

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Rekonstrukce elektrické lokomotivy na hybridní vozidlo trolej-
baterie

Autor práce: **Radim Novotný**
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Martin Pittermann, Ph.D.**

2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Radim NOVOTNÝ**
Osobní číslo: **E22N0041P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Výkonové elektronické technologie a pohony**
Téma práce: **Rekonstrukce el.lokomotivy na hybridní vozidlo trolej+baterie**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

Diplomová práce bude obsahovat tyto body:

1. Stručně uveďte aspekty související s předpokládaným provozním nasazením rekonstruovaného vozidla a z toho vyplývajících technicko-ekonomických požadavků na rekonstruované vozidlo.
2. Stručně uveďte konkrétní příklady vozidel obdobných hybridních lokomotiv (již realizovaných nebo i jen uvažovaných).
3. Stručně popište vhodné reálné možnosti využití stávajících komponent (ss-trakční motory) a komponent nově vyrobených (trakční měniče, měniče pro pomocné pohony atd.).
4. Proveďte návrh vstupní části vozidla pro případ jeho napájení z troleje +3kV.
5. Proveďte návrh vstupní části vozidla pro případ jeho napájení z troleje 25kV/50Hz.
6. Analyzujte problematiku využití kapacity trakční baterie pro dosažení maximálního dojezdu vozidla s ohledem na vyžadovaný provozní režim (akcelerace, dosažení rychlosti atd.) a aktuální stav baterie.


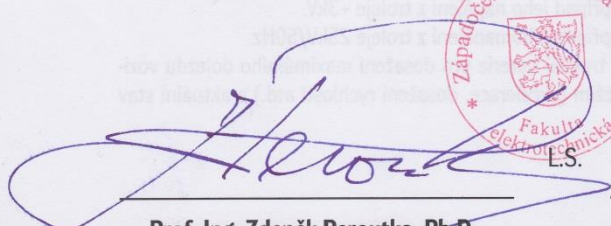
Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **5**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Danzer Jiří: Elektrická trakce 1. Přehled problematiky. Skripta ZČU v Plzni 2009.
2. Danzer Jiří: Elektrická trakce 2. Stupňové řízení sériového motoru. Skripta ZČU v Plzni 2009.
3. Danzer Jiří: Elektrická trakce 3. Plynulá regulace cize buzeného motoru. Skripta ZČU v Plzni 2009.
4. Interní a veřejně dostupné materiály o lokomotivě řady 210 (ČSD S458.0, Škoda 51E), řady 111 (ČSD E458.1, Škoda 78E) a řady 110 (ČSD E458.0, Škoda 33E).

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Martin Pittermann, Ph.D.**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

Abstrakt

Práce se zabývá možnostmi rekonstrukce vozidla s častými rozjezdy na hybrid trolej-baterie. Na příkladu posunovací lokomotivy jsou zhodnoceny požadavky kladené na části lokomotivy nasazením i specifiky rekonstrukce, je odvozena pravděpodobná topologie výsledného vozidla. Dále je proveden výpočet některých parametrů výkonového obvodu vstupní části pro stejnosměrnou trolej 3 kV a střídavou trolej 25 kV/50 Hz, jehož výsledky jsou ověřeny simulací. V poslední kapitole je odvozen zjednodušený model jízdy vozidla a provedeno několik simulací s proměnnými parametry jízdy s určením spotřeby energie a času jízdy.

Klíčová slova

Hybridní lokomotiva, hybrid trolej-baterie, dvouzdrojové vozidlo, vícezdrojové vozidlo, parametry vstupní části, spotřeba energie na jízdním profilu

Abstract

This thesis tries to show possible variants of reconstruction of vehicles with frequent acceleration and deceleration, showed on example of a shunter locomotive. Examples of requirements based on deployment and specifics of reconstruction are provided, as well as probable topology of vehicle after reconstruction. Provided calculations of particular parameters of input circuitry for DC system 3 kV and for AC system 25 kV/50 Hz are then verified by simulation. In the last chapter, power balance of locomotive driving a specific trajectory is examined and transformed into simulation model which is then used to output energy consumption and time of drive based on varying input parameters.

Key Words

Hybrid locomotive, catenary-battery hybrid, overhead wire-battery hybrid, triple hybrid locomotive, input circuit parameters, power consumption over trajectory

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Martinu Pittermannovi, Ph.D. a Ing. Vojtěchu Blahníkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a čas strávený konzultacemi.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Nasazení vozidla, požadavky	- 2 -
2 Obdobná vozidla.....	- 4 -
2.1 Již realizované úpravy lokomotiv řad 110/111/210.....	- 4 -
2.2 Moderní akumulátorové posunovací lokomotivy – např. Stadler Geaf 2/2.....	- 5 -
2.3 Třízdrojová lokomotiva – např. Toshiba HDB 800 (T-HDB 800).....	- 6 -
3 Stávající a nové komponenty.....	- 7 -
3.1 Celková koncepce vozidla	- 7 -
3.2 Stávající komponenty – trakční motor.....	- 8 -
3.3 Nové komponenty – trakční měnič	- 9 -
3.4 Nové komponenty – pomocné pohony	- 9 -
3.5 Nové komponenty – akumulátor.....	- 10 -
3.5.1 Pb akumulátor.....	- 10 -
3.5.2 Ni-Cd akumulátor.....	- 10 -
3.5.3 Li akumulátory	- 10 -
3.5.4 Porovnání potenciálních akumulátorů	- 11 -
4 Návrh vstupní části vozidla pro trolej +3 kV	- 13 -
4.1 Tuzemské stejnosměrné posunovací lokomotivy	- 13 -
4.2 Simulace.....	- 13 -
4.2.1 Schéma zapojení simulace.....	- 14 -
4.2.2 Určení parametrů výkonového obvodu	- 16 -
4.2.3 Výsledky simulace.....	- 19 -
5 Návrh vstupní části vozidla pro trolej 25 kV/50 Hz.....	- 21 -
5.1 Možné topologie vstupní části	- 21 -
5.1.1 Řízení odbočkovým transformátorem	- 21 -
5.1.2 Řízený usměrňovač.....	- 21 -
5.1.3 Měnič zajišťující odběr kvalitního průběhu proudu z troleje	- 21 -
5.2 Tuzemské střídavé posunovací lokomotivy.....	- 22 -
5.3 Simulace.....	- 22 -

5.3.1	Schéma zapojení simulace.....	- 23 -
5.3.2	Určení parametrů výkonového obvodu	- 25 -
5.3.3	Výsledky simulace.....	- 27 -
6	Problematika trakční baterie.....	- 29 -
6.1	Tok výkonů v lokomotivě, ztráty.....	- 29 -
6.2	Předpoklady pro výpočetní smyčku.....	- 29 -
6.2.1	Trakční mechanika vlaku.....	- 29 -
6.2.2	Hmotnost vlaku	- 30 -
6.2.3	Pohybová rovnice vlaku	- 30 -
6.2.4	Jízdní odpory	- 30 -
6.2.5	Rovnice stejnosměrného motoru	- 31 -
6.3	Trakční charakteristika lokomotivy	- 31 -
6.4	Kroky výpočetní smyčky	- 34 -
6.5	Výsledky simulace.....	- 37 -
6.5.1	Průběhy jedné jízdy	- 37 -
6.5.2	Výsledky v závislosti na proměnných požadovaných silách.....	- 39 -
6.5.3	Výsledky podle rychlosti při symetrické tažné a brzdné síle	- 41 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 43 -
	Literatura	- 44 -
	Seznam obrázků.....	- 47 -
	Přílohy	I
	I. Zapojení trakčního obvodu lokomotivy řady 210	I
	II. Inicializace proměnných výpočetní smyčky	I

