

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
ROZVAHA HYBRIDNÍHO POHONU PRO MOTOROVÝ VŮZ

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan JIROTKA**
Osobní číslo: **E11N0082P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Rozvaha hybridního pohonu pro motorový vůz**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Vyberte vhodné vozidlo pro rekonstrukci na hybridní pohon.
2. Sestavte zjednodušený simulační model železničního vozidla s hybridním pohonem.
3. Na zvolených tratích proveďte návrh kapacit akumulátorů energie na vozidle.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Janda, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh přestavby stávajícího motorového vozu s elektrickým přenosem výkonu na hybridní pohon. Jejím cílem je, pomocí simulace jízdy vlaku na skutečných tratích, navrhnout ideální typ akumulátorů energie a jejich kapacitu. Věnuje se také souvisejícím úpravám vozu, přínosu takové přestavby a návratnosti investice. Výsledkem by měl být energeticky úspornější a tišší motorový vůz vhodný pro nasazení na různých typech tratí.

Klíčová slova

Hybridní pohon, motorový vůz, rekuperace, akumulátor energie.

Abstract

This master thesis is focused on the design of reconstruction of the existing diesel motor unit with electric power transmission to the hybrid drive. Its goal is to simulate train ride on the lines to design the ideal type of energy accumulator and their capacity. Also is related of modifications of the unit, benefits of the reconstruction and return of investment. The result should be more energy efficient and quieter railway vehicle suitable for use on different types of tracks.

Key words

Hybrid drive, diesel motor unit, recuperation, power accumulator.

Prohlášení

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

V Plzni dne 5.5.2014

.....
Jan Jírotka

Obsah

1. ÚVOD	1
2. HYBRIDNÍ POHONY	2
ROZDĚLENÍ PODLE STUPNĚ HYBRIDIZACE	2
ROZDĚLENÍ PODLE USPOŘADÁNÍ POHONU	2
STÁVAJÍCÍ HYBRIDNÍ KOLEJOVÁ VOZIDLA	4
3. VOLBA VOZU PRO PŘESTAVBU.....	7
MOTOROVÝ VŮZ ŘADY 843	7
TECHNICKÉ PARAMETRY	8
4. ODPOR JÍZDY VLAKU	10
ODPOR ZRYCHLENÍ F_A	10
TAŽNÁ SÍLA F_T	11
VOZIDLOVÝ ODPOR F_o	11
TRAŤOVÝ ODPOR F_D	12
5. ÚPRAVY MOTOROVÉHO VOZU	14
SPALOVACÍ MOTOR	14
LiFePO4 AKUMULÁTOR (FULL HYBRID)	16
SUPERKONDENZÁTOROVÁ BATERIE (MILD HYBRID)	18
PŘENOS VÝKONU	20
PREDIKTIVNÍ ŘÍZENÍ HYBRIDNÍHO POHONU	22
6. SIMULACE JÍZDY VLAKU.....	23
FUNKCE JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ SIMULACE.....	23
GPS MĚŘENÍ JÍZDY VLAKU	24
ROZJEZDY A BRZDĚNÍ	24
SPOTŘEBA PALIVA	26
7. SIMULACE NA TRATÍCH.....	28
PLZEŇ – MOST	29
MOST – PLZEŇ	36
PLZEŇ – KLATOVY	41
KLATOVY – PLZEŇ.....	44
KLATOVY – Ž. RUDA-ALŽBĚTÍN	47
Ž. RUDA-ALŽBĚTÍN – KLATOVY	50
PŘEHLED VÝSLEDKŮ	53
8. NÁVRATNOST INVESTICE.....	54
SERVISNÍ NÁKLADY SPALOVACÍHO MOTORU.....	54
ŽIVOTNOST AKUMULÁTORŮ ENERGIE	55
NÁKLADY NA PALIVO.....	55
CELKOVÉ NÁKLADY NA TRASE PLZEŇ – MOST – PLZEŇ	55
CELKOVÉ NÁKLADY NA TRASE PLZEŇ – KLATOVY – PLZEŇ.....	56
CELKOVÉ NÁKLADY NA TRASE KLATOVY – Ž. RUDA – KLATOVY	57
KOMBINOVANÝ AKUMULÁTOR ENERGIE.....	58
9. ZÁVĚR	59
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	60

Seznam symbolů a zkratek

SM	spalovací motor
TM	trakční motor
TG	trakční generátor
TS	trakční střídač
PŘ	převodovka
PP	pomocné pohony
VS	vozidlová síť
AKU	akumulátor energie
SC	superkondenzátor
BAT	baterie
SOC	state of charge – stav nabití (akumulátoru energie)
EDB	elektrodynamická brzda
DPF	diesel particulate filter – filtr pevných částic
DKV	depo kolejových vozidel
DP	diplomová práce
Obr.	obrázek
Tab.	tabulka
TK	temeno kolejnice
$g [m \cdot s^{-2}]$	tíhové zrychlení
$m [kg]$	hmotnost
$P [kW]$	výkon
$M [Nm]$	točivý moment
$n [min^{-1}]$	otáčky
$\rho [-]$	součinitel rotujících hmot
$S [l]$	spotřeba paliva
$G [l/100 km]$	průměrná spotřeba paliva
$Mh [h]$	motohodina

1. Úvod

Vysoké ceny energie, stejně jako nutnost ochrany životního prostředí, nutí výrobce i provozovatele železničních vozidel neustále hledat nové možnosti vedoucí k jejich energeticky úspornějšímu provozu. V budoucnosti je navíc nutné očekávat další zvyšování cen energií z důvodu zmenšujících se zásob fosilních paliv. V podstatě všechny hlavní evropské železniční tratě jsou již elektrifikovány, stále ale jde o pouze 47 % z celkových více než 350 000 kilometrů. Na zbylých tratích se vzhledem k většinou nízkým přepravním výkonům elektrifikace nevyplatí a i nadále tam tedy budou provozována vozidla nezávislé trakce. U těchto vozidel dosud úpravy pro snížení energetické náročnosti představovaly zejména zvyšování účinnosti všech hnacích komponent a celkové odlehčování konstrukce. Opětovné využití brzděné energie však dosud bylo vzhledem k vlastnostem akumulčních zařízení značně omezené. V současné době ale již existuje několik typů výkonných akumulátorů energie vhodných pro použití v kolejových vozidlech. Právě zde se přitom skrývá největší potenciál pro snižování spotřeby paliva a tedy i provozních nákladů a emisí výfukových plynů.

Tato práce je zaměřena na přestavbu motorového vozu na hybridní pohon s využitím akumulátorů elektrické energie. Řeší koncepci hybridního pohonu, druhu akumulátoru energie i velikost jeho kapacity. Jejím cílem je zjistit proveditelnost a celkový přínos takové přestavby. Samotná jízda je řešena pomocí její simulace na třech reálných tratích, které se liší svým charakterem i typem provozu. Model vozidla respektuje všechny podstatné fyzikální skutečnosti jeho pohybu a věrně tak popisuje průběh idealizované jízdy. Závěrem se práce samozřejmě věnuje také celkovým nákladům na přestavbu i dlouhodobý provoz navrženého vozu.

2. Hybridní pohony

Vozidlo využívající k pohonu více zdrojů energie je označováno jako hybridní. V železniční dopravě takto dosud byla nazývána vozidla nezávislé trakce vybavená pantografy pro provoz na elektrifikovaných tratích. Obdobným typem hybridního vozidla jsou trolejbusy vybavené dieselaagregátem umožňujícím jízdu mimo troleje. Jinými typy hybridních pohonů jsou řešení známá zejména z automobilů vybavených akumulátory energie. Navrhovaný motorový vůz je právě takovým hybridním vozidlem. Dělení dle [5].

Rozdělení podle stupně hybridizace

Mikro hybrid využívá k pohonu vozidla pouze primárního zdroje energie, sekundární zdroj energie slouží pouze k pohonu a napájení pomocných zařízení. Přínos tohoto řešení je malý, je ale snadno proveditelné u železničních vozidel s elektrickým přenosem výkonu vybavených EDB.

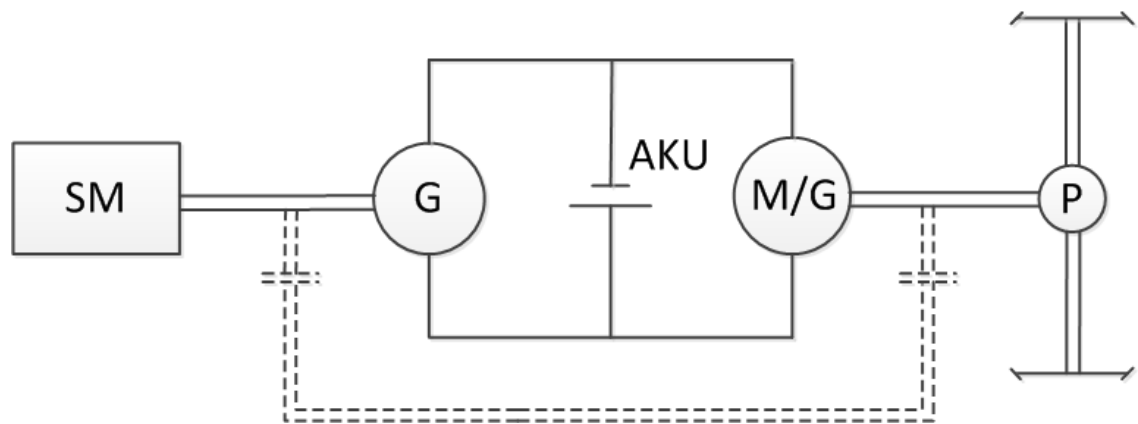
Mild hybrid je poháněn zejména primárním zdrojem energie ale pro zlepšení akcelerace, rekuperační brzdění a pohon pomocných zařízení využívá sekundárního zdroje. Takovým systémem je například Honda IMA (Integrated Motor Assist), známý především z menších automobilů.

Full hybrid může být poháněn jak primárním tak i sekundárním zdrojem nebo oběma zároveň. Je nejnákladnějším systémem ale umožňuje zejména dobré využití brzděné energie. Z automobilového průmyslu je nejznámějším příkladem Toyota HSD (Hybrid Synergy Drive).

Rozdělení podle uspořádání pohonu

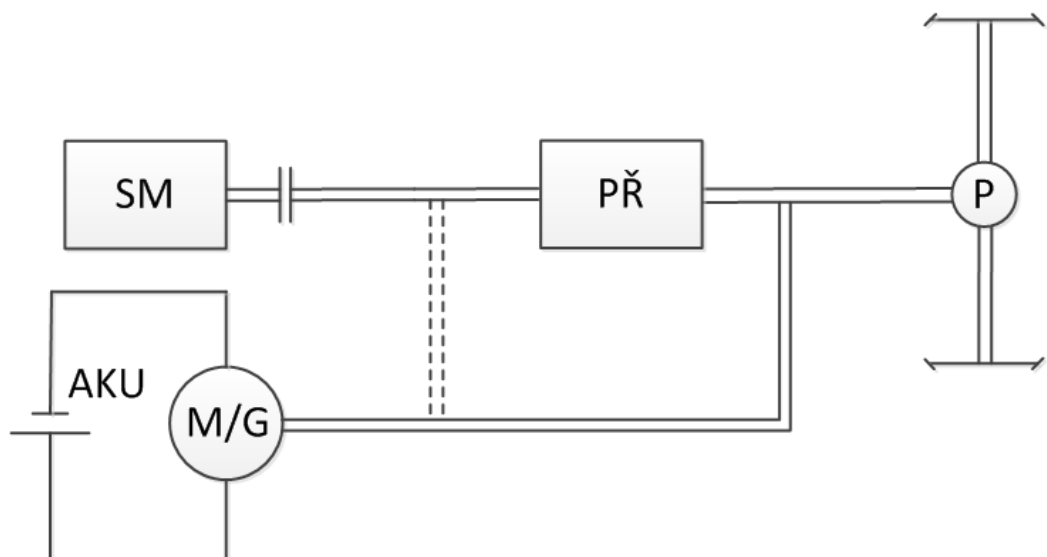
Sériový hybridní pohon je poměrně jednoduchý systém, kde jsou součásti tohoto hybridního pohonu řazeny sériově. Je vhodný zejména pro přestavby stávajících vozidel s elektrickým přenosem výkonu a i zde navrhovaná přestavba motorového vozu je sériovým hybridem. Spalovací motor obvykle pracuje v optimálních otáčkách a dobíjí akumulátory energie nebo přímo napájí trakční elektromotor. Při rekuperačním brzdění pracuje trakční motor v generátorovém režimu a dobíjí akumulátory. Nevýhodou jsou neustálé ztráty energie jak v trakčním motoru, tak v generátoru. Úspory rekuperací ale zejména při častějším zastavování

podstatně převažují nad ztrátami. Při novostavbě je možné tyto ztráty snížit mechanickým přemostěním generátoru a elektromotoru a spojit přímo hřídel spalovacího motoru s hnací nápravou.



Obr. 1: Uspořádání sériového hybridního pohonu

Paralelní hybridní pohon může k jízdě vozidla využívat přímo spalovací motor spojený přes spojku a převodovku s hnacími koly. Elektromotor se připojuje v případě potřeby vyššího výkonu například při rozjezdu a díky tomu může mít spalovací motor nižší výkon. Při brzdění pracuje elektromotor v generátorovém režimu a dobíjí akumulátor. Nevýhodou je vzhledem k charakteristice spalovacího motoru nutnost použití víceúrovňové převodovky.



Obr. 2: Uspořádání paralelního hybridního pohonu

Stávající hybridní kolejová vozidla

ČKD 718.5

Pro zvýšení efektivity posunu vznikl v 80. letech 20. století v ČKD Praha prototyp čtyřnápravové hybridní posunovací lokomotivy 718.501 určené pro středně těžký posun a konstrukčně vycházející z řady 730. Byla vybavena šestiválcovým vznětovým motorem LIAZ o výkonu pouze 189 kW spojeným s trakčním alternátorem, čtyřmi stejnosměrnými trakčními motory a trakčním akumulátorem sestaveným ze 480 NiCd článků NKS 300 o jmenovitém napětí 576 V a kapacitě 300 Ah. Šlo o mild hybridní systém, kde byl požadovaný trakční výkon přednostně kryt ze spalovacího motoru a až při potřebě vyššího výkonu byla energie dotována z baterie a to až 360 kW, maximální výkon lokomotivy tedy činil 510 kW. Přestože lokomotiva v ekonomice provozu předčila obdobné typy s klasickým pohonem, výroba dalších hybridních strojů nebyla realizována, údajně kvůli nedostatku akumulátorů. [15]



Obr. 3: Prototyp hybridní lokomotivy ČKD 718.0501, foto ČKD Praha

Hitachi Ki-Ha E200

Tento motorový vůz vyvinula společnost Hitachi ve spolupráci s dopravcem Japan Railway East, který jej od července 2007 nasadil do pravidelného provozu s cestujícími na trati Koumi Line v prefektuře Nagano. Dva trakční asynchronní motory o výkonu 95 kW jsou napájeny alternátorem 180 kW poháněným vznětovým motorem a Li-ion akumulátory s kapacitou 10 kWh. Spotřeba paliva je údajně nižší o více než 10 % oproti standardním vozům, došlo ke snížení škodlivých emisí výfukových plynů o 60 % a také k podstatnému snížení hluchnosti ve stanicích díky vypínání spalovacího motoru. [13] [16]



Obr. 4: Motorové vozy Hitachi Ki-Ha E200, foto Hitachi

Toshiba HD300

Sériový full hybridní systém této posunovací lokomotivy tvoří vznětový motor o maximálním výkonu 242 kW, třífázový alternátor 170 kW, synchronní motory s permanentními magnety o celkovém maximálním výkonu 500 kW a Li-ion akumulátory s celkovou kapacitou 67 kWh. Při posunu vlaku o hmotnosti 700 t na nákladním nádraží v Tokiu (Tokyo Freight Terminal) vykazuje tato hybridní lokomotiva v porovnání s typem DE10 s hydrodynamickým přenosem výkonu o 36 % nižší spotřebu paliva a 62 % nižší emise NO_x. V současné době jsou již v provozu první 2 sériové kusy a během několika dalších let by měli postupně nahradit všechny stávající posunovací lokomotivy společnosti Japan Railway Freight. [14] [16]



Obr. 5: Lokomotiva Toshiba HD300, foto Toshiba

Siemens VT 642 Hybrid

Tato motorová jednotka vychází z původní Siemens Desiro VT 642 provozované v mnoha zemích světa. Dva původní vznětové agregáty MAN o maximálním výkonu 275 kW s hydromechanickým přenosem výkonu nahradily dvě paralelní full hybridní jednotky MTU o výkonu 315 kW, kde je vznětový motor s převodovkou doplněn o elektrický motor/generátor a Li-ion akumulátory umístěné na střeše vozidla. Jednotka je již v provozu na 37 km dlouhé trati se 14 zastávkami Aschaffenburg – Miltenberg nedaleko Frankfurtu a výrobce zde udává snížení spotřeby paliva o 25 %.



Obr. 6: Hybridní motorová jednotka Siemens Desiro VT642

Alstom Lirex

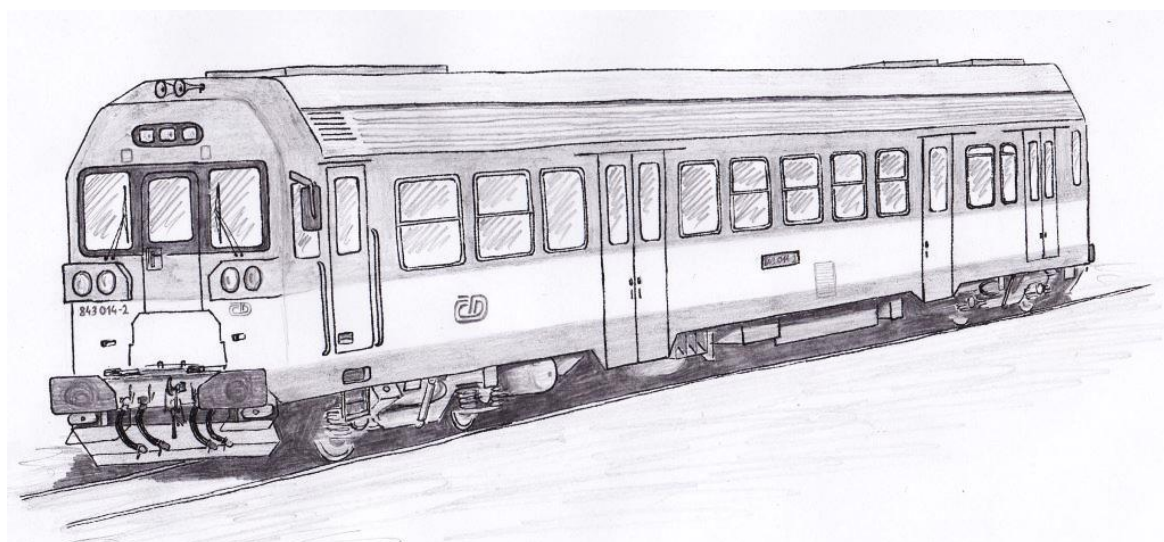
Zcela jiné řešení použila společnost Alstom při vývoji jednotky Coradia Lirex (řada 618) pro Deutsche Bahn. Prototyp vybavila dvěma karbonovými setrvačníky s celkovou kapacitou 12 kWh a špičkovým výkonem až 350 kW. Během brzdění se setrvačníky roztočí až na 25000 ot./min a takto uložená energie se následně opět využije při rozjezdu.

