělitelnost umožňují použití děleného velkého oka ojnice. Horní oko ojnice bývá nedělené a osazené kluzným ložiskem, které je mazáno pomocí kanálů v klikové hřídeli a ojnici nebo nástřikem oleje na dno pístu. Klikovou hřídel je snaha zachovat vcelku z důvodu jednoduššího vyvažování a snadnější montáže. Vyvážení může být buď silové nebo momentové, vývažky mohou být součástí hřídele nebo šroubově spojené. Skrze klikovou hřídel vedou kanály pro rozvod oleje k ložiskům. Pohon agregátů bývá u automobilních motorů na volném konci, u kompaktních motocyklových mezi válci. Kliková skříň nebo blok motoru bývají u motocyklových motorů vyrobeny z hliníku. Vložky válců mohou být litinové. Chlazení je zajištěno žebry ke zvětšení teplosměnné plochy (v případě vzduchem chlazených motorů) nebo kanály s chladicí kapalinou, vedoucí kolem válců a skrz hlavu válců. [6, 9]

1.1.1 DVOUDOBÉ MOTOCYKLOVÉ MOTORY

Vzhledem k jednoduché konstrukci, malému množství pohyblivých částí a snadné údržbě byla výroba těchto motorů levná a efektivní. Dvoudobé motory mají také výrazně nižší hmotnost a plynulejší chod oproti čtyřdobým, což umožňuje lepší manévrovatelnost motocyklu. Tyto skutečnosti zajistily v minulosti velkou oblibu dvoudobých jednoválcových motocyklových motorů, které byly vyráběny převážnou většinou světových výrobců. Do nedávna byly tyto motory doménou maloobjemových crossových motocyklů, například Yamaha YZ 250. [10–13]

Řadové dvoudobé dvouválcové motory byly v období od 50. do konce 80. let minulého století běžné pro silniční motocykly se zdvihovým objemem do 500 cm³. Oproti jednoválcovým motorům vykazovaly plynulejší chod a při srovnatelných rozměrech poskytovaly lepší výkonnostní parametry. Dvoudobé tříválcové motory byly doménou silničních motocyklů, např. Suzuki GT. Motory měly relativně dlouhou klikovou hřídel, což působilo její značné torzní namáhání. Čtyřválcový řadový dvoudobý motor se již nepoužíval u sériově vyráběných motocyklů z důvodu dlouhé klikové hřídele. [10–12, 14]

Vidlicové dvoudobé motory nebyly oproti řadovým tak rozšířené, a to z důvodu prostorové rozložitosti, složitějšího časování zapalování, většího množství dílů, a tím i nákladnější výroby. Oproti řadovým ale mohou mít výrazně kratší klikovou hřídel, což je výhodou z důvodu menšího namáhání, hlavně u víceválcových motorů. Dvoudobé dvouválcové vidlicové motory tzv. V-twin se objevily např. u motocyklů Aprilia RSV 250 nebo Yamaha YZR 250. V současné době takový motor vyrábí společnost Langen motorcycles pro model Langen Two Stroke, plní emisní normu euro 5. Vidlicový dvoudobý tříválec uvedla v 50. letech společnost DKW (*Obr. 3*), později také Honda s motorem V3. Vidlicový čtyřválcový dvoudobý motor se objevil např. u Hondy NSR 500 nebo Yamahy YZR 500. [8, 10–12, 15]



Obr. 3 DKW V3 [16]

Uspořádání s protilehlými válci „boxer“ je doménou převážně čtyřdobých motorů, nicméně vznikly i raritní dvoudobé, jako např. MZ BK 350, Mavisa Sport 250 nebo Velocette Viceroy. Se zavedením emisní normy Euro 5 dvoudobé motory pro silniční provoz na evropském trhu téměř vymizely. [10–12, 15]

1.1.2 ČTYŘDOBÉ MOTOCYKLOVÉ MOTORY

Jednoválcové čtyřtaktní motory jsou běžné pro maloobjemové motocykly, díky malému množství dílů, jednoduché konstrukci, a tím i nízké ceně, se ovšem vyskytují i u motocyklů s větším zdvihovým objemem (Suzuki DR 800 Big, KTM 690 Duke nebo BMW F 650 GS). Nevýhodou těchto motorů je neklidný chod způsobený zapalovací frekvencí. [10–12, 15]

Řadové dvouválcové motory (tzv. parallel twin) jsou v současné době velice rozšířené u různých typů motocyklů pro jejich relativně malou hmotnost, malé množství dílů, vyšší výkon oproti jednoválcovým a plynulejšímu chodu. Objevily se např. u Hondy CMX Rebel nebo Hondy Silver Wing. [10–12, 15]

Řadové tříválcové motory mají velké množství dílů, složitější konstrukci a omezené pásmo maximálního výkonu. Použity byly např. u motocyklů Triumph Speed Triple, Yamaha MT-09 nebo BMW K 75. [10–12, 15]

Řadový čtyřválcový čtyřdobý motor je nejrozšířenějším typem motocyklových motorů v dnešní době z důvodu jednoduché konstrukce a širokého pásma vysokého výkonu, použitý např. pro BMW S 1000 RR nebo Suzuki GSX 1300 R Hayabusa. [10–12, 15]

Řadový pětiválcový čtyřdobý motor se vlivem složité konstrukce a dlouhé klikové hřídele objevil pouze u závodních speciálů Honda RC 148 a Honda RC 149. [10–12, 15]

Řadové šestiválcové motocyklové motory se objevovaly zřídka, vzhledem k dlouhé klikové hřídeli a velkým točivým momentům. Byly použity např. u Kawasaki Z1300, Benelli 750 Sei nebo u BMW K1600. Řadové osmi a víceválcové motory se do motorek nedávaly kvůli zástavbové délce, kroucení klikové hřídele nebo problematickému mazání. [10–12, 15]

Vidlicový dvouválcový motor „V-twin“ má v případě podélného uložení motoru (např. Moto Guzzi) oba válce stejně chlazené. Příčně uložený V-twin je zástavbou menší a umožňuje použití společného karburátoru. Použití je velice univerzální od chopperů a cruiserů až po sportovní stroje, jako je Ducati Monster 696 nebo KTM Super Duke R. [10–12, 15]

Vidlicové čtyřválcové se často objevují u sportovních nebo cestovních strojů pro svou kompaktní zástavbu, nízkou hmotnost a vyváženost chodu, např. u Yamahy V-Max, Hondy VF 1000 R nebo Suzukí SV 1000. [10–12, 15]

Vidlicový šestiválec se pro svou velikost použil u jediného sériově vyráběného motocyklu Honda NR750. Motocyklový vidlicový osmiválec se poprvé objevil roku 1906 v motocyklu Curtiss V-8, později např. u Moto Guzzi V8 nebo PGM V8 nebo Eisenberg EV8. Osmiválcové motory pro vysoké výkonnostní parametry a obtížnou zástavbu již nemají pro motocykly praktické využití. [10–12, 15]

Dvouválcové boxery byly zpočátku příčně uloženy, např. Douglas N3 nebo Harley Davidson W „sport twin“. Později byly z důvodu lepšího chlazení ukládány podélně, např. BMW nineT, BMW R 32 nebo Ural. [10–12, 15]

Motory Boxer se čtyřmi nebo šesti válci se objevily jen v málo případech z důvodu vyššího počtu dílů, než u řadových a vidlicových motorů, jejich vyšší hmotnost a obtížnou zástavbu. Použity byly např. u motocyklu Zündapp K800, později u motocyklů Honda Goldwing, kde existoval jak v čtyřválcovém, tak v šestiválcovém provedení. [10–12, 15]

1.1.3 MOTORY S ALTERNATIVNÍM USPOŘÁDÁNÍM VÁLCŮ

Motory koncepce VR jsou kombinací řadového a vidlicového motoru, kdy úhel rozevření válců je menší než u vidlicových a válce jsou vůči sobě posunuté, což radikálně snižuje rozměry motoru. Tyto motory mají společnou hlavu pro všechny válce, kde jsou nevýhodou rozdílné délky sacích a výfukových kanálů jednotlivých válců. Jediný sériově vyráběný motocykl s uspořádáním válců VR6 je Horex VR6. [17]

Hvězdicové Radiální motory se objevily i u řady motocyklů, převážně příčně uložené, například pětiválcový Verdel (1912). Historicky vznikl i motocykl Megola s radiálním pětiválcovým motorem, který byl součástí předního kola. [18, 19]

Mezi další používaná uspořádání čtyřválcového motoru patří uspořádání „do U“ nebo též „do čtverce“, kdy jsou sdružené dvě příčně uložené dvouválcové jednotky se společnou hlavou, např. Ariel Square Four 1930 nebo dvoudobé Suzuki RG 500 Gamma. Alternativní uspořádání čtyřválcového motoru je „do H“, kdy podélně uložený motor se skládal ze dvou dvojic horizontálních protilehlých válců na dvou samostatných klikových hřídelích, použité u motocyklu The Brough Superior Golden Dream. [20–23]

Další koncepcí je W3, která vychází z klasické konstrukce V-twin přidáním jednoho válce s použitím hlavní a dvou vedlejších ojníc, např. Feuling W3 nebo Anzani 1907, popřípadě s použitím klikové hřídele s dvěma zalomeními (koncept od BMW - Obr. 4). [24–26]



Obr. 4 Koncept BMW W3 [24]

1.1.4 ALTERNATIVNÍ SPALOVACÍ MOTORY

Rotační motory zdánlivě představují ideální řešení motocyklových motorů, z důvodu nízké hmotnosti, vysokého měrného výkonu a absence recipročních členů, a tím i výrazných vibrací motoru. Zásadní nevýhodou je ale obtížné utěsnění částí motoru, tepelné namáhání, drnčení nebo vysoké emise. V historii byl rotační motor poprvé použit v roce 1962 v motocyklu MZ BK 350. Sériově se objevil poprvé u motocyklu Hercules W2000 v roce 1974 (Obr. 5), později v motocyklu Suzuki RE 5. [27, 28]



Obr. 5 Hercules W2000 [29]

Vzhledem k vyššímu točivému momentu a nižší spotřebě oproti zážehovým motorům byla zvažována varianta použití vznětového motoru k pohonu motocyklu, Nevýhodou se ale ukázala vyšší hmotnost a náklady na výrobu. Mezi motocykly s vznětovým motorem patří například enduro Track T-800CDi nebo Kawasaki KLR 650 Diesel s motorem HDT M1030M1, kterou bylo možné provozovat kromě nafty i na kerosin. Jediné sériově vyráběné vznětové motocykly byly Royal Enfield Bullet pro indický trh (Obr. 6). [27, 30]



Obr. 6 Royal Enfield Bullet [31]

Od roku 2000 vyrábí společnost Marine Turbine Technologies motocykl MTT Y2K Turbine Motorcycle, který je poháněn Tryskovým motorem Rolls-Royce 250-C18 nebo 250-C20B. Tyto motocykly mají veškeré homologace, potřebné k provozu na silnici, ale kvůli vysoké prodejní ceně se nevyrábí velkosériově. [27, 32]

1.2 ROZDĚLENÍ PODLE ZPŮSOBU CHLAZENÍ MOTORU

Spalovací motory ideálně pracují většinou jen v relativně úzkém pásmu teplot. Důvodem je tepelná roztažnost dílů, degradace oleje nebo dřívější vznícení palivové směsi a snížení termické účinnosti. Používají se proto více či méně sofistikované způsoby regulace teploty, převážně chlazení motoru. [33]

Nejjednodušším způsobem je přímé chlazení vzduchem, kdy proud vzduchu odebírá teplo exponovaným částem motoru. Je přitom žádoucí, aby teplosměnná plocha motoru byla co možná největší v místech, náchylných k přehřátí, proto jsou válce, hlavy válců, popřípadě další části motorů žebrovány. Výhodou vzduchem chlazených motorů je nižší hmotnost vlivem menšího množství dílů, které jsou náchylné na poškození. [33–35]

Vysoce výkonné vzduchem chlazené motory se mohou v průběhu chodu v některých částech (v hlavě válců) přehřívat. Je tedy možné využívat tepelně vodivostních vlastností oleje, který je kanály přiváděn do exponovaných míst. Kombinace chlazení olejem a vzduchem znamená jednoduchost konstrukce vzduchem chlazených motorů a je v současné době zcela běžná například u motorů Harley Davidson. [36]

Se zvyšujícím se měrným výkonem motorů je potřeba účinnějšího a rovnoměrnějšího chlazení exponovaných částí motoru k zajištění životnosti dílů (mosty mezi ventily), stabilního chodu nebo snížení emisí a spotřeby motoru. Proto se využívá nepřímého chlazení motoru, kdy chladicí kapalina proudí kanály termicky exponovanými součástmi a odebírá jim teplo. Nevýhodou kapalinového chlazení je větší množství dílů, náchylných na poškození, nutná údržba a navýšení hmotnosti. [33, 35, 36]

1.3 ROZDĚLENÍ PODLE PŘÍPRAVY PALIVA

K ideálnímu chodu zážehového motoru je potřeba zajistit směs paliva se vzduchem v optimálním poměru. Zážehové motory mohou pracovat se stechiometrickou směsí, případně s mírně bohatou směsí pro vysoké výkony nebo s chudou směsí pro nižší spotřebu paliva.

Příprava paliva může probíhat mimo válec motorů (tzv. vnější příprava) nebo uvnitř válce (vnitřní příprava paliva).

Historicky nejstarším způsobem přípravy paliva pro zážehové motory je pomocí karburátoru. Jedná se o vnější přípravu paliva, kde vzniká homogenní směs paliva se vzduchem. Tryskový karburátor využívá dynamiku plynu (podtlak) k nasávání paliva z trysky v difuzoru, které se rozptýlí v proudu vzduchu. Množství paliva je řízeno podtlakem v difuzoru, tedy množstvím protékajícího vzduchu. Bohatost je potřeba kompenzovat buď pomocí dvou trysek nebo vzdušníkem k brzdění průtoku paliva. Karburátory využívají také pomocná zařízení pro optimalizaci chodu motoru za všech okolností (sytič, volnoběžný kanál, akcelerační pumpičku a jiné). Karburátory byly velice běžné pro motocyklové motory a používaly do doby, než byly kvůli spotřebě paliva a emisím nahrazeny vstřikovači. [37, 38]

Pro zážehové motory lze připravovat směs také pomocí elektromagnetických vstřikovačů. Ty mohou být umístěných v sacím potrubí, kdy se jedná o tzv. nepřímý vstřik. Dávkování paliva může být určeno tlakovým senzorem v sacím potrubí, mechanickou klapkou, váhou vzduchu, aj., množství směsi bylo určeno dobou otevření ventilu. Vstřikovače jsou řízeny řídicí jednotkou, která na základě zpětné vazby z lambda sondy upravuje množství vstřikovaného paliva. Systém nepřímého vstřikování se poprvé objevil u motocyklu Kawasaki KZ 1000 G v roce 1980, v současné době je doménou převážné většiny motocyklových motorů. [39–41]

Zážehový motor s přímým vstřikem přináší nižší emise a nižší spotřebu u studeného motoru nebo během provozu vlivem možného vrstvení směsi. Naopak nevýhodou je nedostatek prostoru pro vstřikovač v hlavě válce při použití čtyřventilové techniky, potřeba vyšších tlaků vstřikování, a tím i pevnějších a dražších komponent a vyšší hmotnosti. V případě vysokootáčkových motorů se objevuje problém s limitovaným množstvím vstřikovaného paliva během sacího a kompresního cyklu. Dalším problémem motorů s přímým vstřikováním je tvorba vrstvy sazí na sacích ventilech, kterými neprochází palivo. U motocyklů se objevilo přímé vstřikování u dvoudobých skútrů, u dvoudobého motocyklu Bimota V-Due a u čtyřdobého motocyklu Motus MST. [42–45]

1.4 ŘÍDICÍ JEDNOTKY

Řídicí jednotka (též ECU) je mikropočítač, který obsahuje mikroprocesor, paměť, vstupní a výstupní porty. Průběžně přijímá signály o aktuálních parametrech vozidla a ovládacích prvcích vozidla ze sensorů a porovnává je s daty, uloženými v paměti. Na základě rozdílů mezi hodnotami vyhodnocuje a reguluje řídicí veličiny akčních členů. Běžně bývá využívána uzavřená smyčka se zpětnou vazbou, na základě které je možné zavádět korekce jednotlivých úkonů. V dnešní době bývá ve vozidlech více než jedna řídicí jednotka, přičemž jedna je hlavní a každá další má na starosti specifickou oblast řízení vozidla, například převodovku, otáčky kol, senzory osvětlení a deště a mnoho dalších. Tyto jednotky mezi sebou komunikují po palubní síti, většinou CAN-BUS, ale také LIN, MOST, FlexRay nebo Ethernet. [46, 47]

Mezi základní vstupní veličiny u současných motorů patří otáčky klikové hřídele, otáčky vačkových hřídelí, hmotnost nasávaného vzduchu, poloha škrticí klapky (popřípadě ovládání akcelerace), složení výfukových plynů (lambda sonda), tlak oleje, teplota chladicí kapaliny nebo oleje. Mezi další vstupní veličiny podle výbavy a koncepce vozidla patří například plnicí tlak vzduchu, teplota nasávaného vzduchu, teplota výfukových plynů, hladina paliva a mnohé další. [46, 47]

Řídicí jednotka přijímá analogický signál ze snímačů, umístěných na motoru, převodovce a dalších částech vozidla. Analogický signál je pomocí filtrů upravován a následně převáděn na diskrétní signál, který je dále vyhodnocován. Na základě informací o stavu ovládacích prvků a aktuálního chodu motoru, jsou řízeny dílčí operace pro optimální chod vozidla v požadovaném režimu. Řídicí jednotka vyhodnocuje na základě zpracovaných vstupních signálů ideální chování akčních členů. Mezi základní akční členy patří řízení tlaku palivového čerpadla, řízení časování a délky vstřiku paliva, předstih zážehu, natočení škrticí klapky nebo ovládání časování vaček. [46, 47]

Řídicí jednotky každého výrobce (někdy i každého modelu) mají svůj vlastní software, který je navržen speciálně pro dané vozidlo tak, aby byl schopen pracovat se všemi osazenými senzory. Software zajišťuje jednotlivé vitální funkce vozidla, jako je vstřikování, časování zapalování, regulace volnoběhu, diagnostika nebo ochrana proti krádeži (imobilizér). Software pracuje se soubory dat pro všechny předvídatelné situace a předlohové hodnoty, od nichž se následně odvíjí řízení vozidla. Software je průběžně možno přehrát nebo aktualizovat. Existují i programovatelné jednotky, které jsou univerzální a je možno do nich nahrát software řízení téměř libovolného vozidla. [46, 47]

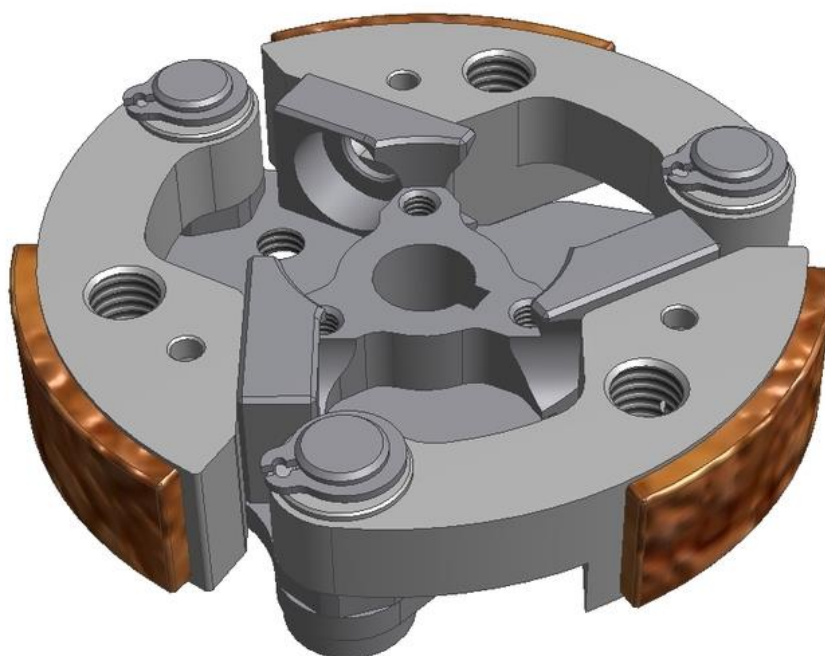
1.5 PŘEVODOVKY A PŘENOS SÍLY

Motocykly používají mezi motorem a převodovkou rozjezdovou spojku ke snadnější ovladatelnosti motocyklu. Suché kotoučové spojky se používají zřídka, vzhledem k rozdílnému uspořádání motoru oproti automobilovým, kdy setrvačnick není samostatný, ale je zde využíván rotor alternátoru. Nejčastější konstrukcí motocyklových rozjezdových spojek jsou „mokré“ lamelové spojky, které využívají větší množství třecích párů kotoučů, pracujících v oleji nebo olejové mlze, čímž se významně snižuje teplota, a tím rychlost jejich

opotřebení. Ovládání spojky je realizováno pomocí přítlačného kotouče a několika vinutých pružin, případně membránovou pružinou. Tyto spojky mohou být ovládány řidičem nebo řídicí jednotkou pomocí elektromagnetu. [48]

Existují také bezobslužné automatické spojky, jako je odstředivá rozjezdová spojka (*Obr. 7*) tvořena vnitřním třecím obložením, spojkovými čelistmi a vratnými pružinami. Zvýšení otáček motoru působí dostředivým zrychlením na spojkové čelisti, které jsou přitlačeny k vnějšímu spojkovému kotouči, kde se realizuje přenos sil. Při poklesu otáček se sníží přítlačná síla a vratné pružiny oddalují spojkové čelisti od obložení kotouče a přeruší se přenos sil. Tento typ spojek je používán u malých motocyklů, skútrů, některých offroadových strojů a motocyklů, určených pro začínající jezdce, např. Honda Super Club, Suzuki DR-Z125, Kawasaki KLX110, Piaggio Vespa. [49]

Další možností přenosu a regulace točivého momentu je hydrodynamický měnič (též hydroměnič), jehož čerpadlo, poháněné od spalovacího motoru, dodává energii hydraulické kapalině, která tuto energii dále předává turbíně, napojené na vstup převodovky. Kapalina, proudící od turbíny, vede na stator, který přeměrovává tok kapaliny, čímž zvyšuje výsledný točivý moment hydrodynamického měniče. Toto zařízení umožňuje přenos točivého momentu bez nutnosti mechanické vazby, a tím mimo jiné tlumí rázy od spalovacího motoru. Hydromechanické spojky ani hydrodynamické měniče nejsou u motocyklů, vlivem své velikosti a hmotnosti, běžné. Hydrodynamický měnič byl použit u motocyklů se systémem Hondamatic. [50, 51]



Obr. 7 Odstředivá spojka [52]

Manuální motocyklové převodovky (*Obr. 8*) bývají sekvenční dvouhřídelové nebo tříhřídelové a jsou součástí klikové skříně. Ovládání je realizováno ráčnovým mechanismem, který otáčí labyrintovým bubnem. Ten v každé poloze posouvá pomocí vidliček zubové

spojky nebo ozubená kola. Ozubená kola motocyklových převodovek mívají přímé evolventní ozubení. [53]

Poloautomatické převodovky se objevují většinou v podobě manuální převodovky s odstředivou spojkou, kdy řazení bylo řízeno uživatelsky. Poloautomatickou převodovku pro motocykly představoval například systém Hondamatic, což byla dvoustupňová převodovka s dvěma hydroměniči a ovládním řidičem. U současných sportovních strojů je převodovka ovládána elektronicky z řídicí jednotky, ale volba rychlostních stupňů je uživatelská. [54]

Variátory jsou typem bezstupňové automatické převodovky, používané převážně u skútrů, které umožňují plynulou změnu převodového poměru. Jedná se o dvojici kuželových řemenic (s variabilním průměrem), kdy jedna je spojena s motorem a druhá s hnacím kolem. Mezi nimi se pohybuje pružný řemen, který svým posuvem po kuželových částech mění převodový poměr. Oproti automatickým převodovkám jsou variátory jednodušší, levnější a umožňují plynulejší jízdu. [55, 56]



Obr. 8 Manuální motocyklová převodovka [57]

Automatické motocyklové převodovky mohou být kromě variátorů také DCT, což jsou dvouspojkové převodovky s dvěma výstupními hřídelemi, kdy na jednom je zařazena rychlost a na druhém je předřazena následující rychlost podle předpokládaného stylu jízdy. Dvouspojková převodovka se rozšiřuje zejména na americkém trhu, ale je k dispozici jako volitelná výbava i u některých motocyklů na evropském trhu. [58]

Přenos síly z výstupní hřídele převodovky na zadní kolo motocyklu bývá realizován řetězem, řemenem nebo kardanem. Nejrozšířenějším řešením je přenos sil pomocí řetězu, vzhledem k malým ztrátám oproti řemenům, jednoduchosti montáže a funkčnosti za všech teplotních

i vlhkostních podmínkách. Nevýhodou je nutná častá údržba řetězu a požadavek na vystředění rozet k minimalizaci třecích ztrát. Pohon řemenem funguje na podobném principu jako řetězový, ale využívá místo rozet ozubené řemenice. Řemeny mají dlouhou životnost, nízkou hlučnost, nízkou hmotnost a nevyžadují údržbu, ale vykazují vyšší třecí ztráty. Kardan spojuje výstupní hřídel převodovky s koncovým kuželovým převodem. Pohon kardanem je bezúdržbový a málo poruchový, ale vykazuje vysoké ztráty převodem, vysokou hmotnost a vysokou cenu. [59, 60]

Mezi další prvky hnacího ústrojí motocyklu mohou patřit volnoběžky, které pomocí valivých elementů, uložených na pružinách, přenáší točivý moment jedním směrem a prokluzují při opačném smyslu otáčení. Používají se nejčastěji u startérů, kde dochází k přenosu silových účinků od startéru pouze tehdy, pokud je obvodová rychlost startéru vyšší, než obvodová rychlost ozubeného kola, spojeného s klikovou hřídelí. [61]

2 ELEKTROMOTORY

Existuje řada různých konstrukcí elektromotorů, které mají základní společné znaky. Skládají se ze statoru a rotoru, které bývají nejčastěji formou vinutí (cívek), uložených v paketu ze vzájemně odizolovaných plechů nebo formou věnce z permanentních magnetů. Některé elektromotory mohou také v závislosti na aktuálních parametrech fungovat jako generátor.

Elektromotory se již řadu let využívají pro pohon ve výrobních strojích, náradí i dopravních prostředcích. V posledních letech se elektromotory rozšiřují i do sériově vyráběných automobilů, motocyklů a dalších dopravních prostředků. Jedná se o elektronické ovládání akčních členů a částí vozidel, pomocné agregáty nebo hlavní pohonné jednotky. Vzhledem k malému množství dílů, jednoduchosti konstrukce, nízké hmotnosti a velkému rozsahu výkonnostních parametrů je použití elektromotor/generátorů možné i v prostorově náročnějších řešeních. Při velkém dodávaném výkonu vzniká ztrátové teplo, které je potřeba aktivně odvádět z elektromotoru k zajištění bezproblémového chodu, což může být řešeno chladicím okruhem nebo zvětšením teplosměnné plochy a chlazení vzduchem.

První průceschopný elektromotor sestrojil Thomas Davenport roku 1834. Jako zdroj energie uvedl Gaston Planté roku 1859 olovený akumulátor. Méně toxická alternativa oloveného akumulátoru Nikl-kadmiová baterie byla poprvé použita roku 1889. Dalším alternativním zdrojem energie jsou palivové články (Fuel Cells), které si roku 1967 nechal patentovat Karl Kodesch. V dnešních elektropohonech nejpoužívanější zdroj energie Li-ion baterie se objevily v 90. letech 20. století. [62–65]

2.1 TYPY ELEKTROMOTORŮ

Elektromotory, používané ve vozidlech, je možno rozdělit podle mnoha kritérií, jako např. podle způsobu chlazení, podle výkonu, podle charakteristického použití, podle principu funkce nebo podle dodávané energie. Podle posledního jmenovaného kritéria lze rozdělit elektromotory na stejnosměrné a střídavé, kdy v rámci obou skupin existuje celá řada typů, lišících se principem funkce.

Stejnoseměrné motory jsou nejjednodušší a nejstarší konstrukcí elektromotoru. Vyznačují se vysokým měrným výkonem vzhledem k hmotnosti, možnou krátkodobou přetížitelností. Mezi základní typy patří komutátorové (kartáčové) DC motory a bezkartáčové BLDC motory, nejčastěji s permanentními magnety. [66, 69]

Střídavé motory využívají napětí se sinusovým průběhem, které sekvenčně napájí jednotlivá vinutí elektromotoru. Základními typy jsou bezkartáčové synchronní střídavé motory s permanentními magnety BLAC a asynchronní střídavé motory, které mohou být jednofázové nebo třífázové. [74, 77]

Dále lze rozdělit elektromotory podle konstrukce rotoru na motory s rotorovým vinutím (indukční) a na motory s permanentními magnety (PMSM), což jsou např. motory BLDC a BLAC. [69, 74]

2.1.1 KARTÁČOVÉ STEJNOSMĚRNÉ MOTORY

Stator kartáčového stejnosměrného motoru je tvořen litým nebo svařovaným magnetovým věncem s budíciemi póly a budícím vinutím. Magnetické pole je tvořeno dvěma nebo více magnety podle počtu pólů. Pro propojení statoru stačí 2 vodiče. Kotva je složena ze vzájemně izolovaných elektrotechnických drážkovaných plechů, ve kterých je uloženo stejnosměrné vinutí. Konce vinutí jsou vyvedeny na komutátor, který je tvořen soustavou vzájemně izolovaných měděných lamel. Sběrné ústrojí je tvořeno uhlíkovými kartáči, které dosedají na komutátor, čímž je přiváděn proud k rotorovému vinutí. Točivý moment vzniká silovým působením mezi magnetickým polem statoru a indukovaným magnetickým polem rotoru. Při zatížení se rotor zpožďuje oproti točivému poli statoru a tím narůstá točivý moment. Kartáčové motory se z důvodu opotřebování kartáčů používají zřídka. U starších nízkonákladových elektromobilů jako Zap Xebra a elektrických motocyklů jako Zero XU se kartáčové motory používaly, v dnešní době byly nahrazeny bezkartáčovými. [66–68]

2.1.2 BLDC MOTORY

BLDC motory se skládají z třífázového vinutí statoru a permanentních magnetů rotoru. Na stator jsou přiváděny vždy pouze dvě fáze, v závislosti na natočení rotoru. BLDC motory pracují pouze se synchronními otáčkami, tj. otáčky rotoru jsou shodné s otáčkami magnetického pole statoru. Regulátor je použit místo komutátoru a přetváří indukované napětí do lichoběžníkového průběhu, při sečtení dílčích indukovaných napětí vzniká hladká konstantní hodnota stejnosměrného napětí. BLDC motory se používají u elektrovozidel s nižšími hmotnostmi, jako jsou elektro skútry nebo některé elektromotocykly, jako KTM Freeride E-XC. [69, 70]

U BLDC motorů, stejně jako u klasických kartáčových motorů je regulace jednoduchá, protože proud je přímo úměrný generovanému točivému momentu a indukované napětí je přímo úměrné otáčkám rotoru. Ve vozidlech se používá řízení pomocí šířkové pulzní modulace (*Obr. 10*, popsáno dále). [69, 71]

2.1.3 OSTATNÍ DRUHY STEJNOSMĚRNÝCH ELEKTROMOTORŮ

Krokové motory jsou dalším typem synchronních motorů, používané k přesnému řízení polohy. Krokové motory využívají dvě fáze vinutí statoru a rotor s permanentními magnety. Změna natočení rotoru je prováděna v krocích, kdy se přepínají vinutí, čímž se natáčí rotor. Krokové motory se nepoužívají jako pohonné jednotky v elektromobilitě kvůli nedostatku výkonu. [72]

Reluktanční motory mají třífázové statorové vinutí a rotor tvořený magnetickým materiálem s rozdílnou směrovou magnetickou reluktancí, což chováním připomíná permanentní magnety. Na rotor jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu materiálu a přesnost výroby, z toho důvodu nejsou reluktanční rozšířené. [73]

2.1.4 BLAC MOTORY

Konstrukčně podobné motorům BLDC jsou motory BLAC, což jsou synchronní motory s permanentními magnety, které mají sinusový průběh indukovaného napětí na všech třech fázích, ty se po sečtení vzájemně nulují. Proudů statoru tvoří točivé magnetické pole, působící na permanentní magnety rotoru, čímž vzniká točivý moment. Amplituda indukovaného napětí a frekvence odpovídají otáčkám motoru. Točivý moment není úměrný proudu. Bezkartáčové motory (BLDC i BLAC) jsou obvykle napájeny pomocí třífázového můstku, jehož tranzistory jsou spínány řídicím obvodem. Změna rychlosti motoru může být řešena buď změnou napětí stejnosměrného meziobvodu, anebo pomocí PWM (pulsní šířkové modulace). BLAC motory se v současnosti používají jako pohonné agregáty v hybridních vozidlech, elektromobilech (Nissan Leaf) nebo u převážné většiny elektro motocyklů (Lito Sora). [74–76]

2.1.5 ASYNCHRONNÍ MOTORY

Otáčky rotoru asynchronního stroje jsou různé oproti otáčkám magnetického pole statoru. Tok energie mezi státorem probíhá výhradně elektromagnetickou indukci. Stator je složen z třífázového vinutí, uloženého ve statorovém paketu, rotor bývá kroužkový nebo kotva nakrátko. Třífázové vinutí statoru je vzájemně prostorově posunuté o 120° a vytváří tak točivé magnetické pole, které indukuje napětí ve vinutí rotoru. Otáčky rotoru jsou shodné s otáčkami magnetického pole (synchronní) nebo nižší o hodnotu skluzu, přičemž u synchronních otáček se v rotoru neindukuje napětí a nevzniká točivý moment a při zvětšujícím se skluzu roste točivý moment. Motor je krátkodobě přetížitelný, a to 1,6 až 2,5krát. Otáčky motoru lze měnit buď skokově pomocí změny počtu pólů, plynule změnou skluzu pro motory s kroužkovou kotvou, ale nejefektivnější způsob plynulého řízení otáček motoru je změnou frekvence napájecího napětí. Jednofázové asynchronní motory dosahují malých maximálních výkonů v poměru k jejich hmotnosti. Otáčky motoru lze plynule regulovat frekvenčním měničem. Tento pohon je kvůli vysoké hmotnosti, nízké účinnosti a nízkému měrnému výkonu pro elektromobilitu zcela nevhodný. [77]

Výhodou je jednoduchá konstrukce, nenáročnost na obsluhu a údržbu, spolehlivost, nízká cena. Jedná se o nejrozšířenější a nejpoužívanější typ elektromotoru. U automobilů jsou používány kvůli možnosti volného pohybu bez indukovaní proudu. V elektromobilitě se vyskytují např. u automobilů Tesla Model S nebo Model X. Pro motocykly se nepoužívají kvůli vyšší hmotnosti, menší účinnosti a pomalejší odezvě oproti synchronním elektromotorům. [78]

2.2 PŘÍSLUŠENSTVÍ

Elektromotory potřebují pro svůj chod také další zařízení, jako jsou zdroj energie, řídicí struktura nebo bezpečnostní systém proti překročení dovolených parametrů, které by vedlo k poškození motoru a připojených zařízení.

2.2.1 BATERIE

Mezi hlavní příslušenství elektropohonů patří zdroj energie, obecně označovaný jako systém akumulace elektrické energie, složený z jednoho či více článků, popřípadě bezpečnostního obvodu.