Seznam symbolů a zkratek

ARR	Automatická regulace rychlosti
CZE	Centrální zdroj energie
GTO	Gate turn-off
IGBT	Insulated gate bipolar transistor
PI regulátor	Proporčně-integrační regulátor
PR regulátor	Proporčně-rezonanční regulátor
ss	Stejnoseměrný
st	Střídavý
TNS	Trakční napájecí stanice
UIC	Mezinárodní železniční unie
ρ_E (kWh/kg)	Energetická hustota akumulátoru
N (-)	Převodový poměr
s (‰)	Sklon
s_{akt} (m)	Aktuální poloha
$s_{cíl}$ (m)	Délka trajektorie

Úvod

Diplomová práce se zabývá možnostmi potenciální přestavby již existujících elektrických lokomotiv na bateriový hybrid pro zlepšení jejich účinnosti a provozních vlastností. Vzhledem k šíři tématu se práce věnuje zejména přestavbě elektrických posunovacích lokomotiv, ale obdobné vlastnostmi mají i jiná vozidla s podobnými charakteristikami provozu – tedy relativně lehká vozidla (soupravy) s častými rozjezdy a brzděním. Podobně by bylo možno aplikovat i například na příměstské jednotky, tramvaje apod. Aby bylo obecné téma ještě více omezeno, jsou nastíněny varianty směřovány prioritně k tuzemským posunovacím lokomotivám současných řad 110, 111 a 210. Tedy továrním značením Škoda 33E, 78E a 51E, dobově podle Kryšpínova značení lokomotiv E458.0, E458.1 a S458.0; dále je v práci používáno současné mezinárodní značení podle UIC.

Jsou zde nastíněny možnosti pro přestavbu vozidla na dvouzdrojové, kombinující napájení z akumulátorové baterie a ze stejnosměrné troleje nebo z baterie a ze střídavé troleje. V práci jsou porovnány jednotlivé navržené varianty a je uvedeno, za jakých podmínek by byla daná možnost vhodná, ale celá přestavba je jen hypotetická, nejsou tedy známy konkrétní požadavky na vozidlo, takže nejsou učiněny ani příliš konkrétní závěry.

1 Nasazení vozidla, požadavky

Elektrické posunovací lokomotivy mají ideální provozní vlastnosti, ale jejich problémem je závislost na trakčním vedení, což je u posunu problematické, protože jsou úseky kolejí, na kterých musí být prováděn posun, ale nemohou být ani teoreticky zatrolejovány – místa nakládky jeřábem apod., existují rovněž místa, kde trolej není vhodné využívat – myčky, haly atd. Dále pak existuje i velké množství „běžných“ úseků, kde výstavba troleje nedává ekonomický smysl – málo využívané vlečky apod. Zřejmým řešením z hlediska dopravce je použití lokomotivy se spalovacím motorem, nicméně lokomotiva se spalovacím motorem není pro posun příliš vhodná, neboť posun žádá obvykle jen malé výkony (uvádí se, že střední využívaný výkon posunovací lokomotivy je cca 10-20 % instalovaného [1]), což vede na provoz spalovacího motoru v neoptimální oblasti, navíc mají posunovací lokomotivy dlouhé prostoje, kdy ale motor zůstává v chodu a spotřebovává palivo. Provoz spalovacího motoru při nižším výkonu rovněž snižuje jeho životnost – zanášení výfukových svodů apod. Další nevýhodou je nemožnost využít dynamickým brzděním získanou energii. Teoretickým řešením by byl provoz elektrické posunovací lokomotivy pod trolejí a provoz lokomotivy nezávislé trakce mimo, nicméně v dnešní době kdy poklesl objem (nákladní) dopravy po železnici se udržovat více pohotovostních vozidel většinou nevyplatí a přednost tedy dostává jediná lokomotiva, která dokáže obsloužit všechny potřebné úseky, tedy nejčastěji lokomotiva se spalovacím motorem.

V této situaci by tedy byla ideální posunovací lokomotiva využívající elektrický pohon a akumulaci elektrické energie v akumulátoru, ať s primárním zdrojem energie v troleji nebo s malým spalovacím motorem dobíjejícím akumulátor. Tato možnost je samozřejmě dlouhodobě známá a podobná vozidla existují. Tyto hybridní lokomotivy kombinují výhody nezávislé trakce a elektrické lokomotivy – umožňují hospodárný provoz při malých rychlostech s vysokou tažnou silou a umožňují nezávislost vozidla na troleji, ať krátkodobou (hybrid s trolejí) nebo dlouhodobou (hybrid se spalovacím motorem). Akumulátorové lokomotivy mají (stejně jako elektrické) navíc výhodu v (lokálně) bezemisním provozu, kdy se hodí i pro provoz v uzavřených prostorech (haly, tunely, doly apod.), případně v husté zástavbě (města obecně, vlečky blízko obytných budov...).

Akumulátor hybridu s trolejí je dobíjen při pobytu vozidla pod trolejí a rovněž s využitím energie získané dynamickým brzděním. U hybridní lokomotivy se spalovacím

motorem je akumulátor dobíjen dynamickým brzděním a menším spalovacím motorem trvale běžícím v optimálním režimu. Je možný i provoz s výkonem daným jako součet výkonu spalovacího motoru a výkonu akumulátoru (např. lokomotiva řady 718, kde byl elektrický výkon spalovacího motoru s generátorem 150 kW, výkon akumulátoru 360 kW a celkový trakční výkon 510 kW [2]). Existují i lokomotivy kombinující napájení z troleje, spalovací motor i akumulátor (např. Toshiba HDB 800).

Lokomotivy řad 110, 111 a hlavně 210 se uplatnily i v lehké traťové službě, například lokomotivy řady 210 jsou stále relativně pravidelně řazeny na osobní vlaky v okolí Lipna nad Vltavou [3]. Při vozbě osobních vlaků, kde jsou rovněž časté rozjezdy a brzdění by akumulace energie rovněž pravděpodobně přinesla úspory.