3. Volba vozu pro přestavbu

Pro přestavbu motorového vozu na hybridní pohon jsem zvolil český motorový vůz řady 843 přezdívaný Apollo. Hlavním důvodem je elektrický přenos výkonu vozu, v současnosti jediný takový provozovaný na české železnici. Úpravy jiného typu přenosu výkonu by byly příliš složité, nákladné a z celkově tedy nevhodné. Zároveň se, vzhledem k jeho stáří, blíží doba vhodná pro rozsáhlejší rekonstrukci. Popis a technické parametry vychází z [6].

Motorový vůz řady 843

Motorový vůz řady 843 je čtyřnápravový motorový vůz s dvěma trakčními agregáty a elektrickým přenosem výkonu. V letech 1995-1997 je vyráběla pro České dráhy společnost Moravskoslezská vagónka a.s. (dnes Škoda Vagonka a.s.). Je určen jako hnací vozidlo pro vnitrostátní dopravu na hlavních i vedlejších neelektrifikovaných tratích. Celkem bylo vyrobeno 31 kusů a jsou k nim určeny řídicí vozy řady Bftn⁷⁹¹ (dříve 943) a přípojné vozy řady Btn⁷⁵³ (dříve 043).



Obr. 7: Motorový vůz řady 843, kresba Ladislav Hrubý

Lehká samonosná konstrukce vozu je svařená z válcových a ohýbaných profilů a vnější opláštění bočnic a čel je tvořeno ocelovými plechy, opláštění střechy a podlaha jsou vyrobeny z profilovaných nerezových plechů. Podvozky jsou bezkolébkové konstrukce s primárním vypružením šroubovitými ocelovými pružinami a sekundárním vzduchovým vypružením. Motorový vůz je vybaven samočinnou kotoučovou tlakovou brzdou DAKO – P s kotouči na kolech, přidavnou brzdou, elektrodynamickou brzdou, doplňkovou brzdou zajišťující

spolupráci elektrodynamické a pneumatické brzdy, parkovací, záchrannou a ruční mechanickou brzdou. Pohon vozu zajišťují dva vznětové motory LIAZ M 1.2C ML 640D v horizontálním provedení s maximálním výkonem 300 kW. Jsou umístěny pod podlahou vozu a přírubově spojeny s trakčními alternátory. Každý agregát napájí přes trakční usměrňovač dva stejnosměrné trakční motory v přilehlém podvozku. Agregáty mají společné palivové hospodářství i pomocné stroje poháněné přes slučovací převodovku s volnoběžkami od předních konců obou naftových motorů. Zdrojovou soustavu tvoří třífázový alternátor s usměrňovačem a polovodičovou regulací. Je schopna pokrýt spotřebu motorového vozu a 2 přípojných vozů řady Btn⁷⁵³ nebo 1 přípojného vozu řady Btn⁷⁵³ a řídicího vozu řady Bfn⁷⁹¹. Vůz je vybaven systémem vícenásobného řízení umožňující ovládnutí dvou vozů z jednoho stanoviště.

Interiér vozu je rozdělen na dva oddíly pro cestující, zavazadlový oddíl, dva nástupní prostory, WC a kabiny strojvedoucího na obou čelech vozu. Vytápění vozu je teplovzdušné, využívá odpadní teplo z chlazení spalovacích motorů a naftový ohříváč, kabiny strojvedoucího jsou klimatizované. Sedadla jsou v uspořádání 2+2 proti sobě s uličkou uprostřed.

Technické parametry

Maximální rychlost	110 km/h
Trvalá tažná síla na obvodu kol	44 kN
Uspořádání náprav	Bo'Bo'
Počet míst k sezení/stání	54/60

Rozměry:

Délka vozu přes nárazníky	25.200 mm
Délka vozové skříně	24.270 mm
Šířka vozové skříně	2.850 mm
Výška střechy vozu nad TK	3.795 mm

Hmotnost a zatížení:

Hmotnost plně vyzbrojeného vozu vyzbrojeného 2/3 zásob nafty, vody a písku	56.000 kg ± 3 %
Hmotnost přepravovaných osob, nákladu a 1/3 zásob provozních hmot	11.085 kg

Spalovací motor:LIAZ M 1.2 C-ML 640 D, kapalinou chlazený vznětový řadový 6 válec, objem 11946 dm³

Jmenovitý výkon	300 kW
Maximální točivý moment při 1800 min ⁻¹	1592 Nm
Jmenovité otáčky	1.800 min ⁻¹
Měrná spotřeba paliva při jmenovitém výkonu	208 g/kWh + 7 %
Měrná spotřeba paliva na vnější charakteristice	198 g/kWh + 7 %
Spotřeba paliva při volnoběhu samotného motoru	1,35 kg/h
Celková suchá hmotnost	970 kg

Trakční alternátor:

Typ TA 614 WO 1, třífázový s vestavěným budičem

Jmenovitý výkon	260 kW
Maximální napětí	900 V
Jmenovitý trvalý proud	450 A
Maximální proud	800 A
Jmenovité otáčky	1.800 min ⁻¹

Trakční usměrňovač:

Typ PA – 28, 3f polořízený můstek, vzduchové náporové chlazení

Jmenovité napětí	900 V
Jmenovitý proud	450 A
Maximální proud	800 A

Trakční motory:

Typ TE 051 A 01, stejnosměrné se sériovým buzením

Jmenovitý příkon	130 kW
Maximální napětí při jmenovitém příkonu	450 V
Jmenovitý proud	450 A

Zdrojová souprava:

Alternátor TA 624 WO 1, usměrňovač PA 29 a regulátor RPG 1.

Jmenovitý výkon (n>850 ot/min)	24 kW
Celková hmotnost	180 kg

4. Odpor jízdy vlaku

Základní popis jízdy vlaku podle [1] vychází z pohybové rovnice jízdy vozidel. Urychlující síla F_a je rozdílem mezi tažnou silou na obvodu kol F_t a silami od vozidlového odporu F_o a traťového odporu F_s .

$$F = F_a = F_t - F_o - F_s \text{ [kN]}$$

Dynamika jízdy jednotlivých druhů vozidel se liší poměrem mezi tažnou silou na obvodu kol a silou pro překonání jízdních a traťových odporů.

Odpor zrychlení F_a

Vyjadřuje síly působící proti změně rychlosti pohybu a skládá se z odporu zrychlení posuvných hmot a odporu zrychlení rotujících hmot.

$$p_a = p_{pos} + p_{rot}$$

$$p_a = (1 + \rho) \cdot m \cdot a \text{ [\%o, -, kg, ms}^{-2}\text{]}$$

$$F_a = \frac{p_a}{1000} \cdot m \cdot g \text{ [kN, \%o, t, m/s}^2\text{]}$$

Empirické hodnoty součinitele rotujících hmot ρ jsou uvedeny v následující tabulce.

Skupina vozidel	Vozidla	ρ [-]
Vlaky	Obvyklé osobní nebo nákladní vlaky	0,06
	El. jednotky nebo mot. jednotky s el. přenosem výkonu	0,15 - 0,20
Vozidla	Motorové vozy s mechanickým přenosem výkonu	0,12 - 0,15
	Motorové vozy s elektrickým přenosem výkonu	0,2 - 0,25
	Osobní	0,04 - 0,06
	Nákladní prázdné	0,04 - 0,05
	Nákladní ložené	0,1 - 0,12
Lokomotivy	Parní	0,08 - 0,1
	Motorové	0,15 - 0,3
	Elektrické	0,2 - 0,3

Tab. 1: Součinitel rotujících hmot pro různé typy vozidel

Tažná síla F_t

Vzniká u hnacího vozidla přenosem točivého momentu motorů na kola, u tažených vozidel je způsobena silovým působením hnacího vozidla. Při jízdě tahem nabývá kladných hodnot a působí ve směru pohybu vozidla, při jízdě výběhem je nulová a při brzdění je záporná a působí proti směru pohybu. Zde je však již vhodnější ji nazývat silou brzdnou.

Vozidlový odpor F_o

Jde o celkový odpor vozidla působící proti jeho pohybu a skládá se z odporu z valení vznikajícího na styku kolo-kolejnice, odporu v ložiskách a odporu vnějšího prostředí (aerodynamický odpor). Určuje se měřením a vyjadřuje se pomocí měrného vozidlového odporu. Ten je součtem jednotlivých vozidlových odporů vztažených k hmotnosti vozidla a matematicky se obvykle vyjadřuje polynomem 2. řádu.

$$p_o(v) = a + b \cdot v + c \cdot v^2 \text{ [‰, km/h]}$$

$$F_o = \frac{p_o}{1000} \cdot m \cdot g \text{ [kN, ‰, t, m/s}^2\text{]}$$

Koeficient a reprezentuje suché tření, b tření kapalinové a c odpor vzduchu. Pro vozidla, u kterých není vozidlový odpor určen měřením, platí vztahy podle předpisu ČD V7.

Měrný jízdní odpor vlakové soupravy je dán výrazem:

$$p_{vlaku} = \frac{m_1 \cdot p_1 + m_2 \cdot p_2 + \dots + m_n \cdot p_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \text{ [‰]}$$

Typ	Popis	Vztah
Bo'Bo'	Lokomotiva	$p_o(v) = 2,8 + 0,00085 \cdot v^2$
Co'Co'	Lokomotiva	$p_o(v) = 2,8 + 0,02 \cdot v + 0,0004 \cdot v^2$
B'B'	Lokomotiva	$p_o(v) = 2,5 + 0,0055 \cdot v^2$
MJ	Motorová jednotka	$p_o(v) = 3 + 0,00037 \cdot v^2$
EJ	Elektrická jednotka	$p_o(v) = 2,45 + 0,0123 \cdot v + 0,000414 \cdot v^2$
R	Osobní 4 nápravové vozy	$p_o(v) = 1,35 + 0,0008 \cdot v + 0,00033 \cdot v^2$

S	Smíšená souprava vozů	$p_o(v) = 1,9 + 0,000465 \cdot v^2$
M2	Osobní 2 nápr. vozy lehké stavby	$p_o(v) = 1,5 + 0,0089 \cdot v^2$
M4	Osobní 4 nápr. vozy lehké stavby	$p_o(v) = 1,8 + 0,01 \cdot v + 0,000476 \cdot v^2$
U2	Nákladní 2 nápr. vozy prázdné	$p_o(v) = 2 + 0,00125 \cdot v^2$
U4	Nákladní 4 nápr. vozy prázdné	$p_o(v) = 2 + 0,0008 \cdot v^2$
T2	Nákladní 2 nápr. vozy ložené	$p_o(v) = 1,7 + 0,0033 \cdot v + 0,00018 \cdot v^2$
T4	Nákladní 4 nápr. vozy ložené	$p_o(v) = 1,3 + 0,00033 \cdot v^2$

Tab. 2: Součinitel měrného vozidlového odporu podle předpisu ČD V7

Trat'ový odpor F_d

Je součtem odporů sklonu, z jízdy obloukem a z jízdy tunelem. Závisí především na stavu tratě a jejím profilu. Při jízdě ze sklonu může, na rozdíl od vozidlového odporu, nabývat i záporných hodnot. Redukovaný sklon s_n nahrazuje všechny složky trat'ového odporu na jednotlivých úsecích tratí jedním fiktivním sklonem.

$$F_d = \frac{p_D}{1000} \cdot m \cdot g \text{ [kN, } \%, t, m/s^2]$$

$$p_d = p_S + p_R + p_T = s_N \text{ [\%]}$$

$$s_N = \frac{s \cdot l + p_R \cdot l_R + p_T \cdot l_T}{l} \text{ [\%]}$$

Odpor sklonu je nejdůležitější složkou trat'ového odporu a vyjadřuje skutečnost, že vozidlo nabývá potenciální energii při překonávání převýšení. Měrný odpor sklonu p_s je vztažený k hmotnosti vozidla.

$$p_S = s \text{ [\%]}$$

Odpor z jízdy obloukem vzniká v důsledku řídicích a třecích sil mezi koly a kolejnicemi a závisí na poloměru oblouku R a rozchodu kolejí. Protože je exaktní vyjádření velmi náročné, používají se empirické Röcklovy vztahy.

$$p_R = \frac{650}{R - 55} \text{ [-], pro } R \geq 300m \text{ a rozchod } 1435mm$$

$$p_R = \frac{500}{R - 30} [-], \text{ pro } R \leq 300\text{m a rozchod } 1435\text{mm}$$

Odpor z jízdy tunelem se zavádí pro tunely delší než 100 m a respektuje vytlačování vzduchu čelem vlaku, jeho omezené obtékání kolem vozidla a je závislý především na rozměrech tubusu tunelu.

$$p_T = 2 [-] \text{ pro jednokolejný tunel}$$

$$p_T = 1 [-] \text{ pro dvoukolejný tunel}$$

Dodatečné zrychlení, obvykle $0,03 \text{ ms}^{-2}$ (odpovídá fiktivnímu stoupání 3 ‰), respektuje rozdíl mezi obvodovou rychlostí kola a jeho podélnou rychlostí, tedy jízdu s určitým prokluzem a je potřeba jej přičíst ještě po dosažení určité konečné rychlosti

Přídavný odpor pro rozjezd z klidu zohledňuje „zatuhnutí“ vozidla (zejména v ložiskách náprav), je výrazný zvláště po dlouhém stání a to zejména v zimě, kdy dosahuje i více než 5 ‰.

5. Úpravy motorového vozu

Po několika zkušebních simulacích jízdy vlaku jsem nakonec navrhl dvě varianty přestavby na hybridní pohon. **Varianta A – full hybrid**, počítá s dosazením pouze jednoho spalovacího agregátu doplněného o LiFePO₄ akumulátor s velkou kapacitou energie a vysokým výkonem. Spalovací motor tak může pracovat v ideálním pracovním bodě s nízkou spotřebou paliva a nerovnováhu mezi výrobou a spotřebou elektrické energie řeší právě lithiový akumulátor. **Varianta B – mild hybrid**, je stejně jako původní vůz osazena dvěma agregáty a akumulátor energie v podobě kondenzátorové baterie slouží pouze k akumulaci brzděné energie.

Předností full hybridu by měla být především velká kapacita akumulátorů umožňující uchování veškeré brzděné energie i při dlouhém a prudkém klesání zejména v horských oblastech. Jejich instalace místo druhého spalovacího motoru nijak nezasahuje do konstrukce vozu a ani nezvyšuje provozní hmotnost. Nevýhodu ale vidím zejména v omezené životnosti lithiových článků při takto náročném využívání a tedy nutnosti jejich výměny.

Naopak kondenzátorová baterie v mild hybridu by měla vydržet po celou dobu životnosti vozu, což ospravedlňuje její vyšší pořizovací cenu. Nevýhodou tohoto řešení je ale její omezená kapacita (navržená s ohledem na její maximální využití) vedoucí v některých případech na nutnost „obětování“ části energie. Vhodným provozem pomocných pohonů je ale možné tuto nevýhodu částečně eliminovat. Ve voze ale zůstanou také obě trakční soustrojí a je tedy nutné prostorově náročnější a těžší (zejména v porovnání s lithiovou) baterii umístit jinde, pravděpodobně na střechu vozu (kde zabere asi 12 m² plochy). Možným řešením je umístit její část také na přípojný vůz zhruba v poměru hmotností vozů.

Pro zjištění přínosu hybridního pohonu je simulována i **varianta C – nehybridní**. Ta počítá pouze s výměnou zastaralých vznětových motorů Liaz za nové Tedom stejně jako v případech hybridních verzí. Tyto motory mají lepší průběh výkonu, točivého momentu a nižší spotřebou paliva o cca 5 %.

Spalovací motor

Protože původní spalovací motory již nevyhovují dnešním emisním normám, rozhodl jsem se nahradit je motorem **TEDOM TD 310 R9H TA 26**. Jde o ležatý čtyřdobý řadový vznětový šestiválec s přímým vstřikem paliva, přeplňovaný výfukovým turbodmychadlem, s mezichladičem plnicího vzduchu, kapalinovým chlazením a dodatečným ošetřením výfukových plynů (oxidační katalyzátor a filtr pevných částic). Jeho výhodou je kromě plnění

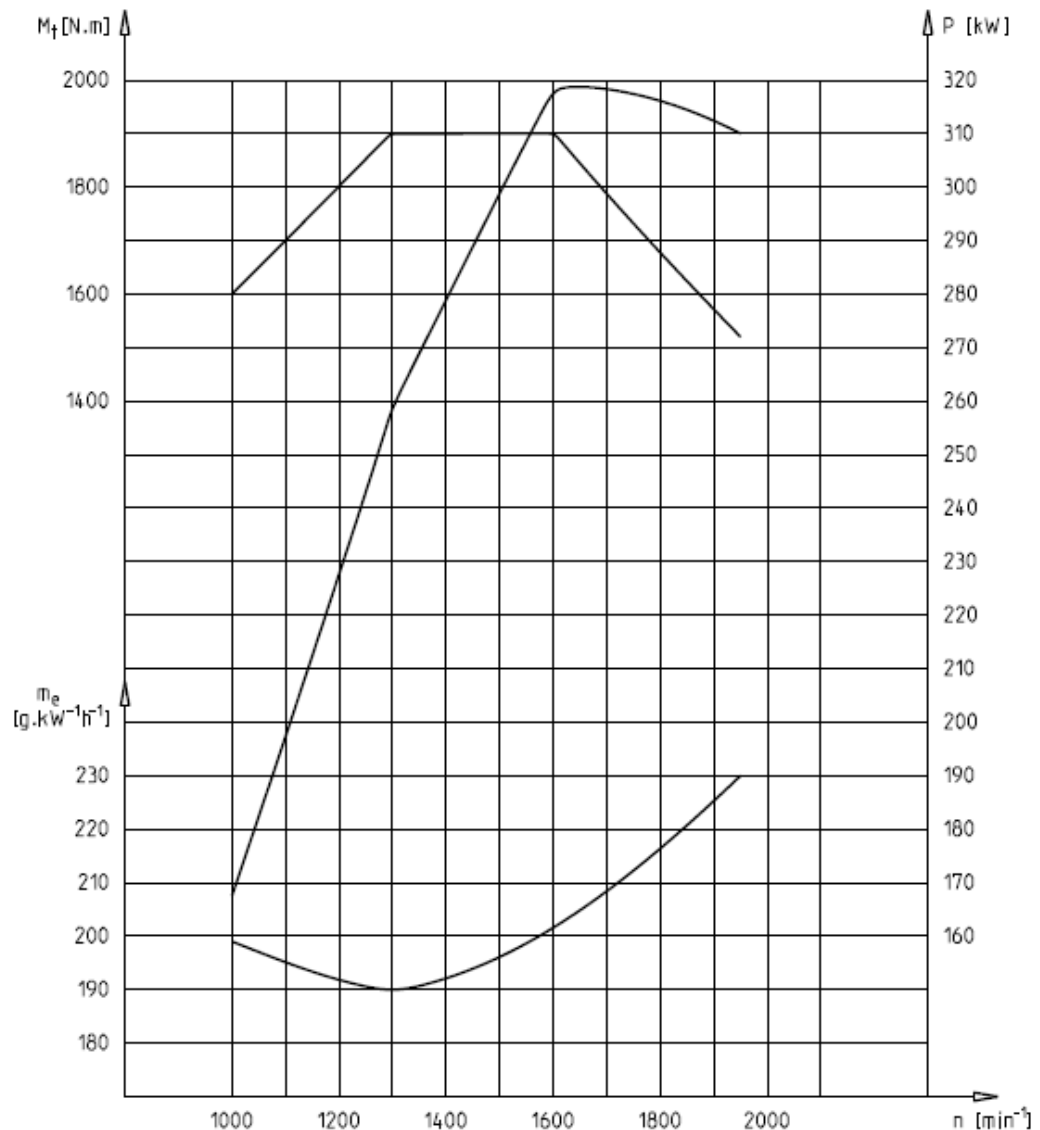
stávajících emisních norem zejména příznivější křivka výkonu a točivého momentu, umožňující provoz v nižších otáčkách a tedy s nižší spotřebou paliva i hlučností. Rovněž jeho zástavba pod podlahu vozidla by neměla být problémem, protože konstrukčně vychází z původního motoru Liaz. [10]