Mezi nejběžnější typy článků patří olovené akumulátory, které mají elektrody na bázi olova a elektrolyt na bázi kyseliny sírové. Každý z článků má jmenovité napětí 2,1 V, nejčastěji jsou uspořádány do série po šesti člancích (12,6 V), přičemž není potřeba použít bezpečnostní obvod. Vzhledem k tomu, že výroba těchto článků je relativně jednoduchá a levná a životnost se pohybuje ve stovkách cyklů, jsou tyto akumulátory velice rozšířené. Nevýhodou je nízká měrná energie vzhledem k hmotnosti a zdravotní riziko při poruše akumulátoru. [79]

Alternativu olovených akumulátorů představují akumulátory na bázi niklu, které jsou značně ekologičtější a poskytují vyšší energetickou hustotu. Na druhou stranu jsou náchylné na samovybíjení, mají vysokou hmotnost a nižší účinnost oproti oloveným akumulátorům. Nejčastěji se používaly Nikl-kadmiové (Ni-Cd) články, které se ale vlivem toxicity kadmia již přestaly používat, a dále Nikl-Metal hydridové (NiMH) akumulátory, které mají vyšší energetickou hustotu a netoxické materiály. [79, 80]

Lithium-iontové (Li-ion) akumulátory patří mezi další běžně používané zdroje, které neobsahují jedovaté kovy. Náklady na výrobu lithiových článků jsou násobně vyšší, což je vyváжено výrazně vyšší životností, vyšší měrnou energií a měrným výkonem, vysokou účinností a nízkou hmotností. Pro lithiové články je třeba použít bezpečnostní obvod jako ochranu před přebíjením. [79, 81]

Akumulátory na bázi sodík-nikl-chlór jsou alternativou lithiových baterií. Nejsou závislé na zásobách lithia a poskytují relativně srovnatelné parametry. Jejich nevýhodou jsou vysoké provozní teploty a vysoké tepelné ztráty, naopak jejich benefitem je odolnost proti přebíjení a mechanická odolnost. [82]

Mezi další alternativní akumulátory patří Metal-air baterie, alkalické baterie nebo sodík-sírové.

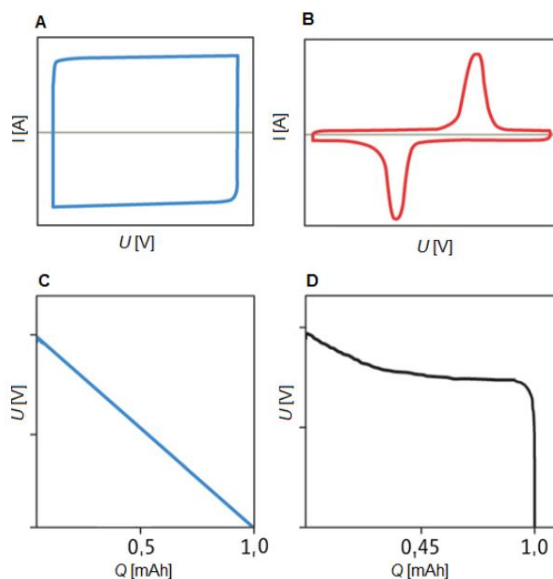
Články akumulátoru lze spojovat podle požadovaných parametrů sériově a paralelně kdy při sériovém zapojení přímo úměrně narůstá napětí, při paralelním zapojení narůstá proud a kapacita paketu.

2.2.2 SUPERKONDENZÁTORY

Možností akumulace elektrické energie jsou také superkondenzátory. Jsou schopny velice rychle přijímat a odevzdávat energii, poskytují vysokou kapacitu, nízký vnitřní odpor a řádově vyšší nabíjecí a vybíjecí proudy bez přehřívání. Superkapacity zvládají bezproblémově fungovat i za nízkých teplot, oproti akumulátorům vykazují vyšší životnosti a kratší dobu nabíjení. Nejedná se ovšem o alternativní řešení k lithiovým článkům. Vzhledem k průběhu závislosti napětí na kapacitě (*Obr. 9*), kvůli kterému nejsou superkondenzátory vhodné jako primární zdroj energie pro elektrická vozidla, ale mohou být

použity k pokrytí krátkodobých přetížení elektromotorů, tzv. peaků. Oproti bateriím nejsou vyráběny z toxických nebo obtížně zlikvidovatelných materiálů a namísto přeměny elektrické energie na chemickou ukládají energii oddělením nábojů. Toho je docíleno pomocí dvou elektrod, které jsou vyrobeny z materiálů s velkým povrchem, jako např. grafen nebo jiné materiály na bázi uhlíku, které jsou odděleny elektrolytem. S rostoucím povrchem elektrod se zvyšuje kapacita kondenzátoru. [83, 84]

Superkapacitory mají velký potenciál pro hybridní vozidla a elektromobily, kde mohou při vhodné kombinaci s bateriemi pokrývat výkonové špičky elektromotoru při menším navýšení hmotnosti, oproti použití pouze baterií. [83, 84]



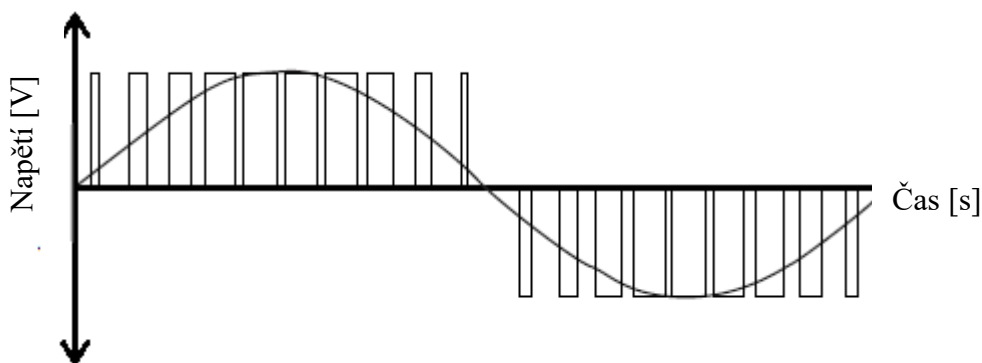
Obr. 9 Vybíjecí charakteristika superkapacitoru (A,C) a lithiové baterie (B,D) [85]

2.2.3 BALANČNÍ OBVODY

Vlivem relativně nepatrných rozdílů kapacity jednotlivých (lithiových) článků dochází k nerovnoměrnému nabíjení a vybíjení článků. Články s nižší kapacitou se nabijí rychleji, tudíž by navenek působil celý paket článků jako plně nabitý, přestože některé články jsou nabité jen částečně. Analogicky to platí i u vybíjení, kdy se některý z článků vybije dříve, a tím by působil celý paket jako vybitý. Tyto články se rychle opotřebovávají, a tím se zvětšují rozdíly kapacity od ostatních článků paketu. Proto se při použití lithiových článků používají bezpečnostní obvody, které chrání články před přebitím, případně úplným vybitím, a tím zabraňují jejich poškození. Tyto obvody sledují každý z článků nezávisle a udržují napětí a stupeň nabití konstantní v celém paketu. Regulace těchto veličin je možná ztrátově pomocí rezistorů nebo bezeztrátově pomocí stejnosměrných měničů, kdy nabitý článek dodává přebytečnou energii ostatním článkům. V elektromobilitě je vhodnější regulace pomocí měničů kvůli úspoře energie a prodloužení životnosti baterií, a to navzdory vyšší ceně. [86, 87]

2.2.4 KONTROLÉR

Pro sofistikované řízení elektromotoru je nutné použití kontroléru, který reguluje otáčky, točivý moment a smysl otáčení elektromotoru. Kontrolér přijímá signály od senzorů a vyhodnocuje z nich aktuální stav motoru a dále přijímá signál z řídicí jednotky nebo řídicí struktury, týkající se aktuálně požadovaných parametrů. Na základě těchto informací upravuje napětí a proud, dodávaný k elektromotoru tak, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů. Pro každý elektromotor je vhodný jiný způsob řízení, např. pro chod elektromotorů typu BLDC, BLAC nebo asynchronních motorů je nutné dodávání nekonstantního napětí. V případě asynchronních motorů a BLAC motorů je vyžadováno sinusové třífázové napětí, u BLDC motorů je žádoucí lichoběžníkový průběh třífázového napětí, přičemž Nenulové napětí je vždy jen na dvou fázích. Pro vytvoření lichoběžníkového průběhu napětí bývá použita metoda PWM (šířková pulzní modulace), kde se aktuální hodnoty a tvaru napětí docílí dvouúrovňovými změnami napětí a úpravou jejich délky trvání při zachování konstantní frekvence. Z výsledného poměru napětí vůči maximálnímu napětí vzniká amplituda. Pro sinusový průběh se používají třífázové střídače, složené z diod a tranzistorů nebo může být použito také PWM (Obr. 10). [88]



Obr. 10 PWM – šířková pulzní modulace [89]

2.3 ELEKTRICKÁ VOZIDLA

Elektrická vozidla využívají ke svému pohybu elektrickou energii namísto fosilních paliv, čímž se snižuje produkce nežádoucích emisí v osobní dopravě. Mezi elektrická vozidla patří hybridní vozy s různým stupněm hybridizace a bateriové elektromobily (BEV). Bateriové elektromobily využívají pro svůj pohon jeden nebo více elektromotorů. Pro bateriová vozidla se používají synchronní i asynchronní motory, popsané v kapitole 2.1. Jako zdroj energie slouží paket Li-ion nebo dříve NiMH akumulátorů, které jsou dobíjeny z externího zdroje nebo během jízdy rekuperačním brzděním. Kapacita a životnost baterií je ovlivněna rychlostí nabíjení, okolní teplotou nebo úrovní nabití a vybití při jednotlivých cyklech. Právě životnost baterií je klíčová z hlediska udržitelnosti elektromobilů vzhledem k ceně akumulátorů a obtížnosti jejich likvidace. Bateriový paket bývá uložen většinou v podlaze, čímž snižuje těžiště vozu a zlepšuje jeho ovladatelnost. [90–92]

Při optimální okolní teplotě je elektromobil schopen dosáhnout svých maximálních výkonnostních parametrů okamžitě bez předchozího zahřívání. Elektromotory jsou

krátkodobě přetížitelné, což umožňuje dodat větší výkon např. při předjíždění. Doba přetížitelnosti je přímo závislá na teplotě elektromotoru. Elektromobily dokáží ve městech pracovat s výrazně vyšší účinností oproti konvenčním vozidlům. [90–92]

Nevýhodou současných elektromobilů je cena, hmotnost a výdrž baterií, malý dojezd a délka nabíjení. Dalším problémem jsou lithiové baterie, náchylné ke vznícení při vysokých teplotách. Ty mohou vzniknout zkratem. Vzhledem k množství článků v bateriovém elektromobilu dochází při vznícení jednoho článku k řetězové reakci, která vede k požáru vozidla. [93, 94]

V dnešní době je na trhu velké množství elektromobilů různých značek, velikostí a funkcí, počínaje mikroauty, přes městská auta, rodinná auta, SUV až po pracovní vozidla. Převážná většina světových výrobců automobilů má v současném výrobním programu alespoň jeden čistě elektrický model. K umožnění funkce elektromobilů v dopravě je potřeba také poskytnout dobíjecí stanice nejen ve městech, ale i podél silnic. [95]

2.4 ELEKTRICKÉ MOTOCYKLY

Elektrické motocykly poskytují stejné výhody jako elektromobily, např. tišší chod a jsou úspornější při průjezdu městem. V dnešní době jsou již dvoukolová a tříkolová elektrická vozidla rozšířena hlavně ve městech, kde malý dojezd ani obtížnost nabíjení není problémem. Tyto nevýhody, spolu s vyšší hmotností a dlouhou nabíjecí dobou mohou být problémem pro mimoměstské použití nebo dojíždění na větší vzdálenosti. [96, 97]

Elektrické motocykly mají dlouhou historii, která sahá až do konce 18. století. První patenty na jednostopá vozidla s elektrickým pohonem pochází z 60. let 19. století (Perreaux nebo Bolton). V roce 1911 se začaly prodávat první elektrické motocykly Eugenio Gentile, od roku 1938 byly v prodeji elektrické skútry Socovel, které se rozšířily ve velké míře. Popularita elektrických motocyklů postupně klesla, protože konvenční motocykly byly výkonnější a levnější. Postupně vznikaly další elektrické motocykly, jako např. Harley Davidson MK2 nebo Kawashocki, které se ale nestaly komerčně úspěšnými. První masově rozšířený elektrický skútr byl Peugeot Scoot'Elec, představený v roce 1996. Mezi další komerčně úspěšná jednostopá elektrovozidla patří např. Vectrix VX-1, Vespa elettrica, Harley Davidson LiveWire, BMW C evolution, Zero SR/F nebo Kymco Candy. V dnešní době je na trhu široká škála různých elektroskútrů a elektromotocyklů od malých městských přes naháče, endura a supersporty až po cestovní. Elektrické motocykly mívají vyšší pořizovací cenu oproti konvenčním motocyklům, ale provozní náklady mohou mít naopak nižší. [98–100]

Nejčastěji se do elektromotocyklů používají synchronní elektromotory s permanentními magnety, které mají nízkou hmotnost, vysoký měrný výkon a nižší cenu. Baterie jsou nejčastěji používány Li-ion kvůli jejich vysoké energetické hustotě, nízké hmotnosti a jednoduché zástavbě.

3 HYBRIDNÍ TECHNOLOGIE

Snahou posledních let je snížit dopad dopravních prostředků na kvalitu okolního ovzduší a na jevy, spojené s nadužíváním vozidel se spalovacími motory. [101] Výsledkem těchto snah jsou postupně se zvyšující nároky na emise vozidel vyráběných a prodávaných v (nejen) evropských státech. Mezi možná řešení patří vývoj úspornějších motorů s dokonalejším aftertreatmentem výfukových plynů nebo snižování hmotnosti vozidel anebo zavádění hybridních hnacích ústrojí, která umožňují úspornější provoz v některých režimech.

Za hybridní vozidlo může být považováno jakékoliv, využívající minimálně dva způsoby pohonu. Jako pohon může být použit spalovací motor, turbína, elektromotor, lidská síla, případně okolní podmínky (vítr). V dnešní době je nejrozšířenější kombinace spalovacího motoru s elektromotorem, který odebírá energii z akumulátorů, palivových článků nebo kondenzátorů. [102]

Koncept hybridního ústrojí si roku 1889 nechal patentovat William H. Patton pro použití u kolejových dopravních prostředků. Roku 1900 byl představen první sériový hybrid Lohner-Porsche Semper Vivus s dvěma jednoválcovými motory o výkonu 2,6 kW, které poháněly generátor a dva elektromotory zabudované v kolech, později byl nahrazen modelem Lohner-Porsche Mixte. [103–107]

Roku 1911 uvedla společnost Woods Motor Vehicle Company paralelní hybrid s názvem Dual Power Model 44 Coupe, který poháněl elektromotor při nízkých rychlostech, při vyšších rychlostech zajišťoval pohon čtyřválcový spalovací motor a elektromotor pracoval jako generátor pro rekuperační brzdění. [107, 108]

V pozdějších letech vznikaly prototypy dalších hybridních vozidel, jako např. plug-in hybrid General Motors XP-883 (1969), Fiat 131 Ibrido (1979), Alfa Romeo 33 Ibrida (1988) nebo Volvo ECC (1992), kde turbína poháněla generátor a dobíjela akumulátory. [107, 109–112]

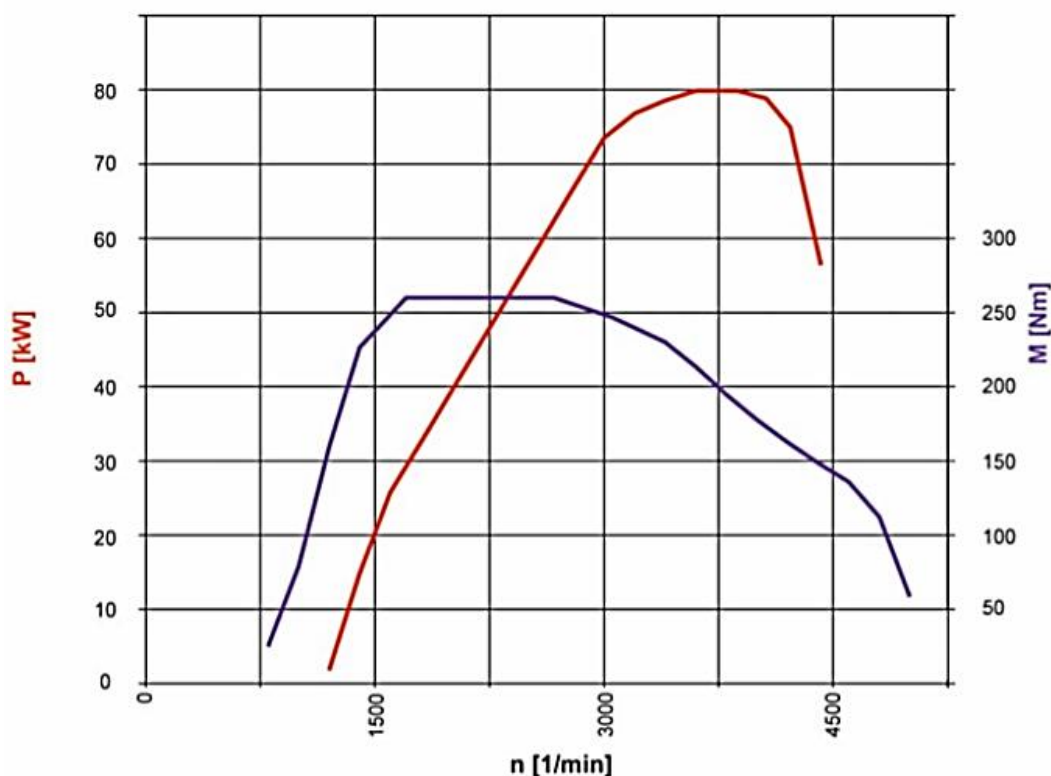
V roce 1990 byla představena jakožto paralelní plug-in hybrid první generace Audi Duo se zážehovým motorem 2.3e, pohánějícím přední kola a elektromotorem Siemens o výkonu 9 kW, pohánějícím zadní kola. Tento vůz vlivem vysoké hmotnosti a slabého elektromotoru měl horší vlastnosti než konvenční Audi 100. V dalších generacích již byly použity silnější elektromotory a mezinápravový diferenciál, který umožňoval spolupráci obou motorů a vhodnější spalovací motory 2.0e a 1.9TDi. [107, 113, 114]

Prvním masově rozšířeným hybridním vozem se stala Toyota Prius, která byla představena v roce 1997. Jednalo se o kombinovaný hybrid s planetovým děličem výkonu, který ovládal zážehový motor s výkonem 43 kW a elektromotor s výkonem 30 kW tak, že bylo možné použít kombinaci obou motorů nebo provoz na jeden z nich. Další generace Priusu měly variabilní časování ventilů a vyšší výkon. Ve stejném období se na trhu objevily i další hybridní vozy, jako např. Honda Insight, Honda Civic hybrid nebo Chevrolet Volt. V roce 2009 se začal prodávat Mercedes-Benz S400 BlueHybrid, který používal Li-ion baterie.

V roce 2012 představil Volkswagen hybrid se vznětovým motorem v některých modelech. [107, 115–118]

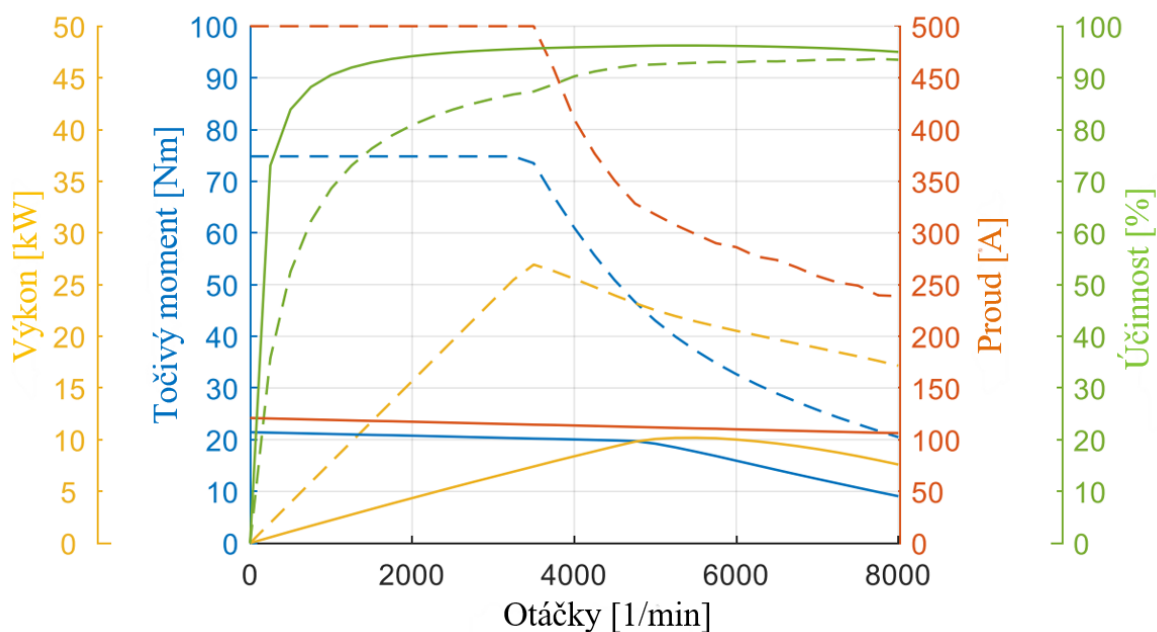
3.1 KOMPONENTY HYBRIDNÍHO ÚSTROJÍ

Spalovací motory poskytují vysoké točivé momenty a výkony při středních a vysokých otáčkách (*Obr. 11*), kdy je jejich účinnost přijatelná (v závislosti na konstrukci motoru), dále vysoký dojezd s možností rychlého doplnění paliva, které má vysokou energetickou hustotu. Při optimálním provozu dosahují zážehové motory účinnosti přes 30 %, přeplňované vznětové motory běžně i přes 40 % [119]. Při malých rychlostech nebo malém zatížení v městském provozu ale účinnost spalovacího motoru nezdědka klesá pod 10 % a při volnoběhu až na 0 %. Pro hybridní vozidla (kromě Micro hybridů a Mild hybridů) se používají maloobjemové úsporné zážehové motory.

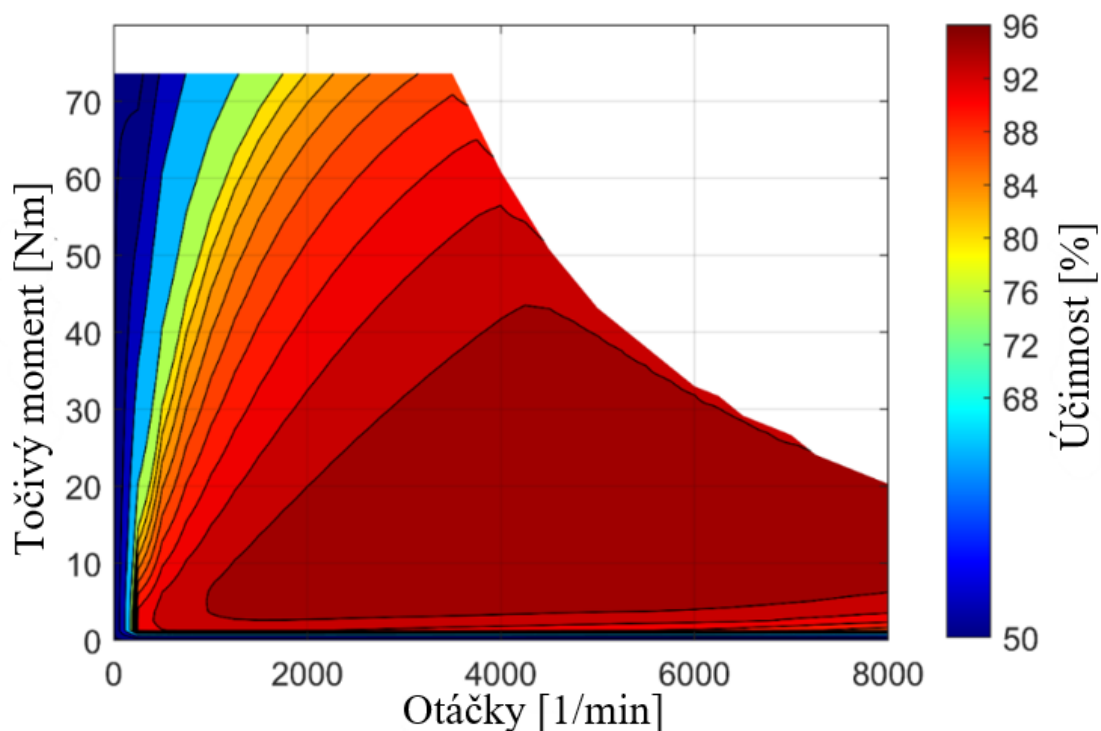


Obr. 11 Otáčková charakteristika spalovacího motoru [120]

Elektromotor naopak poskytuje vysoký točivý moment již od malých otáček (*Obr. 12*), má vysokou účinnost v širokém pásmu otáček (*Obr. 13*), ale dojezd je omezen množstvím baterií, které mají vysokou hmotnost, cenu, dlouhý nabíjecí cyklus a malou energetickou hustotu (0,1 – 0,265 MJ/kg u Lithium-iontových baterií, 0,06 - 0,12 MJ/kg u Nikl-metal hydridových baterií a 0,03 – 0,05 MJ/kg u olověných baterií [81, 121]). K účinnosti elektromotoru, která se podle typu motoru pohybuje kolem 90 až 95 % [122, 123], je ale potřeba započítat také účinnost měniče, což může významným způsobem snížit celkovou účinnost stroje. Do celkové účinnosti není započítána výroba elektrické energie. Nejběžněji používané elektromotory pro pohon vozidel jsou asynchronní třífázové a stejnosměrné s permanentními magnety.



Obr. 12 Otáčková charakteristika elektromotoru [124]



Obr. 13 Mapa účinnosti elektromotoru [124]

Při kombinaci obou typů pohonu lze spojit výhody a potlačit nedostatky obou druhů pohonu. Spalovací motor pracuje v optimálním režimu, kde dobíjí generátor, a elektromotor zajišťuje pohyb nebo může pomáhat spalovacímu motoru v jízdních režimech s nižší účinností a nízké výkonnostní parametry. Tím není spotřebováno tak vysoké množství paliva.

Hybridní vozidla využívají jako zdroj elektrické energie pro elektromotory převážně baterie. Nejběžněji používaným typem bývaly Nikl-metal hydridové (NiMH) baterie, které mají vysokou energetickou hustotu a přijatelnou hmotnost vzhledem k ceně, v současnosti jsou nahrazeny lithium-iontovými. U plug-in hybridů a bateriových elektromobilů se používají lithium-iontové baterie, protože mají oproti NiMH bateriím vyšší hustotu energie a nižší hmotnost, ale jsou dražší. V minulých letech byly používány i olověné akumulátory, které ale kvůli nízké energetické hustotě a toxickým materiálům nejsou v dnešní době pro tato řešení běžné. [125]

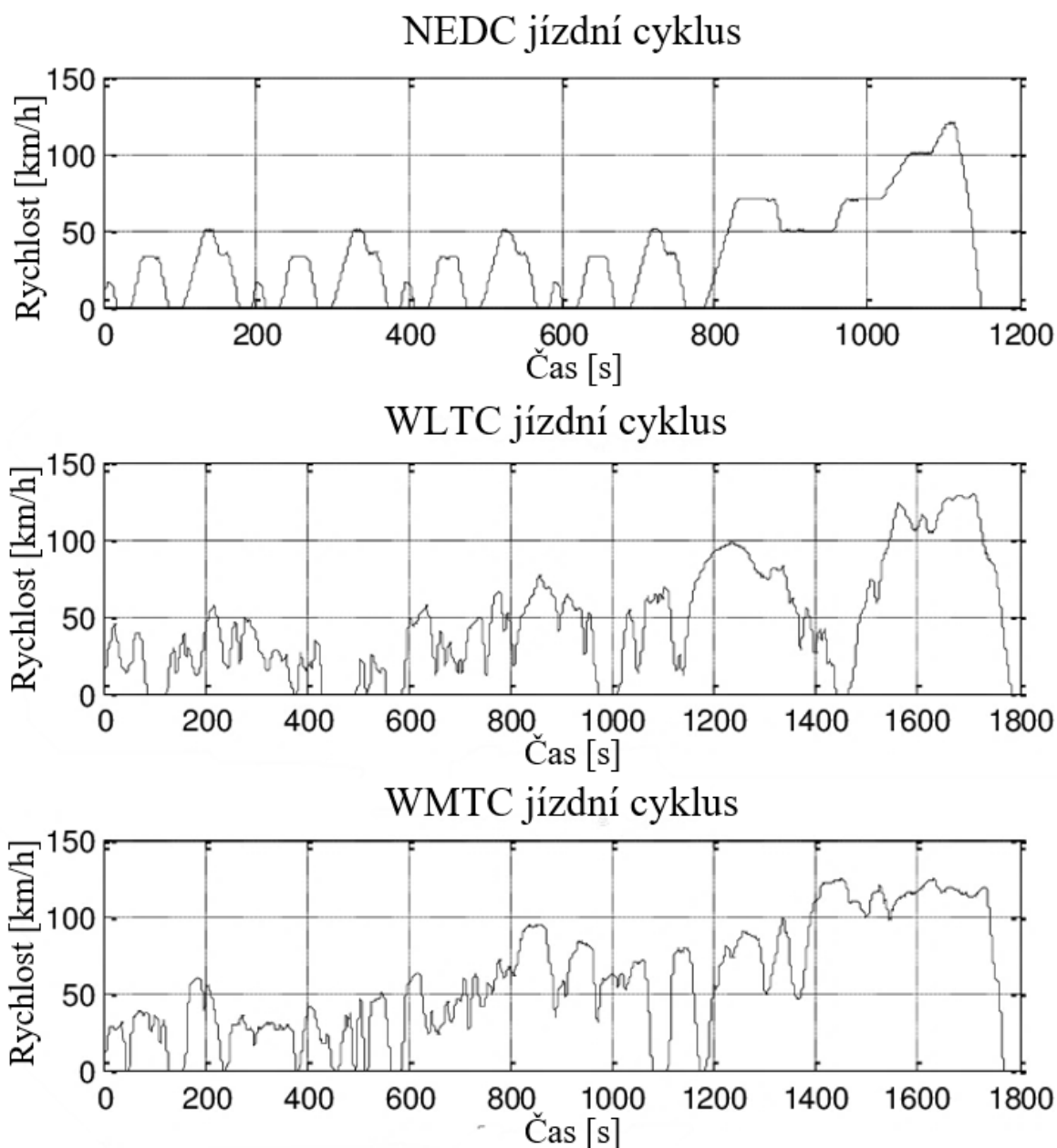
3.2 EMISNÍ NORMY

Emisní normy jsou evropské legislativní dokumenty, které předepisují podle přesně stanovených metodik měření a vyhodnocení množství jednotlivých složek výfukových plynů (mg/km) a udávají maximální povolené hodnoty. První emisní norma Euro 1 byla zavedena od roku 1992, od té doby jsou tyto normy neustále zpřísňovány, aktuálně (k roku 2023) je platná emisní norma Euro 6d. Kromě maximálních dovolených množství látek ve výfukových plynech byly také postupně zavedeny další změny. Např. Euro 3 již nedovolovalo přehřátí motoru před začátkem měření, Euro 5 vyžadovalo filtr pevných částic pro vznětové motory, Euro 6 nastavilo natolik nízké limity oxidů dusíku, že bylo v některých případech nutné použití SCR katalyzátoru. Původní metodika měření NEDC (*Obr. 14* nahoře), která se skládala z 13minutové simulace jízdy ve městě a 7minutové simulace jízdy mimo město, byla nahrazena metodikou WLTP (*Obr. 14* uprostřed), která by měla věrněji napodobit reálný provoz. WLTP cyklus je složen z částí s nízkou, střední, vysokou a velmi vysokou rychlostí. Podle metodiky WLTP jsou vozidla rozdělena do kategorií 3b, 3a, 2 a 1, které jsou určeny poměrem výkonu a hmotnosti (kategorie 3 s měrným výkonem nad 34 W/kg, kategorie 2 s měrným výkonem mezi 22 a 34 W/kg a kategorie 1 s měrným výkonem pod 22 W/kg), v případě kategorií 3b a 3a jsou potom vozidla rozdělena podle maximální rychlosti (3a s maximální rychlostí nižší než 120 km/h a 3b s maximální rychlostí vyšší nebo rovnou 120 km/h). Pro tyto kategorie se mírně liší některé z částí jízdního cyklu. [101, 126–128]

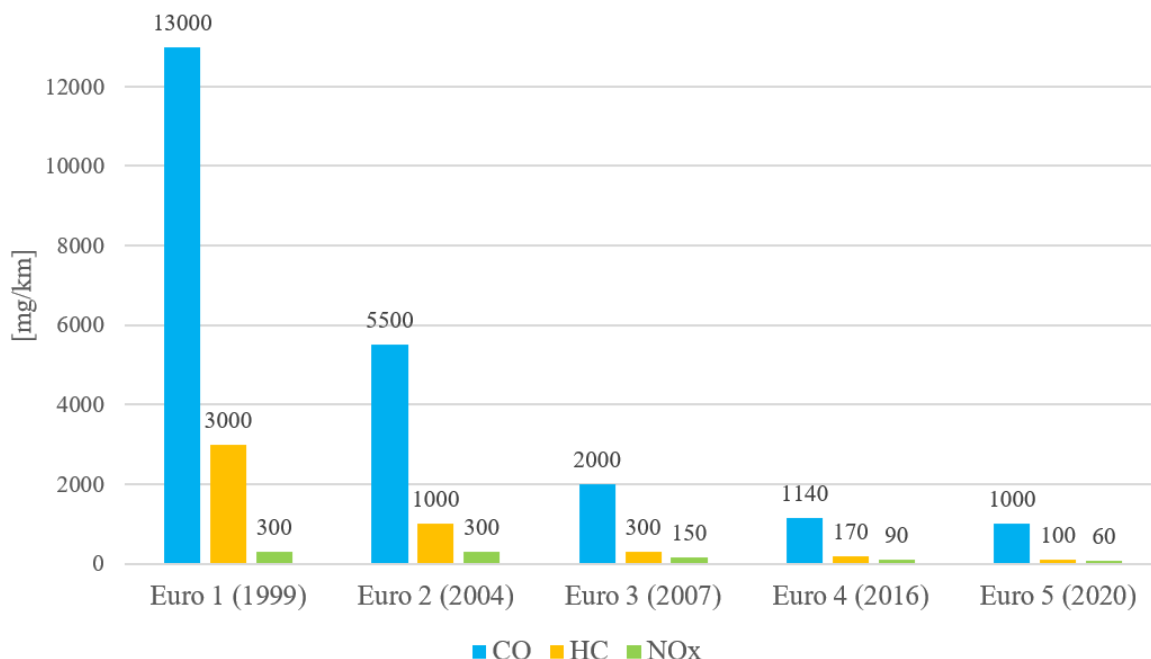
Hybridní vozidla jsou v rámci WLTP metodiky rozdělena do kategorií OVC-HEV – hybridní vozy s externím zdrojem energie, NOVC-HEV – hybridní vozy bez externího zdroje energie a PEV – čistě elektrická vozidla. Všechna tato vozidla jsou zařazena do kategorií 3b a 3a, kdy musí absolvovat stejné jízdní cykly jako konvenční vozidla. Navíc je pro vozidla OVC-HEV a PEV dodatečně zařazen cyklus složený z nízké a střední rychlosti, simulující jízdu městem a je zjišťován mimo jiné dojezd na čistě elektrický pohon. [101, 126–128]

Emisní normy pro motocykly byly zavedeny v roce 1999 a liší se od norem platných pro automobily. Obdobně jako u automobilů se i normy pro motocykly zpřísňují (*Obr. 15*), Aktuálně platná (k roku 2023) je norma Euro 5. Metodika testování emisí je WMTC (*Obr. 14* dole), která je obdobou metodiky WLTC, ale obsahuje 3 části namísto 4 a uražená vzdálenost je vyšší. Norma Euro 5 klade stejné nároky na motocykly, nehledě na stupeň hybridizace motocyklu, čímž nevznikají žádné dodatečné úkony ani omezení vůči takovým strojům. Metodika WMTC pro hybridní motocykly má 3 části stejné jako v případě konvenčních

motocyklů a k tomu má další části 4 a 5 k testování elektrického ústrojí. V části 4 jsou baterie nabity na maximální kapacitu a je testována spotřeba elektrické energie na čistě elektrický pohon. V části 5 je testován maximální dojezd na elektrický pohon do úplného vybití. V případě, že hnací ústrojí hybridního motocyklu neumožňuje pohon pouze na elektrickou energii, je možno zažádat o výjimku z částí 4 a 5. [101, 126–130]



Obr. 14 Jízdní cykly NEDC, WLTC, WMTC [131]



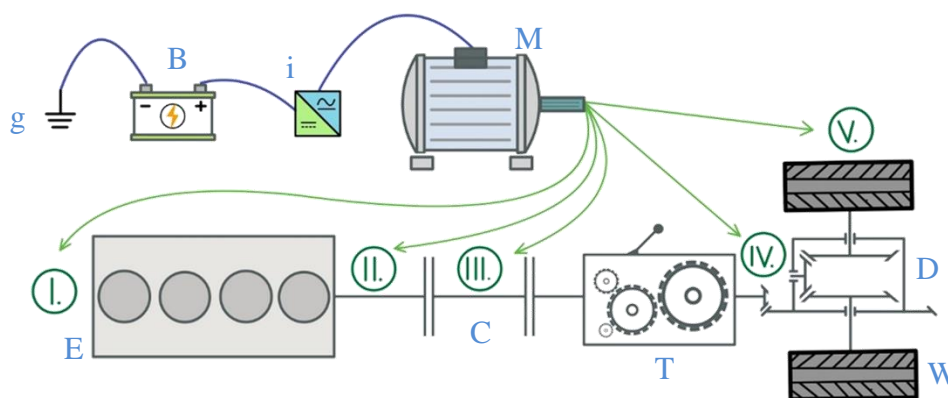
Obr. 15 Vývoj emisních norem pro motocykly [101]

3.3 ROZDĚLENÍ HYBRIDŮ PODLE USPOŘÁDÁNÍ

Hybridní vozidla, využívající k pohonu spalovací motor a elektromotor/generátor lze rozdělit podle uspořádání do několika skupin, kdy každá koncepce vykazuje jiné vlastnosti.