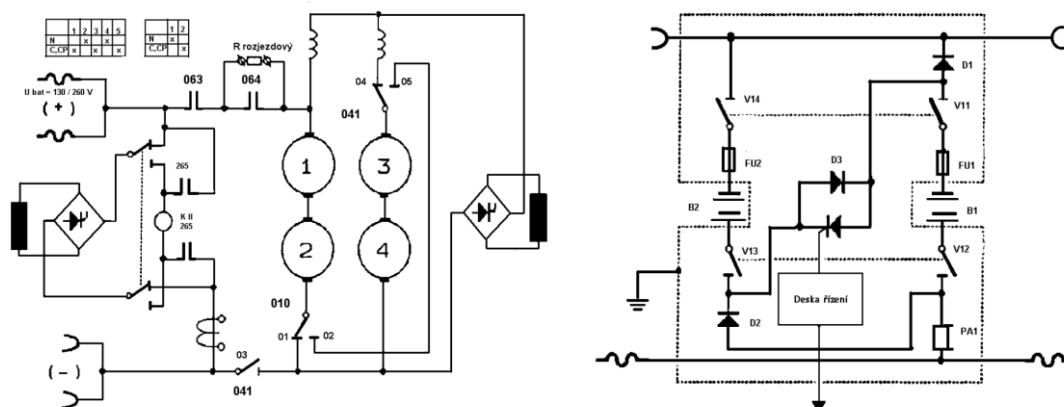
Obr. 1: Posunovací lokomotiva řady 210 (210 055-0) v traťové službě. Zdroj obrázku [4]

2 Obdobná vozidla

2.1 Již realizované úpravy lokomotiv řad 110/111/210

Jedním z problematických režimů provozu posunovacích lokomotiv se spalovacím motorem jsou např. manipulační jízdy nákladních vozů, kdy se vlak pohybuje většinu času na trati pod trolejí, ale zároveň je nutné občas vyjet mimo trolej, např. na vlečku atd. V tomto provozu je většinu času při malém výkonu spalovací motor v neoptimálním režimu, navíc jsou zde často dlouhé prostoje ve volnoběžných otáčkách [2]. První tuzemské pokusy o náhradu lokomotiv se spalovacím motorem na konkrétních výkonech nevznikaly paradoxně pro posun samotný, ale právě pro tento typ lehké traťové služby. Nejstarším tuzemským řešením je řazení dvojice lokomotiv, kdy pod trolejí je využívána elektrická a mimo trolej naftová. Konkrétně se jednalo například o kombinaci lokomotiv 210 s lokomotivou 704 nebo 708 [5]. Tato kombinace byla využívána například v Břeclavi na manipulačních vlacích do Vranovic a Moravského Písku [2].

Další možností provozu lokomotivy mimo trolej je připojení akumulátorového vozu. K prvnímu nasazení posunovacích lokomotiv s akumulátorovým vozem schopných alespoň omezeného provozu i mimo trolej došlo už na začátku 90. let po jejich úpravě v depu České Budějovice. Úprava byla provedena u několika lokomotiv řady 210. K lokomotivě byl připojen dvounápravový služební vůz, do kterého byly nainstalovány olověné akumulátory (2x450 Ah, 2x120 V). Řízení výkonu probíhalo paralelním a sériovým řazením akumulátorů a přepojováním trakčních (sériových) motorů. Lokomotiva fungovala ve třech jízdních režimech: N – normální, tedy trolej; C – cizí zdroj a CP – cizí zdroj pomalu. Při režimu CP byly všechny čtyři trakční motory zapojeny do série, při režimu C byl v provozu jen jeden podvozek, tedy jen dva trakční motory v sérii. Rozjezd probíhal ve třech stupních – při nejnižších rychlostech přes (nově instalovaný) rozjezdový odpor, později při paralelním provozu akumulátorů s přemostěným rozjezdovým odporem, a nakonec při sériovém spojení akumulátorů s přemostěným rozjezdovým odporem. Celá úprava lokomotiv byla provedena s ohledem na co nejnižší pracnost. Pro nabíjení akumulátorů byl přizpůsoben řízený usměrňovač pomocných pohonů, který původně napájel kompresor. Při provozu z akumulátoru nebyly v provozu ventilátory trakčních motorů ani kompresor. Při nedostatku stlačeného vzduchu bylo možné připojit kompresor na akumulátor, ale jen místo trakčních motorů, nebyl tedy možný provoz kompresoru při provozu motorů.



Obr. 2: Schéma zapojení dvouzdrojové lokomotivy řady 210 upravené v depu České Budějovice. Vlevo zapojení lokomotivy, vpravo zapojení akumulátorového vozu. Zdroj obrázku [5]

Maximální výkon lokomotivy v provozu z akumulátoru je cca 100 kW elektrických (z troleje 880 kW mechanických [6]). Úspory na vybraných vlečkových a manipulačních vlacích byly značné, bylo vypočteno, že by se provoz vyplatil i při nákupu nových akumulátorů (původně se jednalo o akumulátory z vyřazených lokomotiv řady 781) [5]. I přes to se od té doby kombinace akumulátorů s trolejí při dalších rekonstrukcích neobjevila. Místo toho se rozšířily lokomotivy s přídavným spalovacím motorem, jejichž provoz není závislý na aktuálním stavu nabití akumulátorů a umožňují tedy ještě větší variabilitu provozu.

Při přestavbě trvající od roku 2001 do roku 2008 vznikla opět v Českých Budějovicích na základu lokomotivy 210 přidáním pomocného spalovacího motoru s trakčním alternátorem první lokomotiva nové řady 218. Z původní lokomotivy zůstala mechanická část (s novým předstávkem pro generátor), pojezd i s trakčními motory a agregáty pomocných pohonů. Nový je celý zbytek elektroinstalace, primární měnič tvoří stabilizovanou stejnosměrnou síť, z které jsou přes IGBT měniče napájeny pomocné pohony, střídače, nabíječe apod. [7] [8].

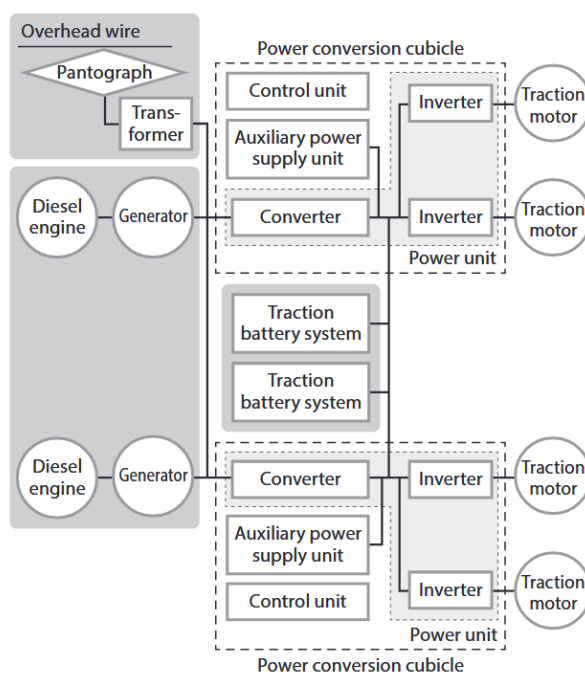
2.2 Moderní akumulátorové posunovací lokomotivy – např. Stadler Geaf 2/2

Lokomotivy Geaf 2/2 Rhétských drah jsou moderní stroje (objednávka 9/2018) použitím prakticky totožné s lokomotivou, která má být výsledkem této potenciální přestavby. Jedná se o lokomotivy pro trakční soustavu 11 kV střídavých a rozchod 1000 mm. Při napájení z troleje je jejich maximální výkon 700 kW a maximální rychlost 80 km/h, při provozu z akumulátoru je maximální výkon 200 kW a maximální rychlost 40 km/h; maximální tažná síla při obou provezech je 75 kN. Lokomotivy jsou vybaveny

akumulátorovou baterií s chemií Li-Ion a využitelnou kapacitou 93 kWh [9]. Hmotnost lokomotivy je 30 t [10].