Obr. 8: Motor Tedom TD 310 R9H TA 26, foto Tedom Motory

Technické parametry:

Zdvihový objem	11946 dm ³
Jmenovitý výkon (dle ISO 3046-1)	310 kW
Maximální točivý moment (při 1 300-1 600 min ⁻¹)	1 900 Nm
Jmenovité otáčky	1950 min ⁻¹
Volnoběžné otáčky	650±25 min ⁻¹
Měrná spotřeba paliva při jmenovitém výkonu	230 g/kWh + 7 %
Měrná spotřeba paliva na vnější charakteristice	190 g/kWh + 7 %
Spotřeba paliva při volnoběhu samotného motoru	1,35 kg/h
Celková suchá hmotnost	970 +5 % kg



Graf 1: Výkonová křivka motoru Tedom TD 310 R9H TA 26

LiFePO₄ akumulátor (full hybrid)

Pro sestavení akumulátoru energie pro použití ve full hybrid verzi uvažují LiFePO₄ články A123 AMP20 vynikající zejména vysokou měrnou kapacitou a výkonem. Trvalý vybíjecí i nabíjecí proud dosahuje hodnoty 5 C (100 A), maximální proud po dobu <10 s potom 20 C (400 A). Zásadní vliv na kapacitu i životnost článků má teplota a proto je nezbytné pro zajištění teplotní stability použít nuceného vzduchového chlazení. Pro výpočet rozměrů baterie jsou uvažovány ventilační kanály o rozměrech shodných s rozměry samotných článků. Snahou je udržet teplotu baterie v rozmezí 10-50 °C s maximálním rozdílem mezi jednotlivými články 10 °C, v takovém případě totiž dosahuje nejpříznivějších parametrů. [7] [9]

Technické parametry článku:

Jmenovité napětí	3.3 V
Kapacita	19.5 Ah
Uložená energie	65 Wh
Trvalý výkon	300 W
Maximální výkon	1200 W
Hmotnost	0,5 kg
Rozměry (DxŠxV)	160x7.25x227 mm
Provozní teplota	-30 °C až 55 °C
Cena	cca 900 Kč



Obr. 9: LiFePO4 článek A123 AMP20, foto A123 Systems

Technické parametry baterie:

Uspořádání článků	150 sériově x 10 paralelně
Jmenovité napětí	495 V
Kapacita	195 Ah
Uložená energie	97,5 kWh
Trvalý výkon	450 kW
Maximální výkon	1800 kW
Hmotnost (bez konstrukce)	750 kg
Rozměry (DxŠxV, včetně ventilačních kanálů)	1600x2250x227 mm
Cena (pouze články)	cca 1 350 000 Kč

Superkondenzátorová baterie (mild hybrid)

Jde o modul o jmenovitém napětí 125 V a kapacitě 63 F určený pro použití v dopravní technice. Je sestaven ze 48 sériově řazených superkondenzátorů Maxwell BCAP3000 s kapacitou článku 3000 F. Je již vybaven vlastní řídicí jednotkou monitorující napětí a teplotu a pro náročnější použití je možné jej dovybavit ventilátory. Výhodou je především vysoký výkon, široký rozsah provozních teplot, jednoduché nabíjení a dlouhá životnost. Mezi hlavní negativa naopak patří hlavně nízká kapacita a dosud vysoká cena. Moduly je možné libovolně spojovat až do maximálního napětí 1500 V, kdy je vzájemná komunikace řešena prostřednictvím CAN sběrnice. [8]

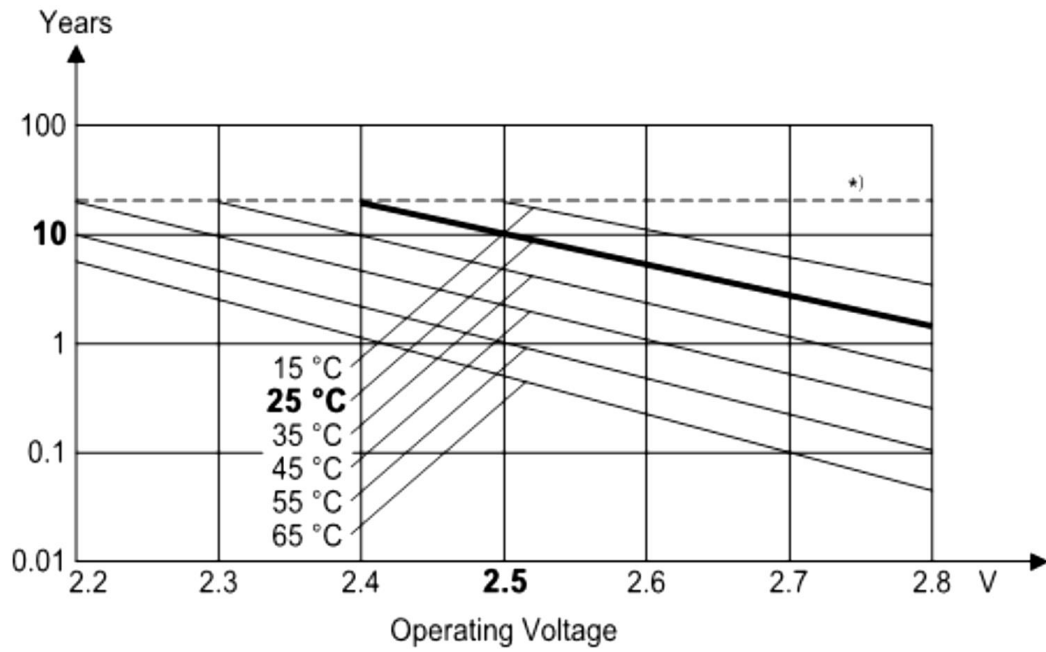


Obr. 10: Superkondenzátor Maxwell BMOD0063, foto Maxwell Technologies

Technické parametry superkondenzátoru Maxwell BMOD0063

Jmenovitá kapacita	63 F
Jmenovité napětí	125 V
Trvalý proud ($\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$)	140 A_{RMS}
Trvalý výkon ($\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$)	17,5 kW
Uložená energie	136,7 Wh
Provozní teplota	-40 $^{\circ}\text{C}$ až 65 $^{\circ}\text{C}$
Hmotnost s ventilátorem	63,4 kg
Rozměry s ventilátorem (DxŠxV)	762x425x265 mm
Proud samovybíjení	10 mA

Pozn. Vzhledem ke snaze o dosažení odpovídající kapacity a životnosti kondenzátorové baterie, předpokládám provoz jednoho bloku na napětí 120 V s maximálním trvalým vybíjecím a nabíjecím proudem 100 A. Trvalý výkon tedy potom činí 12 kW a množství uložené energie 126 Wh.



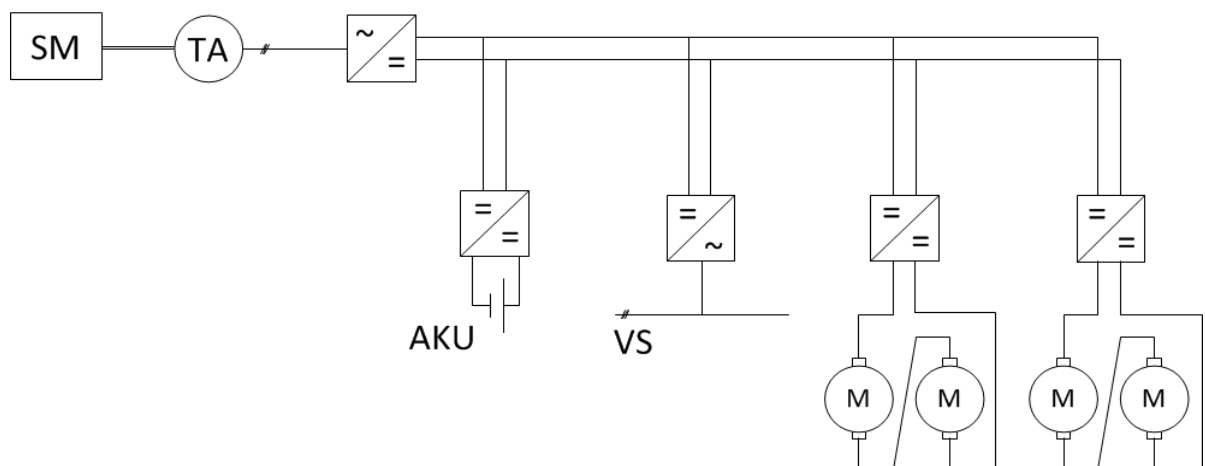
Graf. 2: Závislost životnosti superkondenzátoru na provozním napětí, Maxwell Technologies

Parametry kondenzátorové baterie

Uspořádání	4 sériově x 10 paralelně
Jmenovitá kapacita	157,5 F
Jmenovité napětí	480 V
Trvalý proud	1000 A
Trvalý výkon	480 kW
Uložená energie	5,04 kWh
Hmotnost (bez konstrukce)	2536 kg
Rozměry	8000x2000x265 mm
Cena	cca 5 600 000 Kč

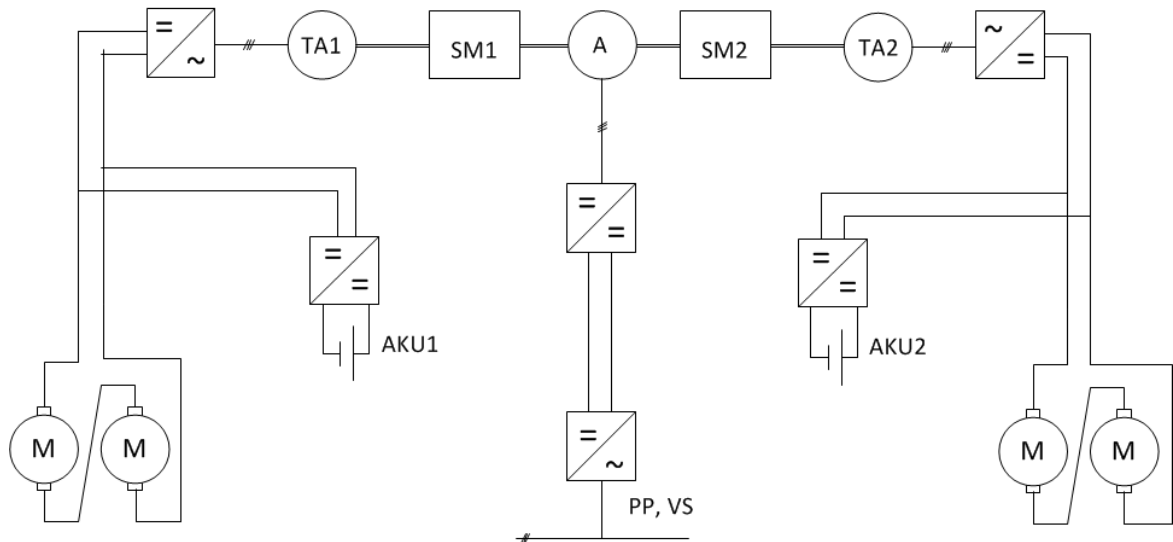
Přenos výkonu

V případě **varianty A – full hybridu**, počítám s instalací pouze jedné motorové skupiny. Spalovací motor tedy pohání trakční alternátor a trakčního usměrňovač napájí stejnosměrnou síť. Z ní jsou následně napájeny trakční motory obou podvozků, střídač pomocných pohonů a vozidlové sítě a při přebytku energie vyrobené spalovacím agregátem nebo rekuperačním brzděním jsou dobíjeny lithiové akumulátory. Naopak při potřebě plného trakčního výkonu nebo v případě vypnutého spalovacího motoru do této sítě dodávají elektrickou energii. Výhodou tohoto uspořádání je provoz spalovacího motoru v optimálních otáčkách a možnost demontáže alternátoru napájejícího vozidlovou síť včetně slučovací převodovky. To vede ke snížení hmotnosti vozu i získání prostoru pro instalaci akumulátorů energie.



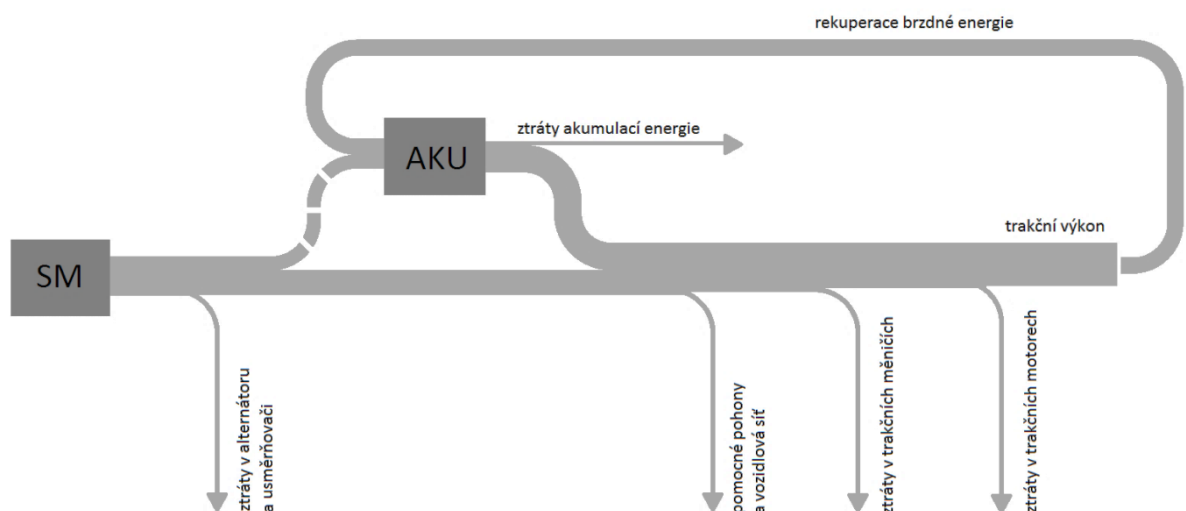
Obr. 11: Full hybrid - schéma přenosu výkonu

Přenos výkonu u **varianty B - mild hybridu**, vychází z původního uspořádání motorového vozu se dvěma spalovacími motory, dvěma trakčními alternátory s usměrňovači a zvláštním alternátorem pro napájení pomocných pohonů a vozidlové sítě poháněným přes slučovací převodovku od druhých konců obou spalovacích motorů. Doplněny byly pouze akumulátory energie v podobě superkondenzátorů umožňující ve většině případů rekuperaci veškeré brzdné energie. Superkondenzátory jsou rozděleny do dvou bloků, kdy je každý určen pro jeden podvozek.



Obr. 12: Mild hybrid - schéma přenosu výkonu

Zjednodušený Sankeyův diagram přehledně zobrazuje toky energie v hybridním systému. Rozdíl mezi full a mild hybridem je zejména ve využívání akumulátoru energie. Zatímco mild hybrid jej používá výhradně k akumulaci rekuperované energie, full hybrid jím vyrovnává okamžité rozdíly mezi výrobou energie (prostřednictvím spalovacího motoru nebo rekuperace) a její spotřebou (trakční výkon, pomocné pohony, vozidlová síť, ztráty). Kromě čárkovaně znázorněného toku energie ze spalovacího motoru do akumulátoru se oba systémy liší také velikostmi jednotlivých toků.



Obr. 13: Zjednodušený Sankeyův diagram přenosu výkonu

	Full hybrid	Mild hybrid
Typ akumulátoru	LiFePO4	Superkondenzátor
Napětí	495 V	480 V
Kapacita	195 Ah	157,5 F
Trvalý výkon	450 kW	480 kW
Akumulovaná energie	97,5 kWh	5,04 kWh
Hmotnost	750 kg	2536 kg
Cena	1 350 000 Kč	5 600 000 Kč
Předpokládaná životnost	3 roky	20 let

Tab. 3: Porovnání použitých akumulátorů energie

Prediktivní řízení hybridního pohonu

Stavba hybridních železničních vozidel má oproti silničním minimálně jednu podstatnou výhodu. Při jejich provozu je totiž předem podrobně známa trajektorie jejich budoucího pohybu. Toho lze účinně využít k řízení činnosti hybridního pohonu pro zlepšení jeho vlastností. Díky předem simulovanému průběhu jízdy a znalosti trati je možné efektivněji využívat kapacitu akumulátorů energie, omezit množství startů spalovacího motoru a tím snížit spotřebu paliva i namáhání komponent pohonu. Pokud se například blíží stanice, prediktivní řízení může při dostatečném množství energie v akumulátoru zastavit spalovací motor i několik kilometrů před stanicí. Akumulátor tak má před zahájením brzdění dostatečnou kapacitu pro uložení veškeré brzdné energie. Velký přínos má rovněž na sklonově náročných tratích, kde může eliminovat možnost nedostatku energie a tím omezení trakční charakteristiky vozidla nebo naopak pomůže k rekuperaci maximálního množství energie v dlouhých klesáních. Nezbytnou součástí takového řídicího systému je neustálé přesné sledování polohy vozidla, stejně jako stavu hladiny nabití akumulátoru energie nebo činnosti ostatních komponent pohonu.

6. Simulace jízdy vlaku

Pro trakční výpočty jsem vytvořil simulaci v prostředí Matlab, konkrétně jsem použil nadstavbu Simulink, umožňující snadné sestavení i složitěho modelu z přednastavených i uživatelem definovaných funkčních bloků. Vychází samozřejmě ze základních rovnic jízdy vlaku uvedených v kapitole 3. Započten není pouze přídavný odpor pro rozjezd z klidu, jelikož nejde o veličinu přesně definovanou. Pozornému čtenáři jistě neuniknou další drobné nepřesnosti způsobené snahou o určité zjednodušení řešení (konstantní spotřeba pomocných pohonů) nebo nedostupností podrobnějších vstupních dat (zjednodušený profil tratě). Zohledněn samozřejmě také není proměnný počet cestujících během jízdy, klimatické podmínky nebo zhoršení vlastností vozidel i tratě v důsledku opotřebení.

Funkce jednotlivých částí simulace

V podsystému **Hmotnost** se zadáním počtu jednotlivých typů vozů sestaví vlaková souprava. Uloženy jsou zde parametry vozů Bftn⁷⁹¹, Btn⁷⁵³, Bdtm⁷⁵⁶ a samozřejmě motorového vozu řady 843, u kterého je navíc potřeba určit počet motorových skupin (1 v případě full hybridu, 2 pokud jde o mild hybrid) a kapacitu akumulátorů energie (lithiových akumulátorů nebo superkondenzátorů). Lze také nastavit zatížení soupravy 0-100 % užitečného zatížení, výstupy tohoto bloku potřebné pro další výpočty jsou hmotnost uvažované soupravy i hmotnosti jednotlivých vozů.

Do části **Jízdní odpory** vstupuje zadané zrychlení vlaku, po integraci tedy rychlost. Ta záhy vstupuje do funkcí vyjadřujících měrné jízdní odpory jednotlivých vozů soupravy. Následně je k výsledku přičten odpor ze stoupání projížděné trati a odpor zrychlení posuvných i rotujících hmot. Výsledkem této části je tažná síla potřebná pro jízdu zadanou rychlostí.

Blok **Energie** z tažné síly a rychlosti počítá potřebný mechanický výkon. Následují výpočty pro zohlednění účinnosti trakčních motorů, polovodičových měničů, nabíjení akumulátorů energie a spotřeby pomocných pohonů a vozidlové sítě. V případě full hybridu obsahuje i soubor podmínek automatického spouštění spalovacího motoru. Výstupy jsou celkový příkon vlaku, množství spotřebované a rekuperované energie, množství energie uložené v akumulátorech, ujetá dráha a činnost spalovacího motoru.