3.3.1 PARALELNÍ HYBRIDY

Paralelní hybrid využívá hnací ústrojí, kde je spalovací motor přes spojku a převodovku spojen s hnacími koly, obdobně jako u vozidel s pouze spalovacím motorem. Toto ústrojí je doplněno o jeden nebo více elektromotorů, které jsou připojeny k hnacímu ústrojí v několika možných pozicích (Obr. 16) a výkonnostní parametry jsou dány součtem parametrů obou motorů.



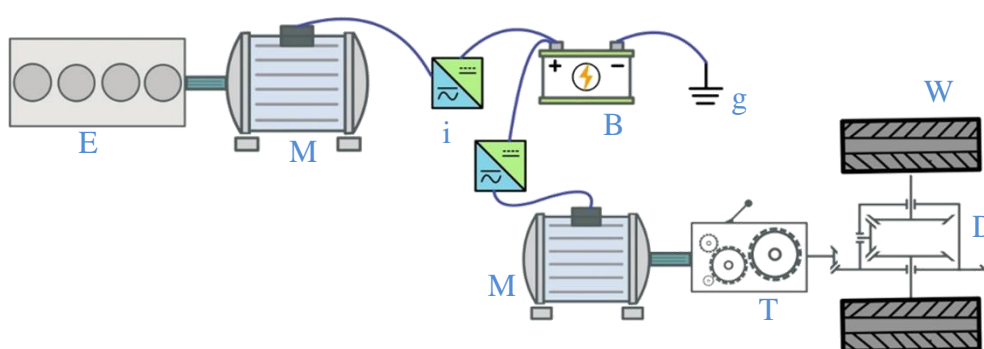
g - uzemnění; B - baterie; i - měnič; M - elektromotor/generátor; E - spalovací motor; C - spojka; T - převodovka; D - diferenciál; W - kola

Obr. 16 Schéma paralelního hybridu s možnostmi umístění elektromotoru [132, 133]

V případě některých umístění může vzniknout nutnost použití stálého převodu nebo vlastní převodovky (nejčastěji CVT) pro elektromotor. V závislosti na umístění elektromotoru může nebo nemusí být možné využití motorů odděleně, tj. pohon pouze elektromotorem, pokud jsou výkonnostní parametry elektromotoru dostatečné pro pohon vozidla, většinou však slouží pouze jako pomocný agregát. Elektromotor může v ústrojí pracovat v trakčním režimu, kdy dodává točivý moment do hnacího ústrojí v jízdních režimech. Spalovací motor pak pracuje s nízkou účinností nebo jsou vyžadovány vyšší výkonnostní parametry, a tím je možné snížit spotřebu paliva. Druhý režim práce elektromotoru je generátorický režim, kdy je přebytek kinetické energie přeměňován na elektrickou energii, která dobíjí akumulátory. Maximální otáčky elektromotoru nesmí být vyšší než maximální otáčky elektromotoru, aby nedošlo k „přetočení“ motoru a jeho mechanickému poškození. [134, 135]

3.3.2 SÉRIOVÉ HYBRIDY

Sériový hybrid (*Obr. 17*) využívá pro pohon jeden nebo více elektromotorů, které jsou napájeny z akumulátorů. V závislosti na počtu, typu a umístění elektromotorů nemusí být nutné použití převodovky nebo rozvodovky, pokud jsou například umístěny v kolech. V případě požadavku na dodávku energie trakčním motorům nebo dobíjení akumulátoru je spuštěn spalovací motor, který není mechanicky spojen s hnacími koly. Spalovací motor pracuje v otáčkovém spektru s nejvyššími výkonnostními parametry a nejvyšší účinností. Výstupní hřídel motoru pohání generátor, který dodává elektrickou energii trakčním motorům nebo při nízkém odběru energie dobíjí akumulátor. Otáčky spalovacího motoru nijak nesouvisí s rychlostí vozidla, což zefektivňuje provoz po městě, kde by spalovací motor pracoval v neefektivních režimech.



g - uzemnění; B - baterie; i - měnič; M - elektromotor/generátor; E - spalovací motor; D - diferenciál;
W - kola; T - převodovka;

Obr. 17 Schéma sériového hybridu [132]

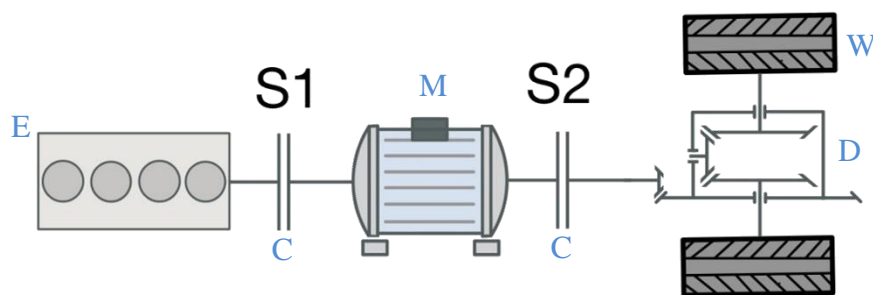
Celková účinnost sériového hybridu je snížena několikanásobnou přeměnou energie, kdy každá přeměna dosahuje omezené účinnosti, tedy přeměna paliva na mechanickou energii ve spalovacím motoru (30–40 % podle typu a výrobce), přeměna mechanické energie na elektrickou energii v generátoru (90–95 %), přeměna elektrické energie na elektrickou v měniči (až 95 %), přeměna elektrické energie na mechanickou v trakčním motoru (90–95 %). Použitím při vysokých rychlostech klesá účinnost elektromotoru (*Obr. 13*), čímž jsou

sériové hybridy nevhodné pro dlouhodobý dálniční provoz nebo je nutné použití převodovky ve vozidle. Tato skutečnost vyžaduje použití většího množství baterií a většího generátoru oproti paralelnímu hybridu. Oproti bateriovému elektromobilu je možné použití výrazně menšího množství baterií. [134, 136]

3.3.3 KOMBINOVANÉ HYBRIDY

Kombinované uspořádání umožňuje provoz vozidla jako paralelního nebo sériového hybridu na základě nejvyšší účinnosti podle aktuálních požadavků. Konstrukčně je toho dosaženo pomocí dvou spojek, planetové převodovky nebo elektronického děliče.

Kombinovaný hybrid s dvěma spojkami je označován jako přepínatelné uspořádání, kdy jsou spojky S_1 a S_2 (Obr. 18) spínány a rozepínány podle jízdního režimu. Lze zde využívat trakční elektromotor při nízkých rychlostech (S_1 rozepnuta a S_2 sepnuta), stejně jako při rekuperačním brzdění, dále lze použít spalovací motor pro přímý pohon, kdy elektromotor pracuje v generátorickém režimu a dobíjí baterie, případně lze použít oba motory k pohonu (S_1 i S_2 jsou současně sepnuté). [137]

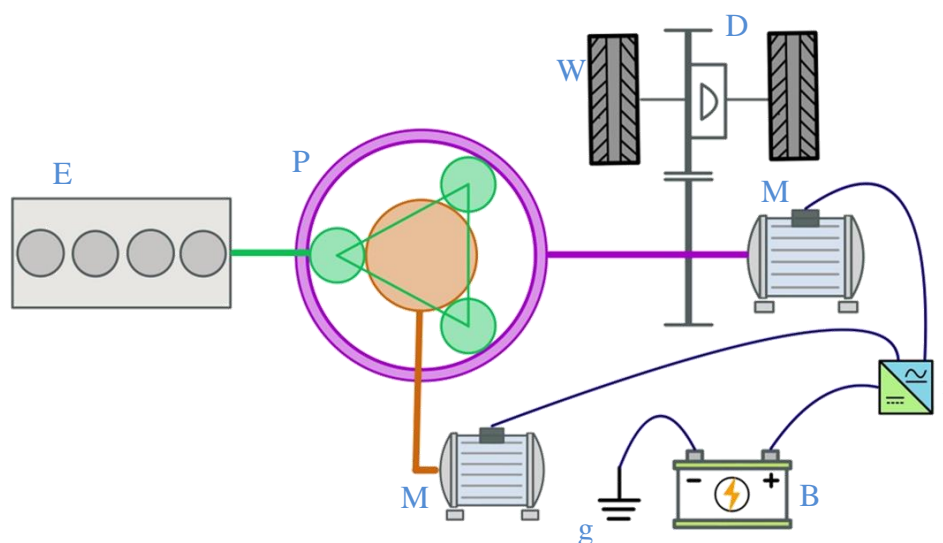


M - elektromotor/generátor; E - spalovací motor; D - diferenciál; W – kola; C – spojka

Obr. 18 Schéma kombinovaného hybridu se dvěma spojkami [137]

Kombinované uspořádání s děličem výkonu využívá planetové převodovky, kdy je na satelity planetového převodu přiváděn točivý moment od spalovacího motoru, na centrální kolo točivý moment trakčního elektromotoru a korunové kolo odvádí výsledný točivý moment ke kolům (Obr. 19). Energie od spalovacího motoru (případně spalovacího motoru a jednoho elektromotoru) může být přenášena na kola nebo na druhý motor/generátor k dobíjení baterie, odkud je napájen jeden nebo více trakčních elektromotorů, které mohou být umístěny i v kolech. [138]

Kombinované uspořádání s elektronickým děličem výkonu využívá místo planetové převodovky speciální elektrický stroj s rotující vnitřní i vnější částí, nelze tedy použít pojmenování stator. Na vnitřní rotor je přiváděn točivý moment od spalovacího motoru a na vnějším rotoru se od něj indukuje točivý moment. K vnějšimu rotoru je připojen elektromotor, který může fungovat jako trakční nebo jako generátor. Zvýšením rychlosti vozidla se snižuje rozdíl otáček vnějšího a vnitřního rotoru, čímž klesá indukovaný točivý moment. [139, 140]



g - uzemnění; B - baterie; i - měnič; M - elektromotor/generátor; E - spalovací motor; D - diferenciál;
W - kola; P - planetový převod

Obr. 19 Schéma kombinovaného hybridu s planetovým děličem výkonu [132, 141]

3.4 ROZDĚLENÍ HYBRIDŮ PODLE STUPNĚ HYBRIDIZACE

Hybridní vozidla lze také rozdělit podle úlohy spalovacího motoru a elektromotoru v systému.

Nejnižším stupněm hybridu je Micro Hybrid, kdy pohon vozidla je zajištěn spalovacím motorem. Elektromotor disponuje výkonem nízkých jednotek kilowatt při 12 V a je poháněn řemenem příslušenství motoru, kde je náhradou startéru a zajišťuje funkci motoru start/stop. V některých konstrukcích motoru může elektromotor pracovat v generátorickém režimu, čímž umožňuje rekuperaci energie. [142, 143]

Mild hybridy (MHEV) mají v hnacím ústrojí (*Obr. 16* na pozicích I, II a III) umístěný elektromotor/generátor (tzv. reverzibilní alternátor) s výkonem nízkých desítek kilowatt při napětí mezi 12 a 200 V, který slouží k rekuperaci energie a jako pomocný trakční agregát. Jedná se o paralelní hybrid, kde pohon vozidla je primárně zajišťován spalovacím motorem. Pohon samotným elektromotorem nebývá zpravidla možný. Elektromotor dodává točivý moment v režimech, kdy by byl provoz na čistě spalovací motor neúsporný, čímž snižuje spotřebu vozidla. [142–144]

Full hybridy (HEV) jsou vozidla s děličem výkonu, ve kterých elektromotory s výkonem vyšších desítek kilowatt umožňují samostatně pohánět vozidlo. Kapacita baterií ale neumožňuje dlouhodobý provoz pouze na elektropohon, proto je možno dobíjet baterie spalovacím motorem nebo použít spalovací motor k pohonu vozidla. Spalovací motor je možno provozovat v optimálním režimu bez vlivu na rychlost vozidla. Trakční napětí elektromotoru se může pohybovat mezi 200 a 300 V, případně až 600 V. [143, 144]

Plug-in hybrid (PHEV) je rozšíření Full hybridu, kdy koncepce je doplněna o zásuvku k dobíjení z externího zdroje, čímž se může zvýšit dojezd bez zapnutého spalovacího motoru.

Plug-in hybridy mívají oproti Full hybridu větší kapacitu baterie, což umožňuje nižší emise v městském provozu. [141, 145]

Mezi další koncepci hybridních vozidel patří Through The Road (TTR) hybrid, kde spalovací motor pohání jednu z náprav a elektromotor zajišťuje pohon druhé z náprav. Toto řešení je velice málo rozšířené z důvodu samostatných hnacích ústrojí pro každou z náprav, a tím i vyšší náklady na výrobu, použito bylo např. u Peugeotu 3008 Hybrid4. V současné době se nevyrábí žádné osobní vozidlo s touto koncepcí. [146, 147]

3.5 REKUPERACE ENERGIE

Rekuperace energie je způsob využití energie, která by jinak byla přeměněna na teplo v mechanických brzdách. Zbytná kinetická energie je při deceleraci přiváděna na rotor motor/generátoru, ve kterém je měněna na elektrickou energii, ukládanou zpět do akumulátorů, případně do kondenzátorů pro rychlejší přijímání a vydávání energie. Schopnost vozidla rekuperovat energii závisí na množství mařené kinetické energie (intenzita brzdění, rychlost, hmotnost) a účinnosti rekuperační přeměny. Celkové množství rekuperované energie je omezeno účinností systému, jako např. maximálními nabíjecími proudy baterií.

Rekuperační brzdění se rozvíjí již od prvních elektrovozidel a hybridních vozidel a zvyšuje celkovou účinnost hnacího ústrojí dobíjením baterií. Mimo jiné se při použití rekuperačního brzdění, oproti pouze mechanickým brzdám, zvyšuje jízdní stabilita a méně se opotřebovávají brzdy. [148, 149]

3.6 ŘÍZENÍ HYBRIDNÍCH VOZIDEL

Pro správnou funkci hybridního vozidla je potřeba, aby jednotlivé komponenty pohonu konaly práci, která je za dané situace neoptimálnější, což bývá možné na základě velkého množství senzorů, které vysílají signály ke zpracování. Spalovací motor má svoji vlastní řídicí jednotku (ECU), stejně jako například převodovka nebo palubní systémy. Tyto jednotlivé řídicí jednotky spolupracují s hybridní řídicí jednotkou (HCU), která může mít na starosti elektromotor a baterie nebo jsou použity oddělené řídicí jednotky. HCU potom vyhodnocuje signály ze všech jednotek a zajišťuje optimální chod hybridního ústrojí. [150–152]

Mezi hlavní funkce hybridního vozu patří volba točivého momentu elektromotoru v závislosti na zatížení motoru, stavu baterií a ovládacích prvcích vozidla. Dále určení, kdy má být spalovací motor aktivní a kdy má být vypnutý tak, aby byl využit opravdu jen tehdy, když je potřeba. Další hlavní funkcí je ovládání rekuperačního brzdění, v závislosti na intenzitě brzdění a stavu baterií. U baterií je třeba monitorovat nabíjení a vybíjení jednotlivých akumulátorů nebo teplotu tak, aby nedocházelo k jejich nadměrné degradaci. Spalovací motor je třeba regulovat v případě, kdy pracuje spolu s elektromotorem a je tím pádem menší potřebné množství vstříkovaného paliva, a tím je možno udržovat motor v efektivnějším provozním režimu. Podle uspořádání hybridního ústrojí je také řízena převodovka a spojky nebo hydrodynamický měnič k zajištění nejefektivnějšího provozu obou (všech) motorů. Stejně jako u konvenčních vozidel je také potřeba efektivně ovládat pomocné systémy, jako je

klimatizace nebo posilovač řízení. Většina hybridních systémů také spolupracuje s aktivními prvky jízdní dynamiky a jízdními asistenty. [150–152]

3.7 HYBRIDNÍ MOTOCYKLY

Myšlenka hybridního motocyklu není nová a již začátkem minulého století se objevovaly pokusy o takový stroj. Jedním z nich byl například tříkolový dvoumístný Morgan Runabout z roku 1917, který měl v přední části dvouválcový vidlicový motor a elektromotor v náboji zadního kola, přičemž oba motory měly společně výkon až 3 kW. V roce 1917 také vzniklo vozidlo Autoped, což byla koloběžka, poháněná spalovacím motorem, pohánějícím přední kolo, kde ale bylo možno při nízkých rychlostech využít pohon elektromotorem. Vzhledem k výkonnostním parametrům, spolehlivosti a ceně benzínu nebyly hybridní motocykly ani jiná vozidla konkurenceschopná. [107, 153]

Hybridní motocykly začaly dávat smysl ve chvíli, kdy se začaly zpříšňovat emisní limity motocyklů. Mezi první koncepty Yamaha Gen-Ryu z roku 2005, což byl paralelní hybrid využívající čtyřválcový spalovací motor s převodovkou, na jejíž výstupní hřídeli byl připojen BLAC elektromotor, který pomáhal při akceleraci a umožňoval rekuperační brzdění. Ani jeden z těchto konceptů neumožňoval samostatný pohon elektrickým motorem a nebyl sériově vyráběn. [154, 155]

První koncept skutečného hybridního motocyklu je BMW K1200GT Hybrid taktéž z roku 2005, vycházející ze sériového modelu, který měl v zadním kole umístěný elektromotor. Ten umožňoval samostatný elektrický pohon. Elektromotor byl napájen Li-ion bateriemi, na rozdíl od např. Yamahy Gen-Ryu, která využívala Ni-Cd baterie. Motocykl mohl být poháněn spalovacím motorem, elektromotorem nebo jejich kombinací. Ani tento motocykl nebyl nikdy sériově vyráběn. [155, 156]

V roce 2005 vznikl koncept Yamaha FC-me, což byl motocykl, využívající jako zdroj energie vodíkový palivový článek. Mimo jiné byl vybaven možností bezdrátového nabíjení baterií a dalšími technologiemi, ukazujícími potenciál vodíkových technologií. Ani tento koncept se nedostal do výroby. [157]

Mezi další koncepty patřila například Kawasaki J Concept, která měla zdvojené přední kolo, čtyřválcový motor, doplněný o elektromotor a další technologie, jako head-up display nebo komunikační zařízení. [158]

V dnešní době jsou dostupné komponenty k přetransformování konvenčních motocyklů na hybridní (sada elektromotoru, baterií, kontroléru, aj.). Takové přestavby motocyklů je ale třeba úředně schválit a nejsou v některých evropských státech legální. [159, 160]

Od roku 2018 lze koupit na evropském trhu hybridní skútr Honda PCX Hybrid, který má 124 cm³ kapalinou chlazený motor v kombinaci s BLDC elektromotorem, který řemenem pohání zadní kolo při požadavku na větší výkon. Elektromotor je schopný kromě pohonu také rekuperačně brzdít, a tím dobíjet Li-ion baterie. Na evropském trhu je také dostupná hybridní tříkolka Piaggio MP3 Hybrid (*Obr. 20*), ve které spalovací motor pohání přední kola

a elektromotor zadní kolo, přičemž je možné tříkolku pohánět spalovacím motorem, elektromotorem nebo jejich kombinací. Piaggio MP3 Hybrid je dostupný ve verzi s motorem 300 cm³ a 125 cm³. [161, 162]



Obr. 20 Piaggio MP3 [163]

Kromě výše uvedených skútrů a tříkolek není aktuálně na evropském trhu nabízen žádný hybridní motocykl.

4 EXPERIMENT – KONCEPCE HYBRIDNÍHO MOTOCYKLU

Cílem experimentální části diplomové práce je návrh koncepce hybridního ústrojí, vycházející ze sériově vyráběného motocyklu tak, aby se při minimálním navýšení nákladů a hmotnosti zlepšily sledované parametry motocyklu v různých jízdních režimech. Mezi nejdůležitější ze sledovaných parametrů patří spotřeba paliva, celkový točivý moment nebo podélné zrychlení v městském i mimoměstském provozu, a s tím spojený dojezd na plnou nádrž paliva.

Hybridní ústrojí je navrženo v softwaru GT Suite, kde jsou jako vstupní parametry použita měření reálného motocyklu, získané na válcové zkušebně a měřeními dílů motocyklu. Je zvolena vhodná konstrukce pro použití v městském i mimoměstském provozu s minimem náročných konstrukčních úprav výchozího motocyklu. Pro toto ústrojí je sestavena řídicí struktura, umožňující optimální chod ve všech požadovaných jízdních režimech. Pro srovnání je sestaven také model konvenčního motocyklu se stejnými parametry motoru, odpovídajícími rozdíly v hmotnosti vozidla, aj. a tyto koncepce jsou srovnávány při různých jízdních testech.

4.1 MOTOCYKL PRO ZÁSTAVBU HYBRIDNÍHO ÚSTROJÍ

Hybridní motocykl, stejně jako hybridní automobil, má největší potenciál ve městech a na kratších mimoměstských trasách, kde elektromotor pomáhá překonávat podmínky, ve kterých by byl samotný spalovací motor neefektivní tj. neúsporný. Na dlouhých dálničních trasách pracuje spalovací motor s přijatelnou účinností, zatímco točivý moment elektromotoru bez dodatečného zpřevodování je ve vysokých otáčkách znatelně nižší (*Obr. 13*). Ve vysokých rychlostech tedy může být elektromotor u motocyklu spíše přítěží, která má negativní vliv na spotřebu.

Motocykl pro přestavbu na hybrid by měl splňovat několik základních kritérií. Z hlediska řízení chodu motoru je nutné elektronické vstřikování paliva k možnému regulování spalovacího motoru za všech okolností. Řídicí jednotka motoru by měla být jednoduchá a měla by umožňovat přímou komunikaci přes rozhraní OBD II. Motocykl by měl mít nižší hmotnost, aby bylo možné použít méně výkonný motor a menší množství baterií, ale přitom byl jejich vliv na chování motocyklu nezanedbatelný. V neposlední řadě nejsou vhodné motocykly, pro které nelze uvažovat použitelnost hybridního ústrojí, tedy motocykly určené na daleké cesty po dálnicích, terénní motocykly nebo motocykly pro specifickou cílovou skupinu (jezdci, pro které je podstatný projev motoru, nikoliv jeho úspornost).

4.1.1 VÝCHOZÍ MODEL MOTOCYKLU, SPECIFIKACE

Jako vhodný výchozí sériově vyráběný motocykl byl pro návrh hybridního ústrojí zvolen stroj KTM RC 390 (*Obr. 22* Zkušební motocykl). K dispozici pro měření je model z roku 2016, spadající pod emisní normu Euro 4. Uvedený motocykl (*Tab. 1*) je osazen jednoválcovým čtyřdobým kapalinou chlazeným motorem s nepřímým vstřikováním paliva. Výhodou představuje nízká hmotnost motocyklu, přímé ovládání škrticí klapky, jednoduchá konstrukce motoru a vývod zásuvky OBD II k monitorování aktuálních parametrů motoru.

Tab. 1 Technické specifikace KTM RC 390 [164–166]

Výrobce	KTM Motorrad AG
Zdvihový objem motoru	373,2 cm ³
Ventilový rozvod	DOHC
Ventilů na válec	4
Průměr sacích ventilů	36 mm
Průměr výfukových ventilů	29 mm
Maximální výkon	32,1 kW
Otáčky maximálního výkonu	9000 1/min
Maximální točivý moment	37 Nm
Otáčky maximálního točivého momentu	7000 1/min
Vrtání válce X zdvih	89 mm X 60 mm
Kompresní poměr	12,6:1
Typ převodovky	Manuální sekvenční šestistupňová
Převodové poměry	2,6667; 1,8571; 1,4211; 1,1428; 0,9565; 0,8400
Primární převodový poměr	2,6667
Stálý převodový poměr	3
Sekundární převod	řetězem
Suchá hmotnost	152,5 kg
Pohotovostní hmotnost	165 kg
Maximální rychlost	167 km/h
Volnoběžné otáčky	1650 1/min
Objem nádrže	10,0 l
Kombinovaná spotřeba	3,52 l/100km

Zkušební motocykl byl v minulosti součástí několika projektů, následkem čehož jsou některé z jeho částí upraveny, tzn. nepůvodní, zejména výfukový systém. Na motocykl je také připojené velké množství snímačů, které neumožňují zachování většiny částí kapotáže stroje (Obr. 21 KTM RC 390 [167]).



Obr. 21 KTM RC 390 [167]



Obr. 22 Zkušební motocykl

4.1.2 MĚŘENÍ VYBRANÝCH PARAMETRŮ MOTOCYKLU

Pro přesné vstupy do simulace je třeba provést měření základních geometrických parametrů, jako např. dynamický poloměr kola a měření výkonnostních charakteristik na válcové zkušebně. V neposlední řadě je nutné zajistit, že vybraný elektromotor a jeho příslušenství bude možné zabudovat do motocyklu bez zásadních konstrukčních úprav.

Dynamický poloměr kola je zjišťován experimentálně a je klíčovým faktorem pro správně fungující simulaci, používanou ke zjištění podélné rychlosti z úhlové rychlosti kola a výpočtu hnací síly z točivého momentu na kole. Dynamický poloměr předního kola není pro výpočet důležitý a nebyl stanoven.

Měření dynamického poloměru kola bylo prováděno na skutečném provozně zatíženém motocyklu s doporučeným tlakem v pneumatikách. Při měření byla měřena dráha, odpovídající třem otáčkám kola, ze které je získán dynamický poloměr kola (rovnice 1). Měření bylo dvakrát opakováno pro ověření správnosti výsledku a byla spočtena průměrná hodnota obou měření.

Měření byly získány hodnoty vzdálenosti $S_1 = 5\,640$ mm a $S_2 = 5\,645$ mm.

Dynamický poloměr:

$$r_d = \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{5642,5}{2 \cdot \pi \cdot 3} = 299,3 \text{ mm} \quad (1)$$

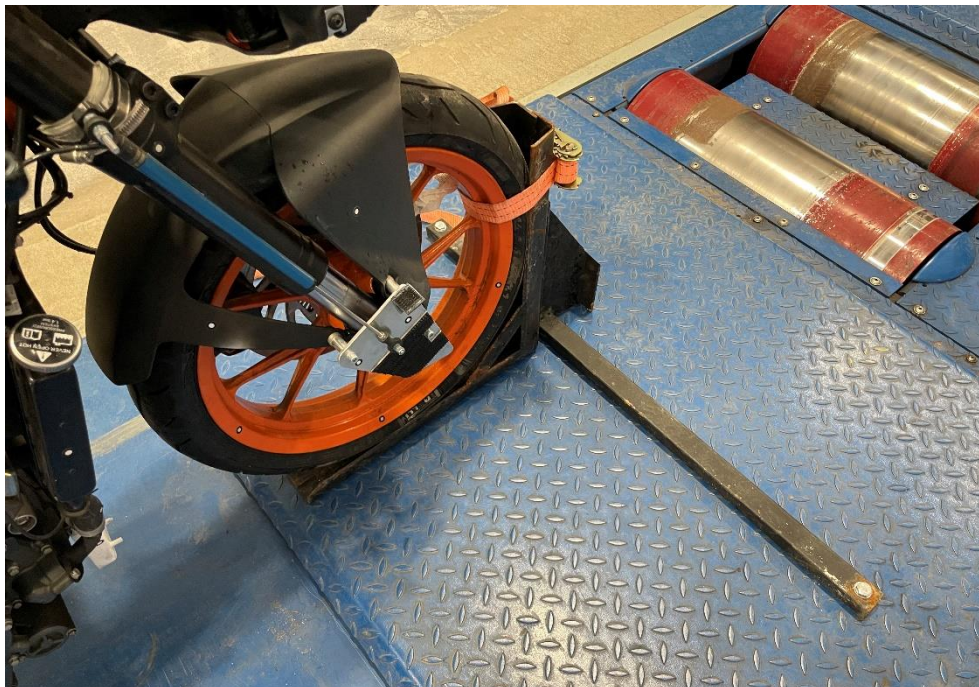
kde r_d je poloměr zadního kola; S je ujetá dráha; n je počet otáček kola.

Po dosazení jejich aritmetického průměru do rovnice (1) byl získán výsledný dynamický poloměr zadního kola $r_d = 299,3$ mm.

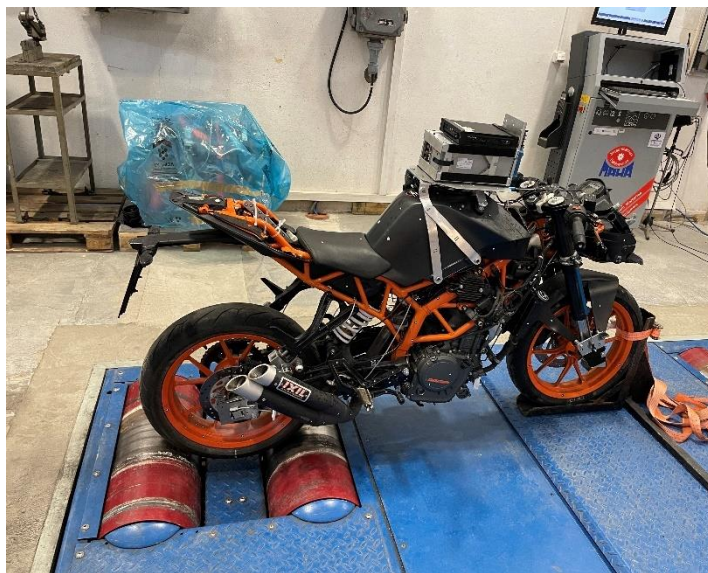
Pro měření výkonnostních parametrů byla k dispozici válcová zkušebna MAHA LPS 3000 [168], pracující na principu vířivých proudů, která je určena pro osobní a užitkové automobily. Každé z kol je usazeno mezi dvěma válci o průměru 318 mm a osové vzdálenosti 540 mm. Na válcové zkušebně lze provádět měření vozidel do výkonu 260 kW, rychlosti 260 km/h a hnací síly 6000 N. Zkušebna umožňuje kontinuální měření zrychlení a setrvačných hmot rotačních částí a současně monitorování otáček motoru, teploty oleje a dalších hodnot dostupných ze zásuvky OBD.

Na válcové zkušebně probíhá měření otáčkových charakteristik vozidel, tedy závislosti točivého momentu a výkonu na otáčkách motoru. Vlastní měření se skládá ze dvou částí, kde první část je akcelerace, která začíná od stanovených otáček, blízkých volnoběžným, a pokračuje až do zásahu otáčkového omezovače. Tato část udává naměřené parametry na kole. Druhá část je decelerační, kde je po zásahu omezovače rozpojena spojka a vozidlo se nechává setrvačností zpomalit. Když jsou k výsledkům akceleračních výkonnostních parametrů přičteny momenty, naměřené při deceleraci, vzniklé setrvačností rotačních hmot, získají se výkonnostní parametry motoru.

Válcová zkušebna MAHA LPS 3000 není primárně určena pro měření motocyklů, bylo proto nutné zajistit motocykl proti pohybu vůči zkušebně. Toho bylo dosaženo pomocí držáku předního kola a upevňovacího pásu (Obr. 23).



Obr. 23 Upevnění předního kola na válcové zkušebně



Obr. 24 Měření na válcové zkušebně

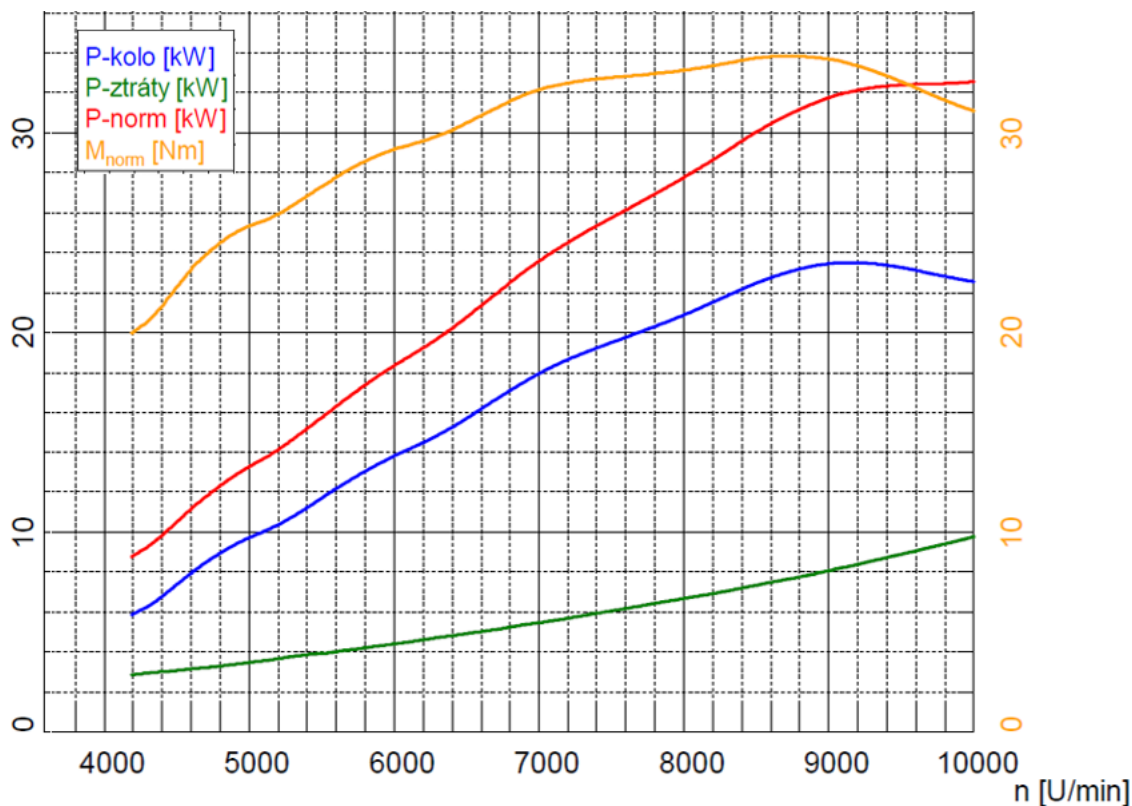


Obr. 25 Měření na válcové zkušebně

Na válcové zkušebně bylo provedeno měření (Obr. 24 a Obr. 25) výkonnostních parametrů na 6. rychlostní stupeň.