2.3 Třízdrojová lokomotiva – např. Toshiba HDB 800 (T-HDB 800)

Lokomotiva HDB 800 je posunovací lokomotiva pro Německé dráhy DB Cargo, je vyvinutá speciálně pro těžký posun. V základním provedení se jedná o dieselelektrickou lokomotivu s akumulátorem, existuje však i ve verzi s možností napájení i z troleje, tedy se třemi zdroji energie (trolej + akumulátor + spalovací motor). Akumulátor je typu Li-Ion s celkovou kapacitou 120 kWh a elektrickým výkonem až 750 kW [11]. Maximální mechanický výkon lokomotivy je 750 kW a maximální rychlost 100 km/h [12].



Obr. 3: Blokové schéma třízdrojové varianty lokomotivy Toshiba HDB 800. Zdroj obrázku [11]

3 Stávající a nové komponenty

Přestavby již existujících vozidel se obvykle řídí nejen snahou o dosažení co nejlepších výsledných parametrů, ale samozřejmě i podle ceny. Často také situaci ovlivňuje jednoduchost provedení. Firma přestavující lokomotivu se typicky věnuje jen např. elektrické části a řešit mechaniku je tedy komplikace, kterou je nutno řešit například subdodávkou, kvůli čemuž často zůstávají na přestavěných vozidlech i řešení, která by nebyla u novostavby zvolena (například stejnosměrné motory, ať trakční nebo v pomocných pohonech apod.). Dalším typickým zástupcem nenahrazovaných komponentů jsou ty, u kterých je obtížná certifikace – typicky např. součásti brzdového systému (certifikace obecně jsou obtížné i pro velké firmy – i Škoda Plzeň u lokomotiv 372 použila ještě v 80. letech čistě mechanický brzdič, neboť modernější elektrický, v tuzemsku běžně používaný, neměl mezinárodní certifikaci a pro relativně malou sérii lokomotiv šlo tedy o jednodušší řešení [13]).

Přestavbou vzniklá vozidla jsou tedy vždy výsledkem konkrétní situace a konkrétních priorit při řešení, které se pak ovšem nedají takto předem obecně určit.

3.1 Celková koncepce vozidla

Využití akumulátorové baterie vozidlo předurčuje k využití topologie s napět'ovým meziobvodem. Akumulátor může být připojen k meziobvodu přímo (resp. přes vypínač, měření, ochrany...) nebo přes další měnič, který by umožnil udržovat rozdílné napětí akumulátoru a meziobvodu. Výhodou připojení přes druhý měnič je izolace akumulátoru od výkyvů napětí v meziobvodu a tedy zajištění šetrného nabíjení a vybíjení. Nevýhodou je pak samozřejmě nutnost použití dalšího měniče, což by u relativně nízkonákladové posunovací lokomotivy asi nebylo zvoleno jako ekonomické řešení.

Napětí meziobvodu by bylo kompromisem protichůdných požadavků – co nejvyšší napětí by vedlo na nízké proudy, ale pro zlevnění elektroniky (drahé vysokonapět'ové tranzistory) by bylo vhodné napětí nižší. Nižší napětí by bylo vhodné i pro zjednodušení mechanické konstrukce akumulátoru a jeho elektroniky (vysoké souhlasné napětí při měření na člancích, propojovací konektory, obtížné nabíjení z vnějšího zdroje...). Napětí meziobvodu by mělo být zvoleno vhodně s ohledem k napětí topné spojky. I posunovací lokomotivy jsou vybaveny zdrojem energie pro vytápění osobních vozů – předehřev ve stanici, lehká traťová služba a dnes i CZE (Centrální Zdroj Energie). Topení by bylo prioritně provozováno z troleje, ideálně úplně mimo meziobvod, ale vzhledem k nutnosti

zajistit napětí pro topnou spojku kvůli CZE by bylo vhodné mít topologii připravenou i na eventualitu topení z meziobvodu, resp. teoreticky i z baterie. Pro topení není žádoucí používat další měnič, protože se jedná o velké výkony, ale bylo by preferováno jeho připojení rovnou do meziobvodu (případně při provozu na troleji i před vstupní měnič přímo na trolej (ss trolej) nebo přímo na trakční transformátor (st trolej)). Používaná stejnosměrná napětí vlakového topení jsou 1500 V a 3000 V [14]. U posunovací lokomotivy s relativně malým výkonem by tedy bylo vhodné použít spíše napětí 1500 V, kvůli dimenzování měničů a konstrukci akumulátoru.

Při využití stejnosměrných trakčních motorů z původní lokomotivy by tyto byly napájeny pomocí pulsních měničů. Vzhledem k tomu, že se jedná o lokomotivu posunovací, byl by preferován jejich provoz jako cize buzených, kvůli plnému využití tažné síly v malých rychlostech. Buzení by si tedy vyžádalo druhý pulsní měnič, pravděpodobně by byl využit měnič schopný provozu při obou polaritách proudu, který by umožnil reverzaci motorů a tím by eliminoval mechanický přepojovač směru. Určitě by bylo vhodné vždy využít více než jeden měnič kvůli redundanci, a tedy možnosti nouzového dojezdu. Bylo by tedy možné použít dva kotevní měniče a trakční motory po dvou – dvě motorové skupiny, což je tradiční zapojení motorů v rámci jednoho podvozku. Bylo by možné použít i pro každý motor samostatný měnič (případně samostatný kotevní měnič a společný budicí pro dva motory např. na podvozku apod.), díky čemuž by nemusela být použita klasická skluzová ochrana, která při skluzu sníží proud, a tedy tažnou sílu, celé motorové skupiny, ale skluz by pak mohl být řešen regulací měničů po jednotlivých motorech a tedy nápravách.

Z meziobvodu by pak byly rovněž napájeny přes nové měniče pomocné pohony, ať původní nebo nové.

3.2 Stávající komponenty – trakční motor

Trakční motory jsou typickou součástí, která je zachovávána z původního vozidla. Trakční motor je obtížné nahradit – prostor v konkrétních podvozcích je omezen ještě více, než jen obecnými rozměry (rozchod trati, rozvor podvozku atd.), což komplikuje využití již existujících motorů z jiných vozidel. Trakční motory mají navíc vysokou výkonovou hustotu, což znamená, že je jejich návrh komplikovaný a vyžaduje ideálně zkušenosti, které menší firma často nemá. Navíc přestavby probíhají často jen v malých sériích (případně i jen po jednotlivých kusech), z čehož plyne, že návrh nového trakčního motoru se nevyplatí téměř nikdy.

3.3 Nové komponenty – trakční měnič

U polovodičových měničů je asi nejvíce patrný pokrok a náhrada trakční výzbroje by tedy byla perspektivní. Konkrétně u lokomotiv 110, 111 a 210 by byla náhrada nutná. Lokomotivy řady 110 využívají odporovou výzbroj, která je u akumulátorového napájení, kdy je energie velmi cennou komoditou, nepřijatelná. Lokomotiva 210 je střídavá s topologií funkčně odpovídající polořízenému usměrňovači (viz příloha I), která by se stejnosměrným napěťovým meziobvodem (= akumulátorem) nedokázala spolupracovat. Lokomotiva 111 sice má pulsní měnič už v továrním provedení, ale neumožňuje dynamické brzdění [15], navíc by při zachování původního bylo nutné pracovat s napětím meziobvodu 3 kV, což je pro konstrukci akumulátoru nevhodně vysoké napětí.