Kromě těchto základních bloků obsahuje simulace ještě části **Superkondenzátory** a **Baterie** pro definici parametrů akumulátorů energie a blok **From Workspace** pro import dat o trati a jízdě vlaku.

Pozn.: Simulace vytvořená v prostředí Matlab Simulink (verze 7.9) je součástí této práce na přiloženém CD.

GPS měření jízdy vlaku

Na simulovaných tratích jsem provedl měření průběhu jízdy současných motorových vozů pomocí mobilní aplikace SportsTracker. Ta zaznamenává data ze zabudovaného GPS přijímače mobilního telefonu a umožňuje je přehledně zobrazit ve webové aplikaci. Zaznamenané průběhy jsem v simulaci využil pro nastavení zrychlení/zpomalení a rychlostí jízdy v jednotlivých úsecích tratí a i přes nižší přesnost měření výrazně přispěly k přiblížení simulace reálnému provozu.

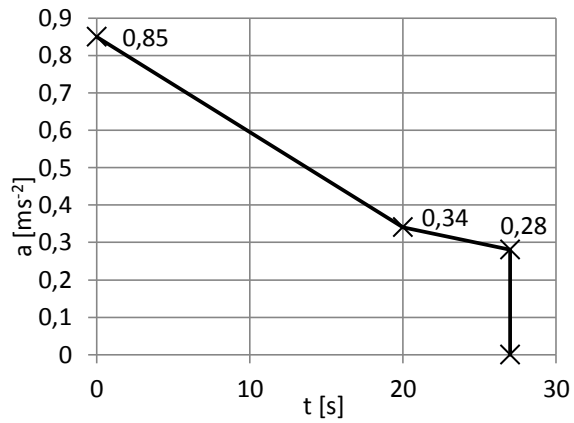


Obr. 14: Záznam průběhu jízdy na trati Plzeň – Klatovy pomocí aplikace SportsTracker

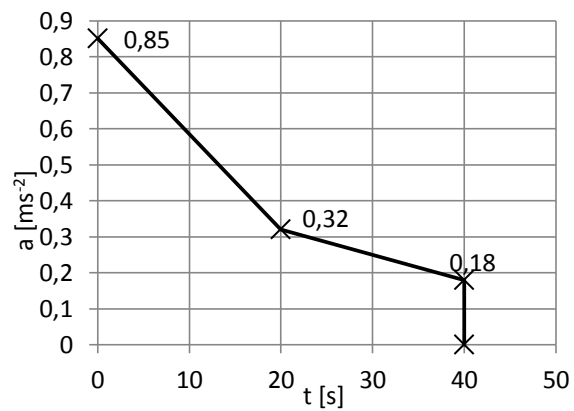
Rozjezdy a brzdění

Pro rozjezdy na dané rychlosti jsou v simulaci zadávány průběhy zrychlení v závislosti na čase. S ohledem na metodu výpočtu jde o spolehlivější řešení než přímé zadání požadované rychlosti jízdy a její následné derivaci pro získání potřebné hodnoty zrychlení. Proto jsem s ohledem na GPS záznam průběhu jízdy a maximální výkon trakčních motorů vytvořil idealizované průběhy zrychlení na rychlosti 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h a 80 km/h. Pro zastavení je pak použito totožných průběhů avšak se zápornými hodnotami zrychlení. Tím je vždy zaručeno zabrzdění do nulové rychlosti a zamezení případnému sčítání chyb. V reálném provozu samozřejmě může snadno nastat situace, kdy nebude možné se rozjet nebo

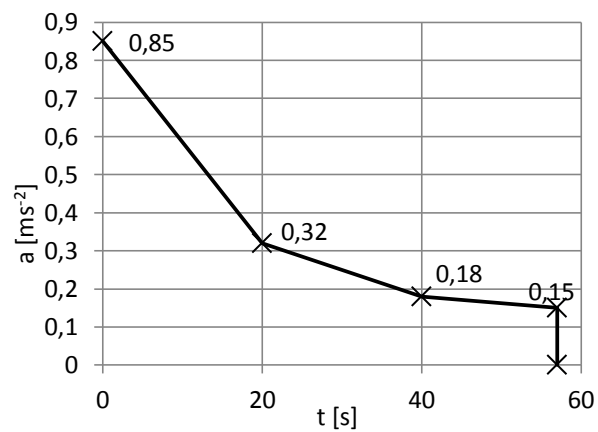
zabrzdit přesně podle daných průběhů. To může být nepříjemné zejména z důvodu dodržování jízdních dob, na spotřebu energie to má ale jen minimální vliv.



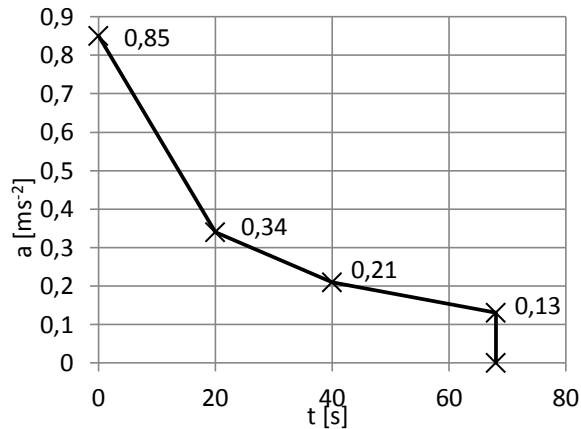
Graf 3: Zrychlení pro rozjezd na 50 km/h



Graf 4: Zrychlení pro rozjezd na 60 km/h



Graf 5: Zrychlení pro rozjezd na 70 km/h



Graf 6: Zrychlení pro rozjezd na 80 km/h

Spotřeba paliva

Skutečnou spotřebu paliva v provozu jsem stanovil z údajů o zbrojení a průběhu plzeňských vozů řady 843 nasazovaných na rychlíky spolu s řídicími vozy řady Bftn⁷⁹¹ výhradně na trase Plzeň – Most a zpět. V simulaci neuvažuji spotřebu paliva na vytápění přídatným naftovým hořákem. Proto i průměrnou spotřebu jsem stanovil pouze pro letní měsíce (červen-září) a ta v letech 2011-2013 činila **74,5 l/100km**. Jde ovšem o hodnotu včetně předehřívání motorů, poježdění v depu a běhu motorů bez zátěže (volnoběhu).

Pozn.: Výše uvedené průměrné spotřeby paliva dosáhly v letech 2011-2013 (červen až září) vozy 95 54 5 843 012-6, 95 54 5 843 014-2, 95 54 5 843 027-4 a 95 54 5 843 030-8 z DKV Plzeň.

Správnou funkci simulace jsem ověřil jejím spuštěním pro rychlík na trase Plzeň – Most – Plzeň (308 km) s vlakem odpovídajícím tomu současnému, tedy motorovým vozem řady 843 bez akumulátorů energie vybaveným dvěma trakčními soustrojími a řídicím vozem řady Bftn⁷⁹¹, oba vozy soupravy s obsazeností 50 %. Vlak na trase spotřeboval celkem **778,5 kWh** energie, tomu odpovídá **209,3 l** motorové nafty a tedy průměrná spotřeba **68 l/100km** (při uvažování měrné spotřeby paliva $210 \text{ g.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$, účinnosti trakčního alternátoru společně s usměrňovačem 0,93 a hustoty motorové nafty $0,84 \text{ g/cm}^3$ ($15 \text{ }^\circ\text{C}$)). Rozdíl může být způsoben jak nezapočtením spotřeby paliva na předehřívání motorů, poježdění v depu a běhu motorů bez zátěže (volnoběhu), tak i proměnným charakterem skutečného provozu nebo drobnými zjednodušeními samotné simulace. Skutečná spotřeba paliva (74,5 l/100km) je tedy o **8 % vyšší** a proto jsem tento rozdíl zohlednil ve všech výsledcích.

Výpočet spotřeby paliva všech tří variant přestavby vychází ze spotřeby energie [kWh] určené pomocí simulace a tuto energii je nutné během jízdy vyrobit pomocí spalovacího motoru a trakčního alternátoru. V případě hybridních verzí simulace samozřejmě respektuje rekuperační brzdění a to až do zastavení, je totiž účinné do velmi nízkých rychlostí a množství energie zmařené mechanickým dobrzděním je tedy zanedbatelné. Účinnost trakčního alternátoru společně s usměrňovačem uvažují 0,93 a hustotu motorové nafty 0,84 g/cm³ (15 °C). Spotřebu paliva na volnoběžné otáčky zanedbávám (cca 1,6 l/h pro 1 motor).

Spalovací motor je ve **variantě A – full hybridu** navržen pro provoz při stálých otáčkách a to v oblasti nejnižší měrné spotřeby 190 g.kW⁻¹.h⁻¹. Účinnost nabíjení i vybíjení lithiových akumulátorů 0,9, pro celý cyklus tedy 0,81.

Spotřeba paliva u varianty **B – mild hybrid** a **C – nehybridní** se liší pouze v množství spotřebované energie dané rekuperací v případě mild hybridu. Provoz samotných spalovacích motorů je obdobný a proto tedy uvažují průměrnou měrnou spotřebu paliva v obou případech 200 g.kW⁻¹.h⁻¹. Oproti původním motorům tak jde o snížení spotřeby o přibližně 5% (původně 210 g.kW⁻¹.h⁻¹).

7. Simulace na tratích

Simulaci jsem zejména pro ověření její správné funkce provedl pro rychlík řazený z motorového vozu 843 a řídicího vozu Bftn⁷⁹¹ na trase Plzeň – Most – Plzeň. Další uvažovanou trasou je Plzeň – Klatovy a zpět jako příklad rovinaté trati s častými zastaveními osobního vlaku složeného z motorového vozu 843 a přípojného Bdtm⁷⁵⁶ (v současné době a pouze na některých spojích 842 a Bdtm⁷⁵⁶). Posledním simulovaným úsekem je sklonově náročná horská trať Klatovy – Železná Ruda – Alžbětín a zpět, v simulaci taktéž obsluhovaná motorovým vozem 843 s přípojným Bdtm⁷⁵⁶ (v současnosti a pouze na některých spojích 842 a Bdtm⁷⁵⁶).

Motorový vůz řady 843 byl v simulaci vybaven jednou motorovou skupinou v případě tzv. full hybridu nebo dvěma pokud se jednalo o tzv. mild hybrid. Ve všech případech bylo uvažováno zatížení 50 % (zhruba odpovídá plnému obsazení sedícími cestujícími), trvalá spotřeba pomocných pohonů a vozidlové sítě 20 kW a účinnost trakčních motorů s měniči 90 %. Na všech uvažovaných tratích dosahuje kapacita lithiových akumulátorů energie v případě full hybridu 97,5 kWh s účinností nabíjení 90 % a kapacita superkondenzátorů v mild hybridu 5,04 kWh s účinností nabíjení 95 %, samovybíjení neuvažují ani v jednom případě.

Doba trvání simulace odpovídá 1/10000 skutečné doby jízdy, čas v simulaci 0,0060 je tedy ve skutečnosti 1 minuta. Metodou řešení je ode45 s automatickým minimálním i maximálním krokem a relativní a absolutní tolerancí $2,85e^{-14}$.

Pozn.: V následujících grafech spotřeby energie [kWh] pro varianty A a C představuje červená křivka průběh spotřeby energie současného vozu tedy bez rekuperace energie – varianta C. Modrá křivka pak zobrazuje spotřebu full hybridního vozu – varianty A. Ve výsledcích varianty B zobrazuje křivka rekuperované energie [kWh] celkové množství. Vzhledem k omezené kapacitě zvolených akumulátorů energie – superkondenzátorů – není v některých případech, například při brzdění do stanice v klesání, možné akumulovat veškerou brzdovou energii. Tento nedostatek je možné samozřejmě odstranit dostatečnou kapacitou akumulátorů, vzhledem k jejich vysoké ceně a malému množství jimi ušetřené energie je ale takové řešení neekonomické. V tabulkách výsledků jsou pak zapsány hodnoty skutečně rekuperované energie. Princip výpočtu spotřeby paliva je objasněn v předchozí kapitole.

Typ vozu	Hmotnost [t]	Zatížení [t]	Měrný jízdní odpor
843	51,8	11,1	$p_o(v) = 1,38 + 0,0082 \cdot v + 0,00034 \cdot v^2$
Btn753	31	11,8	$p_o(v) = 1,8 + 0,01 \cdot v + 0,000476 \cdot v^2$
Bftn791	31,8	10	$p_o(v) = 1,8 + 0,01 \cdot v + 0,000476 \cdot v^2$
Bdtn756	37	7	$p_o(v) = 1,8 + 0,01 \cdot v + 0,000476 \cdot v^2$

Tab. 4: Hmotnost, užitečné zatížení a měrný jízdní odpor vozů užitých v simulaci

Trať	Vzdálenost [km]	Vzdál. mezi stanicemi [km]	Doba jízdy [min]
Plzeň – Most	154	12,8	162
Plzeň – Klatovy	48	3,4	60
Klatovy – Ž. Ruda	49	4,1	66

Tab. 5: Základní údaje o simulovaných tratích (hodnoty pro 1 směr)

Plzeň – Most

Jízda vlaku

	Čas v simulaci		Reálný čas	
	příjezd [s]	odjezd [s]	příjezd [h:mm:ss]	odjezd [h:mm:ss]
Plzeň hl.n.		0,0000		0:00:00
Kaznějov	0,1407	0,1527	0:23:27	0:25:27
Plasy	0,1893	0,2013	0:31:33	0:33:33
Žihle	0,2941	0,3061	0:49:01	0:51:01
Blatno u Jesenice	0,3566	0,3686	0:59:26	1:01:26
Kryry	0,4275	0,4335	1:11:15	1:12:15
Podbořany	0,5042	0,5162	1:24:02	1:26:02
Žatec západ	0,6367	0,6487	1:46:07	1:48:07
Žatec	0,6585	0,6765	1:49:45	1:52:45
Chomutov	0,8052	0,8232	2:14:12	2:17:12
Chomutov město	0,8486	0,8606	2:21:26	2:23:26
Jirkov zastávka	0,8768	0,8888	2:26:08	2:28:08
Most	0,9689		2:41:29	

Tab. 5: Průběh jízdy na trase Plzeň – Most

Výsledky simulace

Spotřebovaná energie – bez rekuperace

$$E_{BR} = 380 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta A – full hybrid

$$E_{FH} = 332,6 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta B – mild hybrid

$$E_{MH} = 343,6 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta C – nehybridní

$$E_{NH} = E_{BR} = 380 \text{ kWh}$$

Výpočty spotřeby paliva

Spotřeba paliva – bez rekuperace

$$S_{BR} = E_{BR} \cdot \frac{m_{eBR}}{\eta_{AU} \cdot \varrho_N} \cdot k = 380 \cdot \frac{0,21}{0,93 \cdot 0,84} \cdot 1,08 = 110,3l$$

Spotřeba paliva – varianta A – full hybrid

$$S_{FH} = E_{FH} \cdot \frac{m_{eFH}}{\eta_{AU} \cdot \varrho_N} \cdot k = 332,6 \cdot \frac{0,19}{0,93 \cdot 0,84} \cdot 1,08 = 87,4l$$

Spotřeba paliva – varianta B – mild hybrid

$$S_{MH} = E_{MH} \cdot \frac{m_{eMH}}{\eta_{AU} \cdot \varrho_N} \cdot k = 343,6 \cdot \frac{0,20}{0,93 \cdot 0,84} \cdot 1,08 = 95l$$

Spotřeba paliva – varianta C – nehybridní

$$S_{NH} = E_{NH} \cdot \frac{m_{eNH}}{\eta_{AU} \cdot \varrho_N} \cdot k = 380 \cdot \frac{0,20}{0,93 \cdot 0,84} \cdot 1,08 = 105,1l$$

 E_{BR} spotřebovaná energie m_{eBR} měrná spotřeba nafty η_{AU} účinnost trakčního alternátoru a usměrňovače ϱ_N měrná hustota motorové nafty k konstanta respektující nepřesnosti simulace

Průměrná spotřeba paliva – bez rekuperace

$$G_{BR} = \frac{S_{BR}}{1,54} = \frac{110,3}{1,54} = 71,6l/100km$$

Průměrná spotřeba paliva – varianta A – full hybrid

$$G_{FH} = \frac{S_{FH}}{1,54} = \frac{87,4}{1,54} = 56,8l/100km$$

Průměrná spotřeba paliva – varianta B – mild hybrid

$$G_{MH} = \frac{S_{MH}}{1,54} = \frac{95}{1,54} = 61,7l/100km$$

Průměrná spotřeba paliva – varianta C – nehybridní

$$G_{NH} = \frac{S_{NH}}{1,54} = \frac{105,1}{1,54} = 68,2l/100km$$

Úspory paliva rekuperací energie – varianta A – full hybrid

$$U_{FH} = \frac{S_{BR} - S_{FH}}{S_{BR}} \cdot 100 = \frac{110,3 - 87,4}{110,3} \cdot 100 = 20,8\%$$

Úspory paliva rekuperací energie – varianta B – mild hybrid

$$U_{MH} = \frac{S_{BR} - S_{MH}}{S_{BR}} \cdot 100 = \frac{110,3 - 95}{110,3} \cdot 100 = 13,9\%$$

Úspory paliva rekuperací energie – varianta C – nehybridní

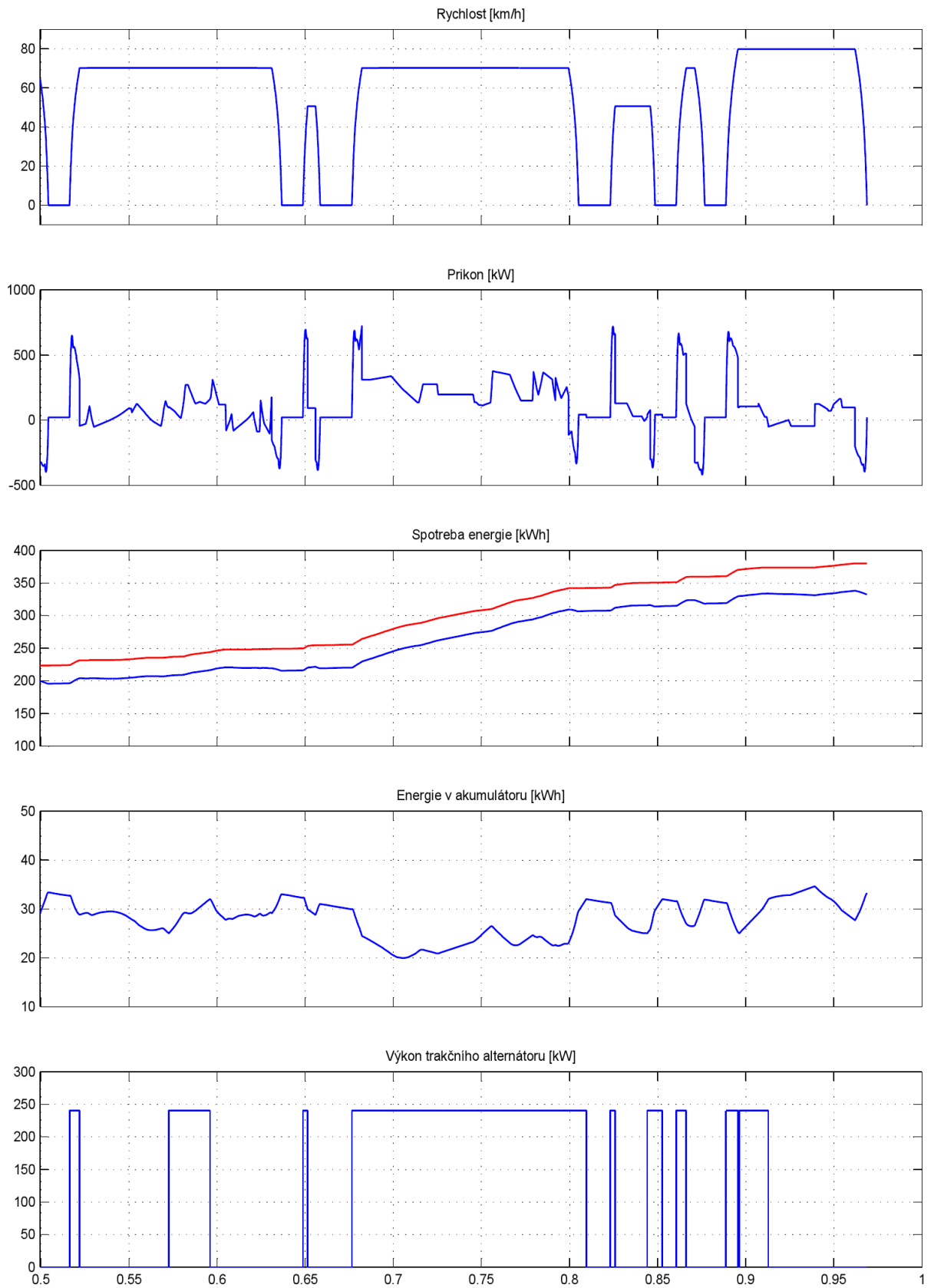
$$U_{NH} = \frac{S_{BR} - S_{NH}}{S_{BR}} \cdot 100 = \frac{110,3 - 105,1}{110,3} \cdot 100 = 4,7\%$$

varianta	S [l]	G [l/100 km]	U [%]
bez rekuperace	115,7	71,6	-
A – full hybrid	96,3	56,8	20,8
B – mild hybrid	99,7	61,7	13,9
C – nehybridní	110,2	68,2	4,7