Naměřená data (Obr. 26) se liší od specifikací výrobce; odchylky jsou způsobeny zejména vlivem použití neoriginálních dílů výfukové soustavy. Tím je způsobeno snížení maxima točivého momentu a jeho posuv do vyšších otáček. Měření bylo provedeno na 6. rychlostní

stupeň od rychlosti 70 km/h, aby nedošlo k prokluzu hnacího kola na válkách, a tím se snížil otáčkový rozsah naměřených parametrů. Vzhledem k prodlevě natočení škrtecí klapky při překročení minimální rychlosti, bylo nutné vyřadit data pro otáčky nižší než 5000 1/min.



Obr. 26 Naměřená vnější otáčková charakteristika

Spotřeba paliva byla určena na základě palivové mapy vstřikovací jednotky, kde jsou stanoveny časy otevření vstřikovače v závislosti na otáčkách a zatížení motoru. Pro použitý vstřikovač Bosch EV-14-EK [169] je známo maximální objemové množství vstříknutého paliva za sekundu při konstantním tlaku paliva v systému. Z těchto údajů byly na základě reakčního času vstřikovače při daném napětí baterie, hustoty benzínu a frekvence spalovacího cyklu určeny hmotnosti vstříknutého paliva za jednotku času v jednotlivých režimech. Tyto údaje slouží jako vstup do simulace, určující spotřebu během jednotlivých jízdních cyklů.

4.2 USPOŘÁDÁNÍ HYBRIDNÍHO ÚSTROJÍ

Vzhledem k zaměření experimentu na levnější maloobjemové motocykly a nízké náklady se ukazuje jako vhodné použít zástavbou malý, pokud možno levný a jednoduše ovladatelný elektromotor. Zástavba elektromotoru byla možná v několika variantách:

Použití koncepce TTR (Through The Road) uspořádání, kdy by elektromotor byl umístěn v předním kole, zatímco spalovací motor by bez úprav poháněl kolo zadní. Umístění motoru do předního kola by znamenalo navýšení hmotnosti neodpružených hmot, a tím zhoršení jízdních vlastností (tlumení nebo ovladatelnost) a současně by elektromotor zcela ztrácel význam pomocného agregátu k rychlým rozjezdům, protože vlivem zrychlení dochází

k přesunu těžiště k zadnímu kolu a odlehčení předního kola, a tím i snížení maximální přenositelné hnací síly od elektromotoru na přední kolo.

Další možností bylo ponechání stávajícího hnacího ústrojí a doplnění o celé hnací ústrojí elektropohonu za výstup z převodovky (jako třetí řetězové kolo). Toto řešení umožňuje zástavbu rozměrnějšího elektromotoru a možného pohonu výhradně elektromotorem. Použití samostatného hnacího ústrojí elektromotoru by vyžadovalo pokrytí širokého pásma otáček, které poskytuje kombinace šestistupňové převodovky (rozsah převodových stupňů je zde téměř 3,2) a spalovacího motoru (otáčkový rozsah do 11 000 1/min). Takto vysoký otáčkový rozsah by představoval nutnost použití samostatné převodovky, kde použití převodovky s ozubenými koly přináší vysoké náklady a rozměrnou zástavbu a použití variátoru vysoké ztráty a další stupeň volnosti kinematického řetězce.

K zachování nízkých nákladů se proto jeví optimální využití co nejvíce stávajících součástí pro funkci elektropohonu, například převodovky spalovacího motoru. Zde se nabízí tři téměř rovnocenná řešení, kam elektromotor umístit. Jednou z možností je pohon přes ozubené kolo vstupní hřídele převodovky, případně ozubeného věnce spojkového koše (*Obr. 27*), kde by byla zástavba proveditelná, ale konstrukčně náročná.



Obr. 27 Spojkový koš [170]

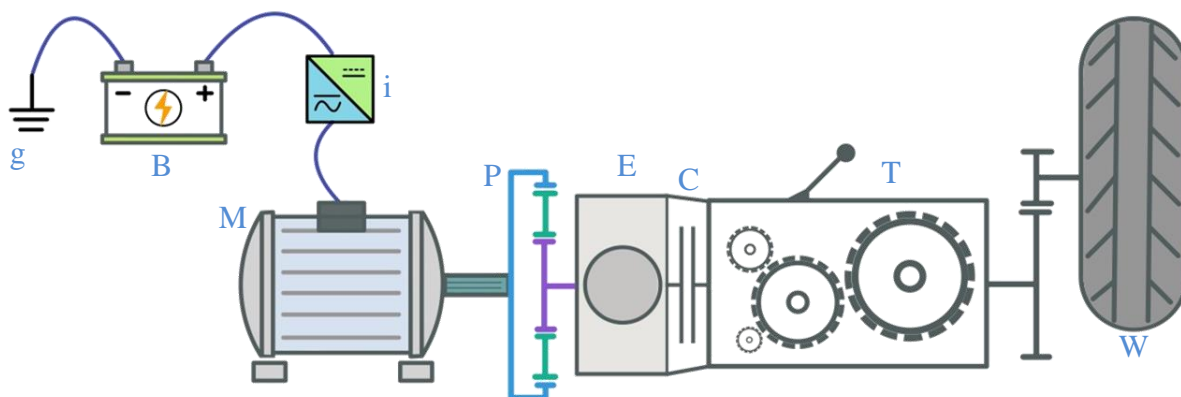
Umístění elektromotoru namísto startéru není vzhledem k jeho umístění možné. Implementací elektromotoru do hnacího ústrojí lze funkčně nahradit startér a alternátor. Právě odstraněním alternátoru vzniká potenciálně prostor pro umístění elektromotoru. Omezením je velikost elektromotoru, který musí být dostatečně kompaktní pro umístění namísto alternátoru (*Obr. 28*).

Spalovací motor by byl přes převodovku přímo spojen se zadním (hnacím) kolem, zatímco elektromotor by plnil funkci pomocného hnacího agregátu a nebyl by určen k samostatnému pohonu motocyklu. Toto řešení bylo zvoleno pro návrh koncepce hybridního pohonu.

Rotor alternátoru vybraného motocyklu má vnější průměr 120 mm, vnitřní průměr 94 mm, délku 78 mm a hmotnost přesahující 2 kg [171]. Na dně rotoru alternátoru je připevněna volnoběžka startéru, která je spojena s klikovou hřídelí. Schématické uspořádání je na obrázku (*Obr. 29*).



Obr. 28 Kryt alternátoru



g - uzemnění; B - baterie; i - měnič; M - elektromotor/generátor; E - spalovací motor; W - kolo; P - planetový převod; C – spojka; T – převodovka

Obr. 29 Schéma uspořádání hybridního motocyklu

4.2.1 ELEKTROMOTOR

Rozhodujícím faktorem pro výběr elektromotoru byla hmotnost samotného elektromotoru a hmotnost bateriového balení k jeho optimálnímu napájení. Pro svoji vysokou hmotnost se ukázaly být nevhodné asynchronní a komutátorové motory, v úvahu připadaly motory typu BLDC a BLAC.

Elektromotor by měl být ideálně chlazený vzduchem, čímž by odpadla nutnost navrhovat sekundární chladicí okruh motocyklu. Dalším klíčovým faktorem byla dostupnost potřebných informací, obsažených v datasheetech.

Na základě těchto kritérií byly jako možné vybrány elektromotory s permanentními magnety od společnosti Engiro GmbH, konkrétně 159AH_06020 a 159AH_06030, jako elektromotory s nejnižší hmotností od daného výrobce. Tyto elektromotory mají vysokou účinnost v širokém pásmu otáček, podrobnou technickou dokumentaci, vysoké hodnoty točivého momentu, na druhou stranu také vysokou hmotnost a vysoké provozní proudy, které by znamenaly velké množství baterií. V tabulce (Tab. 2) jsou uvedeny základní technické parametry vybraných motorů. Některé údaje v tabulce 2 jsou zdvojené, znamenající nominální a peakové hodnoty.

Tab. 2 Technické specifikace elektromotorů Engiro [124]

Výrobce	Označení	Výkon	Otáčky	Toč. Moment	Napětí	Proud	Hmotnost
[-]	[-]	[kW]	[1/min]	[Nm]	[V]	[A]	[kg]
Engiro	159AH_06020	9,6/26	4600/8000	20/74	96	113/500	15
Engiro	159AH_06030	8,4/17	3100/8000	26/75	96	101/334	15

Mezi další elektromotory s požadovanými parametry připadají v úvahu např. BLDC motory NOVA od společnosti Plettenberg Elektromotoren GmbH (Tab. 3). Motory jsou dostupné s rozdílnými počty pólů, počty vinutí, s vyztuženou konstrukcí a s různými hřídelemi.

Tab. 3 Technické specifikace elektromotorů Plettenberg NOVA [172–174]

Označení	[-]	30-50 B6 P50	30-50 B4 P70	15-50 B3 P50	15-50 B6 P30	10-40 A2 P12
Výkon (90V; 150 A) / max	[kW]	11,5 / 21,7	11,4 / 24,4	10,5 / 13,4	11,7 / 16,2	6.8
Otáčky při 90 V / max	[1/min]	2210 / 3150	3060 / 4700	11000	5900 / 5900	11400
Toč. Moment (150 A) / max	[Nm]	65,5/90,9	48,3 / 72,4	10,4 / 14,1	23,4 / 41,7	5,9 / 7,3
Rozsah napětí	[V]	30 - 130	60 - 140	35 - 80	30 - 90	25 - 45
Rozsah proudu	[A]	10 - 200	25 - 220	40 - 200	10 - 240	30 - 180
Hmotnost	[kg]	5.2	5.2	3	3	2.2

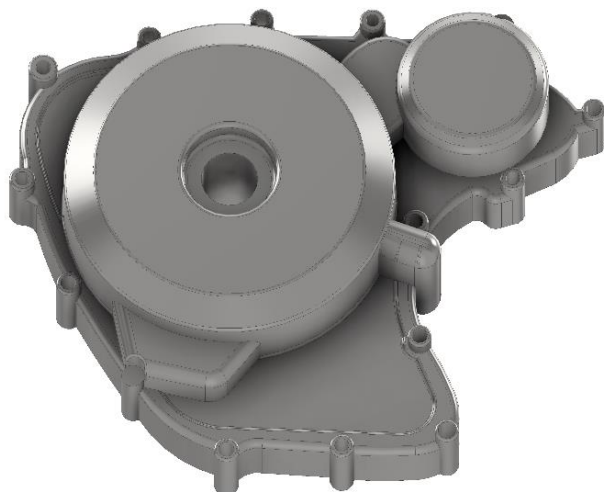
Z vybraných typů motor Nova 10-40 A2 S P12 není schopen poskytnout dostatečný točivý moment pro požadovanou aplikaci. Motory Nova 30-50 B6 P50 a Nova 30-50 B4 P70 naopak poskytují vysoký točivý moment v příliš nízkých otáčkách pro tuto aplikaci, což je také doprovázeno vyšší hmotností a obtížným zabudováním do víka motoru. Pro motor Nova 15 je k dispozici velké množství protokolů z měření v různých modifikacích s různými kontroléry. Z hlediska vhodnosti výkonnostních parametrů vychází nejlépe elektromotor Nova 15-50 B6 P30 (Obr. 30), který byl zvolen pro zástavbu do pohonu vozidla.



Obr. 30 Elektromotor Plettenberg NOVA 15-50 [173]

Pro tento vybraný motor s kontrolérem lze využít napětí 90 V a krátkodobě maximální proud až 260 A. Při vyšších proudech dochází k přehřívání elektromotoru, a proto jej nelze provozovat dlouhodobě při vysokých proudech.

Vzduchem chlazený elektromotor Nova 15-50 má největší vnější průměr statoru (včetně žebér) 128,5 mm [175], přičemž není potřeba uvažovat vůle rotující součásti. Pro zajištění možnosti montáže a dostatečného chlazení elektromotoru bylo potřeba odstranit část víka motoru nad alternátorem a nahradit ji elektromotorem, který je částečně zapuštěný (*Obr. 31* a *Obr. 32*), přičemž celková šířka motoru by zůstala téměř nezměněna.

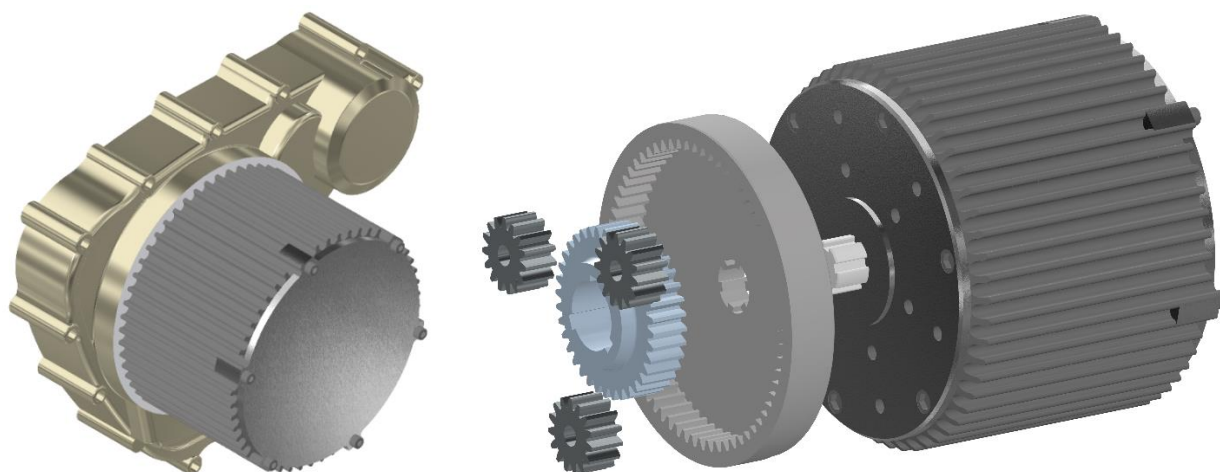


Obr. 31 Kryt alternátoru



Obr. 32 Kryt alternátoru modifikovaný

Vzhledem k rozdílným provozním otáčkám elektromotoru [176] a spalovacího motoru je nutné zařadit stálý převod mezi hřídelemi těchto motorů. Nejjednodušším způsobem realizace převodu je pomocí planetového převodu (*Obr. 33*) se zastaveným unašečem satelitů. Korunové kolo je tvarově spojeno s hřídelí elektromotoru, centrální kolo s klikovou hřídelí a satelity jsou na čepech osazeny do bloku motoru. Platil by tedy vztah (rovnice 2) a z něj vyplývající vztah (rovnice 3) při zastaveném unašeči satelitů.



Obr. 33 Zástavba planetového převodu a elektromotoru

Převodový poměr 36:66 je dán výkonnostními parametry elektromotoru a spalovacího motoru k zajištění neoptimálnějšího provozu. Z konce klikové hřídele by bylo odstraněno zúžení a bylo by nahrazeno centrálním kolem planetového převodu.

$$n_k \cdot z_k + n_c \cdot z_c = n_u \cdot (z_k + z_c) \quad (2)$$

$$n_k \cdot z_k = -n_c \cdot z_c \quad (3)$$

kde n_k jsou otáčky korunového kola; z_k je počet zubů korunového kola; n_c jsou otáčky centrálního kola; z_c je počet zubů centrálního kola; n_u jsou otáčky unašeče satelitů.

4.2.2 KONTROLÉR

Aby mohl být elektromotor využit pro sofistikovanější řešení, např. jako pohonná jednotka vozidla, potřebuje být řízen kontrolérem. Z výběru elektromotoru plynou parametry, které kontrolér (*Tab. 4*) musí splňovat:

- Vhodný pro BLDC motory;
- Schopný pracovat s výstupním napětím 90 V;
- Schopný pracovat s proudem 150 A;
- Chlazený vzduchem;
- Schopný rekuperovat.

Tab. 4 Technické specifikace kontrolérů elektromotoru [177–181]

Výrobce	Model	BLDC	Regen	U_{nom}	U_{max}	I_{con}	I_{max}	m	Cena
Kelly	KBL 96251	Ano	Ano	96 V	115 V	100 A	200 A	1,9 kg	499 USD
Kelly	KLS 96402-8080N	Ano	Ano	96 V	115 V	160 A	400 A	4,5 kg	499 USD
Kelly	KLS 96301-8080H	Ano	Ano	96 V	115 V	120 A	300 A	5,4 kg	499 USD
Plettenberg	MST 140-200	Ano	Ano	140 V	140 V	220 A	280 A	1,5 kg	1700 EUR
ATO	VC-75S-N-100	Ano	Ano	84 V	84 V	100 A	120 A	0,5 kg	280 USD
Golden Motors	EZ-B96800	Ano	Ano	96 V	120 V	320 A	800 A	2,4 kg	664 USD
Golden Motors	EZ-C120900	Ano	Ano	120 V	145 V	360 A	900 A	3 kg	799 USD

Kontrolér od výrobce ATO nesplňuje parametry I_{max} (maximální krátkodobě dodávatelný proud) a U_{nom} (nominální napětí). Kontrolér od výrobců Plettenberg a Golden Motors mají vysokou cenu vzhledem k požadavku na nízkou cenu. Kontroléry Kelly mají shodnou cenu a pracovní napětí, ale liší se hmotností a nominálními a peakovými hodnotami proudu. Vzhledem k velkému rozdílu hmotností mezi jednotlivými kontroléry by vybrán model KBL 96251 (*Obr. 34*), přestože odebíraný proud je vyšší než kontinuální dovolený proud, ale nižší než maximální dovolený proud. A to vzhledem k běžnému provozu vozidla, kde je nepravděpodobné dlouhodobé plné zatížení obou hnacích agregátů.



Obr. 34 Kelly KBL [177]

4.2.3 BALANČNÍ OBVOD AKUMULÁTOROVÉHO PAKETU

Akumulátory, stejně jako ostatní díly, mají v rámci výrobních tolerancí rozdíly kapacity, které udávají, jakým způsobem se mohou jednotlivé kusy lišit vzájemně mezi sebou. Pokud by nebyla tato skutečnost ošetřena, docházelo by k přebíjení nebo předčasnému vybití některých článků, což by nejen přímo ovlivňovalo jejich životnost, ale i chování celého paketu. Řešením proti předčasné degradaci jsou balanční obvody s aktivním balancerem. [86]

Lithiové články lze zapojovat do série nebo paralelně, čímž se mění celkové napětí a proud paketu. Je tedy třeba, aby ochranný obvod byl schopen pracovat se stejnými nebo většími parametry, tj. proudem a napětím. Zvolený elektromotor má rozsah napětí do 90 V, přičemž balanční obvody mohou pracovat s 24 sériově zapojenými články (84,6 V). V případě většího množství sériově zapojených článků cena obvodu neúměrně roste.

Jako nejvíce vhodný se ukázal BMS JK-B2A24S20P (Obr. 35), který za přijatelnou cenu zvládne monitorovat a regulovat články paralelně do celkového proudu 200 A a až 24 článků sériově.



Obr. 35 BMS JK-B2A24S20P [182]

4.2.4 BATERIE

Jako zdroj energie pro elektropohon je vhodný paket lithiových baterií, uspořádaný podle potřeb zvoleného motoru a jeho kontroléru (tedy napětí paketu, kapacity paketu, vybitího

a nabíjecího proudu) a také podle celkové hmotnosti a ceny paketu. Bateriový paket je zvolen podle požadavků vybraného elektromotoru a balančního obvodu, tedy vybíjecí proud 150 A a jmenovité napětí 86,4 V.

Vybrané použitelné běžně dostupné články (Tab. 5) pro pohon elektromotoru se zvolenými parametry jsou například:

Tab. 5 Technické specifikace lithium-iontových článků [183–186]

Li-ion články	ICR18650-HG2	INR18650-MJ1	US18650VTC6C6	US 21700VTC6A
Výrobce	LG	LG	Murata / Sony	Murata / Sony
Kapacita	3000 mA-h	3500 mA-h	3000 mA-h	4000 mA-h
Rozměry	18,3x65 mm	18,2x65,4 mm	18,3x65 mm	21,3x69,8 mm
Hmotnost	46 g	48 g	46 g	72,7 g
Napětí	3,6 V	3,6 V	3,6 V	3,6 V
Vybíjecí proud	20 A	10 A	20 A	30 A
Nabíjecí proud	1,3 C	0,5 C	1 C	2,25 C
Napětí nabitého	4,2 V	4,2 V	4,2 V	4,2 V
Cena za kus	239 Kč	149 Kč	199 Kč	210 Kč
Sériově	24	24	24	24
Paralelně	8	15	8	5
Článků v paketu	192	360	192	120
Hmotnost paketu	8,8 kg	17,3 kg	8,8 kg	8,7 kg
Kapacita	24 A-h	52,5 A-h	24 A-h	20 A-h
Napětí paketu	86,4 V	86,4 V	86,4 V	86,4 V
Vybíjecí I max	160 A	150 A	160 A	150 A
Nabíjecí I max	31,2 A	26,25 A	24 A	45 A
Cena paketu	45 888 Kč	53 640 Kč	38 208 Kč	25 200 Kč

Z vybraných článků je LG INR18650-MJ1 nejméně vhodný pro vysokou hmotnost a cenu paketu vlivem potřeby velkého množství článků pro dosažení požadovaného vybíjecího proudu. Články Murata US18650VTC6C6 obdobně jako články LG INR18650-MJ1 mají nízké nabíjecí proudy, které neumožňují generátorický provoz elektromotoru v přijatelných podmínkách. Články Murata (Sony) US 21700VTC6A (Obr. 36) nabízí výrazně nejvyšší nabíjecí proud, nejnižší hmotnost při nejmenším množství článků a výrazně nejnižší cenu paketu. Vlivem použití malého množství paralelně zapojených článků je kapacita paketu nižší než u ostatních. Byly tedy zvoleny do zástavby.

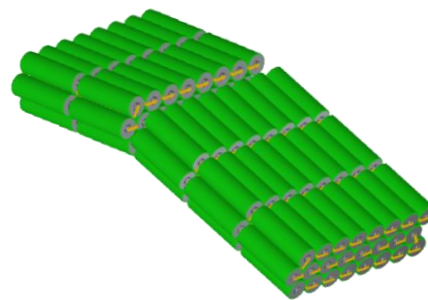


Obr. 36 Sony/Murata US 21700VTC6A [185]

Vzhledem k relativně velkému množství baterií není mnoho možností k umístění bateriového paketu. V podstatě jedinou vhodnou možností je využití prostoru mezi rámem pod sedadlem a zadním kolem (Obr. 37). Z tohoto prostoru je možné využít maximálně 215 mm široký, 130 mm vysoký a 410 mm dlouhý pás, aby nedošlo ke kontaktu s některou stávající částí motocyklu. Jednotlivé články je nejvhodnější umístit do tří vrstev po osmi kusech, tvořících sérii 24 článků. Po zařazení celkem pěti těchto skupin za sebe (z nutnosti respektovat tvar rámu) vzniká paket (Obr. 38), zabírající prostor 185 mm na šířku, 60 mm na výšku a 370 mm na délku, včetně mezer na uložení vodičů. Dále je třeba doplnit zakrytování bateriového paketu, aby nedošlo k mechanickému poškození ani vniknutí nečistot nebo vody.



Obr. 37 Umístění trakční baterie [187]



Obr. 38 Trakční baterie

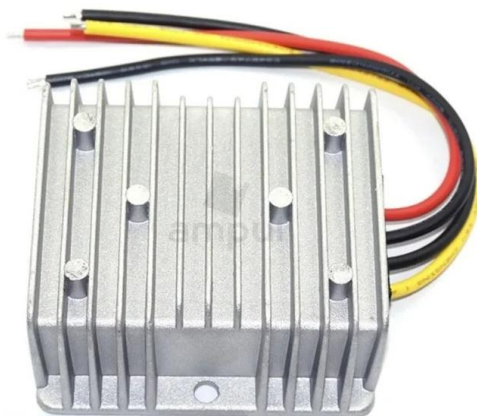
Kromě napájení elektromotoru je potřeba také zajistit napájení zbylých elektrických zařízení motocyklu, napájených stejnosměrným napětím 12 (potažmo 14,4) V, které by standardně bylo poskytováno baterií, která ale byla odstraněna [188, 189]. Řešením je použití druhého paketu, který je napájen přes DC/DC převodník z hlavní trakční baterie. Tato baterie slouží jako záložní pro případ, že by se vybila trakční baterie, aby bylo možné zprovoznit řídicí jednotky a bylo možné motocykl diagnostikovat, případně nastartovat bez jejich poškození. Druhým významem této baterie je stabilizování napájení palubních zařízení, kdy je možné

napájet konstantním proudem a napětím síť, nezávisle na aktuálním vybíjení trakční baterie, tzn. nezávisle na akceleraci a deceleraci motocyklu. Při použití stejných článků, jako u hlavního trakčního paketu, by byl optimální paket 1P4S (4 sériově zapojené články) s kapacitou 4 Ah, napětím 14,4 V, maximálním nabíjecím proudem 9 A, hmotností 291 g [185]. Tento paket by byl zabudován do prostoru původní olověné baterie.

4.2.5 DC/DC MĚNIČ

Jak již bylo zmíněno, je potřeba použít DC/DC měnič, který bude schopen redukovat napětí trakční baterie z 86,4 V na 12 (potažmo 14,4) V. Je také vhodné, aby byl teplotně odolný a opatřený ochranou před přetížením. Palubní systém po zanedbání startéru obsahuje nevelké množství elektroniky; vybíjení paketu bude relativně malé.

Vhodným měničem pro toto použití je např. Ampul AM2187 (*Obr. 39*), který je schopen pracovat se vstupním napětím 50 až 90 V, kdy výstupní napětí je 12 V a výstupní proud 10 A [190], což je pro uvažovaný palubní systém dostačující. Měnič je odolný vůči vlhkosti, širokému pásmu teplot a má ochranu před přetížením a zkratem. Další výhodou je hmotnost 280 g a malé rozměry.



Obr. 39 Ampul AM2187 [190]

4.2.6 ŘÍDICÍ JEDNOTKA

Pro propojení řídicí jednotky motoru, kontroléru elektromotoru, balančního obvodu akumulátorů a dalších dílů je zapotřebí doplnit hybridní řídicí jednotku. Tato jednotka má za úkol sbírat aktuální informace o vozidle ze senzorů a porovnávat je s uloženou databází. V databázi je předdefinováno několik stavů, ve kterých se může vozidlo nacházet. Na základě vyhodnocení aktuálního stavu předá jednotka pokyny dílčím podsystémům, na základě kterých zkorigují své aktuální parametry. Tímto způsobem je například řízeno rekuperační brzdění nebo zapínání a vypínání spalovacího motoru. [191–193]

Existují již předpřipravená řešení pro hybridní řídicí jednotku, která mají již základní operace, nutné pro zprovoznění, vyřešené. Hybridní jednotku lze ale také naprogramovat z běžně programovatelné řídicí jednotky, která má požadované vstupy a výstupy [191–193]. Mezi požadované vstupy patří poloha škrticí klapky, pozice ovladače brzd, stav nabití akumulátorů, otáčky spalovacího motoru, parametry elektromotoru nebo aktuální stav

převodovky. Mezi požadované výstupy patří řídicí jednotka spalovacího motoru, kontrolér elektromotoru, ovládání převodovky nebo ovládání balančního obvodu akumulátorů.

Jednou z možných variant je například Woodward SECM 70 (Small Engine Control Module - *Obr. 40*), který disponuje 14 analogovými a 5 digitálními vstupy, je schopný komunikovat po 2 kanálech CAN a umožňuje zapojení lambda sond, senzoru klepání a dalších senzorů. Programování hybridní řídicí jednotky není cílem této práce a práce se jím nezabývá.



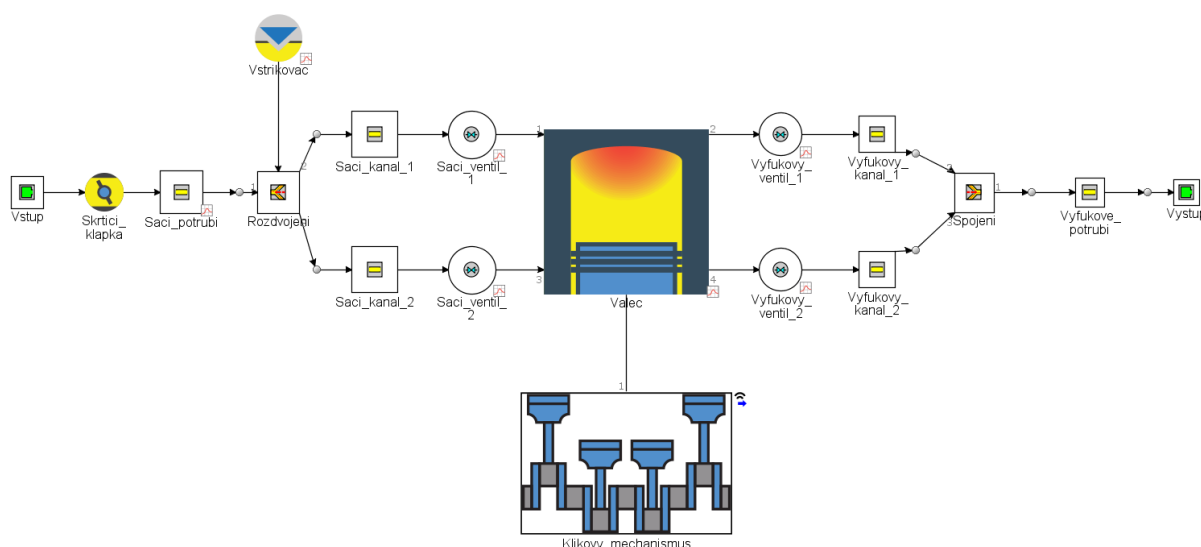
Obr. 40 Woodward SECM 70 [194]

4.3 SIMULACE

Pro dosažení validních výsledků jsou vytvořeny funkční modely hnacího ústrojí v prostředí GT Suite. Protože kompletní charakteristika spalovacího motoru není k dispozici, je třeba sestavit model jednoválcové motorové jednotky, která vykazuje výsledky, korespondující s měřením na válcové zkušebně. Ze vzniklého modelu je možné získat dopočítané výsledky, které slouží jako vstup do simulace konvenčního motocyklu i hybridního ústrojí.

4.3.1 SIMULACE JEDNOVÁLCOVÉ MOTOROVÉ JEDNOTKY

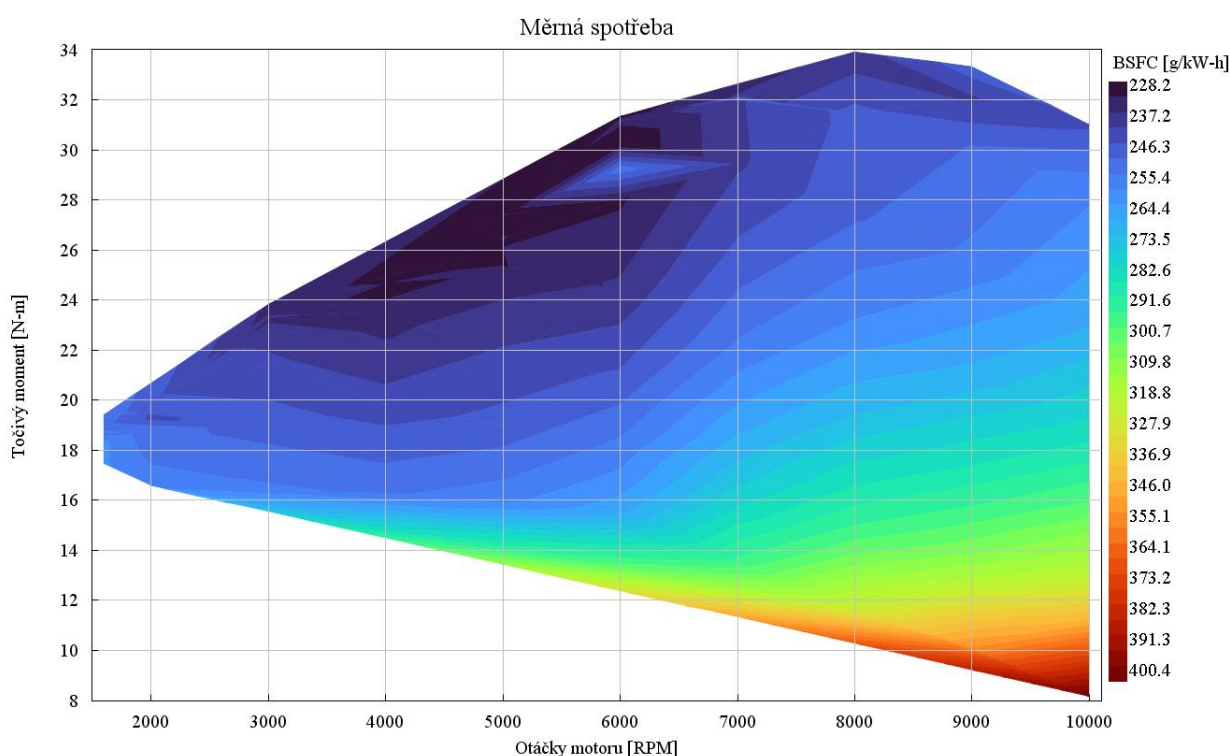
V programu GT Suite byl sestaven model jednoválcové motorové jednotky (*Obr. 41*), který svými parametry simuluje skutečný motor.



Obr. 41 Model jednoválcové motorové jednotky

Přepočítaná palivová mapa byla nahrána do modelu vstřikovače, na základě čehož byly získány informace o spotřebě paliva v jednotlivých jízdních režimech.

Pomocí vstřikovače s nahranou palivovou mapou bylo možné napodobit chování motoru při různých režimech. Zatížení bylo určováno natočením škrticí klapky, odstupňované po 10 % (9 °) natočení. Dostupné údaje o ventilech a klikovém mechanismu byly převzaty z materiálů od výrobce. Parametry, které nebylo možné dohledat, jako například tvar vaček, jejich přesné časování nebo mapa předstihů zážehu, byly řešeny jako parametry modelu pomocí optimalizace průběhu točivého momentu. Model vlivem diskretizace nevystihuje přesné chování motoru za všech situací, což vede k mírným odlišnostem průběhu výkonnostních parametrů při nižším zatížení. Hlavním zdrojem odlišností je ovšem výfukový systém, který je neoriginální, a kde dochází ke znatelným změnám proudění spalin. Výsledkem je úplná charakteristika motoru (Obr. 42).