3.4 Nové komponenty – pomocné pohony

Mezi pomocné pohony lokomotiv patří kompresory a chladicí ventilátory (trakčních motorů, měničů, tlumivek apod.). Zda by bylo preferováno využití nebo náhrada agregátů opět záleží na situaci. Z praktického pohledu jsou preferovány pro pomocné pohony asynchronní motory, které nevyžadují údržbu, ale pokud by původní stroje se stejnosměrnými motory nevyžadovaly větší zásahy, může být hospodárnější původní agregáty ponechat. Například rekonstruovaná řada 218 využívá původní kompresory a ventilátory se stejnosměrnými motory, i přes to, že byla jinak kromě trakčních motorů celá elektroinstalace nahrazena [8].

Dalšími pomocnými „pohony“ jsou nabíječe akumulátoru palubní sítě. Například u lokomotiv 111 byla používána dynamo mechanicky spojená s ventilátory trakčních motorů [15], která by naopak bylo vhodné nahradit statickým měničem nevyžadujícím údržbu. Jejich náhrada je jednodušší, než u kompresorů nebo ventilátorů, protože není potřeba řešit mechanickou konstrukci, navíc by šlo o měnič s relativně malým výkonem.

Dalším měničem by byl zdroj tvořící palubní síť vozidla, která by v dnešní době byla pravděpodobně požadována jako síť 3x400 V, což by si nutně vyžádalo rovněž stavbu nových měničů, neboť taková síť na starších lokomotivách nebyla.

U pomocných pohonů a zdroje palubní sítě vstupuje do hry i požadavek na bezpečnost, kdy pro nové agregáty by bylo pravděpodobně nutné buď zajistit galvanické oddělení, nebo jejich certifikaci úrovně izolace, což opět zvyšuje atraktivitu využití stávajících již certifikovaných strojů.

3.5 Nové komponenty – akumulátor

Je možné využít různé chemie článků. Pro porovnání byl zvolen olověný (Pb) akumulátor – jako levná alternativa, nikl-kadmiový (Ni-Cd) – jako na dráze oblíbená chemie a moderní články na bázi lithia (Li), které jsou v dnešní době pro trakční použití preferované.

3.5.1 Pb akumulátor

Energetická hustota ρ_E olověného akumulátoru je cca 0,03 – 0,04 kWh/kg [16], kvůli životnosti jsou uvažovány otevřené články.

Výhodou olověných článků je jejich nízká cena a celkem velká robustnost (ale menší než u Ni-Cd).

Nevýhodou je nutnost údržby (doplňování vody apod.), vysoká hmotnost (která u posunovací lokomotivy ale není tak omezující jako u jiných dopravních prostředků) a životnost relativně silně závislá na pracovních podmínkách (teplota, režim nabíjení/vybíjení apod.) [17] [18].

3.5.2 Ni-Cd akumulátor

Energetická hustota ρ_E Ni-Cd akumulátoru je cca 0,04 – 0,06 kWh/kg [16], kvůli životnosti uvažovány otevřené články.

Výhodou Ni-Cd akumulátoru je jeho dlouhá životnost, široký rozsah provozních teplot, vysoká odolnost nesprávnému zacházení a celkově značná robustnost. Nevýhodou je nutnost údržby (doplňování vody apod., méně často než u Pb akumulátoru), relativně vysoká hmotnost a relativně vysoká cena. Dalším problémem (který je ale pro průmyslové použití spíše tolerovatelný) je obsah toxického kadmia [17] [19].

3.5.3 Li akumulátory

Z chemií na bázi lithia byly do porovnání vybrány akumulátory Li-Ion, které jsou asi nejběžnějším typem Li akumulátorů a akumulátory LiFePO₄, které mají vhodné vlastnosti pro trakční akumulátory. Udávaná energetická hustota ρ_E Li-Ion akumulátoru je cca 0,1 – 0,25 kWh/kg [16], pro LiFePO₄ 0,125 kWh/kg [20].

Výhodou Li chemií je vysoká energetická hustota.

Nevýhodou akumulátorů na bázi lithia je jejich cena a celková choulostivost baterie, kdy je nutné při nabíjení (někdy i při vybíjení) vyvažovat jednotlivé články, což znamená nutnost osazení BMS (Battery Management System). U takto velké (=drahé) trakční baterie by ale bylo měření napětí po člancích možná osazeno i u jiných typů kvůli přehledu

o stavu jednotlivých článků, i pokud by nebylo využíváno k balancování. Další nevýhodu Li akumulátorů je, že je někdy nutné trakční akumulátor aktivně chladit (například u lokomotivy Toshiba HDB 800 je dokonce použito kapalinové chlazení vodou [11]).

Akumulátory LiFePO₄ mají oproti Li-Ion chemii delší životnost, lepší bezpečnost – na rozdíl od Li-Ion nemají tendenci při špatném zacházení nebo mechanickém poškození explodovat nebo hořet a mají rovněž širší rozsah provozních teplot [21].

Chemii na bázi lithia existuje celá řada, např. i Li-Ion technologie existuje v mnoha dílčích variantách lišících se vlastnostmi, proto je toto porovnání jen velmi obecné a přehledové.

3.5.4 Porovnání potenciálních akumulátorů

Posunovací lokomotivy jsou relativně lehké a kvůli zlepšení adheze bývají často uměle balastovány, díky čemuž obvykle nevádí přidaná hmotnost akumulátoru [1]. Uvažujme lokomotivu řady 210, u které je uváděna hmotnost v rozsahu 64 až 72 t podle počtu balastních závaží [6]. Uvažujme hmotnost 72 t jako nepřekročitelnou a uvažujme, že po přestavbě je hmotnost lokomotivy se všemi novými částmi kromě akumulátoru stále 64 t, tedy akumulátor může vážit teoreticky až

$$m_{MAX} = m_{DOV} - m_{LOKO} = 72 - 64 = 8 \text{ t} = 8\,000 \text{ kg} \quad (1)$$

Uvažujme velmi zjednodušeně střední využití 15 % instalovaného výkonu – pro posun podle [1]. Instalovaný výkon lokomotivy řady 210 je 880 kW mechanických [6], který budeme rovnou uvažovat jako elektrický (tedy zanedbáme účinnost lokomotivy). Uvažovaný střední výkon by tedy mohl být

$$P_{POSUN} = P_{INST} \cdot 0,15 = 880 \cdot 0,15 = 132 \text{ kW} \quad (2)$$

Skutečná kapacita akumulátoru C se z hustoty energie ρ_E spočte jako

$$C = \rho_E \cdot m_{MAX} \quad (3)$$

Například pro Pb tedy

$$C = 0,04 \cdot 8\,000 = 320 \text{ kWh} \quad (4)$$

Doba provozu T se pak z kapacity C a výkonu nutného pro posun P_{POSUN} spočte jako

$$T = \frac{C}{P_{POSUN}} \quad (5)$$

Například pro Pb tedy

$$T = \frac{320}{132} = 2,42 \text{ hod} \quad (6)$$

Tab. 1: Porovnání potenciálních akumulátorů

Chemie	Energetická hustota ρ_E (kWh/kg)	Kapacita C (kWh)	Doba provozu T (hod)
Pb	0,04	320	2,4
Ni-Cd	0,06	480	3,6
Li-Ion	0,25	2 000	15,2
Li- FePO₄	0,125	1 000	7,6

V realitě by byly použitelné časy delší vlivem rekuperace energie při brzdění. Provoz čistě na akumulátor není hlavním záměrem rekonstrukce, cílem je spíše krátkodobý záskok při nedostupnosti troleje. K tomuto režimu provozu by pak pravděpodobně stačily i nejkratší odhadnuté časy v Tab. 1.