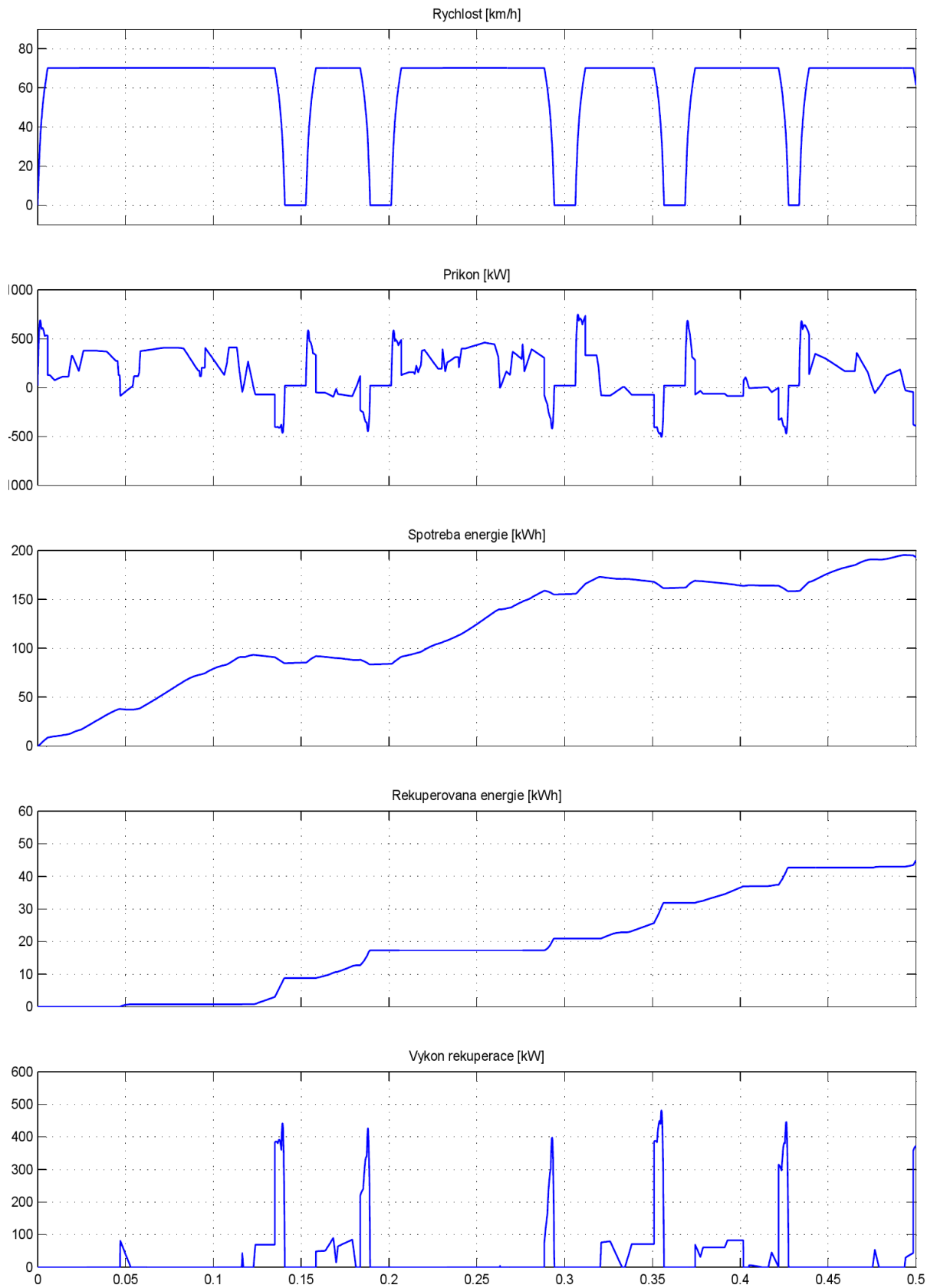
Tab. 6: Spotřeba paliva na trase Plzeň - Most



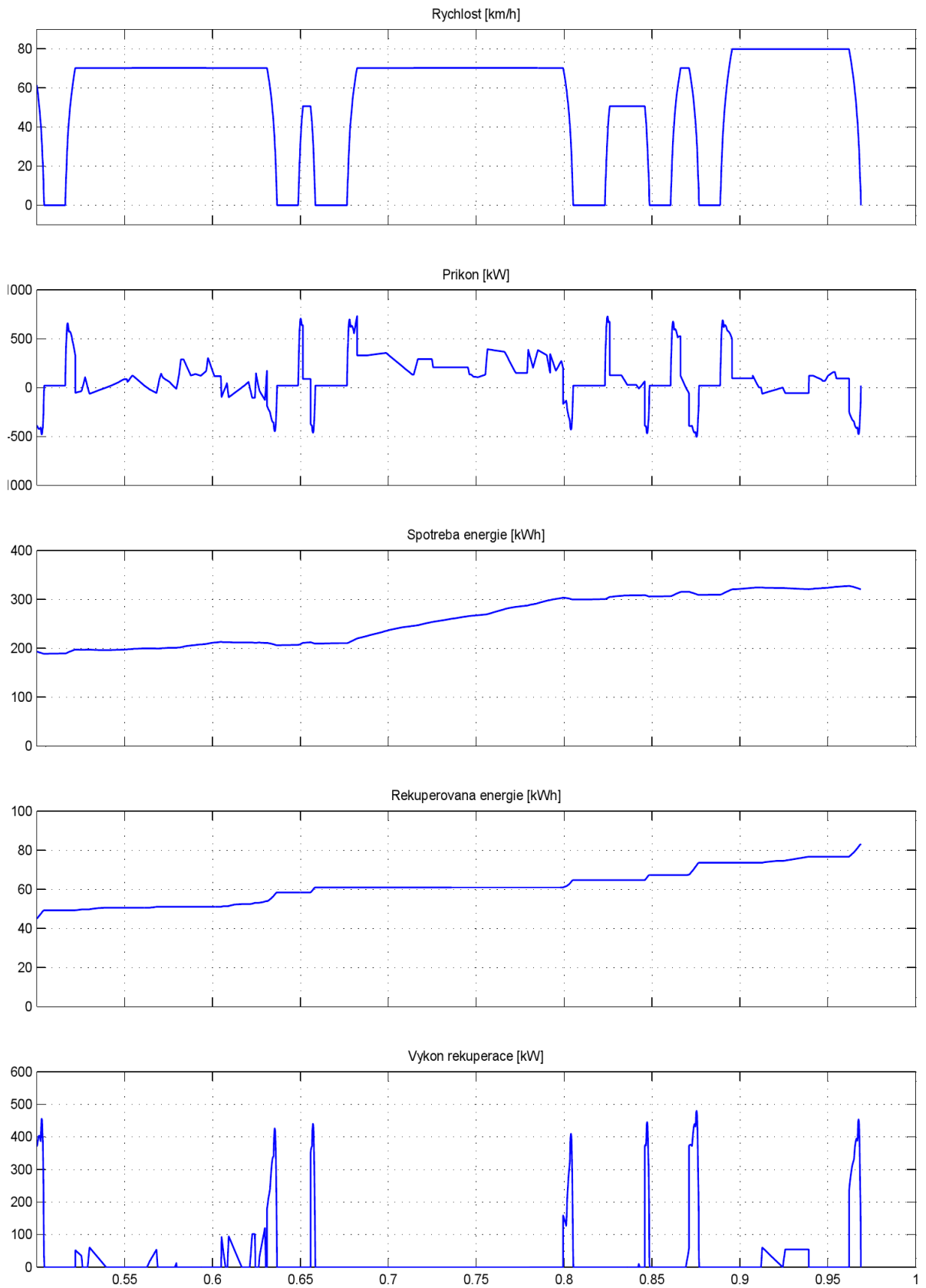
Graf 7: Varianta A, C: Plzeň – Most, 1. Část



Graf 8: Varianta A, C: Plzeň – Most, 2. Část



Graf 9: Varianta B: Plzeň – Most, 1. Část



Graf 10: Varianta B: Plzeň – Most, 2. Část

Most – Plzeň

Jízda vlaku

	Čas v simulaci		Reálný čas	
	příjezd [s]	odjezd [s]	příjezd [h:mm:ss]	odjezd [h:mm:ss]
Most		0,0000		0:00:00
Jirkov zastávka	0,0699	0,0819	0:11:39	0:13:39
Chomutov město	0,1099	0,1219	0:18:19	0:20:19
Chomutov	0,1456	0,1636	0:24:16	0:27:16
Žatec	0,2944	0,3124	0:49:04	0:52:04
Žatec západ	0,3212	0,3332	0:53:32	0:55:32
Podbořany	0,4538	0,4658	1:15:38	1:17:38
Kryry	0,5376	0,5436	1:29:36	1:30:36
Blatno u Jesenice	0,6029	0,6149	1:40:29	1:42:29
Žihle	0,6651	0,6771	1:50:51	1:52:51
Plasy	0,7713	0,7833	2:08:33	2:10:33
Kaznějov	0,8201	0,8321	2:16:41	2:18:41
Plzeň hl.n.	0,9689		2:41:29	

Tab. 7: Průběh jízdy na trase Most – Plzeň

Výsledky simulace

Spotřebovaná energie – bez rekuperace

$$E_{BR} = 398,5 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta A – full hybrid

$$E_{FH} = 366,8 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta B – mild hybrid

$$E_{MH} = 360,7 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta C – nehybridní

$$E_{NH} = E_{BR} = 398,5 \text{ kWh}$$

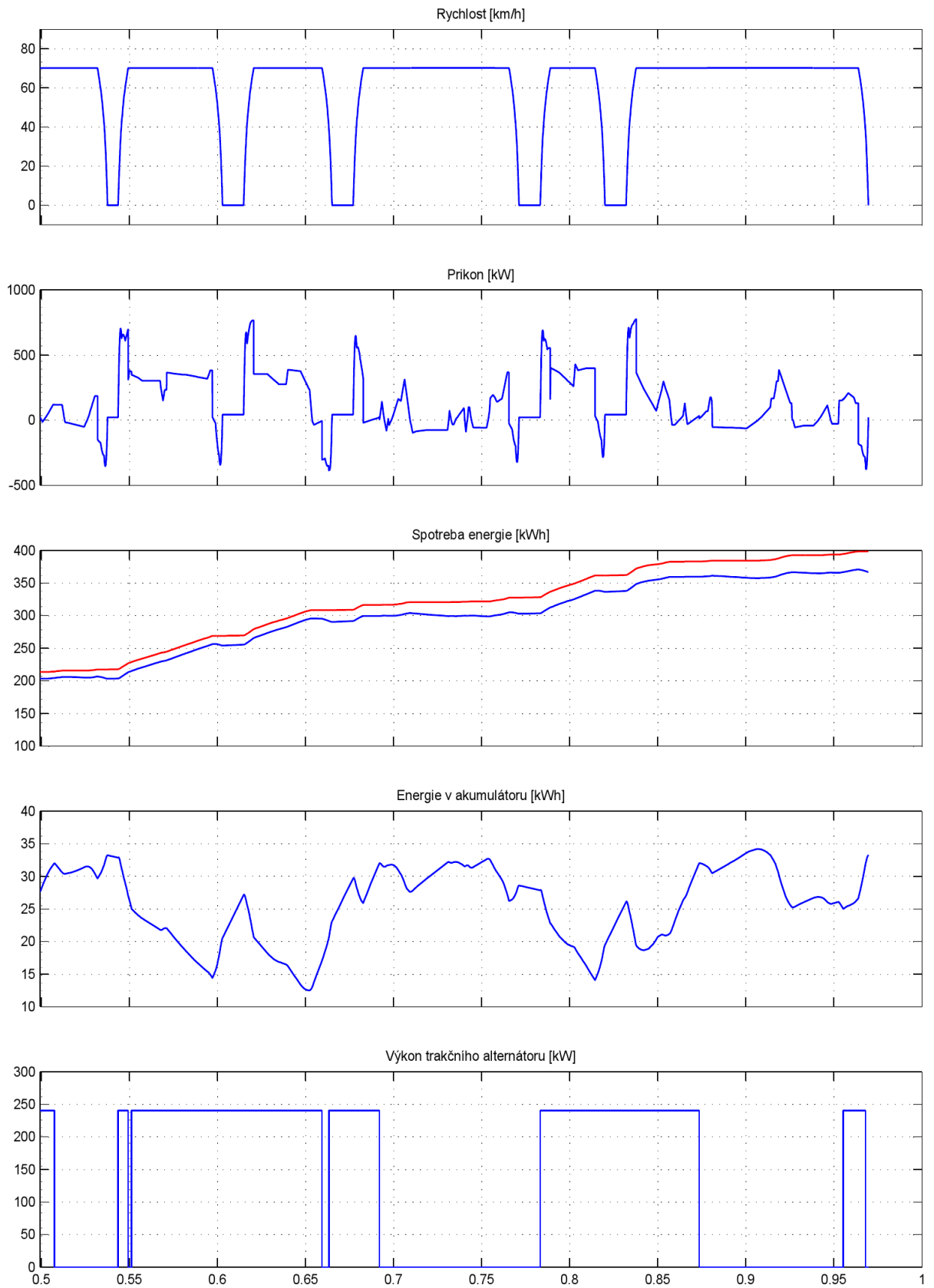
Vypočtené spotřeby paliva

varianta	S [l]	G [l/100 km]	U [%]
bez rekuperace	115,7	75,1	-
A – full hybrid	96,3	62,5	16,8
B – mild hybrid	99,7	64,7	13,8
C – nehybridní	110,2	71,6	4,8

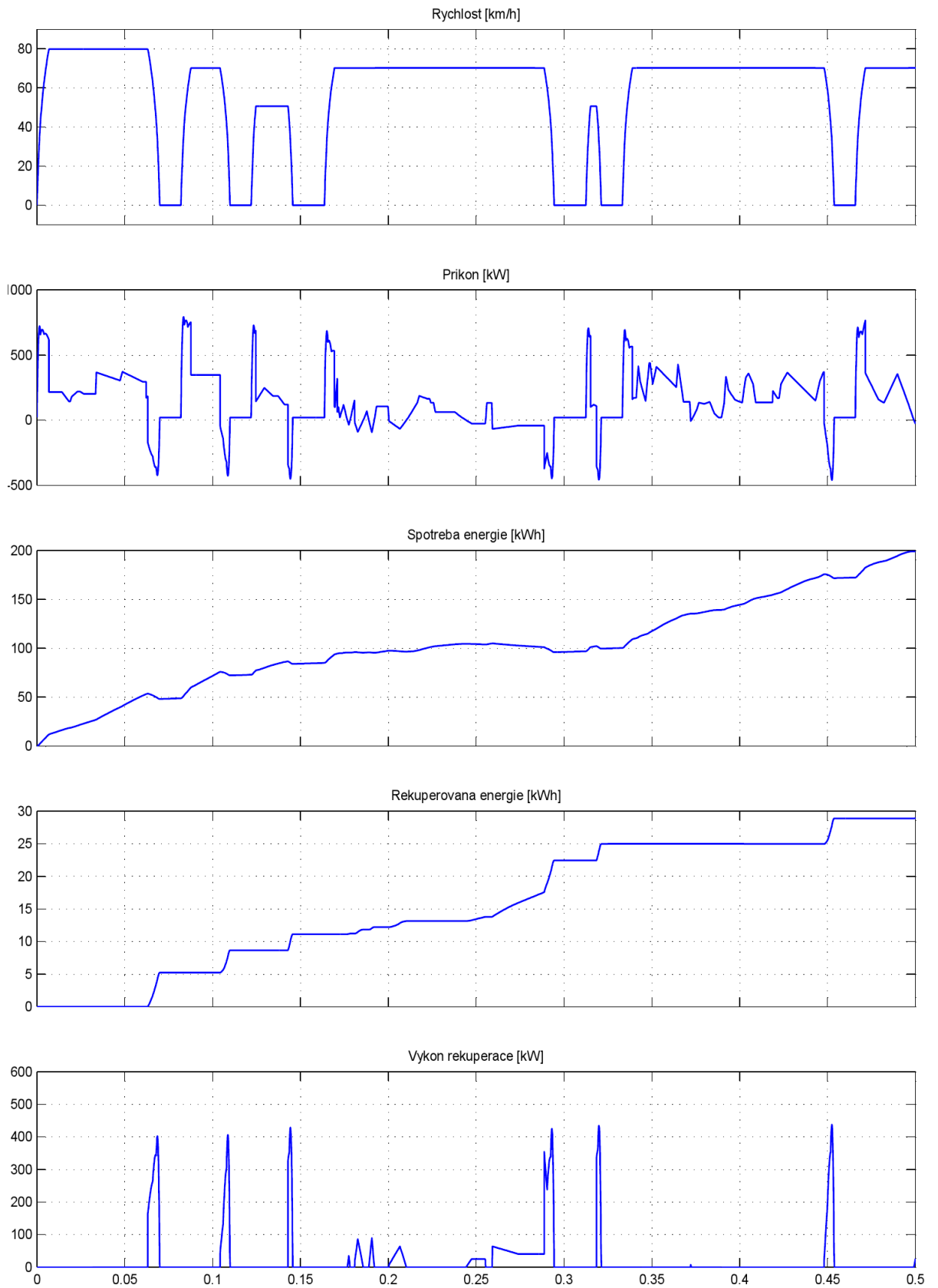
Tab. 8: Spotřeba paliva na trase Most - Plzeň