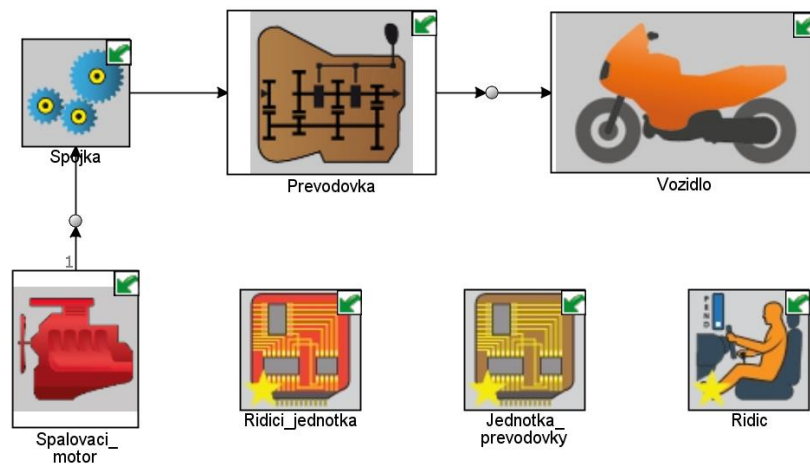


4.3.2 SIMULACE KONVENČNÍHO MOTOCYKLU

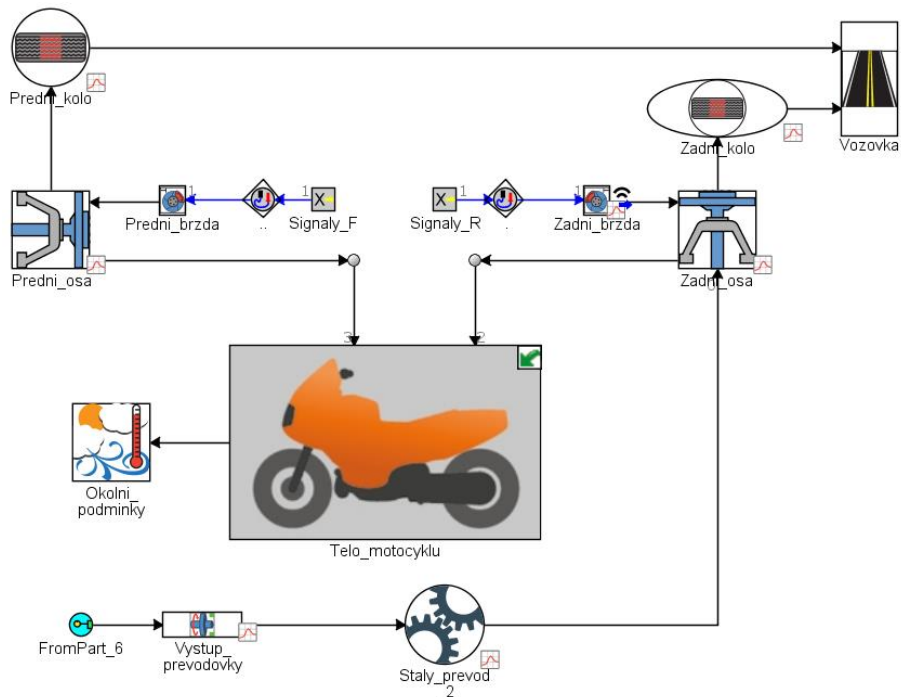
K sestavení funkčního modelu konvenčního motocyklu (Obr. 43) je potřeba mapa spalovacího motoru, která využívá výsledky z předchozího modelu. Podle průběhu byla určena také volnoběžná spotřeba, tedy spotřeba stojícího vozidla s běžícím motorem.

Na motor navazuje spojka s parametry, odpovídajícími skutečné spojce, na kterou dále navazuje model převodovky. Model převodovky obsahuje informace o převodových poměrech a momentech setrvačnosti. Výstupní hřídel převodovky vstupuje do modelu podvozku motocyklu (Obr. 44), konkrétně stálého převodu, který je umístěn na zadní ose kola. Samotné zadní kolo s brzdou odpovídá rozměrem i momentem setrvačnosti [195]

skutečnému kolu. Model motocyklu obsahuje informace o poloze těžiště [195], hmotnosti, součiniteli aerodynamického odporu aj.



Obr. 43 Model konvenčního motocyklu



Obr. 44 Model podvozku motocyklu

Maximální dosažitelná rychlost vozidla je dána dynamickým poloměrem kola, otáčkami motoru a převodovými poměry dle rovnice (4):

$$v_{max} = \frac{n_{max} \cdot 2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{r_d}{i_6 \cdot i_p \cdot i_s} \cdot \frac{60^2}{1000} = \frac{10200 \cdot \pi}{30} \cdot \frac{0,2993 \cdot 3,6}{0,84 \cdot 2,6667 \cdot 3} = 171,27 \text{ km/h} \quad (4)$$

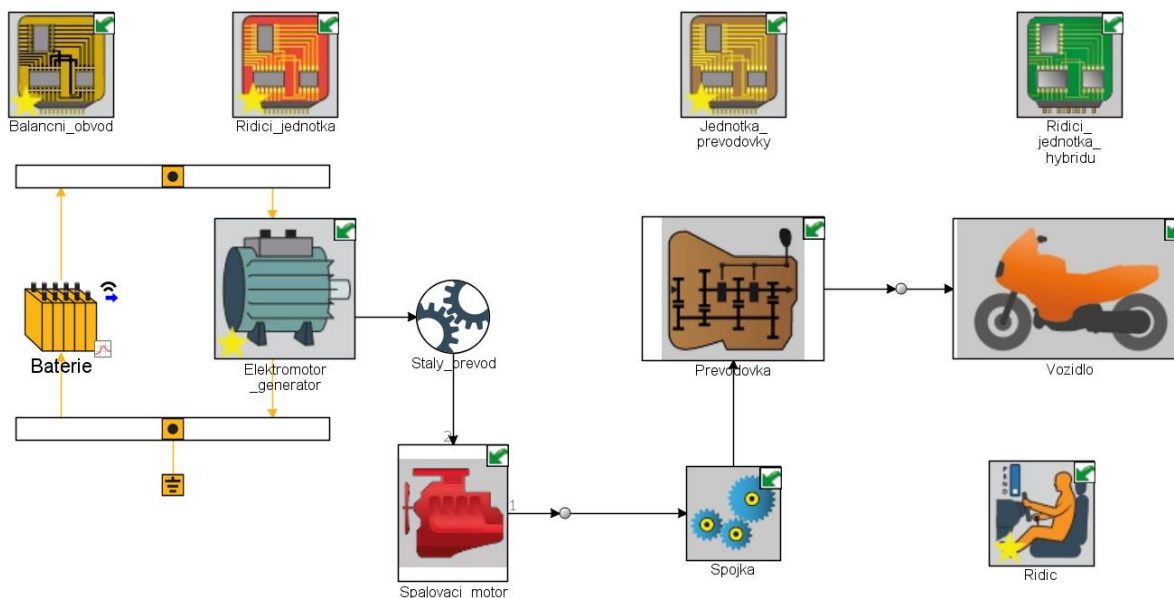
kde v_{max} je maximální rychlost; n_{max} jsou maximální otáčky motoru; r_d je dynamický poloměr kola; i_6 je převodový poměr 6. rs; i_p je převodový poměr primárního převodu; i_s je převodový poměr sekundárního (stálého) převodu.

Řízení motoru má na starosti řídicí jednotka motoru (ECU), obsahující informace o provozních podmínkách motoru. Řízení převodovky zajišťuje řídicí jednotka převodovky (TCU), kde je nahrána strategie řazení mezi jednotlivými stupni. Těmto jednotkám je nadřazený model řidiče (Driver), který na základě požadavků na aktuální parametry vozidla určuje, jaké chování mají jednotlivé části ústrojí vykazovat. Jedná se konkrétně o točivý moment motoru, zařazený rychlostní stupeň, sepnutí a rozepnutí spojky, aplikaci brzdné síly, atd.

4.3.3 SIMULACE HYBRIDNÍHO ÚSTROJÍ

Pro model hybridního ústrojí byla část prvků, které nejsou klíčové pro tuto práci, použita z poskytnutých šablon a upravena podle požadovaných parametrů (např. balanční obvod akumulátoru).

Model hybridního ústrojí (Obr. 45) je rozšířením předchozího modelu konvenčního motocyklu. Rozdílem je navýšená hmotnost a dodatečné komponenty. Elektromotor odpovídá parametrům, naměřeným výrobcem za daných podmínek. K elektromotoru je připojen akumulátorový paket 24S5P s parametry odpovídajícími skutečným článkům Murata US 21700VTC6A. Tyto články jsou vybíjeny a nabíjeny konstantním proudem. Jejich stav nabití je udržován optimálně mezi 95 a 70 %, ale využívat elektromotor k pohonu lze až do 30 % nabití baterií. Vývod elektromotoru vstupuje přes stálý planetový převod do spalovacího motoru jakožto příslušenství s převodovým poměrem 36:66 při modulu ozubení 1,5 mm. Tento stálý převod umožňuje sjednocení pásma maximálního točivého momentu elektromotoru s otáčkami nejvyššího točivého momentu spalovacího motoru.



Obr. 45 Model hybridního motocyklu

Elektromotor během všech jízdních zkoušek pracuje na nižší než maximální výkon. Použitý proud, potažmo výkon, je limitovaný počtem paralelně zapojených článků v bateriovém paketu. Výrobce poskytuje pro tento elektromotor měření s proudy dosahujícími 260 A [176].

Pro toto použití je maximální proud z baterií 150 A. Režimy, ve kterých bude elektromotor během provozu pracovat, nemohou způsobit přehřátí elektromotoru. Vzhledem k umístění elektromotoru bude výrazně ovlivňována jeho teplota prouděním vzduchu kolem něj. Nelze ale jednoduše určit, jaká bude výměna tepla s okolím, protože proudění vzduchu zásadně ovlivňuje deflektor motocyklu a přímá blízkost spalovacího motoru, který odklání část proudění vzduchu a sálá teplo.

4.3.4 SIMULACE ŘÍDÍCIHO SYSTÉMU

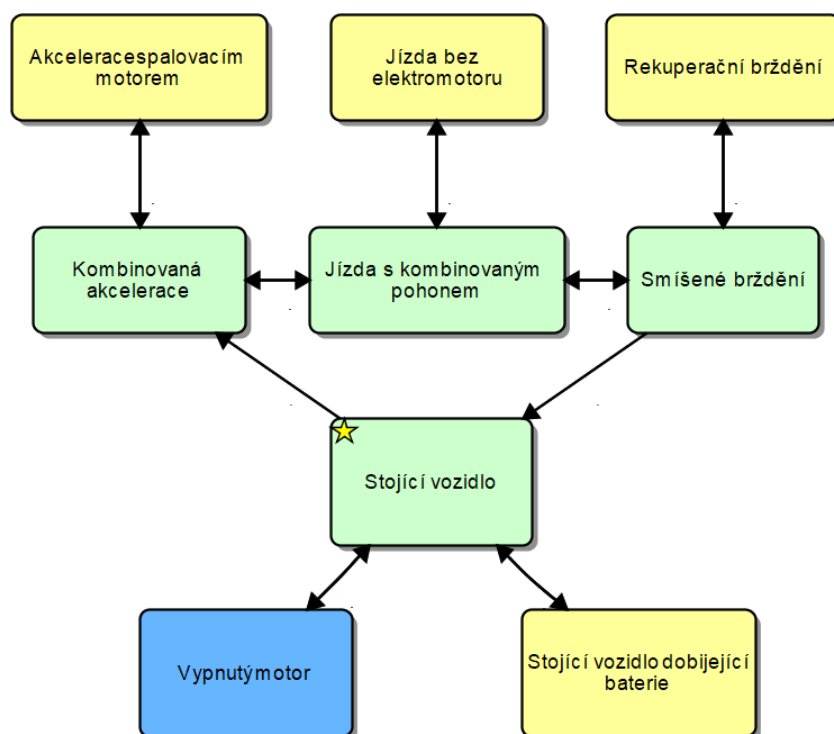
Pro hybridní ústrojí je klíčové, aby bylo schopno pracovat v různých jízdních režimech při definovaných podmínkách. Z toho důvodu je nutné použití řídicí jednotky, která má tyto režimy definovány a je schopna mezi nimi přepínat.

V rámci simulace byl sestaven systém vzájemně provázaných stavů, ve kterých se hybridní ústrojí může nacházet, včetně podmínek přepínání mezi jednotlivými stavy. Tohoto lze dosáhnout pomocí prvku `if/elseif/else`, kde jsou podmínky přecházení mezi režimy zcela přímočaré, ale s rostoucím množstvím stavů, ze kterých může ústrojí přecházet by bylo obtížné podchytit veškeré možné scénáře. Další možností vytvoření řídicí struktury je pomocí grafické metody, kdy jsou definovány stavy a jejich parametry (točivý moment spalovacího motoru nebo elektromotoru), tato metoda byla použita.

První snahou bylo podchytit veškeré režimy, ve kterých se ústrojí může nacházet a nadefinovat všechny proveditelné způsoby přechodů mezi jednotlivými režimy. Výsledkem bylo 11 provozních stavů, propojených 63 vazbami (*Příloha 1*). Jak je ze schématu patrné, byla tato struktura velice složitá a jakékoliv úpravy byly náročné nejen z časových důvodů, ale také vzhledem k výskytu chyb, které bylo potřeba odhalit a eliminovat při jakémkoliv průběhu testování.

Vzhledem k obtížím, spojeným se složitostí systému vznikla snaha co nejvíce zjednodušit řídicí strukturu při zachování všech jejích funkcí. Základní myšlenkou bylo, že přechod mezi jednotlivými stavy nemusí probíhat diskrétní změnou (např. z akcelerace na brzdění nebo naopak), ale ve skutečnosti prochází rovnovážnou pozicí. Podle této myšlenky bylo eliminováno velké množství vazeb. Společně se změnou vazeb byly také některé provozní stavy spojeny, popřípadě eliminovány, protože již pozbývaly zásadní funkce.

Vznikla řídicí struktura (*Obr. 46*) s devíti členy a 16 vazbami, vycházející ze 4 základních stavů (zelené), které jsou vzájemně propojené a ústrojí mezi nimi volně přechází. Jedná se o stav zastaveného vozidla, akcelerace, jízdy s malým zrychlením a stav brzdění. Z každého ze zmíněných režimů může přejít ústrojí do dalších 4 doplňkových stavů (žluté), pokud je stav baterií nižší než požadovaný nebo je záporné zrychlení dostatečně malé. Jedná se o zastavené vozidlo dobíjející baterii, akceleraci bez pomoci elektromotoru, jízdu s malým zrychlením, při které jsou dobíjeny baterie a rekuperační brzdění.

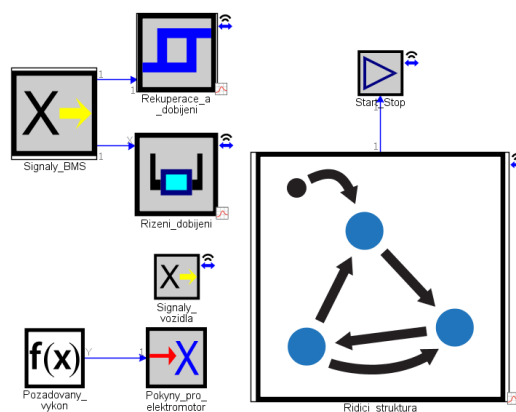


Obr. 46 Řídicí struktura hybridního motocyklu

Vazby mezi jednotlivými stavy jsou určeny logickými podmínkovými rovnicemi, využívajícími porovnávání hodnot a booleovských operátorů. Zde se parametry ústrojí a aktuální požadované parametry (tj. požadovaný točivý moment, pozice brzdového ovladače, zatížení, stav nabití baterií, otáčky motoru, rychlost vozidla nebo zrychlení vozidla) porovnávají s číselnými hodnotami nebo zvolenými konstantami, jako jsou např. minimální a maximální točivý moment spalovacího motoru nebo elektromotoru, horní a spodní hodnota stavu nabití baterií pro zapojení elektromotoru k pohonu nebo naopak k aktivnímu dobíjení baterií. Při splnění podmínek (*Příloha 2*) přechází ústrojí mezi danými stavy.

Aktuální informace o stavu vozidla jsou přebírány z ostatních částí modelu, požadované parametry jsou dopočítávány pomocnými prvky (*Obr. 47*) pro řízení dobíjení nebo pro požadovaný točivý moment k dobíjení baterií. Motor je během dynamických testů zapnutý a při stání má nenulovou volnoběžnou spotřebu, pouze při zařazení neutrálu se motor vypíná.

Systém je řízen mj. aktuálními parametry vozidla, kdy jsou stanoveny limitní hodnoty. Bylo ovšem potřeba pro jednotlivé přechody použít hysterezi, aby nedocházelo k oscilacím kolem mezní hodnoty s neustálými změnami jízdního režimu. Zavedení hysterezní smyčky může mít za následek vyhodnocení stejné situace při několika opakováních různými způsoby, kdy je splněna dříve jiná z podmínek přechodu mezi stavy než v případě předchozím či následujícím.



Obr. 47 Řídicí struktura včetně pomocných prvků

4.3.5 SIMULACE JÍZDNÍCH TESTŮ

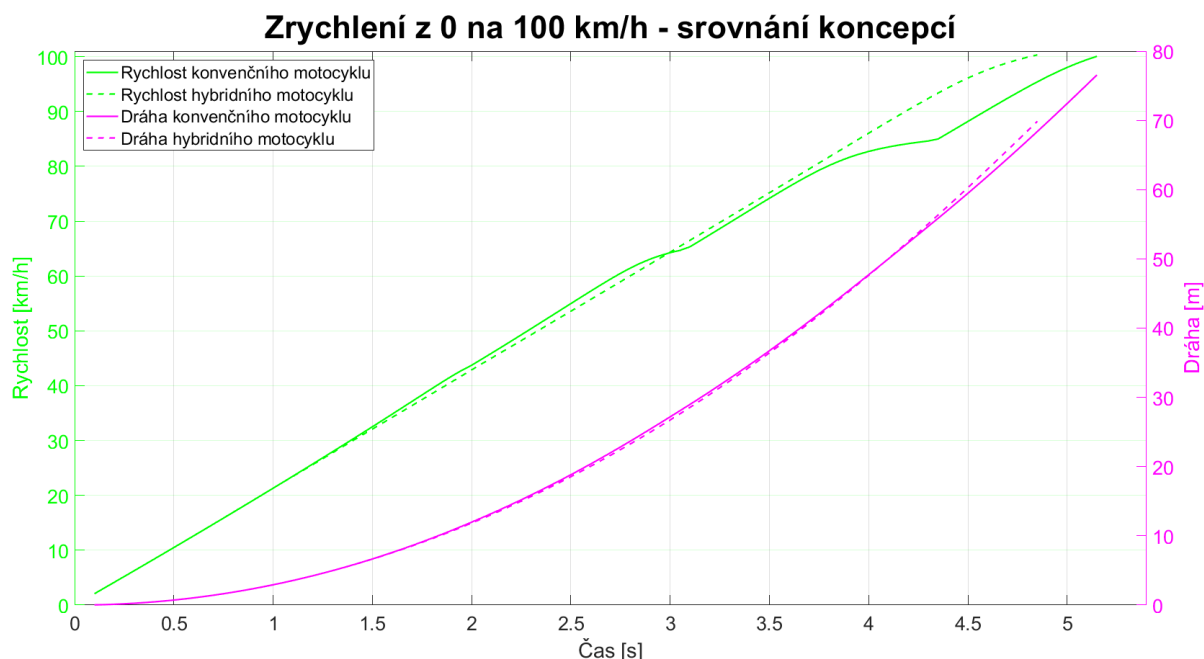
V rámci zjišťování efektu zapojení elektromotoru do hnacího ústrojí je sledován vliv na zrychlení, spotřebu paliva a dojezd na plnou nádrž. Toho je docíleno pomocí standardizovaných jízdních cyklů i vlastních jízdních scénářů. Všechny tyto jízdní cykly jsou pro možnost srovnání provedeny jak pro model konvenčního motocyklu, tak pro model hybridního motocyklu. Je potřeba uvažovat diskretizaci modelu, která může způsobit odlišnosti od zkušebního motocyklu a skutečného konvenčního motocyklu. V rámci simulací je kromě dodatečného točivého momentu zohledněn také nárůst hmotnosti vozidla.

Provedeny byly testy při plném zatížení, tj. zrychlení z 0 na 100 km/h, zrychlení z 60 na 130 km/h, zrychlení z 60 na 150 km/h a sprint na 1 km. Dále byly provedeny standardizované jízdní testy NEDC, WLTC, WMTC (přestože ani NEDC ani WLTC nejsou určeny pro motocykly). Dále byly sestaveny jízdní cykly ke zjištění správné funkce hybridního ústrojí, např. rekuperace při brzdění, udržování baterií v provozním stavu nabití, odlehčení spalovacímu motoru při rozjezdech, a tím vliv na spotřebu. Mezi tyto sestavené cykly patří projetí 20 po sobě následujících WMTC cyklů, což má za úkol monitorovat vybíjení baterie. Dále byl vytvořen mimoměstský cyklus dlouhý 90 km, jehož projetí trvá 105 minut při nerespektování omezení rychlosti (krátkodobě dosaženo rychlosti 125 km/h). Byl sestaven také městský cyklus, simulující reálný průjezd Brnem v dopravní špičce, dlouhý bezmála 21 km a trvající 61 minut. Také byl sestaven dálniční cyklus, který je dlouhý 58,8 km a napodobuje jízdu po dálnici při rychlosti 130 km/h s opakovaným snížením rychlosti, které odpovídá dávání přednosti při předjíždění pomalejších vozidel. K demonstraci rozdílu mezi oběma koncepcemi byl sestaven taktéž okruhový test, kdy byla stanovena rychlost v závislosti na dráze, která odpovídá rovinkám a zatáčkám smyšleného závodního okruhu.

ZRYCHLENÍ Z 0 NA 100 KM/H

Zrychlení z 0 na 100 km/h je jeden z nejběžnějších testů, který se provádí při testování vozidel. Hodnotí se parametry, jako je čas, za který vozidlo akceleruje, dráha, kterou při tom

urazí nebo množství paliva, které spotřebuje. Byla provedena simulace pro konvenční (Příloha 3) a hybridní motocykl (Příloha 4) a klíčové výsledky byly srovnány (Obr. 48).



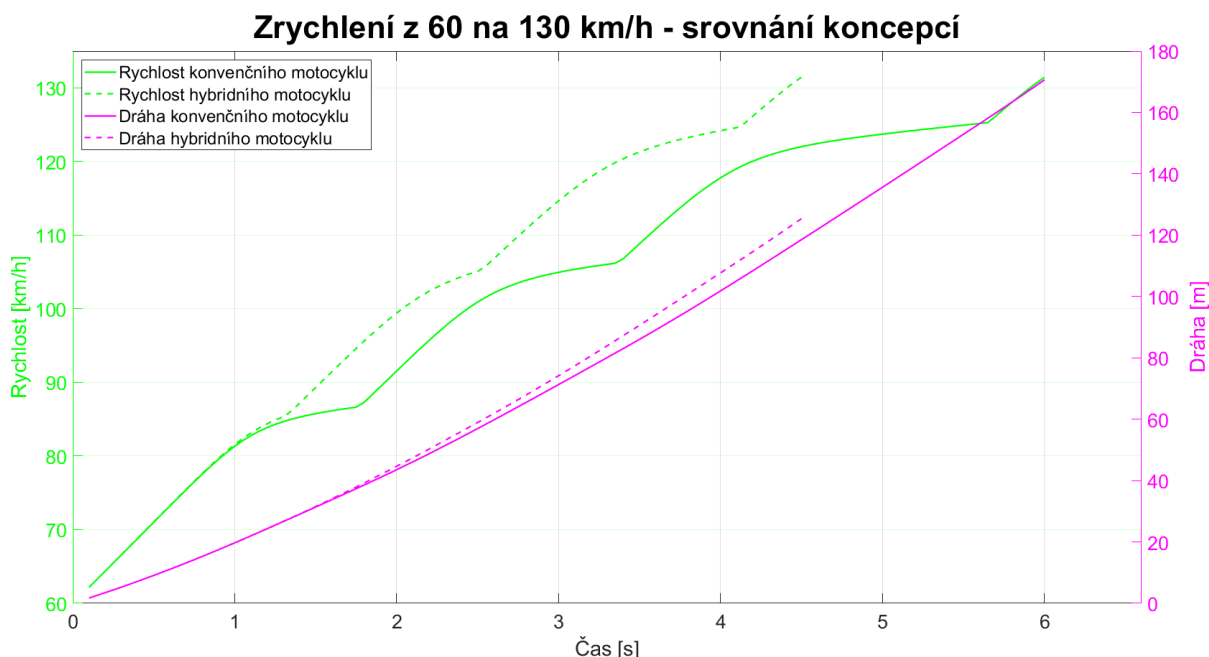
Obr. 48 Zrychlení z 0 na 100 km/h

V případě zrychlení má velký vliv úprava výfukového systému, čímž se přesunulo maximum točivého momentu do vyšších otáček, což ale způsobuje horší akceleraci v nižších otáčkách.

Výrobce KTM oficiálně nezveřejnil čas zrychlení z 0 na 100 km/h, ale výsledky nezávislých testů udávají pro neupravené stroje hodnoty kolem 5,6 s (6,15 s [196]; 6,49 s [197]; 5,68 s [198]). Průměrné zrychlení se v případě zavedení hybridního ústrojí zvýší z 5,83 m/s² na 5,92 m/s², a tím se zkrátí i dráha, potřebná pro toto zrychlení z 76,5 m na 68,8 m a čas akcelerace z 5,15 s na 4,81 s (zlepšení o 6,6 %). Vlivem kratší dráhy a času se sníží také množství paliva potřebné ke zrychlení z 10,8 g na 10,1 g. Skutečný točivý moment elektromotoru je 1,83krát větší, než točivý moment, přenesený na klikovou hřídel přes stálý převod (vynesený v grafu).

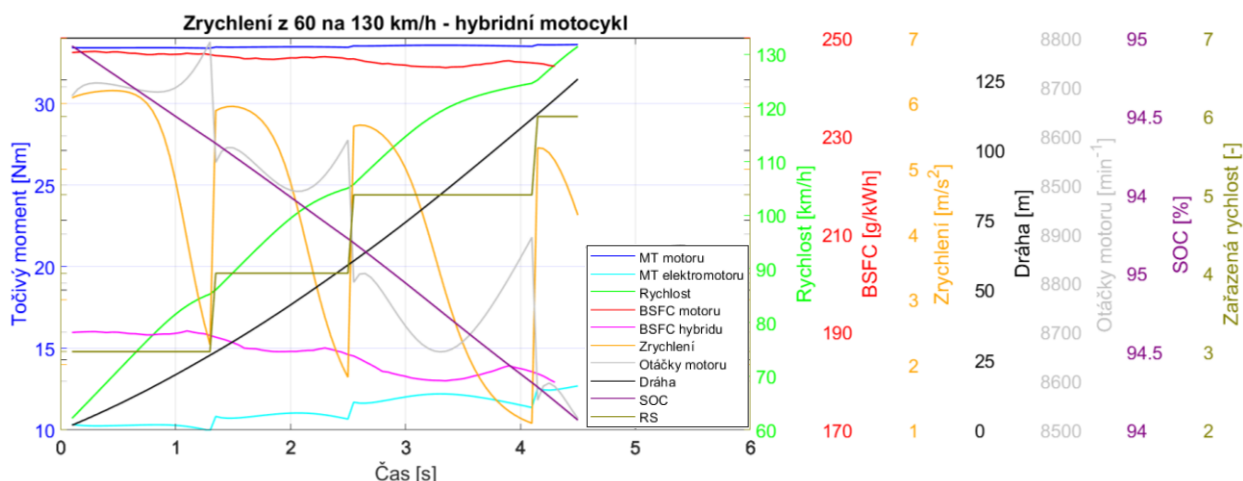
ZRYCHLENÍ Z 60 NA 130 KM/H

Zrychlení z nenulové rychlosti zvyšuje říditelnost motocyklu a částečně eliminuje vliv jezdce na výsledek. Zrychlení z 60 na 130 km/h simuluje nájezd na dálnici a není problémem ani pro konvenčního stroje (7,76 s [198]). Průměrné zrychlení se v případě zavedení hybridního ústrojí zvýší z 4,093 m/s² na 5,047 m/s², a tím se zkrátí i dráha, potřebná pro toto zrychlení z 168,7 m na 122,1 m a čas akcelerace z 5,95 s na 4,41 s (rozdíl 25,9 %). Na toto zrychlení bylo potřeba 12,4 g paliva pro konvenční motocykl a 9,3 g paliva pro hybridní. Průběh točivého momentu, měrné spotřeby, rychlosti, dráhy a zrychlení konvenčního a hybridního motocyklu je uveden v příloze (Příloha 5 a Příloha 6). Srovnání dráhy a rychlosti obou koncepcí je zobrazen na obrázku (Obr. 49).



Obr. 49 Zrychlení z 60 na 130 km/h

Pro všechny jízdní testy se kromě rychlosti a dráhy pozoruje velké množství dalších veličin, které ale nemohou být, s ohledem na přehlednost grafů, vyznačeny u komplikovanějších a delších testů. Velká část sledovaných veličin na znázorněna v grafu (Obr. 50). Jedná se o veličiny, které jsou v grafech v příloze, tj. rychlost, zrychlení, dráha, točivý moment spalovacího motoru, točivý moment elektromotoru a BSFC motoru, ale kromě toho také otáčky spalovacího motoru, stav vybíjení baterií, zařazený rychlostní stupeň, nebo BSFC hybridu (spalovací motor s pomocí elektromotoru). Kromě zmíněných byly sledovány ještě další parametry.

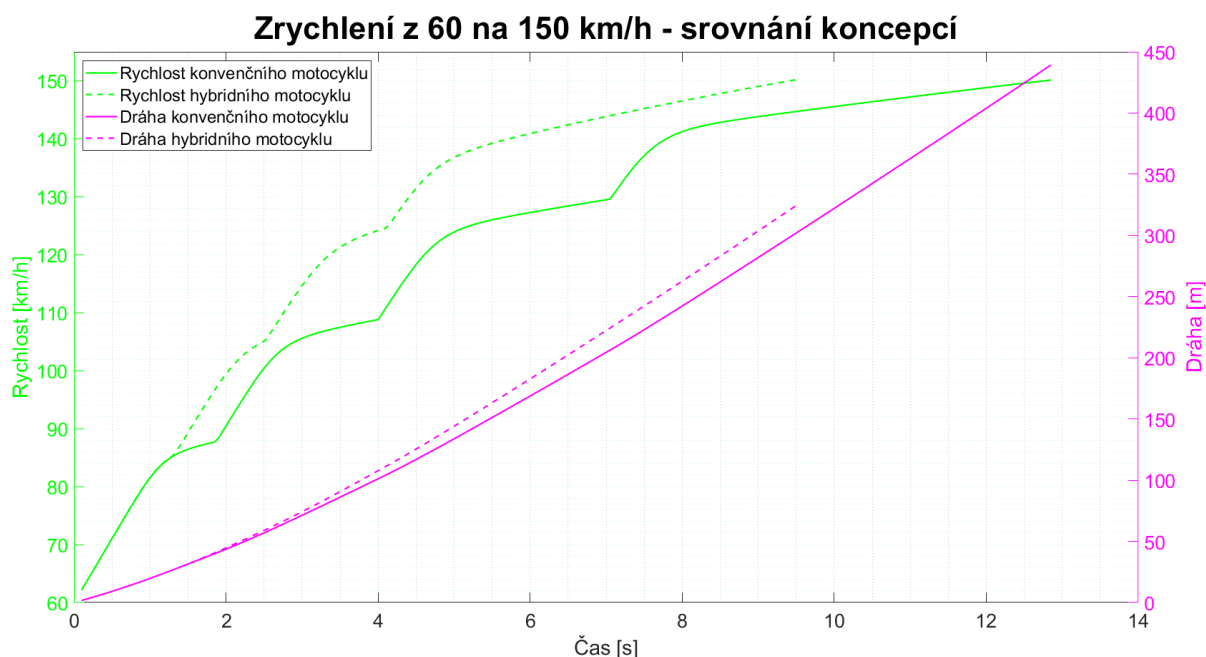


Obr. 50 Podrobný přehled sledovaných veličin - Zrychlení z 60 na 130 km/h

ZRYCHLENÍ Z 60 NA 150 KM/H

V případě zrychlení z 60 na 150 km/h se blíží konvenční motocykl svému konstrukčnímu limitu a výsledek je velmi závislý na okolních podmínkách při testování (13,27 s [198],

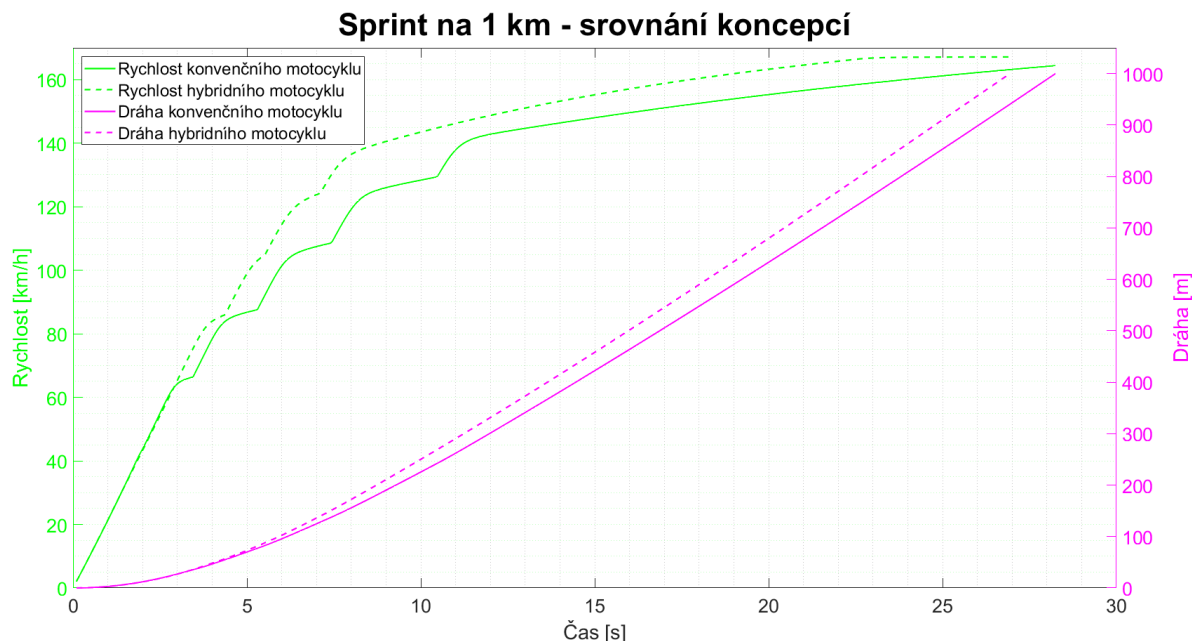
13,41 s [196]). Průměrné zrychlení se v případě zavedení hybridního ústrojí zvýší z $3,128 \text{ m/s}^2$ na $4,099 \text{ m/s}^2$, a tím se zkrátí i dráha, potřebná pro toto zrychlení z 437,1 m na 320,8 m a čas akcelerace z 13,2 s na 9,4 s (rozdíl 28,8 %). Na toto zrychlení bylo potřeba 27,1 g paliva pro konvenční motocykl a 19,9 g paliva pro hybridní. Průběh točivého momentu, měrné spotřeby, rychlosti, dráhy a zrychlení konvenčního a hybridního motocyklu je v příloze (*Příloha 7 a Příloha 8*). Srovnání dráhy a rychlosti obou koncepcí je na obrázku (*Obr. 51*).



Obr. 51 Zrychlení z 60 na 150 km/h

SPRINT NA 1 KM

Sprint na 1 km je dalším z ukazatelů rozdílů jednotlivých hnacích ústrojí. Model konvenčního motocyklu urazil vzdálenost za 28,3 s, přičemž dokázal zrychlit nejvíce na 164 km/h, ale maximální rychlosti nedosažnul. V případě hybridního ústrojí byla vzdálenost uražena za 27,0 s (rozdíl 4,6 %) a maximální rychlosti bylo dosaženo za 22,5 s. Konvenční motocykl spotřeboval 60,6 g a hybridní 55,1 g paliva. Průběh točivého momentu, měrné spotřeby, rychlosti, dráhy a zrychlení konvenčního a hybridního motocyklu je v příloze (*Příloha 9 a Příloha 10*). Srovnání dráhy a rychlosti obou koncepcí je na obrázku (*Obr. 52*).