Všechny zmíněné chemie mají za určitých podmínek smysl. Například pokud bylo představováno jen prototypové množství lokomotiv a byla by navíc žádána nízká cena, dávalo by smysl použít Pb akumulátor. Pokud by byl například naopak požadavek na dlouhou životnost, vysokou odolnost špatnému zacházení a klimatickou odolnost, dávaly by smysl články Ni-Cd. Pokud by bylo cílem co nejmodernější řešení bez ohledu na cenu (např. při využití vozidla jako prototypu pro ověření koncepce, snaha využít prodej „na dotaci“), bylo by vhodné použít Li chemii akumulátoru. Konkrétní Li chemie by opět záležela na požadavcích – nová technologie LiFePO₄ je vhodná pro trakci, ale starší Li-Ion je zatím pořád častěji využíváná a byla by tedy možnost například využít hotové moduly pro elektromobily apod.

4 Návrh vstupní části vozidla pro trolej +3 kV

4.1 Tuzemské stejnosměrné posunovací lokomotivy

Generace elektrické výzbroje jsou pozorovatelné u všech druhů lokomotiv a trakce obecně, příkladem tuzemských zástupců jednotlivých generací u posunovacích lokomotiv je řada 110, 111 a v malém počtu vyrobená řada 114. Zatímco v traťové službě je i odporová (tj. velmi ztrátová) výzbroj relativně přijatelná, protože je možné často využívat hospodárné stupně (tj. s vyřazeným předřadným odporem), u posunovacích lokomotiv, u kterých je z principu žádán provoz při malých rychlostech a časté rozjezdy/brzdění jsou ztráty na rozjezdových odporech netolerovatelně vysoké. I v době vzniku lokomotiv řady 110 byla nevhodnost odporové výzbroje pro posun zřejmá, už po dodání prvních lokomotiv probíhala energetická měření lokomotiv v provozu, kdy při nejnepříznivější, ale reálné, situaci (těžká souprava, malá rychlost – tedy např. na svážném pahrbku) bylo zjištěno, že poměr výkonů je až 750 kW v teple na odporech a jen 50 kW výkon motoru. Jedním z v dané době možných řešení bylo napájení z pomocné troleje s proměnlivým napětím, které bylo připojeno přímo na motory. Tento systém byl realizován ve Valašském Meziříčí, kde lokomotivy dostaly pomocný sběrač, a pomocná trolej byla napájena z Ward-Leonardova soustrojí. Napojení regulovatelné troleje přímo na motory umožňovalo navíc dálkové řízení lokomotivy, což je při posunu také celkem vhodné [22].

Lokomotiva řady 111 využívá pulsní měnič napájený přímo z troleje, vzhledem k době vzniku složený z tyristorů [15].

Řada 114 (Škoda 90E), která vznikla ve 4 kusech a dnes existuje ještě v nižším počtu [23], je moderně koncipovaná, využívá asynchronní motory s napěťovým střídačem ze zpětně vodivých GTO tyristorů [24]. Na vstupu má pulsní měnič snižující napětí, a tedy stabilizující napětí meziobvodu.

4.2 Simulace

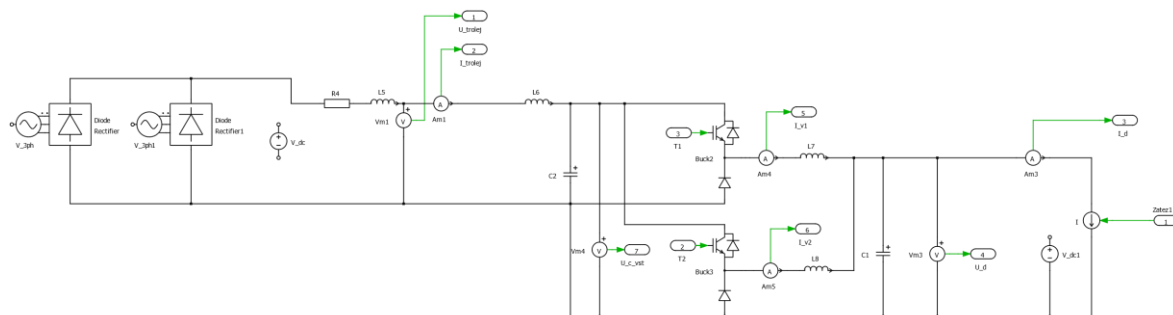
Pokud by byl požadován meziobvod o napětí nižším, než je trolejové, ať kvůli dimenzování měničů, nebo kvůli stabilizaci meziobvodu s ohledem na nestabilitu troleje, byl by jako vstupní měnič zvolen pulsní měnič pro snižování napětí, pravděpodobně z tranzistorů IGBT. Podle požadavku na rekuperaci by se jednalo o jednokvadrantovou verzi (tedy s jednou polaritou napětí i proudu) nebo o dvoukvadrantovou verzi (jedna polarita napětí, obě polarity proudu).

Protože plánovaná lokomotiva je vybavena akumulátorem, není teoreticky nutné řešit rekuperaci zpět do troleje a stačí tedy pulsní měnič jednokvadrantový. Protože požadovaný poměr napětí se nachází v okolí $\frac{U_{VYST}}{U_{VST}} = \frac{1500}{3000} = \frac{1}{2}$, je s ohledem na minimalizaci výstupního zvlnění vhodné použít zapojení pulsního měniče se sudým počtem fází [25]. Vzhledem k relativně malému výkonu lokomotivy a k tomu, že by se jednalo o přestavbu, kde by byla klíčová i cena, zvoleny by byla pravděpodobně 2 fáze, tedy nejmenší možná sudá varianta.