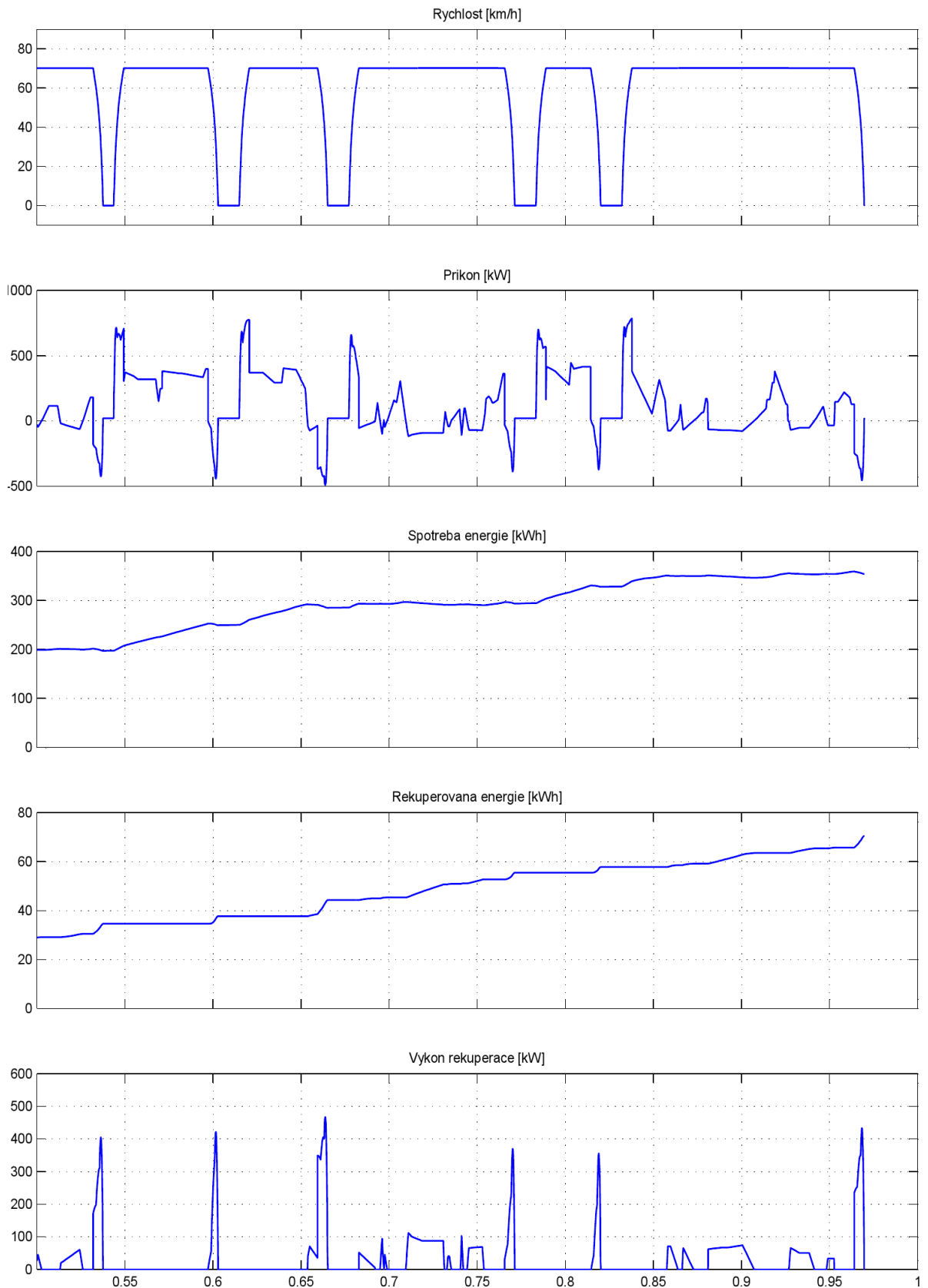
Graf 11: Varianta A, C: Most – Plzeň, 1. část



Graf 12: Varianta A, C: Most – Plzeň, 2. část



Graf 13: Varianta B: Most – Plzeň, 1. část



Graf 14: Varianta B: Most – Plzeň, 2. část

Plzeň – Klatovy

Jízda vlaku

	Čas v simulaci		Reálný čas	
	příjezd [s]	odjezd [s]	příjezd [h:mm:ss]	odjezd [h:mm:ss]
Plzeň hl.n.		0,0000		0:00:00
Plzeň zastávka	0,0108	0,0168	0:01:48	0:02:48
Plzeň-Doudlevice	0,0315	0,0375	0:05:15	0:06:15
Plzeň-Valcha	0,0619	0,0649	0:10:19	0:10:49
Dobřany	0,1123	0,1183	0:18:43	0:19:43
Chlumčany	0,1450	0,1510	0:24:10	0:25:10
Přeštice zastávka	0,1646	0,1676	0:27:26	0:27:56
Přeštice	0,1871	0,1931	0:31:11	0:32:11
Lužany	0,2108	0,2168	0:35:08	0:36:08
Borovy	0,2359	0,2389	0:39:19	0:39:49
Červené Poříčí	0,2593	0,2623	0:43:13	0:43:43
Švihov	0,2796	0,2856	0:46:36	0:47:36
Dehtín	0,3056	0,3086	0:50:56	0:51:26
Točnick	0,3259	0,3289	0:54:19	0:54:49
Klatovy	0,3543		0:59:03	

Tab. 9: Průběh jízdy na trase Plzeň – Klatovy

Výsledky simulace

Spotřebovaná energie – bez rekuperace

$$E_{BR} = 188,8 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta A – full hybrid

$$E_{FH} = 148,4 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta B – mild hybrid

$$E_{MH} = 158,5 \text{ kWh}$$

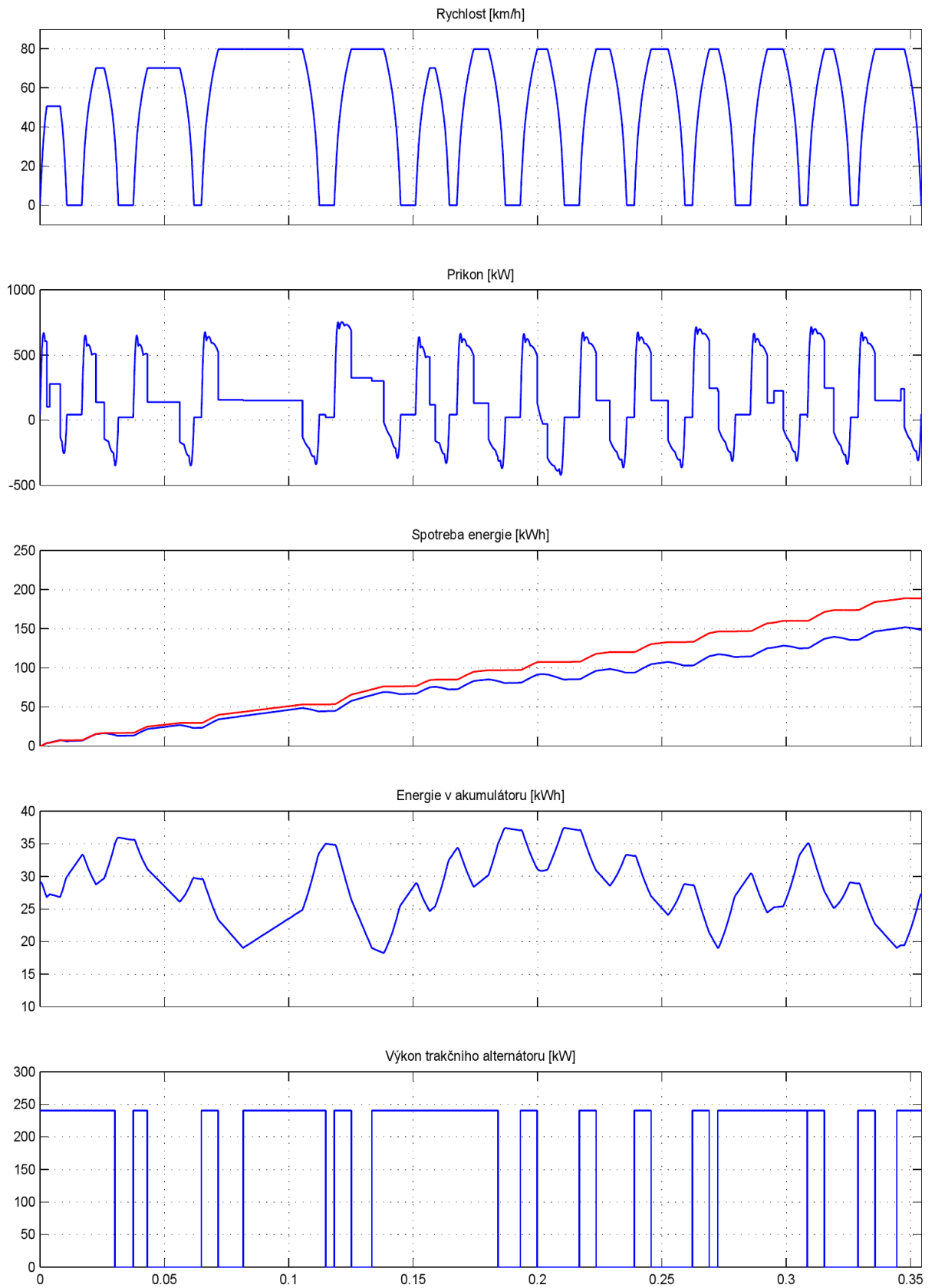
Spotřebovaná energie – varianta C – nehybridní

$$E_{NH} = E_{BR} = 188,8 \text{ kWh}$$

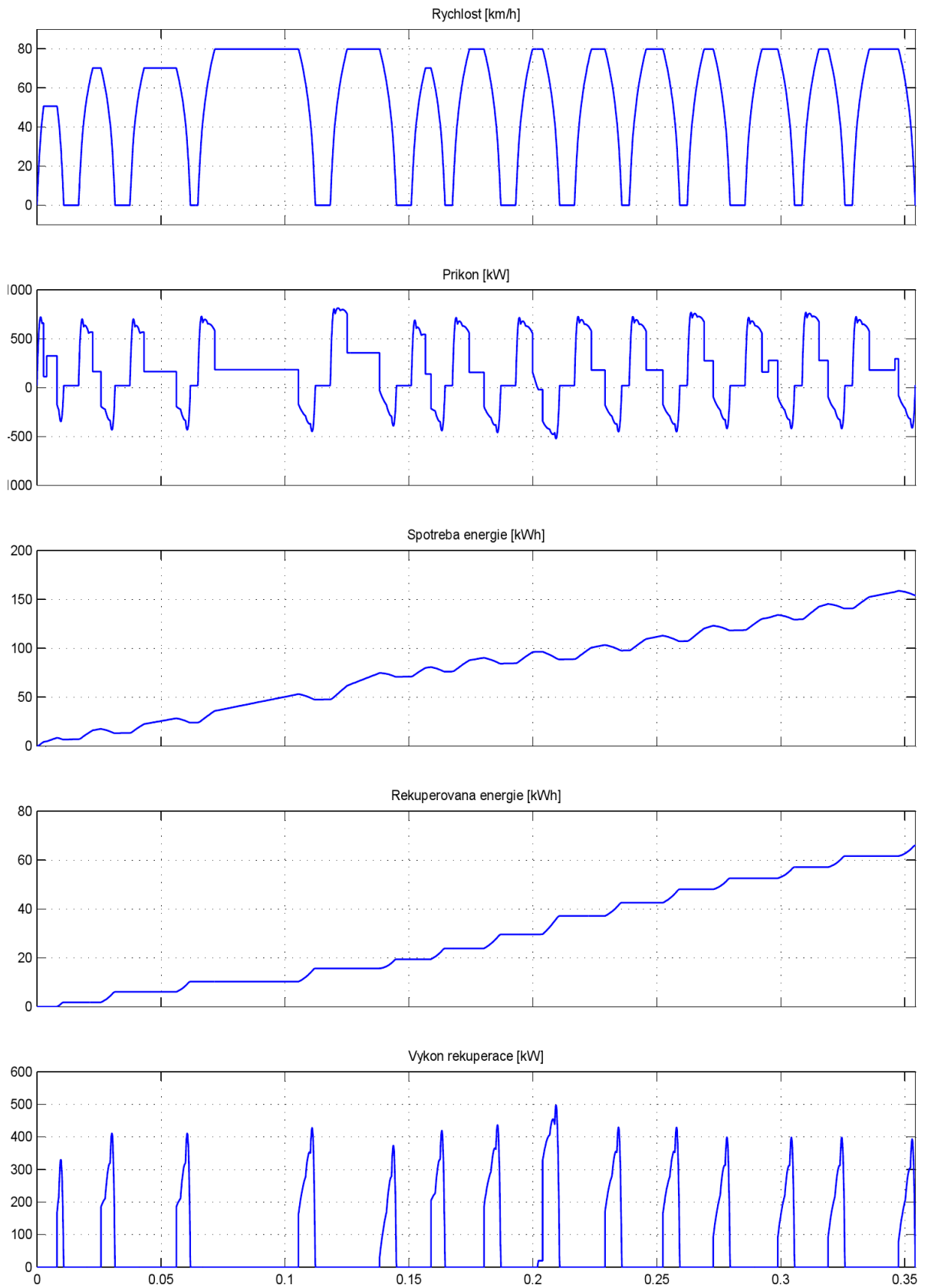
Vypočtené spotřeby paliva

varianta	S [l]	G [l/100 km]	U [%]
bez rekuperace	54,8	114,2	-
A – full hybrid	39,0	81,3	28,8
B – mild hybrid	43,8	91,3	20,1
C – nehybridní	52,2	108,8	4,7

Tab. 10: Spotřeba paliva na trase Plzeň – Klatovy



Graf 15: Varianta A, C: Plzeň – Klatovy



Graf 16: Varianta B: Plzeň - Klatovy

Klatovy – Plzeň

Jízda vlaku

	Čas v simulaci		Reálný čas	
	příjezd [s]	odjezd [s]	příjezd [h:mm:ss]	odjezd [h:mm:ss]
Klatovy		0,0000		0:00:00
Točnick	0,0254	0,0284	0:04:14	0:04:44
Dehtín	0,0457	0,0487	0:07:37	0:08:07
Švihov	0,0687	0,0747	0:11:27	0:12:27
Červené Poříčí	0,0920	0,0950	0:15:20	0:15:50
Borovy	0,1154	0,1184	0:19:14	0:19:44
Lužany	0,1375	0,1435	0:22:55	0:23:55
Přeštice	0,1612	0,1672	0:26:52	0:27:52
Přeštice zastávka	0,1867	0,1897	0:31:07	0:31:37
Chlumčany	0,2033	0,2093	0:33:53	0:34:53
Dobřany	0,2360	0,2420	0:39:20	0:40:20
Plzeň-Valcha	0,2894	0,2924	0:48:14	0:48:44
Plzeň-Doudlevice	0,3168	0,3228	0:52:48	0:53:48
Plzeň zastávka	0,3375	0,3435	0:56:15	0:57:15
Plzeň hl.n.	0,3543		0:59:03	

Tab. 11: Průběh jízdy na trase Klatovy – Plzeň

Výsledky simulace

Spotřebovaná energie – bez rekuperace

$$E_{BR} = 153,2 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta A – full hybrid

$$E_{FH} = 95,9 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta B – mild hybrid

$$E_{MH} = 110,9 \text{ kWh}$$

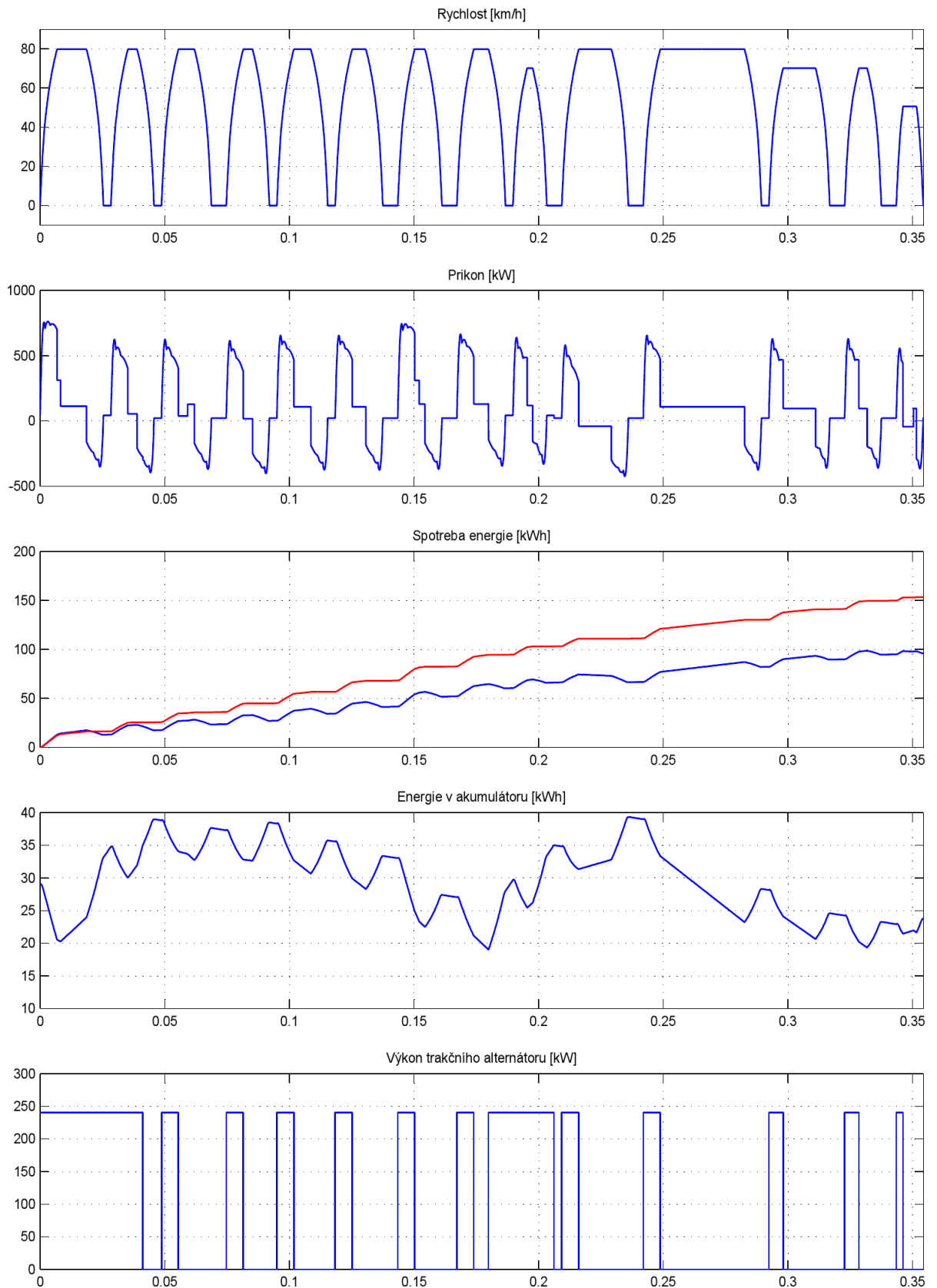
Spotřebovaná energie – varianta C – nehybridní