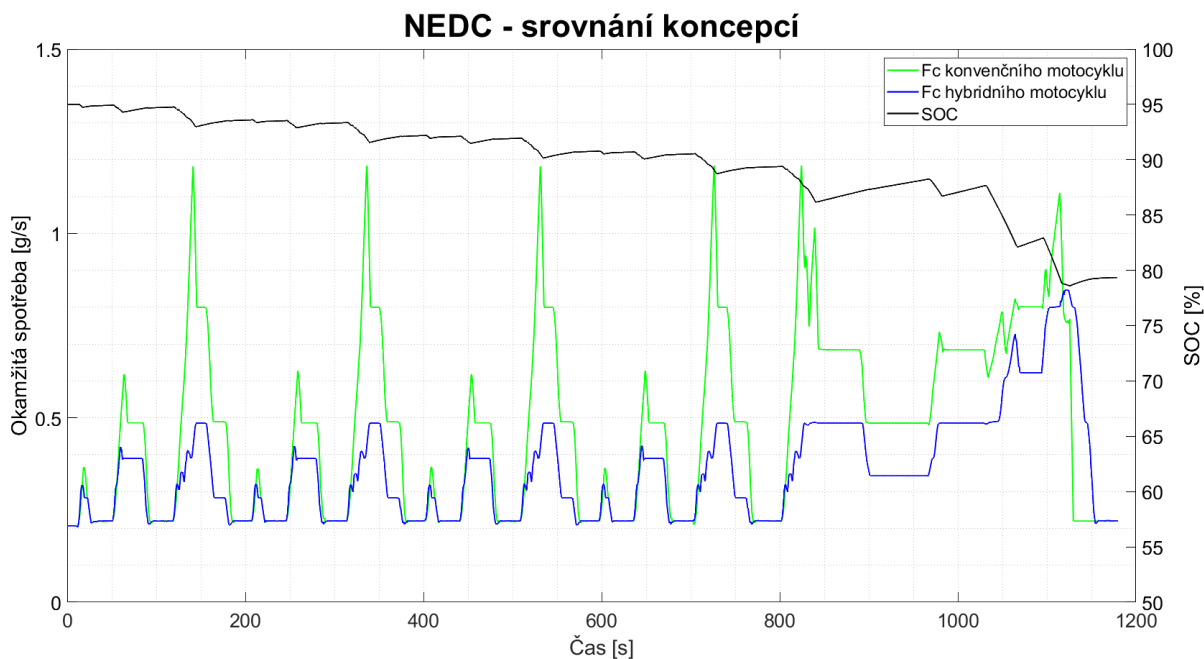
Obr. 52 Sprint na 1 km

JÍZDNÍ CYKLY

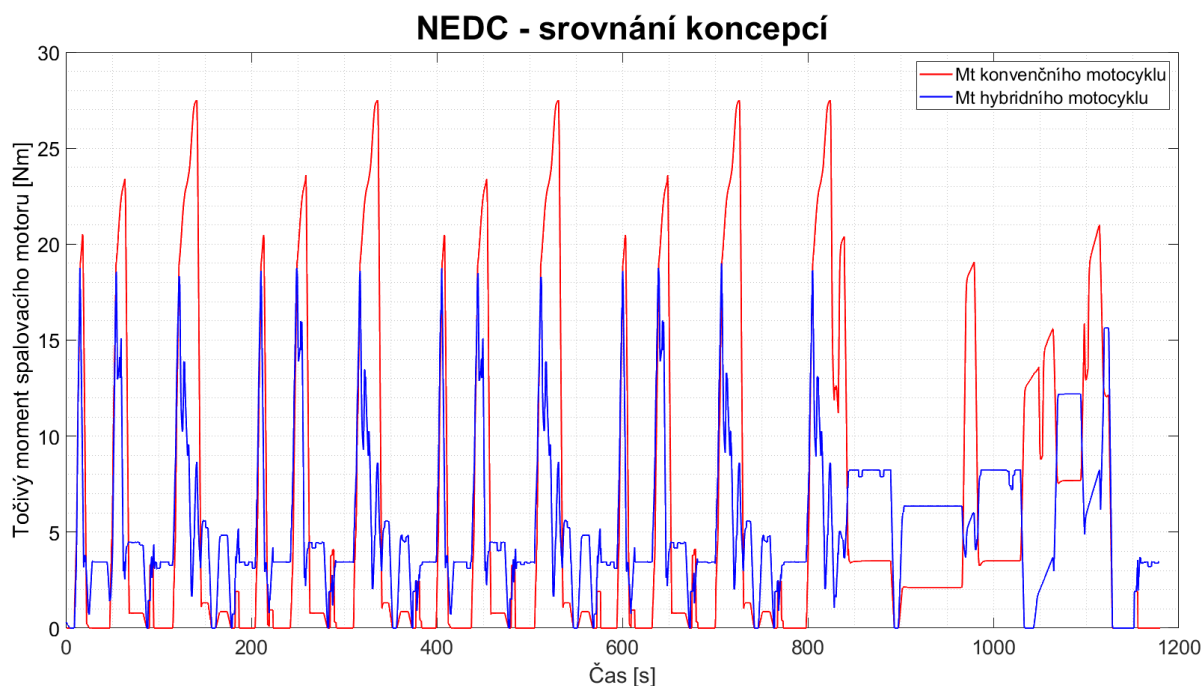
Jízdní cykly s předepsaným průběhem rychlosti v čase byly provedeny pro modely obou ústrojí, kdy nebyly sledovány emise, ale spotřeba vozidla. Řadící strategie byla pro konvenční i hybridní vozidlo stanovena tak, aby skutečný průběh rychlosti byl velmi podobný předepsanému průběhu, ale také, aby spotřeba byla co možná nejnižší. Vzhledem k možnosti zadání pouze jediných parametrů řazení dochází k nepatrným odchylkám od ideálního průběhu akcelerace, takže se ураžená vzdálenost lehce liší.

NEDC

Jízdní cyklus NEDC trvá 1180 s a je dlouhý 10966 m [199]. Simulace testu byla provedena pro model obou ústrojí, kdy model konvenčního ústrojí spotřeboval 559,5 g paliva a model hybridního ústrojí 415,9 g paliva na dokončení cyklu. Jak je patrné v grafu (Obr. 54), tak přítomnost elektromotoru snížila zatížení elektromotoru při akceleraci, a tím také spotřebu paliva (Obr. 53). Průběh točivého momentu, rychlosti vozidla a okamžité spotřeby konvenčního motocyklu je znázorněn na grafu v příloze (Příloha 11). Pro hybridní motocykl je kromě aktuální spotřeby a točivého momentu spalovacího motoru znázorněn také stav nabití akumulátorů (Příloha 12).



Obr. 53 Srovnání spotřeby obou koncepcí při NEDC

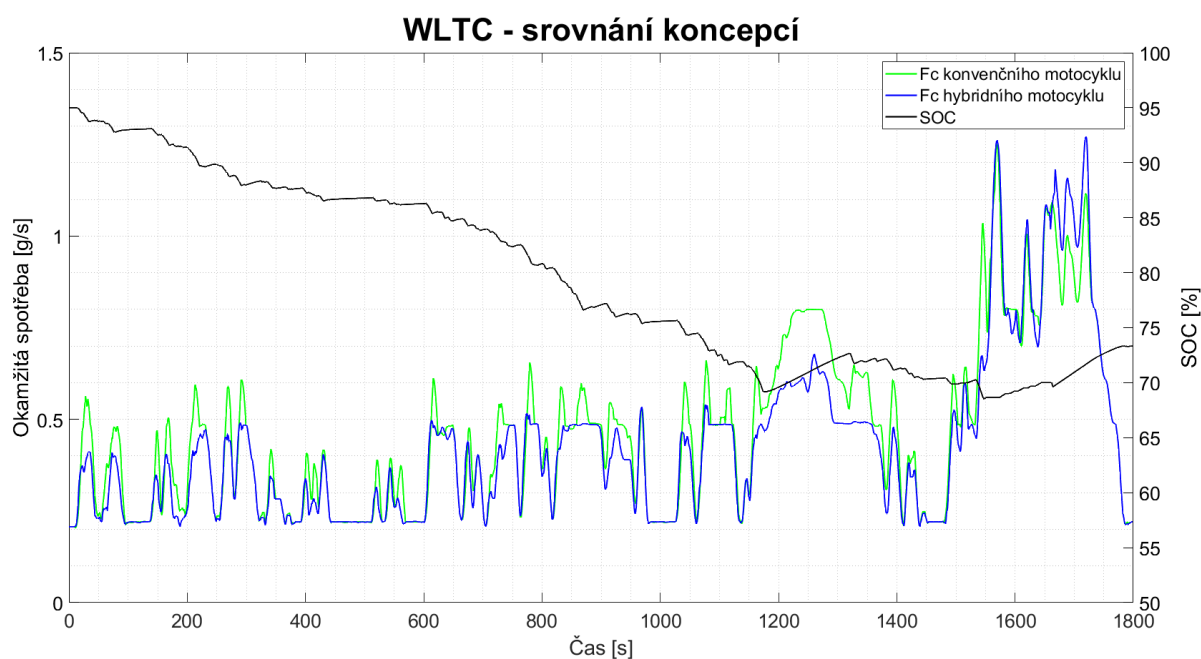


Obr. 54 Srovnání točivého momentu obou koncepcí při NEDC

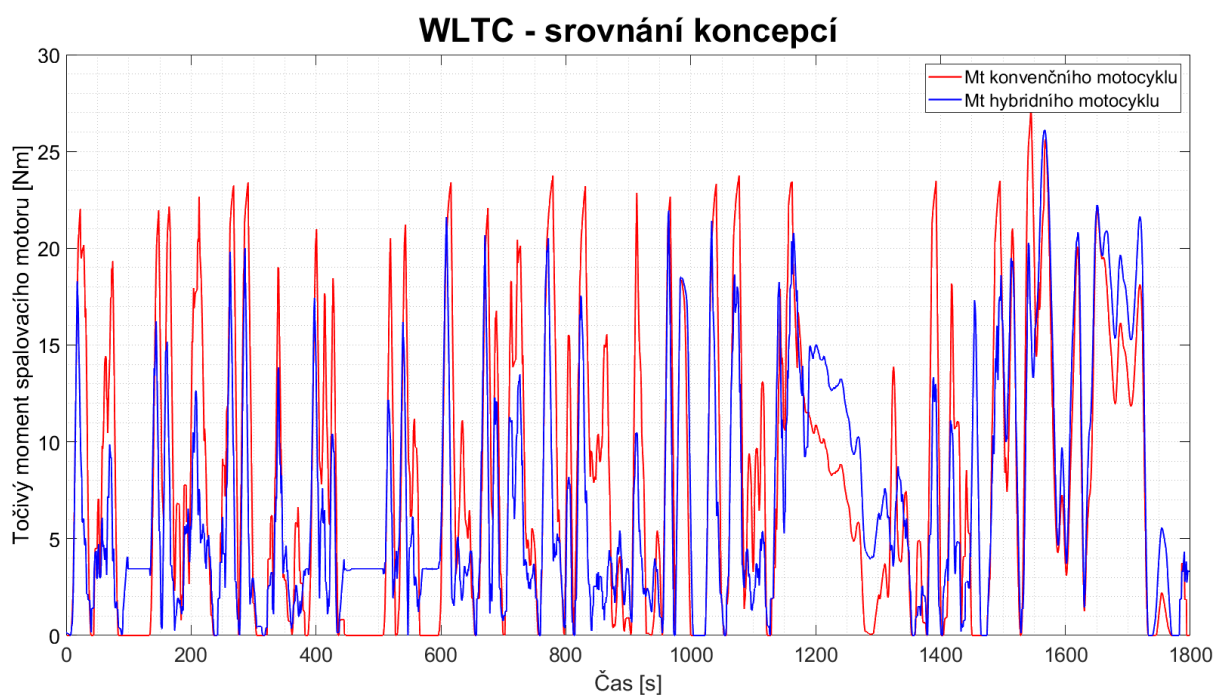
WLTC

Jízdní cyklus WLTC je dlouhý 23,26 km a trvá 1800 s [200]. Na absolvování tohoto cyklu spotřeboval model konvenčního motocyklu 832,5 g a hybridní 773,3 g paliva. Průběh točivého momentu konvenčního motocyklu, okamžité spotřeby a rychlosti v čase je uveden v grafu (*Příloha 13*), v případě hybridního v grafu (*Příloha 14*). V grafu (*Obr. 56*) je patrný rozdíl točivého momentu spalovacího motoru obou koncepcí, kdy elektromotor napomáhá

při akceleraci, ale při ustálené jízdě dobíjí akumulátor. Úměrně tomu také odpovídá průběh aktuální spotřeby obou koncepcí (Obr. 55).



Obr. 55 Srovnání spotřeby obou koncepcí při WLTC

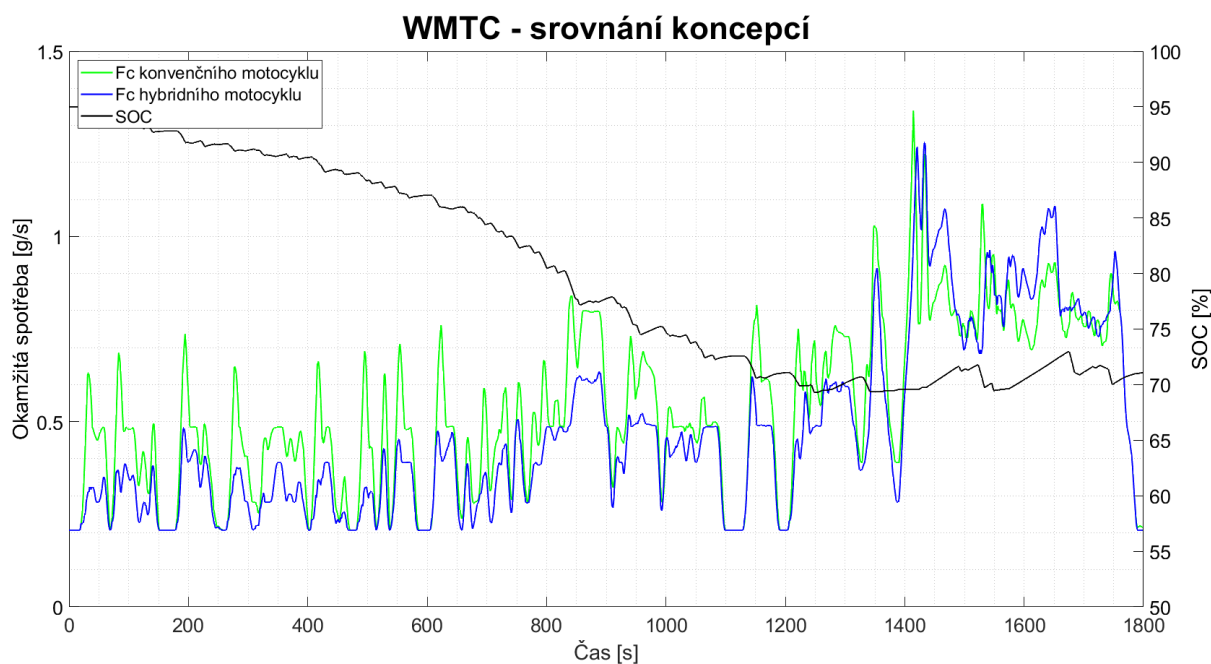


Obr. 56 Srovnání točivého momentu obou koncepcí při WLTC

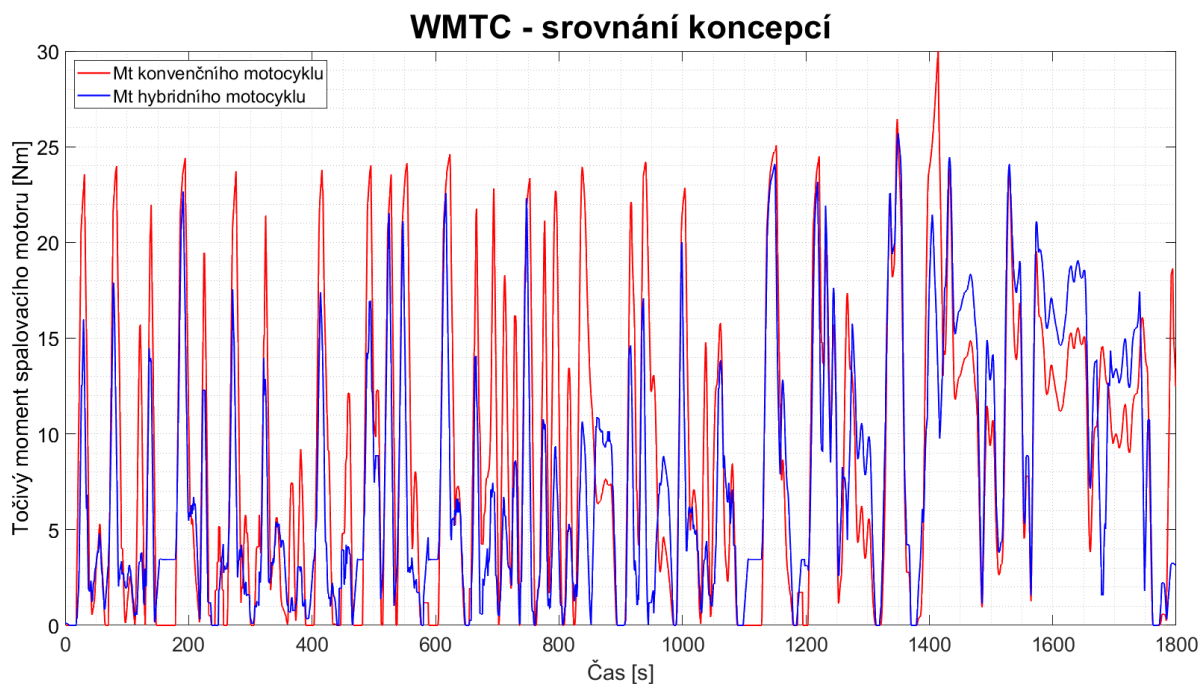
WMTC

WMTC cyklus [201] je určený pro motocykly a je dynamičtější a delší oproti WLTC cyklu. Tento cyklus je dlouhý 28,9 km a trvá 1800 s. Na jeho absolvování spotřeboval model konvenčního motocyklu 967,7 g a model hybridního 884,1 g paliva. Průběh sledovaných

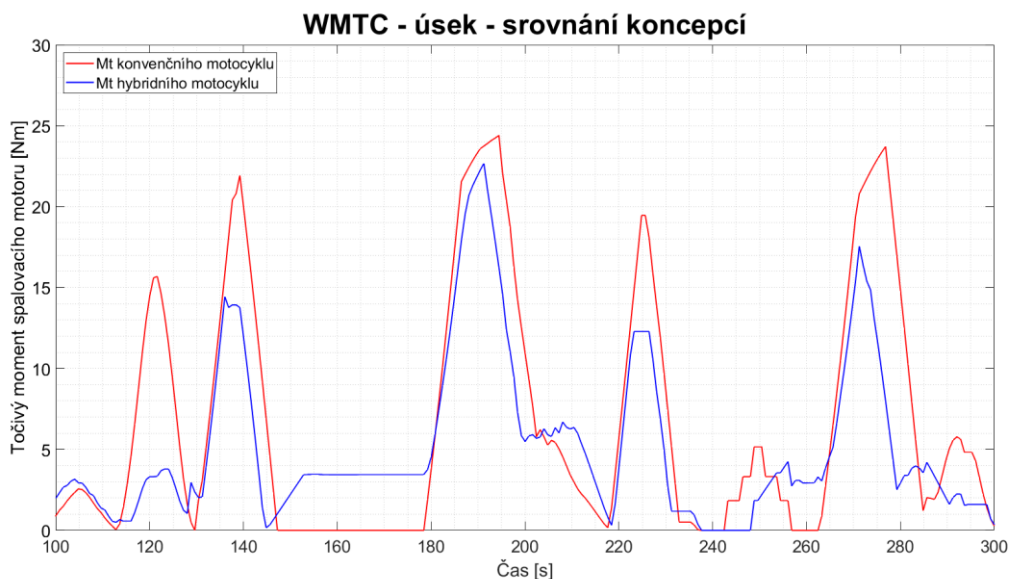
veličin u konvenčního motocyklu jsou v grafu (*Příloha 15*) a v případě hybridního motocyklu v grafu (*Příloha 16*). Srovnání průběhu točivého momentu je v grafu (*Obr. 58*) a tomu odpovídající průběh aktuální spotřeby v grafu (*Obr. 57*). Vzhledem k velkému množství dat může být graf nepřehledný, proto je jeho úsek na *Obr. 59*, kde je vidět, že při požadavku na vysoký točivý moment pomáhá elektromotor se zrychlením a v přebytku momentu dobíjí v režimu generátoru baterie.



Obr. 57 Srovnání spotřeby obou koncepcí při WMTC



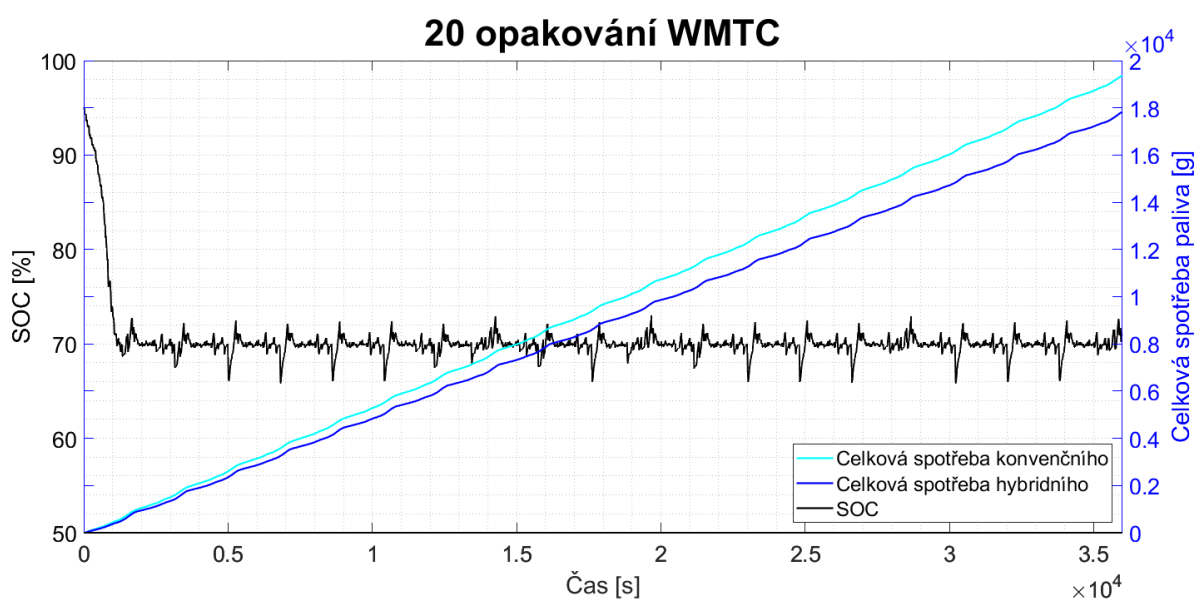
Obr. 58 Srovnání točivého momentu obou koncepcí při WMTC



Obr. 59 Úsek WMTC cyklu - srovnání točivého momentu

20 OPAKOVÁNÍ WMTC

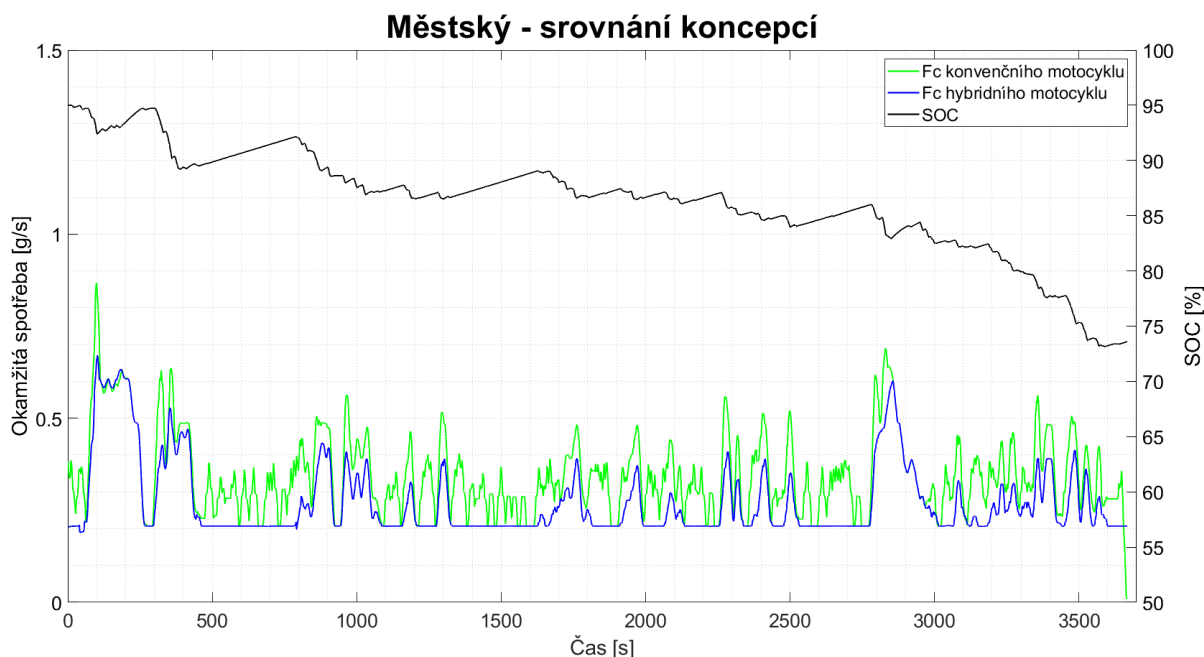
Simulace 20 opakování WMTC cyklu byla zařazena, aby byla sledována nejen spotřeba paliva, ale také schopnost udržení stavu nabití baterií v průběhu dlouhé jízdy (v tomto případě 578 km). Spotřeba paliva konvenčního motocyklu dosáhla 19 361 g a u hybridního ústrojí 17 824 g. Zde je patrné, že spotřeba konvenčního motocyklu poměrně odpovídá jednomu opakování WMTC cyklu, zatímco v případě hybridního se rozdíl snížil vlivem dobíjení baterie v průběhu jízdy. Průběh spotřeby obou koncepcí a stavu nabití baterie je znázorněn v grafu (Obr. 60), kdy SOC se pohybuje mezi hodnotami 0,66 a 0,73. Právě na průběhu SOC je patrný vliv hystereze v modelu řídicí struktury (zmiňovaný v kapitole 4.3.4), kdy některá z opakování mají jiný průběh.



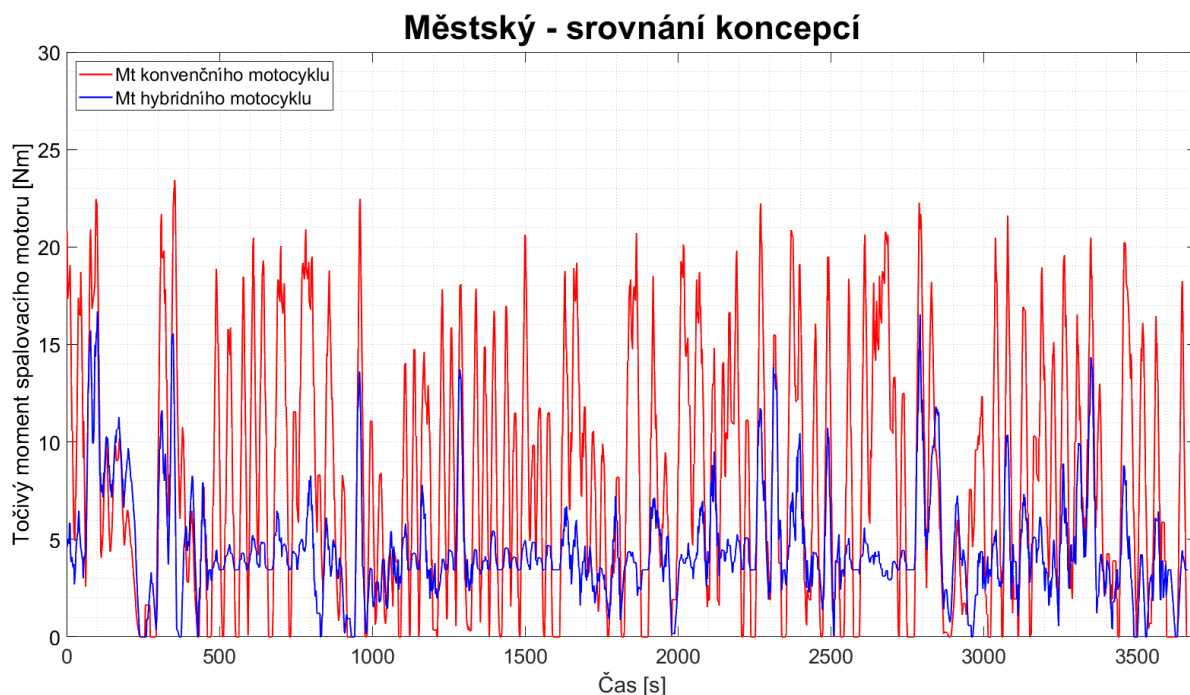
Obr. 60 Srovnání spotřeby obou koncepcí při 20 opakováních WMTC

MĚSTSKÝ CYKLUS

Největší potenciál hybridního motocyklu je ve městech, kdy přidaný elektromotor pomáhá v nejméně úsporných režimech spalovacímu motoru. Proto byl sestaven jízdní cyklus, který odpovídá jízdě v dopravní špičce ve městě, který byl inspirován průjezdem Brna (z Ivanovic přes Pisárky, Zábrdovice, Židenice do Králova Pole) v dopravní špičce.



Obr. 61 Srovnání spotřeby obou koncepcí při městském cyklu

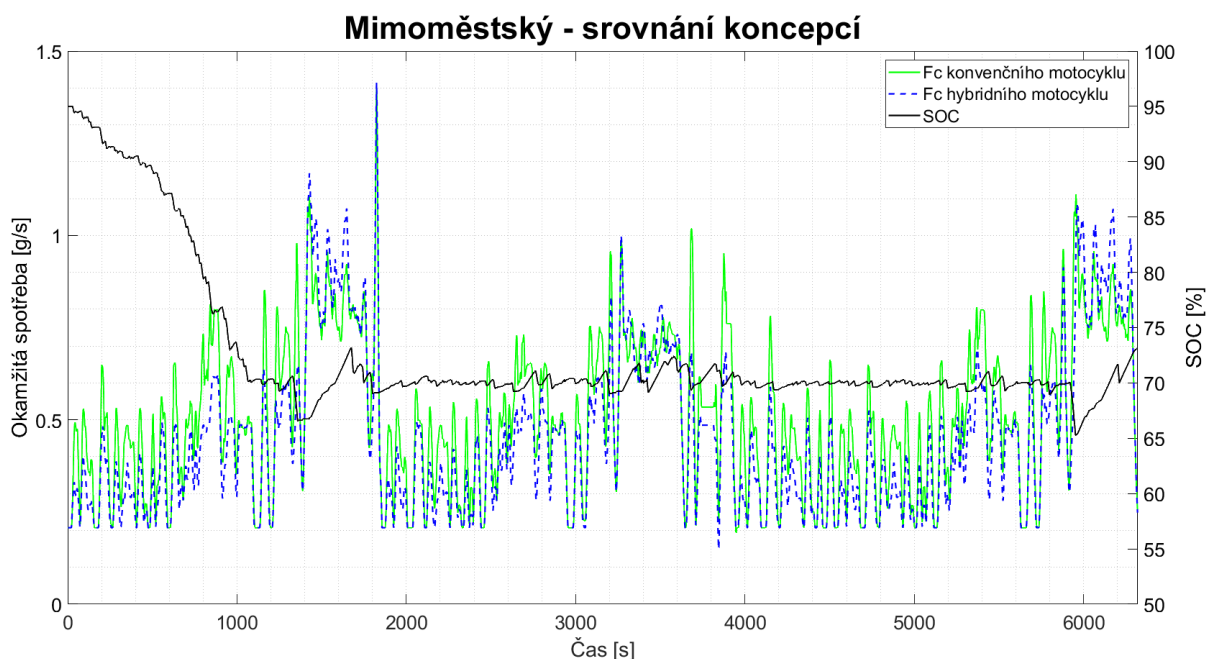


Obr. 62 Srovnání točivého momentu obou koncepcí při městském cyklu

Tento cyklus je dlouhý 20,8 km a trvá 61 minut, kde je uvažován přesun po rychlostní komunikaci i stání v kolonách. Model konvenčního motocyklu spotřeboval na absolvování cyklu 1275,9 g a hybridní 1001,8 g paliva. Průběh rychlosti a spotřeby konvenčního motocyklu je v grafu (*Příloha 17*) a hybridního motocyklu v grafu (*Příloha 18*). Srovnání průběhu točivého momentu obou koncepcí je v grafu (*Obr. 62*) a tomu odpovídající spotřeby v grafu (*Obr. 61*).

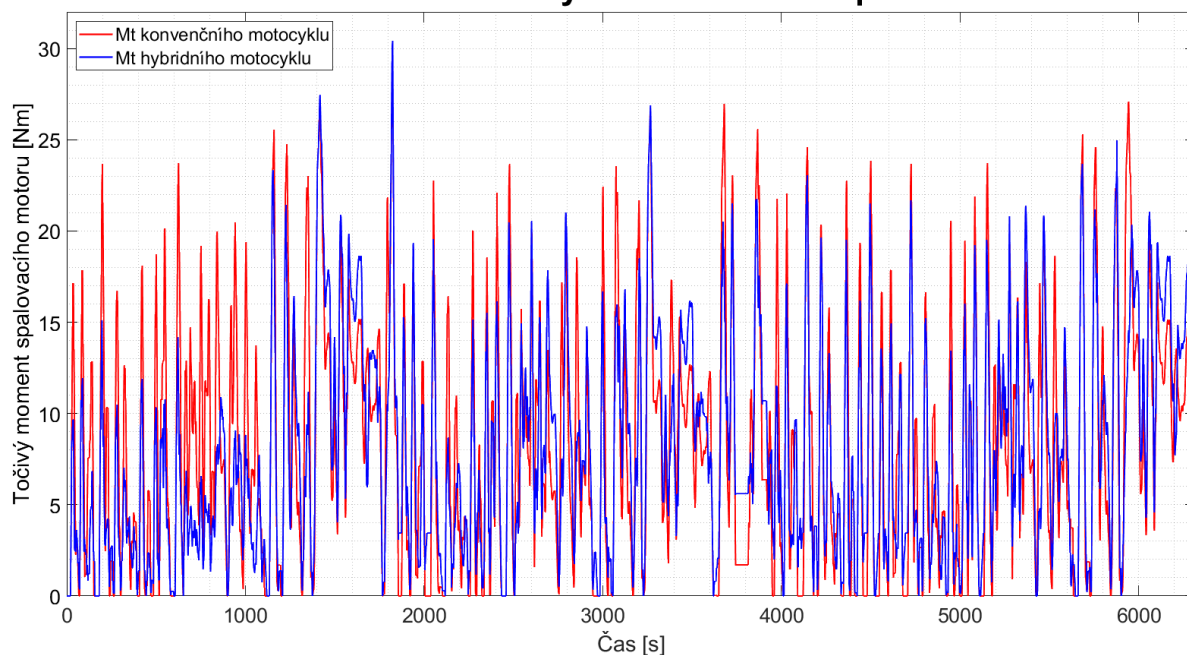
MIMOMĚSTSKÝ CYKLUS

Motocykl, ze kterého vychází tato koncepce, je také vhodný na svižnou jízdu na mimoměstských cestách, kde je možné jezdit dynamicky. K tomu byl sestaven jízdní cyklus, který napodobuje krátkou projížďku po zatáčkovitých cestách. Tato trasa je dlouhá 90 km, trvá 105 minut a obsahuje velké množství akcelerací a zastavování. Model konvenčního motocyklu spotřeboval na projetí této trasy 3249,1 g a hybridní 2899,4 g paliva. U tohoto cyklu musely být sníženy maximální zrychlení, protože konvenční motocykl zde narazil na svůj limit, zatímco hybridní ne. Průběh rychlosti a spotřeby konvenčního motocyklu je v grafu (*Příloha 19*) a hybridního motocyklu v grafu (*Příloha 20*). Srovnání průběhu točivého momentu obou koncepcí je v grafu (*Obr. 64*) a tomu odpovídající spotřeby v grafu (*Obr. 63*).