Vícefázová zapojení pulsních měničů mohou být sériová nebo paralelní (nebo i sérioparalelní, což zde pro komplikovanost realizace není řešeno) [25]. Sériové spojení má výhodu v nižším napěťovém namáhání tranzistorů, což je u napájení z napětí 3 kV (+ velká rezerva, protože trolej je z principu nestabilní zdroj s velkou tolerancí napětí) příjemné. Pro simulaci bylo nicméně zvoleno paralelní spojení z několika důvodů: Při přestavbě by bylo možná vyhodnoceno, že i dvoufázové spojení je příliš komplikované a jednofázové zapojení je topologicky stejné jako jedna větev dvoufázového (ve variantě bez mezifázového transformátoru, s balancováním proudu řízením). Paralelní zapojení rovněž poskytuje, alespoň teoreticky, redundanci pro provoz jen jedné větve při sníženém výkonu

4.2.1 Schéma zapojení simulace

Trolej je modelována pomocí dvanáctipulsního usměrňovací sítě (V3ph, V3ph1 a Diode Rectifier a Diode Rectifier1) a sériového obvodu RL – R4 a L5. Vstupní filtr LC je tvořen prvky L6 a C2. Dva pulsní měniče V1 a V2 pracují do společného meziobvodu filtrovaného pomocí filtrační kapacity C1 přes filtrační indukčnosti L7 a L8. Zátěž je tvořena řízeným zdrojem proudu I. Vzhledem k cílovému umístění v lokomotivě s trakčním akumulátorem není uvažována možnost rekuperace do troleje a je tedy zvolen pouze jednokvadrantový pulsní měnič pro snižování napětí.



Obr. 4: Zapojení výkonového obvodu simulace pulsního měniče

- **Velikost filtrační kapacity meziobvodu** C_{fil} lze určit dvěma způsoby: podle požadovaného zvlnění meziobvodu nebo z hlediska univerzálnosti výroby – pokud by byla lokomotiva stavěna pro střídavou i stejnosměrnou verzi (nebo dokonce jako dvousystémová), bylo by vhodné využívat co největší množství společných „dílů“, kdy filtrační kapacita C_{fil} je mnohem kritičtější u střídavé verze, kde se vlivem jednofázového napájení vyskytuje zvlnění od druhé harmonické. Pro méně kritickou stejnosměrnou verzi by tedy bylo možné použít rovnou $C_{fil} = 16 \text{ mF}$, přičemž by byla filtrace do značné míry předimenzovaná. Druhou možností je určit kapacitu C_{fil} z poměrného zvlnění výstupního napětí Δu . Při uvažování, že by byl kondenzátor vybíjen celou půlperiodou spínání $\frac{T_{sp}}{2}$ a z jednotky $1F = 1 \frac{A \cdot s}{V}$ plyne

$$C_{fil} = \frac{I_{MAX} \cdot \frac{T_{sp}}{2}}{\Delta U} = \frac{I_{MAX} \cdot \frac{1}{2 \cdot f_{sp}}}{\Delta U} \quad (7)$$

Zvolme $\Delta u = 5 \%$, tedy $\Delta U = \Delta u \cdot U_C = 0,05 \cdot 1500 = 75 \text{ V}$. Pro možnost provozu jen jedné větve měniče (např. při zvolené jednodušší topologii) budeme uvažovat spínací frekvenci f_{sp} skutečné 2 kHz místo idealizovaných 4 kHz při přesazeném řízení. Pak podle vztahu, kde I_{MAX} je maximální proud zátěže při výkonu 1 MW

$$C_{fil} = \frac{I_{MAX}}{2 \cdot f_{sp} \cdot \Delta U} = \frac{667}{2 \cdot 2000 \cdot 75} \cong 2,5 \text{ mF} \quad (8)$$

- **Velikost filtrační indukčnosti** se určí z požadovaného zvlnění proudu, např. $\Delta i_V = 25 \%$ při maximálním výkonu $P_{MAX} = 1 \text{ MW}$, jedním měničem pak teče polovina, tedy $P_{MAXV} = \frac{P_{MAX}}{2} = \frac{1000}{2} = 500 \text{ kW}$. Což odpovídá střední hodnotě proudu

$$I_V = \frac{P_{MAXV}}{U_C} = \frac{500}{1,5} = 333,3 \text{ A} \quad (8)$$

Při zvlnění proudu $\Delta i_V = 25 \%$ musí platit, že maximální hodnota proudu I_{VMAX} je o polovinu Δi_V , tedy o 12,5 % vyšší, než I_V a minimální hodnota proudu I_{VMIN} je naopak o polovinu Δi_V , tedy o 12,5 % nižší.

$$I_{VMAX} = 1,125 \cdot I_V = 1,125 \cdot 333,3 \cong 375 \text{ A} \quad (9)$$

$$I_{VMIN} = 0,875 \cdot I_V = 0,875 \cdot 333,3 \cong 292 \text{ A} \quad (10)$$

Pro napěťové množství indukčnosti Q_L podle [26] platí

$$Q_L(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} u_L dt \quad (11)$$

$$Q_L(t_1, t_2) = L \cdot [i(t_2) - i(t_1)] \quad (12)$$

Při úpravě vztahu (11) pro uvažování konstantního napětí meziobvodu a pro Δt značící dobu vybíjení, která je při poměrném sepnutí cca 0,5 (3000 V vstup, 1500 V výstup) polovinou spínací periody, tedy $\Delta t = \frac{T_{sp}}{2} = \frac{\frac{1}{f_{sp}}}{2} = \frac{1}{2 \cdot f_{sp}} = \frac{1}{2 \cdot 2000} = 250 \mu s$ pak platí

$$Q_L = U_L \cdot \Delta t = 1500 \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 0,375 \text{ Vs} \quad (13)$$

Ze vztahu (12) lze napěťové množství za vybíjecí takt vyjádřit pomocí proudu na začátku a na konci vybíjení jako

$$Q_L = L \cdot \Delta i = L \cdot (I_{VMAX} - I_{VMIN}) \quad (14)$$

$$L = \frac{Q_L}{(I_{VMAX} - I_{VMIN})} = \frac{0,375}{(375 - 292)} \cong 5 \text{ mH} \quad (15)$$

Zvlnění proudu je v absolutní hodnotě stále stejně velké nezávisle na proudu zátěže, je tedy vhodné zkontrolovat vhodnost volby akumulární tlumivky s ohledem na přechod do režimu přerušovaného proudu. V simulaci přechod do přerušovaných proudů a zpět nečinil problémy.

- **Parametry vstupního filtru** se určí podle zvoleného zvlnění napětí na vstupu měniče. Vstupní proud měniče lze spočítat z výkonu P_{MAX} jako

$$I_{VST} = \frac{P_{MAX}}{U_{trolej}} = \frac{1\,000\,000}{3\,000} = 333,3 \text{ A} \quad (16)$$

Na kondenzátoru vstupního filtru je pozorovatelné zvlnění od troleje dané pulsností usměrňovače, která se projeví zvlněním na relativně nízké $f_{zvlñ}$ a zvlnění od spínání pulsního měniče, které je dáno spínací frekvencí f_{sp} . Vlivem nižší frekvence je podstatnější zvlnění od usměrňovače. Uvažujme nejméně příznivý případ, kdy by mohl teoreticky být použit i šestipulsní usměrňovač (místo obvyklého 12-ti pulsního). Frekvence zvlnění $f_{zvlñ}$ je pak šestinásobná, tedy 300 Hz. Zvolme hodnotu zvlnění napětí Δu , např. 5 %, pak $\Delta U = \Delta u \cdot 3000 = 0,05 \cdot 3000 = 150 \text{ V}$. Podle vztahu 7 tedy platí

$$C_{vst} = \frac{I_{MAX}}{2 \cdot f_{zvlñ} \cdot \Delta U} = \frac{333,3}{2 \cdot 300 \cdot 150} \cong 4 \text{ mF} \quad (17)$$