$$E_{NH} = E_{BR} = 153,2 \text{ kWh}$$

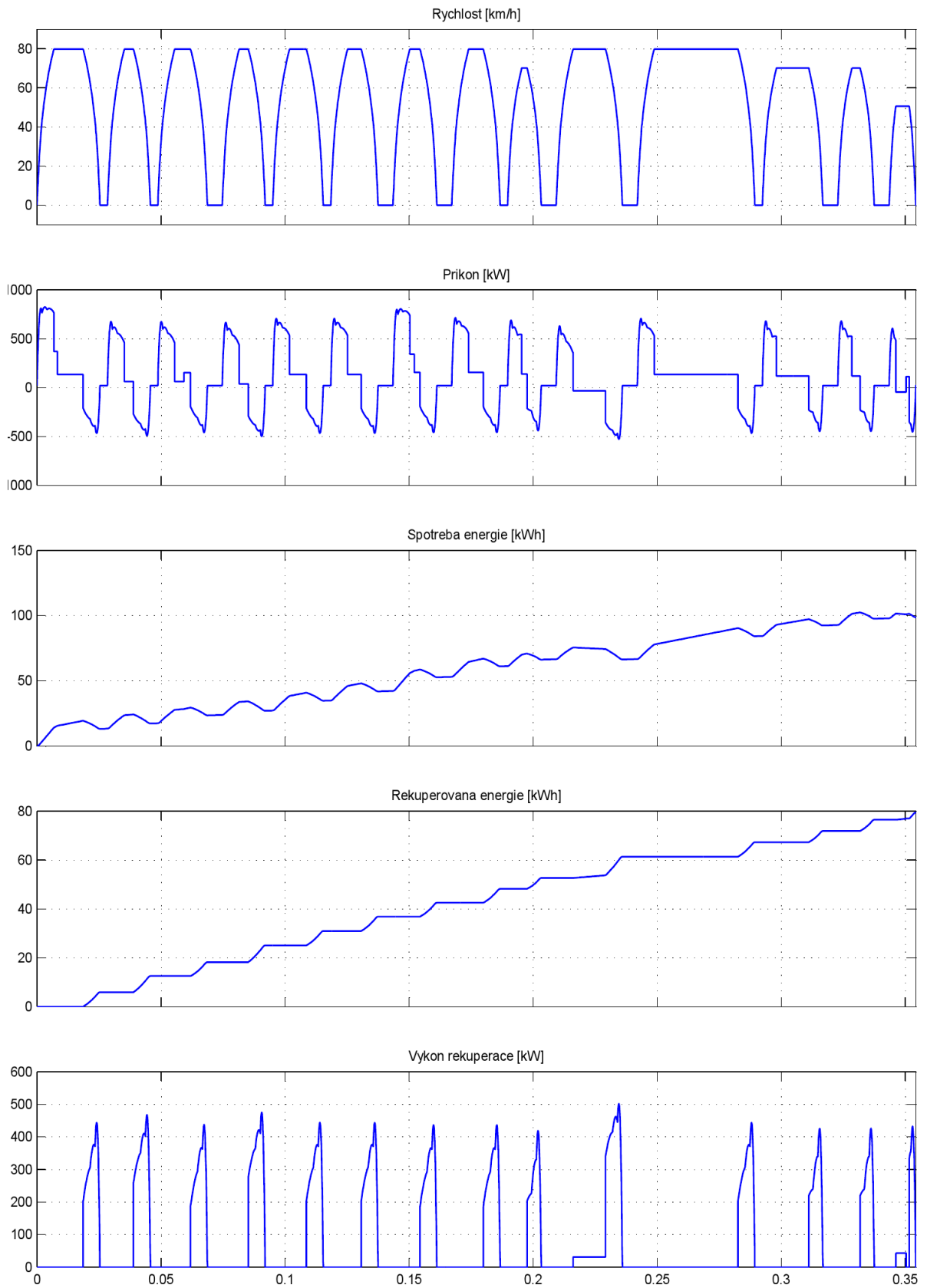
Vypočtené spotřeby paliva

varianta	S [l]	G [l/100 km]	U [%]
bez rekuperace	44,5	92,7	-
A – full hybrid	25,2	52,5	44,4
B – mild hybrid	30,7	64,0	31,0
C – nehybridní	42,4	88,3	4,7

Tab. 12: Spotřeba paliva na trase Klatovy – Plzeň



Graf 17: Varianta A, C: Klatovy – Plzeň



Graf 18: Varianta B: Klatovy – Plzeň

Klatovy – Ž. Ruda-Alžbětín

Jízda vlaku

	Čas v simulaci		Reálný čas	
	příjezd [s]	odjezd [s]	příjezd [h:mm:ss]	odjezd [h:mm:ss]
Klatovy		0,0000		0:00:00
Bezděkov	0,0229	0,0289	0:03:49	0:04:49
Janovice nad Úhlavou	0,0533	0,0653	0:08:53	0:10:53
Petrovice nad Úhlavou	0,0908	0,0968	0:15:08	0:16:08
Nýrsko	0,1197	0,1317	0:19:57	0:21:57
Dešenice	0,1556	0,1616	0:25:56	0:26:56
Zelená Lhota	0,2041	0,2101	0:34:01	0:35:01
Hojsova Stráž	0,2526	0,2586	0:42:06	0:43:06
Hojsova Stráž-Brčálník	0,2874	0,2934	0:47:54	0:48:54
Špičák	0,3197	0,3317	0:53:17	0:55:17
Železná Ruda město	0,3526	0,3586	0:58:46	0:59:46
Železná Ruda centrum	0,3681	0,3741	1:01:21	1:02:21
Železná Ruda-Alžbětín	0,3968		1:06:08	

Tab. 13: Průběh jízdy na trase Klatovy – Železná Ruda-Alžbětín

Výsledky simulace

Spotřebovaná energie – bez rekuperace

$$E_{BR} = 263,2 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta A – full hybrid

$$E_{FH} = 239,1 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta B – mild hybrid

$$E_{MH} = 230 \text{ kWh}$$

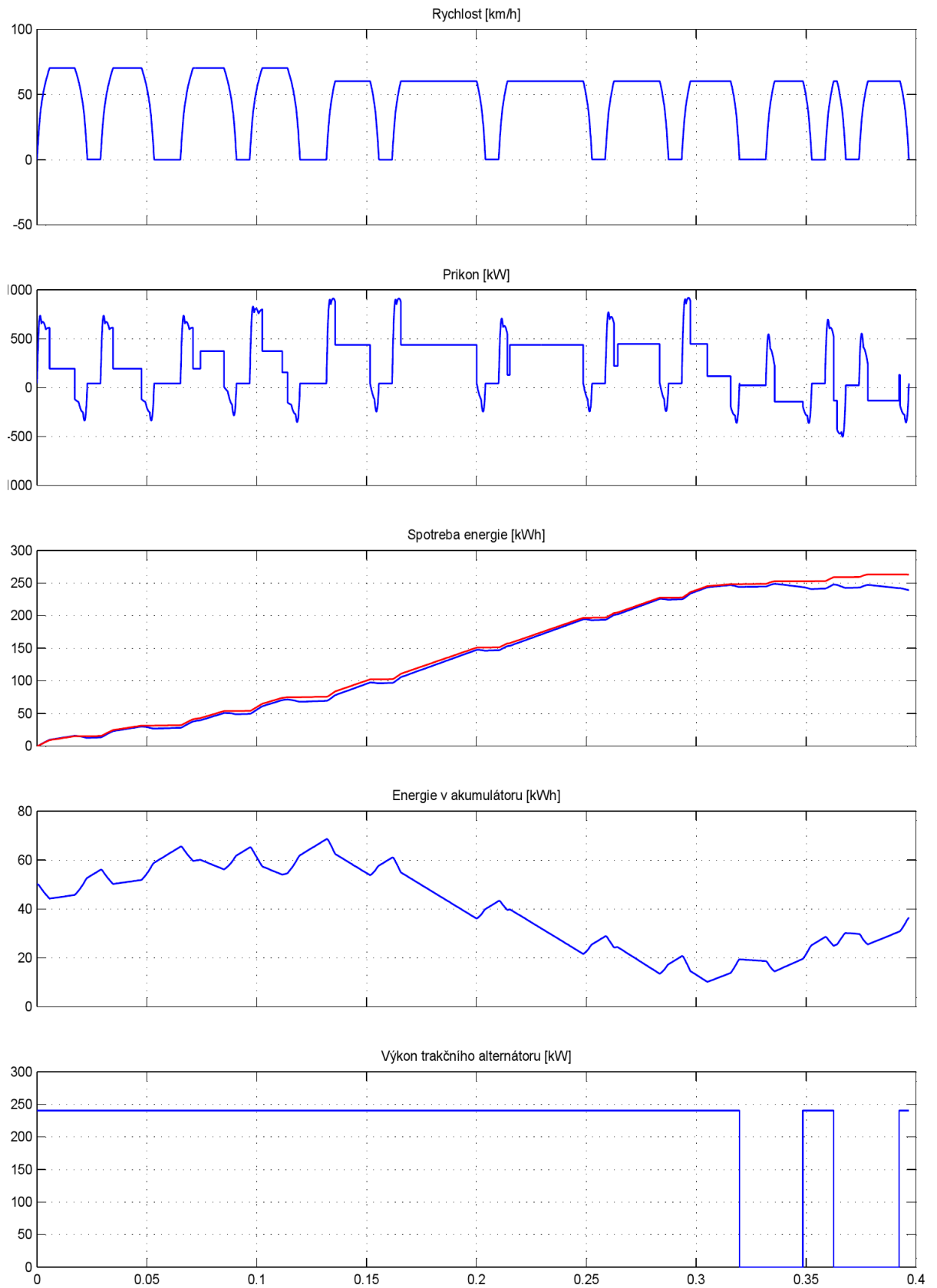
Spotřebovaná energie – varianta C – nehybridní

$$E_{NH} = E_{BR} = 263,2 \text{ kWh}$$

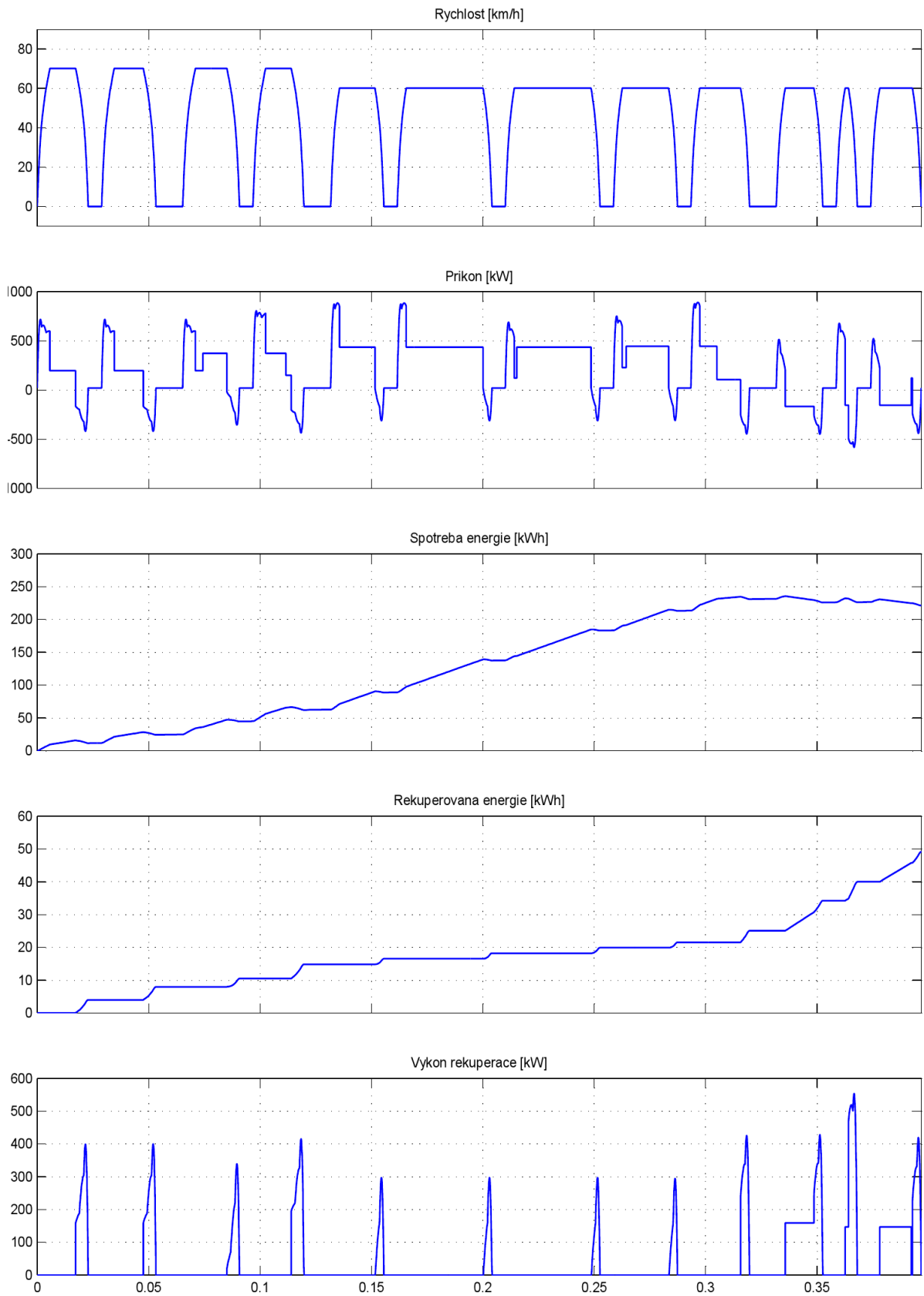
Vypočtené spotřeby paliva

varianta	S [l]	G [l/100 km]	U [%]
bez rekuperace	76,4	155,9	-
A – full hybrid	62,8	128,2	17,8
B – mild hybrid	63,6	129,8	16,8
C – nehybridní	72,8	148,6	4,7

Tab. 14: Spotřeba paliva na trase Klatovy – Železná Ruda-Alžbětín



Graf 19: Varianta A, C: Klatovy – Ž. Ruda-Alžbětín



Graf 20: Varianta B: Klatovy – Ž. Ruda-Alžbětín

Ž. Ruda-Alžbětín – Klatovy

Jízda vlaku

	Čas v simulaci		Reálný čas	
	příjezd [s]	odjezd [s]	příjezd [h:mm:ss]	odjezd [h:mm:ss]
Železná Ruda-Alžbětín		0,0000		0:00:00
Železná Ruda centrum	0,0227	0,0287	0:03:47	0:04:47
Železná Ruda město	0,0382	0,0442	0:06:22	0:07:22
Špičák	0,0651	0,0771	0:10:51	0:12:51
Hojsova Stráž-Brčálník	0,1034	0,1094	0:17:14	0:18:14
Hojsova Stráž	0,1382	0,1442	0:23:02	0:24:02
Zelená Lhota	0,1867	0,1927	0:31:07	0:32:07
Dešenice	0,2352	0,2412	0:39:12	0:40:12
Nýrsko	0,2651	0,2771	0:44:11	0:46:11
Petrovice nad Úhlavou	0,3000	0,3060	0:50:00	0:51:00
Janovice nad Úhlavou	0,3315	0,3435	0:55:15	0:57:15
Bezděkov	0,3679	0,3739	1:01:19	1:02:19
Klatovy	0,3968		1:06:08	

Tab. 15: Průběh jízdy na trase Železná Ruda-Alžbětín – Klatovy

Výsledky simulace

Spotřebovaná energie – bez rekuperace

$$E_{BR} = 127,7 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta A – full hybrid

$$E_{FH} = 53,7 \text{ kWh}$$

Spotřebovaná energie – varianta B – mild hybrid

$$E_{MH} = 74,7 \text{ kWh}$$

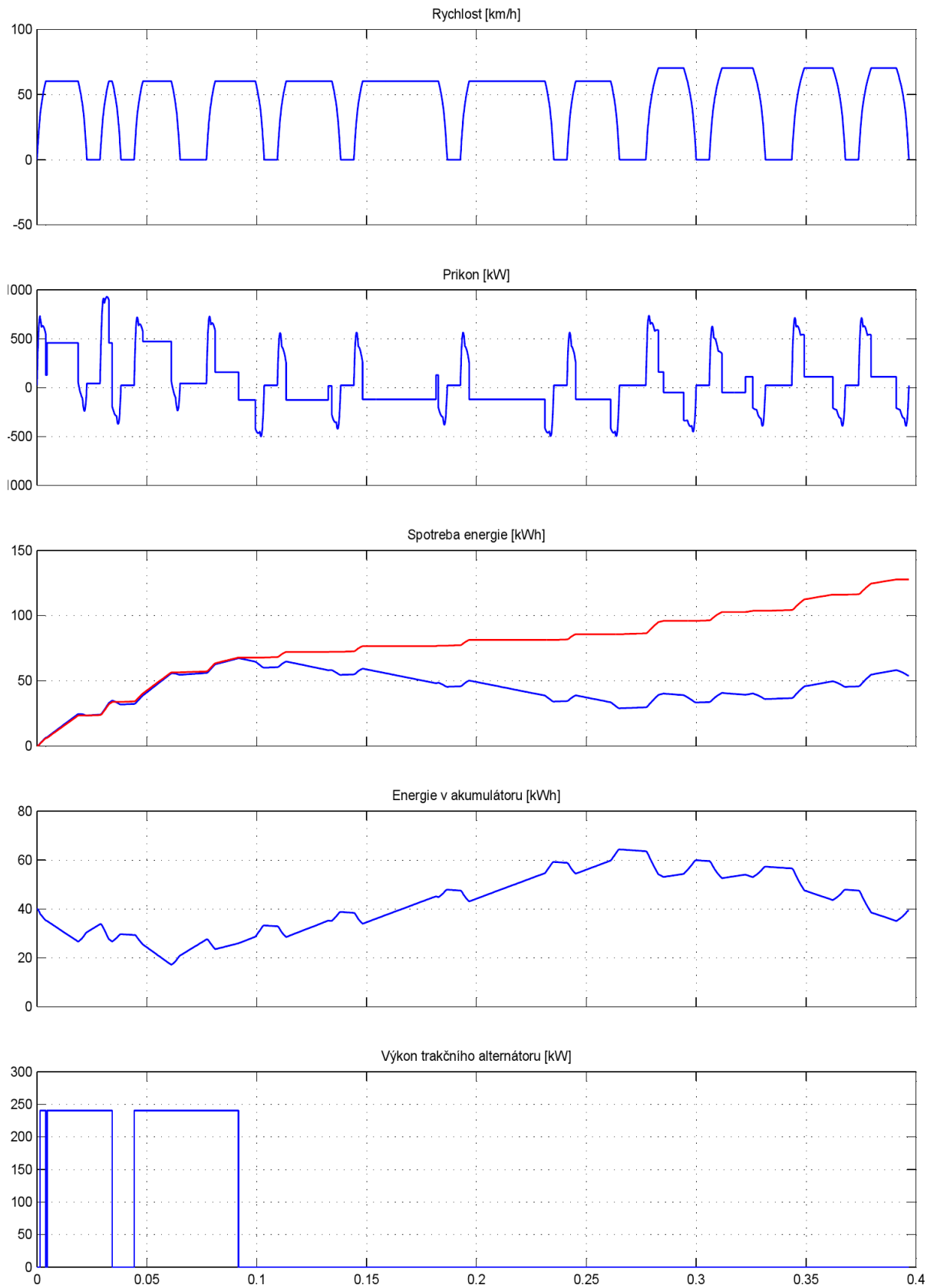
Spotřebovaná energie – varianta C – nehybridní