Obr. 63 Srovnání spotřeby obou koncepcí při mimoměstském cyklu

Mimoměstský - srovnání koncepcí

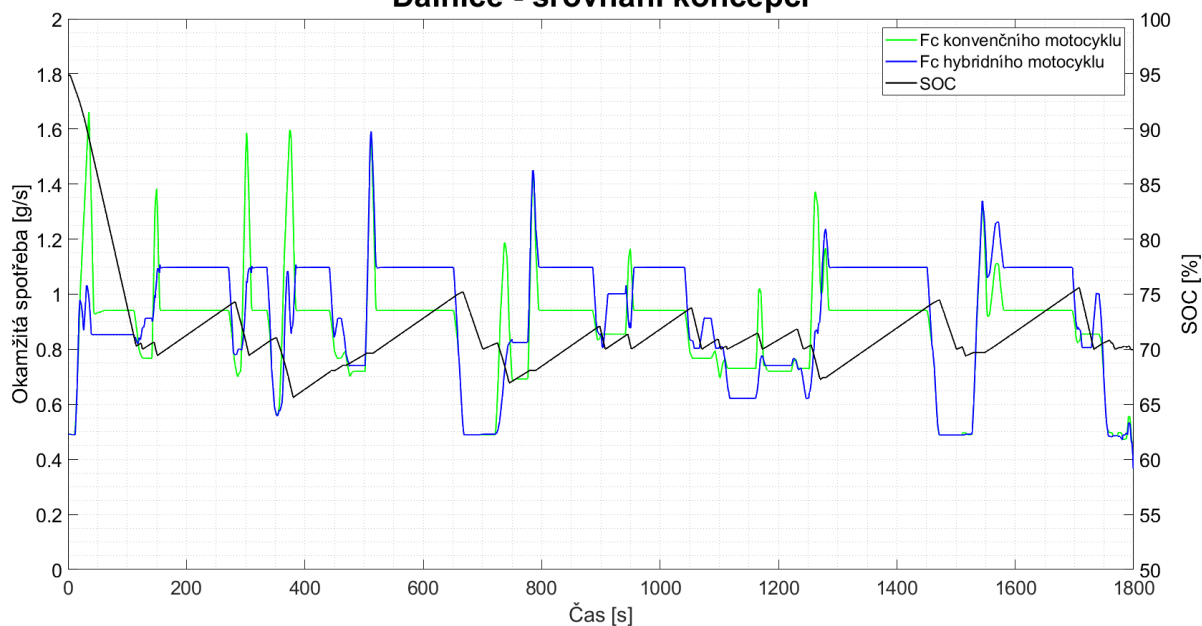


Obr. 64 Srovnání točivého momentu obou koncepcí při mimoměstském cyklu

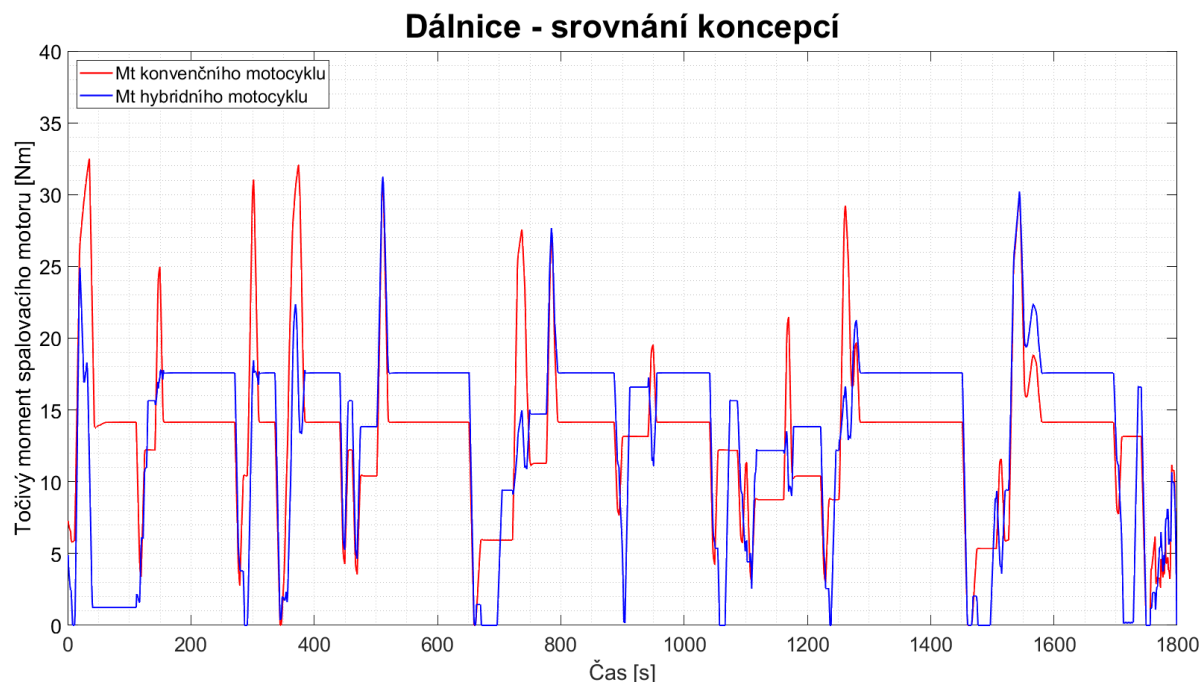
DÁLNIČNÍ CYKLUS

Vzhledem k tomu, že motocykl smí legálně využívat dálnice, byl sestaven taktéž dálniční cyklus. Ten vychází z udržování rychlosti 130 km/h s opakovaným brzděním, simulujícím dání přednosti při předjíždění.

Dálnice - srovnání koncepcí



Obr. 65 Srovnání spotřeby obou koncepcí při dálničním cyklu

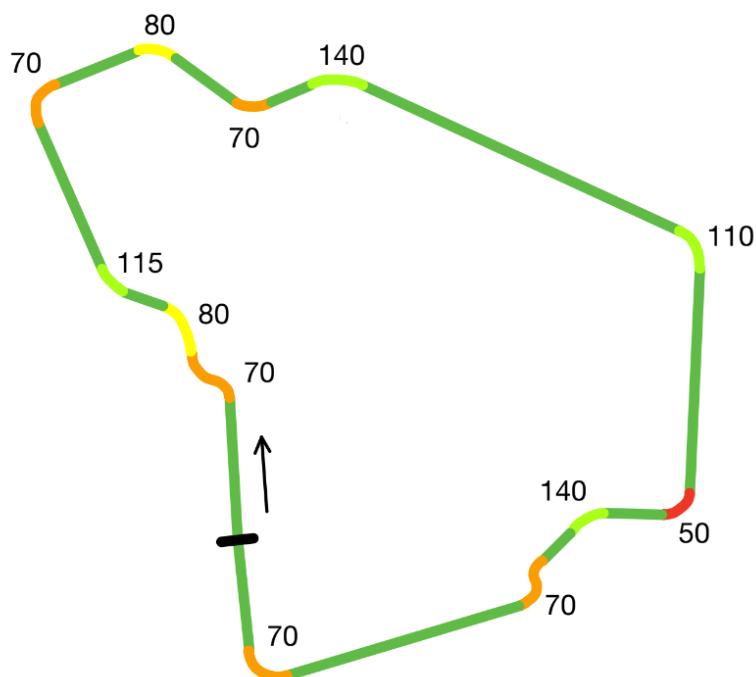


Obr. 66 Srovnání točivého momentu obou koncepcí při dálničním cyklu

Dálniční úsek je dlouhý 58,8 km a trvá 30 minut. Model konvenčního motocyklu spotřeboval na projetí této trasy 1572 g a hybridní 1676 g paliva. Průběh rychlosti a spotřeby konvenčního motocyklu je v grafu (*Příloha 21*) a hybridního motocyklu v grafu (*Příloha 22*). Srovnání průběhu točivého momentu obou koncepcí je v grafu (*Obr. 66*) a tomu odpovídající spotřeby v grafu (*Obr. 65*). Je patrné, že při akceleraci pomáhá elektromotor, čímž odlehčuje spalovacímu motoru, ale při ustálené jízdě elektromotor dobíjí baterie, aby udržel SOC v požadovaném rozsahu.

ZÁVODNÍ OKRUH

Všechny předchozí cykly sledovaly spotřebu paliva obou koncepcí a jízdní cykly byly uzpůsobeny tak, aby je obě koncepce byly schopny absolvovat. Proto byla sestavena také simulace jízdy na fiktivním závodním okruhu, dlouhém 3750 m, která sleduje rozdíly v akceleraci obou koncepcí (*Obr. 68*). Jedná se o rovné úseky, kde je požadavek na maximální rychlost, a zatáčky, do kterých je podle jejich náročnosti potřeba přibrzdit na stanovenou rychlost (*Obr. 67*).



Obr. 67 Schéma závodního okruhu

Stejně jako předchozí simulace, tak i tato uvažuje pouze podélnou dynamiku vozidla a nebere v potaz přetížení při brzdění a odlehčení předního kola. Konvenčnímu motocyklu trvalo kolo na okruhu 126,1 s a hybridnímu 122,8 s.



Obr. 68 Srovnání koncepcí na závodním okruhu

4.4 SROVNÁNÍ KONCEPCÍ POHONU

Hybridní koncepce motocyklu vykazuje vyšší zrychlení oproti konvenčnímu ve všech jízdách zkouškách při plném zatížení, kdy se zvyšující se rychlostí (a tím rostoucím aerodynamickým odporem) je rozdíl významnější. Maximální rychlost motocyklu je určena omezovačem otáček motoru, které při zachování původní převodovky neumožní další nárůst rychlosti motocyklu. Přehled časů a spotřeby jednotlivých testů při plném zatížení je v tabulce (Tab. 6).

Tab. 6 Výsledky testů při plném zatížení

Test	t _{konvenční}	t _{hybridní}	rozdíl	f _{konvenční}	f _{hybridní}	Skonvenční	Shybridní
	[s]	[s]	[%]	[g]	[g]	[m]	[m]
0-100 km/h	5,15	4,81	6,6	10,8	10,1	76,5	68,8
60-130 km/h	5,95	4,41	25,9	12,4	9,3	168,7	122,1
60-150 km/h	13,2	9,4	28,8	27,1	19,9	437,1	320,8
Sprint 1 km	28,3	27	4,6	60,6	55,1	1000	1000
Okruh	126,1	122,8	2,6	244,9	240,5	3750	3750

V případě jízdých cyklů se projevily nepřesnosti, způsobené použitím jediné strategie řazení jednotlivých stupňů pro každý z jízdých testů. Bylo tedy nutné najít kompromis mezi řazením ve vysokých otáčkách, kdy má motocykl vyšší točivý moment, potažmo zrychlení, ale také vyšší spotřebu, a řazením v nižších otáčkách. Tento rozdíl znamená v případě cyklů, určených rychlostí v čase, že se celková dráha může nepatrně lišit.

Výsledky jízdých cyklů ukázaly, že přítomnost elektromotoru se projevuje při momentových maximech, které jsou oproti konvenčnímu motocyklu ve většině případů nižší. S klesajícím stavem nabití baterií je ale část točivého momentu motoru při ustálené jízdě používán k dobíjení, tím pádem je vyšší než v případě konvenční koncepce. Při dynamických testech se velká část požadavků na dobíjení pokryje pomocí rekuperačního brzdění.

Spotřeba paliva se různí pro jednotlivé režimy (Tab. 7), kdy největší úspora nastala u městského režimu a NEDC cyklu. U WLTC, WMTC a mimoměstského cyklu byla úspora nižší, ale stále znatelná. Hodnoty spotřeby se liší od hodnot od výrobce vzhledem k použití jiných dílů výfukové soustavy, a tím i jiným výkonnostním parametrům. Palivová nádrž KTM RC 390 má objem 10,0 l, což odpovídá 7,429 kg benzínu.

Tab. 7 Výsledky jízdých cyklů

Jízdí cyklus	Spotřeba konvenční [g]	Spotřeba hybridní [g]	Dojezd konvenční [km]	Dojezd hybridní [km]
NEDC	559,5	415,9	145,0	196,5
WLTC	832,5	773,3	252,2	271,5
WMTC	967,7	884,1	221,9	242,8
20x WMTC	19361	17824	221,9	240,9
Městský	1275,9	1001,8	118,4	154,4
Mimoměstský	3249,1	2899,4	202,3	230,7
Dálniční	1572	1676	277,7	260,7

V ekonomickém zhodnocení je potřeba odděleně posoudit provozní náklady a náklady na stavbu vozidla. Jednotlivé položky pro stavbu vozidla jsou uvedeny v tabulce (Tab. 8) včetně cen (platných k 05/2023) při nákupu 1 kusu. V případě uskutečnění výroby by na některé položky mohla být uplatněna množstevní sleva. V neposlední řadě je potřeba brát v úvahu hodnotu dílů, které by byly z motocyklu odstraněny (startér, alternátor nebo baterie).

Tab. 8 Soupis použitých dílů [173, 177, 182, 185, 190, 194]

Díl	Název	Množství	Celková cena	Hmotnost
Elektromotor	Plettenberg Nova 15-50 B6 P30	1	2400 euro (56 150 Kč)	3 kg
Kontrolér	Kelly KBL 96251	1	499 USD (10 650 Kč)	1,9 kg
Baterie trakční	Murata US 21700VTC6A	120	25 200 Kč	8,7 kg
Baterie palubní	Murata US 21700VTC6A	4	840 Kč	0,3 kg
Balanční obvod	BMS JK-B2A24S20P	1	5 950 Kč	0,4 kg
DC/DC měnič	Ampul AM2187	1	1050 Kč	0,3 kg
Řídicí jednotka	Woodward SEMC 70	1	310 GBP (8 350 Kč)	2 kg
Planetový převod	-	1	3500 Kč	0,6 kg
Dodatečné	Propojovací kabely, pojistky	-	1 000 Kč	1 kg
Nahrazené díly	Startér Alternátor Baterie	-		- 1 kg - 2 kg - 3,5 kg
Celkem	-	-	112 690 Kč	11,7 kg

Náklady na provoz (palivo) se výrazně liší v závislosti na stylu jízdy, kdy každý jezdec má jiné trasy a jinou dynamiku jízdy. WMTC cyklus má napodobit typický jízdní styl, pro porovnání je v tabulce (Tab. 9) i rozvaha pro hustý městský provoz nebo dynamickou mimoměstskou jízdu. Uvažme roční nájezd motocyklu 15 000 km při ceně benzínu 38,50 Kč/l (platné k 05/2023 na nejbližší čerpací stanici od budovy FSI).

Tab. 9 Srovnání nákladů konvenčního a hybridního motocyklu

Styl provozu	konvenční		hybridní		rozdíl	
	Náklady na 1 km	Náklady na rok	Náklady na 1 km	Náklady na rok	Absolutní	Relativní
NEDC	2,655 Kč	39 822 Kč	1,959 Kč	29 383 Kč	10 439 Kč	26,2 %
WLTC	1,527 Kč	22 900 Kč	1,418 Kč	21 271 Kč	1 629 Kč	7,1 %
WMTC	1,735 Kč	26 030 Kč	1,585 Kč	23 780 Kč	2 250 Kč	8,6 %
20x WMTC	1,735 Kč	26 038 Kč	1,598 Kč	23 972 Kč	2 066 Kč	7,9 %
Městský	3,252 Kč	48 784 Kč	2,494 Kč	37 413 Kč	11 371 Kč	23,3 %
Mimoměstský	1,903 Kč	28 450 Kč	1,668 Kč	25 027 Kč	3 513 Kč	12,3 %
Dálniční	1,386 Kč	20 796 Kč	1,477 Kč	22 153 Kč	-1 357 Kč	- 6,5 %

ZÁVĚR

Koncept přetvoření konvenčního pohonu motocyklu na hybridní má nespočet možných konstrukčních řešení, čímž lze dosáhnout různých provozních režimů vozidla. Tyto koncepce se liší kromě principu funkce také složitostí potřebných úprav na vozidle také cenou.

Vybraná koncepce pro KTM RC 390 využívá BLDC elektromotor spojený planetovým stálým převodem ke klikové hřídeli sériově vyráběného jednoválcového motocyklu, kde zastává funkci alternátoru, startéru a pomocného hnacího agregátu. Zásobování energií je realizováno paketem lithium-iontových akumulátorů s celkovým napětím 86,4 V pro trakční elektromotor a paketem stejných článků s napětím 14,4 V k napájení zařízení v palubní síti. Trakční paket baterií je vybaven balančním obvodem k řízení nabíjení a vybíjení. Nabíjení paketu je zajišťováno rekuperačním brzděním, případně při ustálené jízdě tak, aby stav nabití neklesal pod optimální mez a bylo případně možné využít zbývající energii v případě nutnosti. Palubní paket baterií je dobíjen přes stejnosměrný měnič z trakční baterie. Řídicí jednotka spalovacího motoru je doplněna o kontrolér elektromotoru a hybridní řídicí jednotku, která zajišťuje funkčnost všech komponent při různých jízdních režimech.

Modely byly sestaveny v softwaru GT Suite podle zkušební motocyklu, který byl v minulosti upraven, na základě čehož se liší výsledek simulace konvenčního motocyklu od údajů od výrobce. Byly sestaveny zvláště modely konvenčního a hybridního motocyklu, které byly následně podrobeny identickým testům ke srovnání jízdních parametrů.

Řídicí systém je sestaven z jednotlivých režimů, ve kterých může vozidlo fungovat. Mezi těmito režimy jsou vazební podmínky, které srovnávají aktuální parametry vozidla se statickými mezními hodnotami. Řídicí systém byl sestaven s hysterezí, aby nedocházelo k zacyklení kolem mezních hodnot. Použití hystereze vneslo do systému vůli, na základě které může docházet k různým průběhům při opakováních stejné situace. V některých případech může být vlivem nepatrného rozdílu hodnot dříve splněna jiná z podmínek a systém přejde do jiného z režimů, než při dalších opakováních.

Dobíjení baterií při rekuperačním brzdění není omezeno elektromotorem, ale bateriemi, které mají omezený nabíjecí proud. Vyšší efektivity by se tedy dalo docílit použitím baterií s vyšším C-rate. Pro koncept hybridního motocyklu by bylo vhodnější použití úspornějšího a neupraveného výchozího motocyklu.

V testech zrychlení při plném zatížení vykazovala hybridní koncepce vyšší zrychlení (a tím i kratší časy zrychlení) vzhledem k vyššímu točivému momentu na klikové hřídeli. V komplexnějších jízdních testech vykazovala hybridní koncepce lepší schopnost akcelerace (v rozmezí 6,6 až 28,8 %), nižší spotřebu paliva v dynamických testech a v městském provozu (v rozmezí 7,1 až 26 %). Podle očekávání byla spotřeba při dálničním provozu vyšší (o 6,5 %), než u konvenční koncepce, vzhledem k vyšší hmotnosti a požadavku na udržování dostatečného stavu nabití baterií. Při simulaci závodního okruhu vykazovala hybridní koncepce lepší schopnost akcelerace. Podrobnější výsledky jsou uvedeny v dílčích závěrech jednotlivých kapitol.

SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

1. 1860-1869. *Motorcycle Timeline* [online]. 25. červenec 2018 [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://motorcycletimeline.com/1860-1869/>
2. Daimler Reitwagen: Motocykl slaví 135 let. *auto.cz* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/daimler-reitwagen-motocykl-slavi-135-let-135781>
3. 1880-1889. *Motorcycle Timeline* [online]. 25. červenec 2018 [vid. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://motorcycletimeline.com/1880-1889/>
4. 1890-1899. *Motorcycle Timeline* [online]. 30. červenec 2018 [vid. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://motorcycletimeline.com/1890-1899/>
5. 1902. *Motorcycle Timeline* [online]. 25. červenec 2018 [vid. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://motorcycletimeline.com/1902-2/>
6. VLK, František. Konstrukce motocyklových motorů. *Soudní inženýrství: Časopis pro soudní znalectví a řízení rizik v technických a ekonomických oborech* [online]. 2006, **17**(4), 20. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2006-04-224-243.pdf>
7. 2 stroke engine: Definition, Parts, Working, Diagram, Types. *Mech Content* [online]. 4. říjen 2022 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://mechcontent.com/2-stroke-engine/>
8. Langen Two Stroke gains Euro 5 certification! Here's how! *Visordown* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.visordown.com/news/new-bikes/langen-two-stroke-gains-euro-5-certification-heres-how>
9. Four stroke petrol engine: Definition, Working, Cycle, Applications. *Mech Content* [online]. 3. prosinec 2020 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://mechcontent.com/four-stroke-petrol-engine/>
10. VISITURE, Erin. What are the Different Types of Motorcycle Engines: Your Guide to Motorcycle Engines? *Cardo* [online]. 17. září 2021 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.cardosystems.com/blog/what-are-the-different-types-of-motorcycle-engines-your-guide-to-motorcycle-engines/>
11. 10 Different Types of Motorcycle Engines Explained. *Power Sports Guide* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://powersportsguide.com/different-types-of-motorcycle-engines/>
12. Different Types of Motorcycle Engines: Uses, Pros, Cons & More | dubizzle. *UAE's leading autos blog | dubizzle Cars* [online]. 9. leden 2023 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.dubizzle.com/blog/cars/types-motorcycle-engines/>
13. Yamaha YZ 250. *Motorkáři.cz* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/motokatalog/yamaha/yamaha-yz-250.html>
14. Suzuki GT 500. *Motorkáři.cz* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/motokatalog/suzuki/suzuki-gt-500.html>
15. Kompletní Motokatalog a katalog motocyklů 2023. *Motorkáři.cz* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/motokatalog/>



16. DAWES, Geoff. The 1982 NS500 and 1984 NSR500 Grand Prix Racers. *MotoVue* [online]. 23. únor 2016 [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://motovue.net/2016/02/23/the-1982-ns500-and-1984-nsr500-grand-prix-racers/>
17. TIBU, Florin. Horex' VR6 15-Degree Engine, Compact Engineering at its Best. *Autoevolution* [online]. Dostupné z: <https://www.autoevolution.com/news/horex-vr6-15-degree-engine-compact-engineering-at-its-best-53833.html>
18. TEST: Megola, nemocniční postel na dvou kolech. *Motorkáři.cz* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/clanky/redakcni-testy/megola/test-megola-nemocnicni-postel-na-dvou-kolech-41402.html>
19. 1912 – *Motorcycle Timeline* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://motorcycletimeline.com/1912-2/>
20. HOBOSULLIVAN. Weird Engines. *Sublime Curiosity* [online]. 30. srpen 2016 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://sublimecuriosity.com/2016/08/30/weird-engines/>
21. Ariel Square Four. *Wikipedia* [online]. 5. květen 2022 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ariel_Square_Four&oldid=1086286078
22. Suzuki RG500. *Wikipedia* [online]. 13. září 2022 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Suzuki_RG500&oldid=1110114777
23. Brough Superior Golden Dream. *Wikipedia* [online]. 10. listopad 2022 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Brough_Superior_Golden_Dream&oldid=1121106202
24. Bring On the BMW W3 Cruiser Concept. *Dealer Spike* [online]. 21. březen 2015 [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.bobsmotorcycles.com/blog/bring-on-the-bmw-w3-cruiser-concept-48295>
25. Feuling Parts. *Feuling Parts* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: https://www.feulingparts.com/sku/W3-ENGINE?gclid=CjwKCAjwgqejBhBAEiwAuWHioKYbOEZwImCRnqNuZl9LELZUVpjJlFHTG9T8pzoqu6nc4jdXMoIoYxoCm-QQAvD_BwE
26. 1907. *Motorcycle Timeline* [online]. 25. červenec 2018 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://motorcycletimeline.com/1907-2/>
27. List of motorcycles by type of engine. *Wikipedia* [online]. 26. únor 2023 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_motorcycles_by_type_of_engine&oldid=1141778992
28. KVĚTOŇ, Michael. *Automobily a motocykly s motorem Wankel*. Praha: Grada Publishing, 2021. ISBN 978-80-271-3429-8.
29. Hercules W 2000. *Motorkáři.cz* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/motokatalog/hercules/hercules-w-2000.html>
30. Best Diesel Motorcycles. *TopSpeed* [online]. 28. červenec 2022 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.topspeed.com/best-diesel-motorcycles-of-all-time/>

31. 1965 Royal Enfield Bullet 500 DIESEL for sale | MotorcycleFinder. *Motorcycle Finder* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.motorcyclefinder.co.uk/motorbike/1965-royal-enfield-bullet-500-diesel/u-27462-5612>
32. Motorcycles. *Marine Turbine Technologies - The Leader in Turbine Technology* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.marineturbine.com/motorcycles/>
33. VLK, František. Chlazení a mazání motocyklových motorů. *Soudní inženýrství: Časopis pro soudní znalectví a řízení rizik v technických a ekonomických oborech* [online]. 2005, **16**(5), 15. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2005-05-243-257.pdf>
34. Why things are the way they are: A farewell to air-cooled engines. *RevZilla* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <http://www.revzilla.com/common-tread/why-things-are-the-way-they-are-a-farewell-to-air-cooling>
35. Yamaha Motorcycle Technology. *YAMAHA MOTOR CO., LTD.* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: [//global.yamaha-motor.com/business/mc/mc-tech/](http://global.yamaha-motor.com/business/mc/mc-tech/)
36. Air Cooled vs Oil Cooled vs Liquid Cooled Engines - Know the Differences. *Bajaj Finance LTD* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.bajajautofinance.com/blog/air-cooled-vs-oil-cooled-vs-liquid-cooled-engines>
37. PRESTON, Benjamin. How Do Carburetors Work? *The Drive* [online]. 13. září 2016 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.thedrive.com/tech/5181/how-do-carburetors-work>
38. How Do Motorcycle Carburetors Work? What You Need to Know | UTI. *UTI Corporate* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.uti.edu/blog/motorcycle/motorcycle-carburetors>
39. Bosch systém vstřikování paliva. *bosch-system-vstrikovani-paliva-l-jetronic.pdf* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://skoleniaabosch.cz/img/ke-stazeni/technicke-prirucky/bosch-system-vstrikovani-paliva-l-jetronic.pdf>
40. How Electronic Fuel Injection (EFI) Works - How To. *Motorcycle Cruiser* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.motorcyclecruiser.com/how-electronic-fuel-injection-efi-works-how-to/>
41. Kawasaki Kz1000g-1 Classic | Cycle World | SEPTEMBER 1980. *Cycle World | The Complete Archive* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://magazine.cycleworld.com/article/1980/9/1/kawasaki-kz1000g-1-classic>
42. Why is There No Gas Direct Injection on Motorcycles? *Motorcycle.com* [online]. 1. říjen 2021 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.motorcycle.com/ask-mo-anything/ask-mo-anything-why-is-there-no-gas-direct-injection-on-motorcycles.html>
43. ACADEMY, Ocsaly. Direct Injection: Advantages and Disadvantages of an Advanced Fuel Delivery System. *Ocsaly* [online]. 19. březen 2023 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://ocsaly.com/direct-injection-advantages-and-disadvantages-of-an-advanced-fuel-delivery-system/>
44. Bimota V-Due - The Bike That Tried To Save The 2 Stroke Engine - Timeless 2 Wheels. *Timeless 2 wheels* [online]. 17. říjen 2021 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://timeless2wheels.com/668716/bimota-v-due/>

45. Motus MST-01: is direct injection the next big thing? *Motorcycle News* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.motorcyclenews.com/news/new-bikes/2011/march/mar1611-motus-mst-01-is-direct-injection-next-best-thing/>
46. LANDHÄUSSER, Felix, Michael HEINZELMANN, Andreas MICHALSKE, Mikel SUSAETA, Martin GROSSER, Johannes FEGER, Lutz-Martin FINK, Wolfram GERWING, Klaus GRABMAIER, Bernd ILLG, Joachim KURZ, Rainer MAYER, Dietmar OTTENBACHER, Andreas WERNER, Jens WIESNER a Michael WALTHER. Electronic Control Unit (ECU). In: [online]. 2014, s. 272–277. ISBN 978-3-658-03980-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-658-03981-3_21
47. TAKASHIMA, Hiroyuki a Toshiro KITA. Study on Architecture of ECU for Automobile. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C* [online]. 2008, **74**, 1758–1764. Dostupné z: doi:10.1299/kikaic.74.1758
48. Motorcycle Clutch Types. *Safety Brake and Clutch* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <http://www.safetybrakeandclutch.co.za/2018/12/05/motorcycle-clutch-types/>
49. What is “Centrifugal” in the Centrifugal Clutch Typical of the Super Cub? *Webike Philippines News* [online]. 15. březen 2021 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: https://www.webike.ph/ph_news/webike-original/how-to/20210315-what-is-centrifugal-in-the-centrifugal-clutch-typical-of-the-super-cub/
50. *Honda Develops New Automatic Transmission System for Motorcycles* [online]. Dostupné z: https://phys.org/news/2007-10-honda-automatic-transmission_motorcycles.html
51. Tokyo 2007 Preview: Honda DN-01 motorcycle features automatic transmission. *Autoblog* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.autoblog.com/2007/10/05/tokyo-2007-preview-honda-dn-01-motorcycle-features-automatic-tr/>
52. Centrifugal clutch. 3D CAD Model Library. *GrabCAD* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/centrifugal-clutch>
53. What Is a Motorcycle Transmission & How Does it Work? | UTI. *UTI Corporate* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.uti.edu/blog/motorcycle/transmission>
54. Automatic Bikes You Can Buy in 2023. *Cycle World* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.cycleworld.com/story/bikes/top-automatic-motorcycles-you-can-buy/>
55. LLC, Cyclepedia Press. CVT Transmission Service. *Motorcycle & Powersports News* [online]. 3. květen 2012 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.motorcyclepowersportsnews.com/cvt-transmission-service/>
56. All About Automatic CVT Transmission. *Woman Motorcycle Enthusiast - MOTORESS* [online]. 28. leden 2021 [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://motoress.com/motorcycle-performance/cvt-transmission/>
57. LYTRAS, Christos. Racing Motorcycle Gearbox, Christos Lytras. *ArtStation* [online]. 17. říjen 2020 [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.artstation.com/artwork/AqEkQe>
58. Mechanism and Evolution of Dual Clutch Transmission. *Honda Global* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://global.honda/innovation/technology/motorcycle/pleasure/dct.html>

59. Motorcycle Chain Vs. Belt Vs. Shaft—Which Drivetrain Is Best? *Motorcyclist* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.motorcyclistonline.com/all-about-motorcycle-chains-belts-and-drive-shafts/>
60. Chain Vs Belt Vs Shaft Drive: Motorcycle Final Drive Systems Explained With Their Characteristics. *TVS Motor* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.tvsmotor.com/media/blog/chain-vs-belt-vs-shaft-drive-motorcycle-final-drive-systems-explained-with-their-characteristics>
61. One-way roller clutches: one idea, many applications - BEARING NEWS. *Bearing News* [online]. [vid. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.bearing-news.com/one-way-roller-clutches-one-idea-many-applications/>
62. Thomas Davenport - Electrical Pioneer. *Edison Tech Center* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://edisontechcenter.org/DavenportThomas.html>
63. BOBBY. About the Planté Battery. *News about Energy Storage, Batteries, Climate Change and the Environment* [online]. 14. květen 2014 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.upsbatterycenter.com/blog/plante-battery/>
64. History of the battery. *Wikipedia* [online]. 28. března 2023 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=History_of_the_battery&oldid=1147113383
65. Hydrogen fuel cells. *E-Mobility Engineering* [online]. 10. leden 2021 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.emobility-engineering.com/hydrogen-fuel-cells-2/>
66. Brushless Vs Brushed DC Motors: When and Why to Choose One Over the Other | Article | MPS. *Monolithic Power* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.monolithicpower.com/en/brushless-vs-brushed-dc-motors>
67. ZAP Xebra. *Wikipedia* [online]. 3. dubna 2023 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=ZAP_Xebra&oldid=1147961392
68. Zero XU. *Wikipedia* [online]. 7. červenec 2020 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Zero_XU&oldid=966435479
69. What are Brushless DC Motors. *Renesas* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/us/en/support/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview>
70. 2023 KTM Freeride E-XC. Straight Line Motorsports Racing. *Dealer Spike* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.slmracing.com/New-Inventory-2023-KTM-Motorcycle-Scooter-Freeride-E-XC-Arlington-Texas-13086165>
71. VAVRA, Chris. Understanding the effect of PWM when controlling a brushless dc motor. *Control Engineering* [online]. 26. leden 2022 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.controleng.com/articles/understanding-the-effect-of-pwm-when-controlling-a-brushless-dc-motor/>
72. Everything You Need To Know About Stepper Motors. *RS* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://uk.rs-online.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/stepper-motors-guide>

73. AGARWAL, Tarun. Reluctance Motor : Construction, Working, Types and Its Applications. *ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students* [online]. 17. srpen 2020 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/what-is-a-reluctance-motor-working-its-applications/>
74. Synchronous Motors. AC Motors. Electronics Textbook. *All About Circuits* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-13/synchronous-motors/>
75. Nissan Leaf. *Wikipedia* [online]. 11. květen 2023 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nissan_Leaf&oldid=1154228071
76. LITO Motorcycles unveils its SORA Generation 2 Electric Superbike - Electric motorcycle news. *thepack.news* [online]. 7. květen 2019 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://thepack.news/lito-motorcycles-unveils-its-sora-generation-2-electric-superbike/>
77. AGARWAL, Tarun. Types of Induction Motor - Working, Advantages & Their Applications. *ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students* [online]. 29. říjen 2013 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/induction-motor-types-advantages/>
78. LAMBERT, Fred. Tesla is upgrading Model S/X with new, more efficient electric motors. *Electrek* [online]. 5. duben 2019 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://electrek.co/2019/04/05/tesla-model-s-new-electric-motors/>
79. ARUN, V., R. KANNAN, S. RAMESH, M. VIJAYAKUMAR, P. RAGHAVENDRAN, M.Siva RAMKUMAR, Anbarasu PALANISAMY a Venkatesa PRABHU S. Review on Li-Ion Battery vs Nickel Metal Hydride Battery in EV. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2022, **2022**, 1–7. Dostupné z: doi:10.1155/2022/7910072
80. KOEHLER, Uwe. Chapter 2 - General Overview of Non-Lithium Battery Systems and their Safety Issues. In: Jürgen GARCHE a Klaus BRANDT, ed. *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications* [online]. B.m.: Elsevier, 2019 [vid. 2023-05-19], s. 21–46. ISBN 978-0-444-63777-2. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63777-2.00002-5
81. Lithium-Ion Battery. *Clean Energy Institute* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/>
82. *EASE_TD_Electrochemical_NaNiCl2.pdf* [online]. [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Electrochemical_NaNiCl2.pdf
83. BU-209: How does a Supercapacitor Work? *Battery University* [online]. 11. září 2010 [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-209-how-does-a-supercapacitor-work>
84. ZEDNÍČEK, Tomáš. Supercapacitors. *Passive Components Blog* [online]. 24. říjen 2018 [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://passive-components.eu/supercapacitors/>
85. Superkondenzátor vs. baterie: parametry a použití. *TZB-info* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21462-superkondenzator-vs-baterie-parametry-a-pouziti>
86. What is a Battery Management System (BMS)? – How it Works. *Synopsys* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html>