$$E_{NH} = E_{BR} = 127,7 \text{ kWh}$$

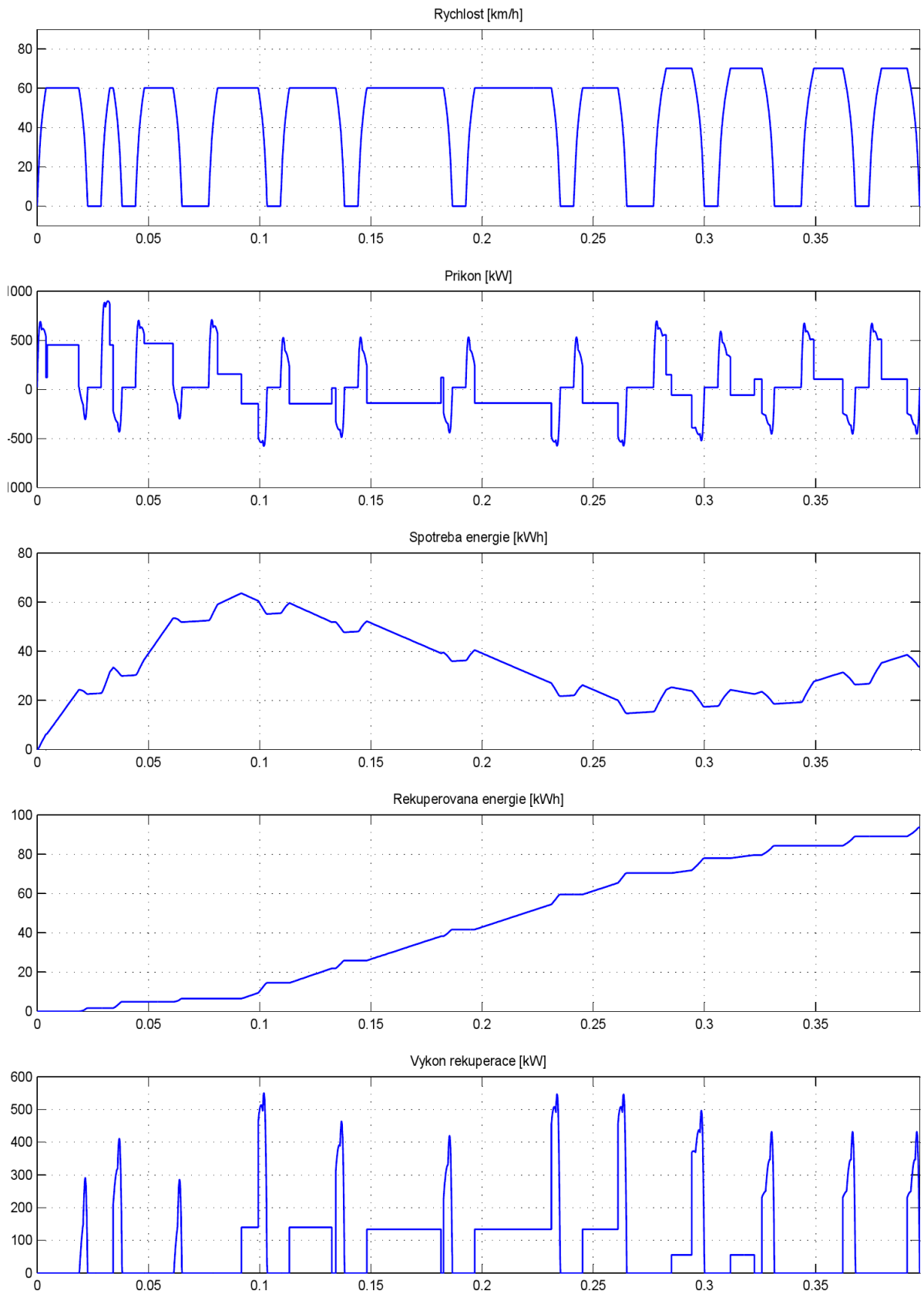
Vypočtené spotřeby paliva

varianta	S [l]	G [l/100 km]	U [%]
bez rekuperace	37,1	75,7	-
A – full hybrid	14,1	28,8	62,0
B – mild hybrid	20,7	42,2	44,2
C – nehybridní	35,3	72,0	4,8

Tab. 16: Spotřeba paliva na trase Železná Ruda-Alžbětín – Klatovy



Graf 21: Varianta A, C: Ž. Ruda-Alžbětín – Klatovy



Graf 22: Varianta B: Ž. Ruda-Alžbětín – Klatovy

Přehled výsledků

V následující tabulce je uveden přehled nejdůležitějších výsledků simulace. Jsou zde zřetelné jak rozdíly mezi jednotlivými variantami přestavby, tak i rozdílné profily zkoumaných tratí a druhů vlaků. Rychlík na trati Plzeň – Most a zpět má jasně nejnižší spotřebu paliva a naopak osobní vlak na horské trati Klatovy – Železná Ruda a zpět má spotřebu nejvyšší. Porovnáním s osobním vlakem na trati Plzeň – Klatovy a zpět je vidět velký vliv častého zastavování na spotřebu.

Pokud jde o varianty přestavby tak největší úspory paliva přináší na všech tratích varianta A – full hybrid. Za to vděčí zejména velké kapacitě akumulátorů energie schopných uchovávat veškerou rekuperovanou energii. Při nasazení na rychlíku ale již není přínos tohoto řešení tak velký a je tedy otázkou, zda se zde kromě úspory paliva vyplatí i finančně.

Pozn.: Přestože mild hybrid vykazuje na trasách Most – Plzeň a Klatovy – Železná Ruda – Alžbětín nižší spotřeby energie [kWh] než full hybrid, jeho spotřeba paliva je nakonec vyšší. To je způsobeno rozdílným přepočtem na spotřebu paliva, viz část Spotřeba paliva, str. 26-27.

Trasa / varianta	Bez rekuperace G [l/100km]	A – full hybrid		B – mild hybrid		C – nehybridní	
		G [l/100km]	U [%]	G [l/100km]	U [%]	G [l/100km]	U [%]
Plzeň – Most	71,6	56,8	20,8	61,7	13,9	68,2	4,7
Most – Plzeň	75,1	62,5	16,8	64,7	13,8	71,6	4,8
Plzeň – Most a zpět	73,4	59,6	18,7	63,2	13,8	69,9	4,8
Plzeň – Klatovy	114,2	81,3	28,8	91,3	20,1	108,8	4,7
Klatovy – Plzeň	92,7	52,5	44,4	64,0	30,1	88,3	4,7
Plzeň – Klatovy a zpět	103,4	66,9	35,3	77,6	25,0	98,5	4,7
Klatovy – Ž. Ruda	155,9	128,2	17,8	129,8	16,8	148,6	4,7
Ž. Ruda – Klatovy	75,7	28,8	62	42,2	44,2	72	4,8
Klatovy – Ž. R. a zpět	115,8	78,5	32,2	85,9	25,8	110,3	4,7

Tab. 17: Přehled nejdůležitějších výsledků

8. Návratnost investice

Pro představu a porovnání ekonomiky provozu jsem provedl výpočet nákladů na provoz motorových vozů a to jak hybridních, tak i s klasickým pohonem. Kalkulace je na dobu 20 let pro všechny tři uvažované tratě a zahrnuje ty nejzákladnější výdaje: pořizovací náklady, servis spalovacího motoru, výměnu akumulátorů energie a náklady na palivo. Z důvodu nedostupnosti nejsou zohledněny náklady na související elektronickou výzbroj, která jistě zvýší náklady zejména na stavbu full hybridu. Na ostatní náklady by systém pohonu neměl mít vliv, předpokládám je tedy stejné a nejsou zde proto ani uvedeny.

Veškeré částky uvedené v kalkulaci jsou bez DPH. Cena motoru Tedom TD 310 R9H TA 26 (březen 2014) 854 750 Kč, cena superkondenzátoru Maxwell BMOD0063 P125 (prodejce RichardsonRFPD.com, leden 2014) 6935USD, cena LiFePO4 článku A123 Systems AMP20 (březen 2014) cca 900 Kč.

Servisní náklady spalovacího motoru

Pro výpočet servisních nákladů spalovacího motoru na trase Plzeň – Most – Plzeň vycházím ze současného provozu, kdy má každý ze 4 strojů řady 843 z DKV Plzeň průměrný měsíční proběh 11073 km a zajišťují 6 párů vlaků denně na trase Plzeň – Most a zpět. Celkem denně překonají minimálně (bez posunu) 1848 km za dobu 33 hodin 12 minut a každý vůz tedy 462 km za dobu 8 hodin 18 minut. Vzhledem k nutnosti ohřevu motorů, posunu a prostojům, uvažuji provozní dobu motorů jednoho vozu 10 hodin denně. Za 20 let tak bude každý z motorů v provozu 73050 hodin. Obdobný provoz uvažuji i na tratích Plzeň – Klatovy – Plzeň a Klatovy – Železná Ruda – Klatovy.

Úroveň údržby	Kdy [Mh]	Cena [Kč bez DPH]
T0	po prvních 250	4863
T1	každých 1000 Mh	6489
T2	každých 3000 Mh	8359
T3	každých 6000 Mh	9184
T4	každých 12000 Mh	12209
Sekundární oprava	po 24000 Mh	77800
Generální oprava	po 48000 Mh	193200
Regenerace DPF	každých 5000 Mh	4200

Tab. 18: Stručný servisní plán motorů Tedom, údaje Tedom, Divize motory 2014

Celkové náklady na běžný servis 1 spalovacího motoru včetně práce činí během 20 let (73050 Mh) na všech tratích uvažovaných v simulaci celkem 896 505 Kč bez DPH.

Životnost akumulátorů energie

Superkondenzátory mild hybridu jsou navrženy tak, aby byly funkční po celých 20 let provozu. Dosáhnout něčeho podobného při tak náročném použití je ale v případě lithiových akumulátorů v dnešní době nemožné a je tedy nutné počítat s poměrně častou výměnou. Určení jejich životnosti je ale velmi obtížné neboť závisí na množství proměnných a hlavně dosud chybí zkušenosti s jejich provozem při tak náročném nasazení. Při poklesu kapacity na 70% původní je udávaná životnost článků 5000 celých cyklů. Při provozu s nižší hloubkou vybití ale počet možných cyklů výrazně narůstá. Hrubým výpočtem pomocí množství energie procházející akumulátory při jízdě jsem stanovil jejich předpokládanou životnost na 3 roky provozu. Během 20 let to tedy znamená nutnost šesti (!) výměn.

Pozn.: V následujících propočtech nákladů na provoz je započtena pouze cena samotných akumulátorů bez nákladů na práci při výměně.

Náklady na palivo

Při výpočtů nákladů na palivo vycházím z vypočtených průměrných spotřeb paliva pro jednotlivé varianty přestavby. Na trase Plzeň – Most a zpět očekávám za 20 let provozu nájezd 2 657 520 km a pro trasy Plzeň – Klatovy a zpět a Klatovy – Ž. Ruda a zpět shodně 1 554 720 km. Cenu 1 litru motorové nafty uvažuji současných 30 Kč bez DPH.

Pozn.: Očekávaný nájezd kilometrů vychází ze současného stavu, kdy motorové vozy řady 843 z DKV Plzeň obsluhující rychlíky na trase Plzeň – Most a zpět mají průměrný měsíční proběh 11073 km a motorové vozy řady 842 z DKV Plzeň (95 54 5 842.023-4, 95 54 5 842.024-2, 95 54 5 842.029-1 a 95 54 5 842.030-9) sloužící i na trati č. 183 Plzeň – Klatovy – Železná Ruda - Alžbětín překonají v průměru 6478 km za měsíc.

Celkové náklady na trase Plzeň – Most – Plzeň

Varianta A – full hybrid

Motor Tedom TD 310 R9H TA 26	1	854 750 Kč
------------------------------	---	------------

Akumulátor energie	1	1 350 000 Kč
Servis spalovacího motoru	1	896 505 Kč
Výměna akumulátorů energie	6	8 100 000 Kč
Palivo	1 583 882	47 516 460 Kč
Celkem		58 717 715 Kč

Varianta B – mild hybrid

Motor Tedom TD 310 R9H TA 26	2	1 709 500 Kč
Akumulátor energie	1	5 600 000 Kč
Servis spalovacího motoru	2	1 793 010 Kč
Palivo	1 679 553	50 386 590 Kč
Celkem		59 489 100 Kč

Varianta C - nehybridní

Motor Tedom TD 310 R9H TA 26	2	1 709 500 Kč
Servis spalovacího motoru	2	1 793 010 Kč
Palivo	1 857 733	55 731 990 Kč
Celkem		59 234 500 Kč

Celkové náklady na trase Plzeň – Klatovy – Plzeň**Varianta A – full hybrid**

Motor Tedom TD 310 R9H TA 26	1	854 750 Kč
Akumulátor energie	1	1 350 000 Kč
Servis spalovacího motoru	1	896 505 Kč
Výměna akumulátorů energie	6	8 100 000 Kč
Palivo	1 040 108	31 203 240 Kč
Celkem		42 404 495 Kč

Varianta B – mild hybrid

Motor Tedom TD 310 R9H TA 26	2	1 709 500 Kč
Akumulátor energie	1	5 600 000 Kč
Servis spalovacího motoru	2	1 793 010 Kč

Palivo	1 206 463	36 193 890 Kč
Celkem		45 296 400 Kč

Varianta C - nehybridní

Motor Tedom TD 310 R9H TA 26	2	1 709 500 Kč
Servis spalovacího motoru	2	1 793 010 Kč
Palivo	1 531 029	45 930 870 Kč
Celkem		49 433 380 Kč

Celkové náklady na trase Klatovy – Ž. Ruda – Klatovy**Varianta A – full hybrid**

Motor Tedom TD 310 R9H TA 26	1	854 750 Kč
Akumulátor energie	1	1 350 000 Kč
Servis spalovacího motoru	1	896 505 Kč
Výměna akumulátorů energie	6	8 100 000 Kč
Palivo	1 220 455	36 613 650 Kč
Celkem		47 814 905 Kč

Varianta B – mild hybrid

Motor Tedom TD 310 R9H TA 26	2	1 709 500 Kč
Akumulátor energie	1	5 600 000 Kč
Servis spalovacího motoru	2	1 793 010 Kč
Palivo	1 335 504	40 065 120 Kč
Celkem		49 167 630 Kč

Varianta C - nehybridní

Motor Tedom TD 310 R9H TA 26	2	1 709 500 Kč
Servis spalovacího motoru	2	1 793 010 Kč
Palivo	1 714 634	51 439 020 Kč
Celkem		54 941 530 Kč

Kombinovaný akumulátor energie

Z dosažených výsledků jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými hybridními systémy i akumulátory energie. První – full hybrid s lithiovými akumulátory – dosahuje vysokých úspor paliva i finančních prostředků na provoz, jeho největší nevýhodou je kromě náročnější přestavby hlavně krátká životnost akumulátorů energie. Naopak druhý systém – mild hybrid se superkondenzátory – je možné realizovat poměrně jednoduše a akumulční prvky mají dlouhou životnost, nedosahuje ale takových úspor paliva. Logicky se tedy nabízí otázka, zda je možné spojit výhody obou variant v jeden celek.

Varianta A – full hybrid, akumulátorem energie LiFePO₄ články

- + velká úspora paliva
- + možnost rekuperace i na dlouhých klesáních díky velké kapacitě akumulátorů
- + snížení hmotnosti vozu díky použití pouze jedné motorové skupiny
- krátká životnost akumulátorů
- v některých případech omezená trakční charakteristika

Varianta B – mild hybrid, akumulátorem energie superkondenzátory

- + dlouhá životnost akumulátorů
- + zálohování pohonu
- + zachování trakční charakteristiky vozu
- menší úspory paliva
- zvýšení celkové hmotnosti vozu

Za nejvýhodnější lze tedy považovat stavbu full hybridního vozu vybaveného lithiovými akumulátory pro dosažení potřebné kapacity energie a doplnit je menším blokem superkondenzátorů (cca 1 kWh, 95 kW) a to zejména pro pokrytí oblastí špičkových výkonů, protože právě ty mají zásadní vliv na životnost elektrochemických akumulátorů. Takto navržený stroj si za cenu složitější a nákladnější přestavby zachovává hlavní výhodu full hybridu v podobě velké úspory paliva, lze ale očekávat podstatné prodloužení životnosti lithiových akumulátorů a hmotnost vozu přitom nepřesáhne hmotnost výchozího stroje. V tomto případě je ale ještě více než v předchozích návrzích nutná podrobnější analýza pro zjištění skutečných vlastností navrženého pohonu.

9. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vybrat motorový vůz vhodný pro přestavbu na hybridní pohon a pomocí simulace jízdy na reálných tratích navrhnout potřebné úpravy vozu. Na základech současného motorového vozu řady 843 jsem tedy navrhl dvě odlišná řešení hybridního pohonu, která zachovávají trakční parametry původního vozu a využívají různých druhů akumulátorů energie. Po simulaci těchto systémů na třech tratích s různými sklonovými poměry i typy vlaků a porovnání s původním i remotorizovaným vozem lze potvrdit jednoznačný přínos hybridních systémů pohonu pro osobní vlaky.

Nejlepším řešením se na všech tratích ukázal full hybridní systém s lithiovými akumulátory energie o kapacitě 97,5 kWh. Jeho nasazení je ideální na rovinných tratích se vzdáleností zastávek do 5 km, například na trati Plzeň – Klatovy a zpět vykazuje snížení spotřeby paliva o 35,3 %. Během 20 let provozu to při současném nasazení představuje v jednom voze úsporu téměř půl milionu litrů paliva. Tato úspora znamená i po započtení nákladné přestavby a výměn akumulátorů energie snížení nákladů na provoz o více než 7 miliónů korun. Navíc lze díky stále vyšší ceně paliva i rychlému vývoji nových typů akumulátorů očekávat neustálé zvyšování finančních úspor. Na druhou stranu je potřeba přiznat nevýhodu v poměrně krátké životnosti současných lithiových akumulátorů a tedy nutnosti jejich časté výměny. Kromě neustálého zlepšování provozních parametrů lithiových článků může být možným řešením krátké životnosti také jejich kombinace se superkondenzátory umožňující mnohem rychlejší příjem i výdej elektrické energie.

Současné parametry akumulátorů energie již umožňují stavbu lehkých hybridních kolejových vozidel nezávislé trakce. Ta umožňují dosáhnout díky rekuperaci brzděné energie velkých úspor paliva i provozních nákladů. V České republice je v dnešní době elektrifikováno pouze 32 % délky železničních tratí a přestože jde vesměs o hlavní dopravní cesty, zbývajících 68 % je neelektrifikovaných a představují obrovský prostor pro nasazení hybridních vozidel umožňujících podstatné snížení spotřeby paliva, nákladů na provoz a tím zvýšení konkurenceschopnosti železnice.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] Danzer, Jiří. Elektrická trakce I. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. 198 s. ISBN 80-7082-633-9.
- [2] Danzer, Jiří. Elektrická trakce II. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. 1 sv. (v různém stránkování). ISBN 80-7082-814-5.
- [3] Lokomotivy a historie. 1. vyd. Praha: Nadas, 1989. 159 s. Knižnice nové techniky a technologie. ISBN 80-7030-038-8.
- [4] Schwarz, Jaroslav. Dimenzování trakčních baterií pro vozidla MHD. Plzeň, 2012. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Jiří Flajtingr.
- [5] Staněk, Jiří. Hybridní pohon regionálního vozidla. Plzeň, 2012. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. Vedoucí práce Petr Heller.
- [6] Motorový vůz řady 843, vložený vůz řady 043 a řídicí vůz řady 943 - příručka pro strojvedoucí.
Dostupné z: <http://www.843krnov.fscz.cz/Prirucka843/Rada843Prirucka.doc>
- [7] Battery Pack Design Guide, A123 Systems 2013 [online].
Dostupné z: <http://www.a123systems.com/>
- [8] Technická data společnosti Maxwell Technologies. [online].
Dostupné z: <http://www.maxwell.com/>
- [9] Technická data společnosti A123 Systems [online].
Dostupné z: <http://www.a123systems.com/>
- [10] Technická data společnosti TEDOM, Divize motory. Dostupné na vyžádání.
- [11] Technická data SKD Trade [online]. Dostupné z: <http://www.skd.cz/>
- [12] Internetové stránky International Union of Railways
<http://www.uic.org>
- [13] Internetové stránky společnosti Hitachi Railway Systems
<http://www.hitachi-rail.com>
- [14] Internetové stránky společnosti Toshiba Railway Systems
<http://www.toshiba.co.jp>
- [15] Atlas lokomotiv [online].
<http://www.atlaslokomotiv.net>
- [16] Klub příznivců japonských železnic DC65 [online].
<http://dc65.net>