87. Battery Management System. *EV Expert* [online]. [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.evexpert.eu/eshop1/knowledge-center/bms1>
88. BLDC Motor Controller: Design Principles & Circuit Examples. *Integra Sources* [online]. [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.integrasources.com/blog/bldc-motor-controller-design-principles/>
89. DRAKES. Zero-Crossing Detector Circuit for a PWM-Generated Sine Wave. In: *Electrical Engineering Stack Exchange* [online]. 20. listopad 2022 [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://electronics.stackexchange.com/q/643143>
90. STEVENS, Ben. Effects of temperature on EV performance. *Rivus* [online]. 15. březen 2022 [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.rivusgroup.co.uk/effects-of-temperature-on-ev-performance/>
91. MUNIAMUTHU, Sumathy, S. ARJUN, M. JALAPATHY, S. HARIKRISHNAN a A. VIGNESH. Review on Electric Vehicles. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development* [online]. 2018, **8**, 557–566. Dostupné z: doi:10.24247/ijmperdapr201865
92. Explaining Electric & Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *US EPA* [online]. 17. srpen 2015 [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/greenvehicles/explaining-electric-plug-hybrid-electric-vehicles>
93. TEAGUE, Chris. How Much Should You Worry About EV Fires? *Autoweek* [online]. 3. říjen 2022 [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.autoweek.com/news/a38225037/how-much-you-should-worry-about-ev-fires/>
94. REBEKAH. Do Electric Cars Pose a Higher Fire Danger? *Fire Systems, Inc.* [online]. 4. prosinec 2022 [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://firesystems.net/2022/12/04/do-electric-cars-pose-a-higher-fire-danger/>
95. EV Database. *EV Database* [online]. [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://ev-database.org/>
96. Pros and Cons of the Electric Motorcycle. *Motorcycle.com* [online]. 25. květen 2018 [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.motorcycle.com/features/pros-cons-electric-motorcycle.html>
97. CLARK, John. What Are the Pros & Cons of Electric Bikes | Velospeed Blog. *Velospeed* [online]. 8. říjen 2020 [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.velospeed.co.uk/advantages-and-disadvantages-of-electric-bikes/>
98. ALEXIS, Marcelo. Electric Motorcycles History. *OX MOTORCYCLES / EN* [online]. 20. srpen 2021 [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://ox-motorcycles.com/en/electric-motorcycles-history/>
99. History of the Electric Motorcycle & scooter. *Wheel N Water* [online]. [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: https://www.wheelnwater.com/index.php?route=journal3/blog/post&journal_blog_post_id=6
100. TOLL, Micah. I've ridden every electric motorcycle out there. Here's what I've discovered. *Electrek* [online]. 28. listopad 2022 [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://electrek.co/2022/11/28/ive-ridden-every-electric-motorcycle/>

101. Euro 1 to Euro 6 – find out your vehicle’s emissions standard. RAC Drive. *RaC* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.rac.co.uk/drive/advice/emissions/euro-emissions-standards/>
102. PRAJAPATI, Karan, Rachit SAGAR a Ravi PATEL. Hybrid Vehicle: A Study on Technology. *International Journal of Engineering Research & Technology*, ISSN: 2278-0181. 2014, 3, 1076–1082.
103. Porsche Semper Vivus - hybrid z roku 1900 - Historie. *Autokaleidoskop* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.autokaleidoskop.cz/Historie/Porsche-Semper-Vivus-hybrid-z-roku-1900/>
104. Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. *Porsche Museum Press Kit 2019* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://presskit.porsche.de/museum/en/2019/topic/exhibitions/cars/the-technology-of-the-semper-vivus.html>
105. Lohner–Porsche. *Wikipedia* [online]. 15. prosinec 2022 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lohner%E2%80%93Porsche&oldid=1127595159>
106. RICHARD. Hybrid Electric Vehicles: For the Indecisive. *News about Energy Storage, Batteries, Climate Change and the Environment* [online]. 30. květen 2019 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.upsbatterycenter.com/blog/hybrid-electrical-vehicles-if-you-cant-decide/>
107. ANDERSON, Curtis D. a Judy ANDERSON. *Electric and hybrid cars: a history*. 2nd ed. Jefferson, N.C: McFarland, 2010. ISBN 978-0-7864-3301-8.
108. Hybrid from a time of transition - the 1916 Woods Dual Power Model 44. *Hemmings* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.hemmings.com/stories/2013/03/21/hybrid-from-a-time-of-transition-the-1916-woods-dual-power-model-44>
109. MCG. GM’s Pioneer Hybrid: the 1969 XP-883. *Mac’s Motor City Garage* [online]. 13. listopad 2021 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://macsmotorcitygarage.com/gms-pioneer-hybrid-the-1969-xp-883/>
110. Fiat 131 ibrida: un’occasione mancata. *Ruoteclassiche* [online]. 15. leden 2020 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://ruoteclassiche.quattroruote.it/fiat-131-ibrida-unoccasione-mancata/>
111. AGO, Masterlukein #cars • 5 Years. Alfa Romeo 33 Hybrid, 10 years before the Prius!! *Steemit* [online]. 27. března 2018 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://steemit.com/cars/@masterluke/alfa-romeo-33-hybrid-10-years-before-the-prius>
112. Volvo ECC – the car that gave the world a preview of Volvo’s future already back in 1992. *Volvo Car Switzerland AG* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.media.volvocars.com/ch/de-ch/media/pressreleases/5023/volvo-ecc-the-car-that-gave-the-world-a-preview-of-volvos-future-already-back-in-1992>
113. European Hybrid Pioneer – The Audi 100 Avant Duo. *Dyler* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://dyler.com/blog/101/european-hybrid-pioneer-the-audi-100-avant-duo>
114. SÁNCHEZ, Miguel. Audi Duo and the first steps of the German hybrids. *La Escudería* [online]. 14. prosinec 2021 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://en.escuderia.com/audi-duo-hybrid-1989/>

115. CLIFFORD, Joe. History of the Toyota Prius. *Toyota UK Magazine* [online]. 10. únor 2015 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://mag.toyota.co.uk/history-toyota-prius/>
116. The evolution of the Prius. *Toyota Motor Corporation Official Global Website* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <http://global.toyota/en/detail/17852348>
117. PANG, Natalie. A brief history of hybrid cars. *Carro Blog* [online]. 1. listopad 2022 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://carro.sg/blog/a-brief-history-of-hybrid-cars/>
118. Hybridní systémy pro pohon automobilů. *oEnergetice.cz* [online]. 27. říjen 2015 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektromobilita/hybridni-systemy-pro-pohon-automobilu/>
119. GOLDENSTEIN, Christopher. *Advanced Combustion Engines* [online]. 9. říjen 2011 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/goldenstein2/>
120. Engine specifications for Mercedes OM607, characteristics, oil, performance. *Mymotorlist* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://mymotorlist.com/engines/mercedes/om607/>
121. Battery Comparison of Energy Density - Cylindrical and Prismatic Cells. *Epectec* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>
122. Motor efficiency. *FoodTechInfo.com* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: http://foodtechinfo.com/efficiency/motor_efficiency/
123. DEMIREL, Yaşar. 5.2 Energy Conservation. In: Ibrahim DINCER, ed. *Comprehensive Energy Systems* [online]. Oxford: Elsevier, 2018 [vid. 2023-05-12], s. 45–90. ISBN 978-0-12-814925-6. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-809597-3.00505-8
124. Motors and generators. *Engiro GmbH* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.engiro.de/en/products/motors-and-generators>
125. SANTOS, Joe. Nickel-Metal Hydride or Lithium Ion: Which Type of Hybrid Battery Is Better? *MotorBiscuit* [online]. 9. června 2021 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.motorbiscuit.com/nickel-metal-hydride-lithium-ion-type-hybrid-battery-better/>
126. Emission Test Cycles: WLTC. *Dieselnet* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>
127. Regulation (EU) No 168/2013 of the European Parliament and of the Council of 15 January 2013 on the approval and market surveillance of two- or three-wheel vehicles and quadricyclesText with EEA relevance. *Official Journal of the European Union*.
128. Global Technical Regulations (GTRs). *Unece* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: https://unece.org/transport/standards/transport/vehicle-regulations-wp29/global-technical-regulations-gtrs#jfmulticontent_c29896-15
129. Energy Consumption Test of an Electric Motorcycle. *Dewesoft* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://dewesoft.com/blog/energy-consumption-test-of-electric-motorcycle>
130. Tighter limits are coming. *Bennetts UK* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.bennetts.co.uk/bikesocial/news-and-views/features/bikes/how-much-cleaner-euro5>



131. Figure 3. NEDC, WLTC, WMTC and MAC driving cycles and phases. *ResearchGate* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/NEDC-WLTC-WMTC-and-MAC-driving-cycles-and-phases_fig2_274315884
132. DU, Aimin, Xudong YU a Junjie SONG. Structure design for power-split hybrid transmission. *2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* [online]. 2010, 884–887 [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: doi:10.1109/ICMA.2010.5589018
133. PARK, Gwangmin, Seonghun LEE, Sungho JIN a Sangshin KWAK. Integrated modeling and analysis of dynamics for electric vehicle powertrains. *Expert Systems with Applications* [online]. 2014, **41**(5), 2595–2607 [vid. 2023-05-11]. ISSN 09574174. Dostupné z: doi:10.1016/j.eswa.2013.10.007
134. LUCENA, Samuel E. de. A Survey on Electric and Hybrid Electric Vehicle Technology. In: *Electric Vehicles - The Benefits and Barriers* [online]. B.m.: IntechOpen, 2011 [vid. 2023-05-12]. ISBN 978-953-307-287-6. Dostupné z: doi:10.5772/18046
135. JAIN, Shailendra a Lalit KUMAR. 31 - Fundamentals of Power Electronics Controlled Electric Propulsion. In: Muhammad H. RASHID, ed. *Power Electronics Handbook (Fourth Edition)* [online]. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2018 [vid. 2023-05-24], s. 1023–1065. ISBN 978-0-12-811407-0. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-811407-0.00035-0
136. MA, Yue. Chapter nine - Power management technology. In: Yue MA, ed. *Dynamics and Advanced Motion Control of Off-Road UGVs* [online]. B.m.: Academic Press, 2020 [vid. 2023-05-24], Emerging Methodologies and Applications in Modelling, Identification and Control, s. 219–263. ISBN 978-0-12-818799-9. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-818799-9.00009-8
137. FR Hybrid System (Intelligent Dual Clutch Control) | Innovation |. *Nissan Global* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: https://www.nissan-global.com/EN/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/HYBRID_SYSTEM/
138. CHEN, Haijun, Lin LI a Ferit KÜÇÜKAY. Study of Series-Parallel and Power-Split DHT for Hybrid Powertrains. *Automotive Innovation* [online]. 2021, **4**(1), 23–33 [vid. 2023-05-12]. ISSN 2522-8765. Dostupné z: doi:10.1007/s42154-020-00126-w
139. CHMELICEK, Petr, Stuart D. CALVERLEY, Radu S. DRAGAN a Kais ATALLAH. Dual Rotor Magnetically Geared Power Split Device for Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2019, **55**(2), 1484–1494 [vid. 2023-05-12]. ISSN 0093-9994, 1939-9367. Dostupné z: doi:10.1109/TIA.2018.2883547
140. ZHAO, Hang a Chunhua LIU. Design of an Effective Double-Rotor Machine with Robust Mechanical Structure. In: *2018 Asia-Pacific Magnetic Recording Conference (APMRC): 2018 Asia-Pacific Magnetic Recording Conference (APMRC)* [online]. 2018, s. 1–2. Dostupné z: doi:10.1109/APMRC.2018.8601067
141. MOURA, Scott. Plug-in hybrid electric vehicle power management: Optimal control and battery sizing [online]. 2023. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/PLUG-IN-HYBRID-ELECTRIC-VEHICLE-POWER-MANAGEMENT-%3A-Scott-Moura/76c896914d3036baa54e5e1ad54604f3218b6f35>

142. CARDOSO, Daniel S., Paulo O. FAEL a António ESPÍRITO-SANTO. A review of micro and mild hybrid systems. *Energy Reports* [online]. 2020, **6**, The 6th International Conference on Energy and Environment Research - Energy and environment: challenges towards circular economy, 385–390 [vid. 2023-05-12]. ISSN 2352-4847. Dostupné z: doi:10.1016/j.egy.2019.08.077
143. What is the difference between micro, mild, full and plug-in hybrid electric vehicles. *x-engineer.org* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/micro-mild-full-hybrid-electric-vehicle/>
144. Napětí akumulátorů - od článků k napěťovým systémům bateriových úložišť. *TZB-info* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/20416-napeti-akumulatoru-od-clanku-k-napetovym-systemum-bateriovych-ulozist>
145. YANG, Yinye, Weisheng JIANG a Piranavan SUNTHARALINGAM. Plug-In Hybrid Electric Vehicles. In: [online]. 2014, s. 465–490. ISBN 978-1-4665-9769-3. Dostupné z: doi:10.1201/b17506-15
146. PISANTI, C., G. RIZZO a V. MARANO. Energy Management of Through-The-Road Parallel Hybrid Vehicles. *IFAC Proceedings Volumes* [online]. 2014, **47**(3), 19th IFAC World Congress, 2118–2124 [vid. 2023-05-12]. ISSN 1474-6670. Dostupné z: doi:10.3182/20140824-6-ZA-1003.02494
147. Peugeot launches 3008 Hybrid4, first production diesel through-the-road hybrid. *Autoblog* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.autoblog.com/2010/08/24/peugeot-launches-3008-hybrid4-worlds-first-production-diesel-t/>
148. GÜNEY, Bekir a Halil KILIÇ. Research on Regenerative Braking Systems: A Review. *International Journal of Science and Research (IJSR)* [online]. 2020, **9**, 160–166. Dostupné z: doi:10.21275/SR20902143703
149. DOYLE, Aisling a Tariq MUNEER. 2 - Traction energy and battery performance modelling. In: Tariq MUNEER, Mohan Lal KOLHE a Aisling DOYLE, ed. *Electric Vehicles: Prospects and Challenges* [online]. B.m.: Elsevier, 2017 [vid. 2023-05-24], s. 93–124. ISBN 978-0-12-803021-9. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803021-9.00002-1
150. TANG, Zi, Hong ZHANG, Zhi KONG a Wei WANG. Development of Hybrid Control Unit Hardware for Hybrid Electric Vehicle. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2014, 1078–1082. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.536-537.1078
151. EO, Jeong, Youn JUNG, Dae PARK a Chung LEE. Development of Combined Control Unit for Hybrid Electric Vehicle. *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems* [online]. 2010, 41–52. Dostupné z: doi:10.4271/2010-01-0484
152. LIVINT, G., Vasile HORGA, Marcel RA?T?OI a Mihai ALBU. Control of Hybrid Electrical Vehicles. In: [online]. 2011. ISBN 978-953-307-477-1. Dostupné z: doi:10.5772/16637
153. 1918 Eveready Autoped Scooter. *The Online Bicycle Museum* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://onlinebicyclemuseum.co.uk/1918-eveready-autoped-scooter/>
154. HORČÍK, Jan. Yamaha chce prodávat hybridní motorku Gen-Ryu. *Hybrid.cz* [online]. 25. červen 2009 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/yamaha-chce-prodavat-hybridni-motorku-gen-ryu/>

155. Yamaha Back in the Hybrid Game. *Cycle World* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.cycleworld.com/story/motorcycle-news/yamaha-back-in-the-hybrid-game/>
156. GARRETT, Jerry. A BMW to Ride When a Trip Is Long and Time Is Short. *The New York Times* [online]. 2007 [vid. 2023-05-13]. ISSN 0362-4331. Dostupné z: <https://www.nytimes.com/2007/04/15/automobiles/autoreviews/15BIKE.html>
157. Yamaha's radical adjustable electric motorcycle. *New Atlas* [online]. 28. říjen 2005 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://newatlas.com/yamahas-radical-adjustable-electric-motorcycle/4686/>
158. QUICK, Amanda. Concept J: Kawasaki To Bring Three Wheels To The Track. *webBikeWorld* [online]. 20. září 2021 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.webbikeworld.com/concept-j-kawasaki-to-bring-three-wheels-to-the-track/>
159. Vitesco presents improved hybrid motorcycle drive - electrive.com. <https://www.electrive.com/> [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.electrive.com/2022/11/08/vitesco-presents-improved-hybrid-motorcycle-drive/>
160. Vitesco now offers a hybrid motorcycle system; here are the pros and cons. *New Atlas* [online]. 9. listopad 2022 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://newatlas.com/motorcycles/hybrid-motorcycle-vitesco/>
161. Piaggio MP3 Hybrid 300ie. *Piaggio Group* [online]. 11. září 2017 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.piaggiogroup.com/en/archive/press/piaggio-mp3-hybrid-300ie>
162. Item-pcx-hev. *Honda Global* [online]. [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://global.honda/innovation/technology/motorcycle/ecology/item-pcx-hev.html>
163. PIAGGIO - MP3 LT SPORT 500 IE(2016) SCOOTER. *motostop.gr* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.motostop.gr/moto/piaggio-mp3-lt-sport-500-ie-2016-scooter/14502>
164. *KTM-D390-SPC-13-16-Doc71111717Rev0Apr-16.pdf* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.eskayautomotive.com/pdf/2W/KTM-D390-SPC-13-16-Doc71111717Rev0Apr-16.pdf>
165. 2022 KTM RC 390. *Motorcycle Specs* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: https://www.motorcyclespecs.co.za/model/ktm/KTM_rc390_22.html
166. KTM 390 Duke. *Motorcycle Specs* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.motorcyclespecs.co.za/model/ktm/KTM%20390%20Duce%2013.htm>
167. 2016 KTM RC390 launched in India at Rs 2.13 lakh. *BikeWale* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.bikewale.com/news/2016-ktm-rc390-launched-in-india-at-rs-213-lakh/>
168. Maha LPS 3000. *BA052301-en.pdf* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: https://www.maha.de/restriction/check-asset/support_documents/dokumente/Betriebsanleitungen/04%20Leistungsmesstechnik/BA052301-en.pdf?_locale=es
169. Bosch injection valve EV-14. *Data Sheet_67797771_Injection_Valve_EV_14.pdf* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: https://www.bosch-motorsport.com/content/downloads/Raceparts/Resources/pdf/Data%20Sheet_67797771_Injection_Valve_EV_14.pdf

170. Ktm 390 Bikes Slipper Clutch Assembly. *indiamart.com* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/ktm-390-bikes-slipper-clutch-assembly-23302980162.html>
171. Flywheel with original freewheel Ktm 390 duke 2012 2016. *Motoricambi39 Parts* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.motoricambi39.it/en/articolo.asp?iid=82704&txt=Flywheel%20with%20original%20freewheel%20Ktm%20390%20duke%202012%202016#.ZF4aWxHP2z5>
172. NOVA 10. *Plettenberg* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://plettenbergmotors.com/product/nova-10-en/>
173. NOVA 15. *Plettenberg* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://plettenbergmotors.com/product/nova-15-en/>
174. NOVA 30. *Plettenberg* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://plettenbergmotors.com/product/nova-30-en/>
175. *NOVA-15-50-MKR.pdf* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://plettenbergmotors.com/wp-content/uploads/2022/03/NOVA-15-50-MKR.pdf>
176. *Nova_15_50_B6_P30_HF_MST140-200.pdf* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: https://plettenbergmotors.com/wp-content/uploads/2022/03/Nova_15_50_B6_P30_HF_MST140-200.pdf
177. KBL - General Brushless Motor Controller with Regen (12V-96V) (100A-500A). *Kelly Controls* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://kellycontroller.com/shop/kbl/>
178. KSL - Sensorless Brushless Motor Controller (12V-72V) (100-500A). *Kelly Controls* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://kellycontroller.com/shop/ksl/>
179. MST 140-200 – Plettenberg. *Plettenberg* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://plettenbergmotors.com/product/mst-140-200-en/>
180. 100A 4-20S Electronic Speed Controller (ESC) for Single BLDC Motor. *ATO.com* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.ato.com/100a-4-20s-electronic-speed-controller>
181. BLDC motor controller. *Golden Motor* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.goldenmotor.com/>
182. BMS JK SMART 8-24s 200A s aktivním balancerem | E-pohon - elektrokola a sety na přestavbu pro všechny. *e-pohon.cz* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: https://www.e-pohon.cz/bms-jk-smart-8-24s-200a-s-aktivnim-balancerem?gclid=CjwKCAiA_6yfBhBNEiwAkmXy5zwSClBt3p3eM3IxxosB8Zfw25Rr4T_GzSEVuwvfgT3vSb6q-cK3xoC09UQA_vD_BwE
183. LG INR18650-MJ1 3500mAh - 10A. *RCStudio* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://rcstudio.cz/cs/baterie/533-lg-inr18650-mj1-3500mah-10a.html>
184. LG 18650 ICR18650-HG2 3000mAh 20A. *RCStudio* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://rcstudio.cz/cs/baterie/534-lg-18650-icr18650-hg2-3000mah-20a.html>



185. Sony / Murata US21700VTC6A 4000mAh - 40A. *RCStudio* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://rcstudio.cz/cs/baterie/700-sony-murata-us21700vtc6a-4000mah-40a-9503385386789.html>
186. Sony / Murata 18650 US18650VTC6 3000mAh 30A. *RCStudio* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: https://rcstudio.cz/cs/baterie/767-sony-murata-18650-us18650vtc6-3000mah-30a.html?gclid=Cj0KCQjwqoibBhDUARIsAH2OpWiOn4NGVVbkDhT3Kfc8qc9I9rkZpY8TKy_vPw2ebkVbXVHI-B2XYkEaAk9IEALw_wcB
187. Buy Maisto KTM RC 390 - Multicolor Online at Low Prices in India. *Amazon.in* [online]. [vid. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.amazon.in/Maisto-KTM-Diecast-Bike-Model/dp/B01JA596UU>
188. Why Do Full EVs Still Have a 12v Battery? *MUO* [online]. 6. únor 2023 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.makeuseof.com/why-do-full-evs-still-have-12v-battery/>
189. DXIANG. Why Do Fully Electric Vehicles Still Have a 12V Battery in Them? *Midtronics* [online]. 28. červen 2022 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.midtronics.com/blog/why-do-fully-electric-vehicles-still-have-a-12v-battery-in-them/>
190. Měnič napětí z 50-90V na 12V, 10A, 120W, IP68 | AMPUL.eu. *AMPUL* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: https://www.ampul.eu/cs/menice-napeti/4247-menic-napeti-z-50-90v-na-12v-10a-120w-ip68?gclid=Cj0KCQjw0tKiBhC6ARIsAAOXutmYtP_H61IUUsRwnyjw5WJXz6UiGY7SrcaspOu7T8rABDXUFyv-6cEaAgZWEALw_wcB
191. Control of Hybrid Electric Vehicles. *Guzzella.pdf* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <http://www.cs.cmu.edu/~cga/ok/Guzzella.pdf>
192. ALEMAYEHU, Getachew a Ramesh Babu NALLAMOTHU. Programmable logic controller (PLC) application for hybrid electric vehicle (HEV) simulator. [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/320287034_Programmable_logic_controller_PLC_application_for_hybrid_electric_vehicle_hev_simulator
193. LI, Weimin, Guoqing XU, Zhancheng WANG a Yangsheng XU. A Hybrid Controller Design For Parallel Hybrid Electric Vehicle. In: [online]. 2007, s. 450–454. Dostupné z: doi:10.1109/ICITECHNOLOGY.2007.4290517
194. SECM70. *Moto Hawk* [online]. [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <http://mcs.woodward.com/support/wiki/index.php?title=SECM70>
195. TOBIÁŠ, Martin. Analýza měřených dynamických stavů motocyklů [online]. Brno, 2019 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116752>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
196. KTM RC 390 review, road test - Performance. *Autocar India* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.autocarindia.com/bike-reviews/ktm-rc-390-review-road-test-392479/performance>
197. 2022 KTM RC 390 Performance Explained - ZigWheels. *ZigWheels.com* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.zigwheels.com/news-features/general-news/2022-ktm-rc-390-performance-explained/46225/>

198. VIRA, Dhanil. KTM Duke 390 vs KTM RC 390 – What Should You Be Buying. *MotorBeam* [online]. 16. září 2014 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.motorbeam.com/ktm-duke-390-ktm-rc-390-shootout-comparison/>
199. MOCK, Peter, John GERMAN, Anup BANDIVADEKAR a Iddo RIEMERSMA. Discrepancies between type- approval and “real-world” fuel- consumption and CO2 values [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/288267481_Discrepancies_between_type-approval_and_real-world_fuel_consumption_and_CO2_values
200. TUTUIANU, Monica, Pierre BONNEL, Biagio CIUFFO, Takahiro HANIU, Noriyuki ICHIKAWA, Alessandro MAROTTA, Jelica PAVLOVIC a Heinz STEVEN. Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2015, **40**, 61–75 [vid. 2023-05-12]. ISSN 13619209. Dostupné z: doi:10.1016/j.trd.2015.07.011
201. *ECE-TRANS-180a2e.pdf* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a2e.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

i_6	[-]	převodový poměr 6. (nejvyššího) rychlostního stupně
I_{con}	[A]	kontinuální dovolený proud
I_{max}	[A]	maximální dovolený proud
i_p	[-]	převodový poměr primárního stálého převodu
i_s	[-]	převodový poměr sekundárního stálého převodu
k	[-]	počet otáček měřeného kola
n_c	[1/min]	otáčky centrálního kola
n_k	[1/min]	otáčky korunového kola
n_{max}	[1/min]	maximální otáčky motoru
n_u	[1/min]	otáčky unašeče satelitů
r_d	[m]	poloměr zadního kola
S	[m]	ujetá dráha
U_{max}	[V]	maximální dovolené napětí
U_{nom}	[V]	nominální napětí
v_{max}	[km/h]	maximální teoretická rychlost vozidla
z_c	[-]	počet zubů centrálního kola
z_k	[-]	počet zubů korunového kola

AC	Alternating current – Střídavý proud
BLAC	Brushless alternating current – Bezkartáčový střídavý elektromotor
BLDC	Brushless direct current – Bezkartáčový stejnosměrný elektromotor
BSFC	Brake specific fuel consumption – Měrná spotřeba paliva
C-rate	Jednotka rychlosti nabíjení a vybíjení baterie
CVT	Continuously variable transmission – Bezestupňová převodovka
DC	Direct current – Stejnosměrný proud
DCT	Dual-clutch transmission – Dvojspojková převodovka
DOHC	Double over head camshaft – Ventilový rozvod se dvěma vačkovými hřídeli v hlavě
ECU	Electronic control unit – Řídicí jednotka
FC	Fuel consumption – Spotřeba paliva
HCU	Hybrid control unit – Řídicí jednotka hybridu
HEV	Hybrid electric vehicle
Li-ion	Lithium iontový (akumulátor)
MHEV	Mild hybrid electric vehicle
Mt	Točivý moment
NEDC	New European Driving Cycle
Ni-Cd	Nikl-kadmiový (akumulátor)

NiMH	Nikl-metal hydridový (akumulátor)
OBD	On-Board Diagnostics – Palubní diagnostika
OHC	Over head camshaft – Ventilový rozvod s vačkovou hřídelí v hlavě
OHV	Over head valve – Ventilový rozvod s vačkovou hřídelí v bloku
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
PMSM	Permanent magnet synchronous motor – Synchronní elektromotor s perm. magnety
PWM	Pulse width modulation – Šířková pulzní modulace
SOC	State of charge – stav nabití baterií
SV	Side Valves – Ventilový rozvod s ventily v bloku
TCU	Transmission control unit – Řídicí jednotka převodovky
WLTC	Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles
WLTP	Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Procedure
WMTC	World Motorcycle Test Cycle

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

<i>Obr. 1</i> Michaux-Perreaux 1868 [1].....	12
<i>Obr. 2</i> Reitwagen 1885 [2].....	12
<i>Obr. 3</i> DKW V3 [16]	15
<i>Obr. 4</i> Koncept BMW W3 [24]	17
<i>Obr. 5</i> Hercules W2000 [29].....	17
<i>Obr. 6</i> Royal Enfield Bullet [31].....	18
<i>Obr. 7</i> Odstředivá spojka [52].....	21
<i>Obr. 8</i> Manuální motocyklová převodovka [57].....	22
<i>Obr. 9</i> Vybíjecí charakteristika superkapacitoru (A,C) a lithiové baterie (B,D) [85].....	28
<i>Obr. 10</i> PWM – šířková pulzní modulace [89].....	29
<i>Obr. 11</i> Otáčková charakteristika spalovacího motoru [120]	32
<i>Obr. 12</i> Otáčková charakteristika elektromotoru [124]	33
<i>Obr. 13</i> Mapa účinnosti elektromotoru [124]	33
<i>Obr. 14</i> Jízdní cykly NEDC, WLTC, WMTC [131].....	35
<i>Obr. 15</i> Vývoj emisních norem pro motocykly [101].....	36
<i>Obr. 16</i> Schéma paralelního hybridu s možnostmi umístění elektromotoru [132, 133].....	36
<i>Obr. 17</i> Schéma sériového hybridu [132]	37
<i>Obr. 18</i> Schéma kombinovaného hybridu se dvěma spojkami [137]	38
<i>Obr. 19</i> Schéma kombinovaného hybridu s planetovým děličem výkonu [132, 141].....	39
<i>Obr. 20</i> Piaggio MP3 [163].....	42
<i>Obr. 21</i> Zkušební motocykl	44
<i>Obr. 22</i> KTM RC 390 [167].....	44
<i>Obr. 23</i> Upevnění předního kola na válcové zkušebně.....	46
<i>Obr. 24</i> Měření na válcové zkušebně	46
<i>Obr. 25</i> Měření na válcové zkušebně	46
<i>Obr. 26</i> Naměřená vnější otáčková charakteristika	47
<i>Obr. 27</i> Spojkový koš [170].....	48
<i>Obr. 28</i> Kryt alternátoru.....	49
<i>Obr. 29</i> Schéma uspořádání hybridního motocyklu.....	49
<i>Obr. 30</i> Elektromotor Plettenberg NOVA 15-50 [173]	50
<i>Obr. 31</i> Kryt alternátoru.....	51
<i>Obr. 32</i> Kryt alternátoru modifikovaný	51
<i>Obr. 33</i> Zástavba planetového převodu a elektromotoru	51
<i>Obr. 34</i> Kelly KBL [177].....	53
<i>Obr. 35</i> BMS JK-B2A24S20P [182].....	53
<i>Obr. 36</i> Sony/Murata US 21700VTC6A [185].....	55
<i>Obr. 37</i> Umístění trakční baterie [187]	55
<i>Obr. 38</i> Trakční baterie	55
<i>Obr. 39</i> Ampul AM2187 [190]	56

<i>Obr. 40</i> Woodward SECM 70 [194]	57
<i>Obr. 41</i> Model jednoválcové motorové jednotky	57
<i>Obr. 42</i> Úplná charakteristika motoru.....	58
<i>Obr. 43</i> Model konvenčního motocyklu	59
<i>Obr. 44</i> Model podvozku motocyklu	59
<i>Obr. 45</i> Model hybridního motocyklu	60
<i>Obr. 46</i> Řídicí struktura hybridního motocyklu.....	62
<i>Obr. 47</i> Řídicí struktura včetně pomocných prvků	63
<i>Obr. 48</i> Zrychlení z 0 na 100 km/h	64
<i>Obr. 49</i> Zrychlení z 60 na 130 km/h	65
<i>Obr. 50</i> Podrobný přehled sledovaných veličin - Zrychlení z 60 na 130 km/h	65
<i>Obr. 51</i> Zrychlení z 60 na 150 km/h	66
<i>Obr. 52</i> Sprint na 1 km.....	67
<i>Obr. 53</i> Srovnání spotřeby obou koncepcí při NEDC	68
<i>Obr. 54</i> Srovnání točivého momentu obou koncepcí při NEDC	68
<i>Obr. 55</i> Srovnání spotřeby obou koncepcí při WLTC	69
<i>Obr. 56</i> Srovnání točivého momentu obou koncepcí při WLTC.....	69
<i>Obr. 57</i> Srovnání spotřeby obou koncepcí při WMTC.....	70
<i>Obr. 58</i> Srovnání točivého momentu obou koncepcí při WMTC.....	70
<i>Obr. 59</i> Úsek WMTC cyklu - srovnání točivého momentu.....	71
<i>Obr. 60</i> Srovnání spotřeby obou koncepcí při 20 opakováních WMTC	71
<i>Obr. 61</i> Srovnání spotřeby obou koncepcí při městském cyklu	72
<i>Obr. 62</i> Srovnání točivého momentu obou koncepcí při městském cyklu	72
<i>Obr. 63</i> Srovnání spotřeby obou koncepcí při mimoměstském cyklu	73
<i>Obr. 64</i> Srovnání točivého momentu obou koncepcí při mimoměstském cyklu.....	74
<i>Obr. 65</i> Srovnání spotřeby obou koncepcí při dálničním cyklu	74
<i>Obr. 66</i> Srovnání točivého momentu obou koncepcí při dálničním cyklu	75
<i>Obr. 67</i> Schéma závodního okruhu.....	76
<i>Obr. 68</i> Srovnání koncepcí na závodním okruhu	76
<i>Tab. 1</i> Technické specifikace KTM RC 390 [164–166]	44
<i>Tab. 2</i> Technické specifikace elektromotorů Engiro [124].....	50
<i>Tab. 3</i> Technické specifikace elektromotorů Plettenberg NOVA [172–174].....	50
<i>Tab. 4</i> Technické specifikace kontrolérů elektromotoru [177–181]	52
<i>Tab. 5</i> Technické specifikace lithium-iontových článků [183–186].....	54
<i>Tab. 6</i> Výsledky testů při plném zatížení	77
<i>Tab. 7</i> Výsledky jízdních cyklů.....	77
<i>Tab. 8</i> Soupis použitých dílů [173, 177, 182, 185, 190, 194]	78
<i>Tab. 9</i> Srovnání nákladů konvenčního a hybridního motocyklu	78

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1* Původní řídicí struktura
- Příloha 2* Podmínky přechodu mezi jízdními režimy
- Příloha 3* Zrychlení z 0 na 100 km/h - konvenční motocykl
- Příloha 4* Zrychlení z 0 na 100 km/h - hybridní motocykl
- Příloha 5* Zrychlení z 60 na 130 km/h - konvenční motocykl
- Příloha 6* Zrychlení z 60 na 130 km/h - hybridní motocykl
- Příloha 7* Zrychlení z 60 na 150 km/h - konvenční motocykl
- Příloha 8* Zrychlení z 60 na 150 km/h - hybridní motocykl
- Příloha 9* Sprint na 1 km - konvenční motocykl
- Příloha 10* Sprint na 1 km - hybridní motocykl
- Příloha 11* NEDC - konvenční motocykl
- Příloha 12* NEDC - hybridní motocykl
- Příloha 13* WLTC - konvenční motocykl
- Příloha 14* WLTC - hybridní motocykl
- Příloha 15* WMTC - konvenční motocykl
- Příloha 16* WMTC - hybridní motocykl
- Příloha 17* Městský cyklus - konvenční motocykl
- Příloha 18* Městský cyklus - hybridní motocykl
- Příloha 19* Mimoměstský cyklus - konvenční motocykl
- Příloha 20* Mimoměstský cyklus - hybridní motocykl
- Příloha 21* Dálniční cyklus - konvenční motocykl
- Příloha 22* - Dálniční cyklus - hybridní motocykl