Indukčnost vstupního filtru L_{fil} je nutno volit s ohledem na rezonanční frekvenci filtru – aby nebyla v blízkosti spínací frekvence měniče. Protože rezonanční frekvence vstupního filtru se mění vlivem indukčnosti troleje, která se přičítá k indukčnosti filtru, čímž snižuje jeho rezonanční frekvenci, je nutno volit velikost indukčnosti tlumivky vstupního filtru v nejnepříznivějším místě troleje, tedy v „nulové“ vzdálenosti od TNS. Pak je rezonanční frekvence f_{rezvst} nejvyšší a je dána jen prvky L_{vst} a C_{vst} . Resonanční frekvence by podle [27] měla být alespoň pětkrát až desetkrát nižší, než spínací frekvence měniče, podle [25] alespoň třikrát nižší, než spínací frekvence. Uvažujme méně příznivý případ, kdy je např. při poruše druhého v provozu jen jeden pulsní měnič se spínací frekvencí 2 kHz. Pak musí platit

$$f_{rezvst} \leq \frac{f_{sp}}{5} = \frac{2\,000}{5} = 400\text{ Hz} \quad (18)$$

Z Thomsonova vztahu pro rezonanční frekvenci pak lze určit L_{vst} jako

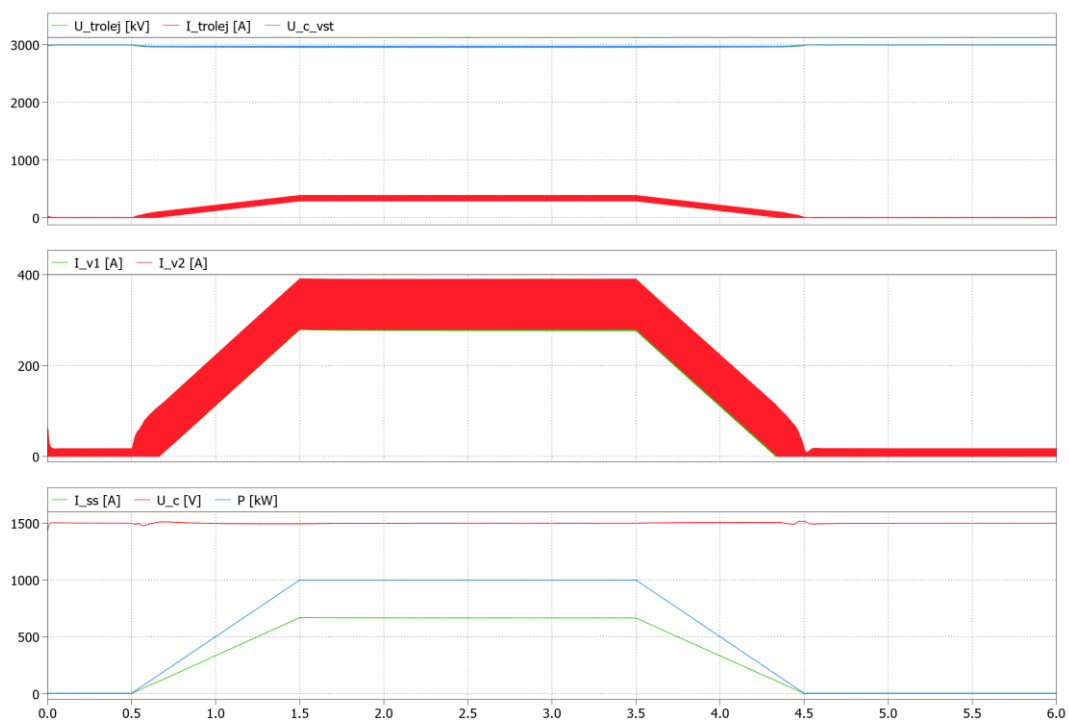
$$f_{rezvst} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{vst} \cdot C_{vst}}} \quad (19)$$

$$400 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{vst} \cdot 0,004}} \rightarrow L_{vst} \geq 0,039\text{ mH} \quad (20)$$

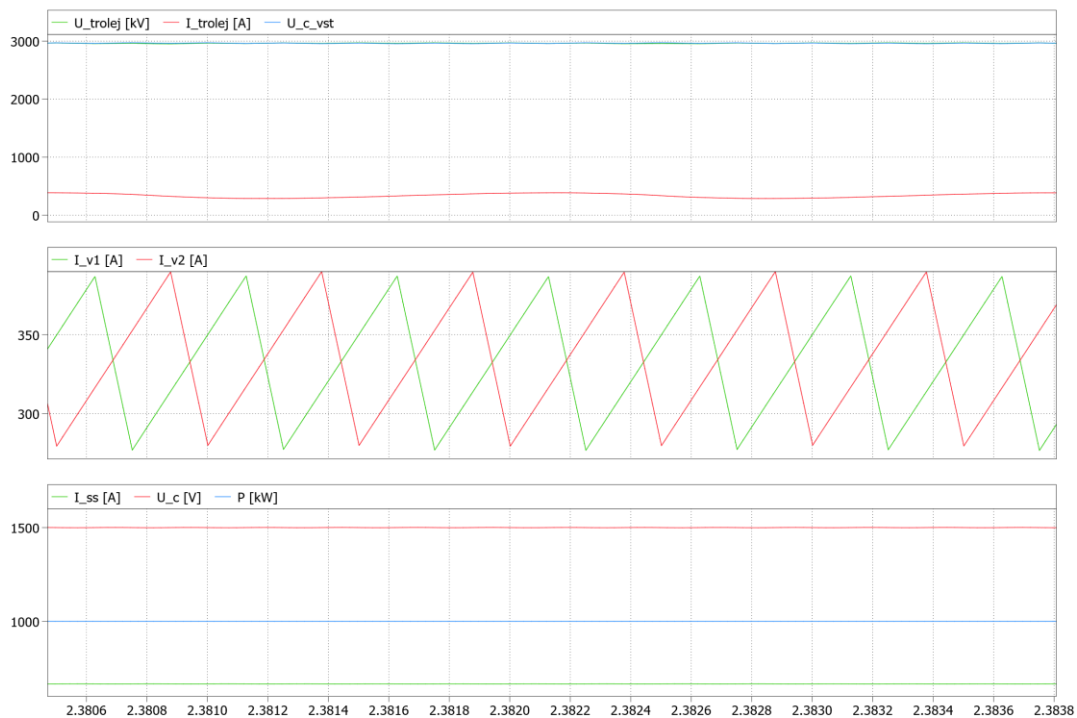
$$L_{vst} = 0,04\text{ mH} \quad (21)$$

4.2.3 Výsledky simulace

Výstupem simulace jsou průběhy napětí a proudu výkonovou částí. Regulátory byly naladěny pouze pokusem, hlavním cílem bylo ověřit vypočtené parametry výkonové části. Výsledná dynamika systému ve výsledku umožňuje přechod z téměř nulového výkonu (4 kW představující pomocné pohony) na výkon 1 MW nebo naopak za jednu sekundu, což je pro reálnou lokomotivu rozhodně dostatečně rychlé. Uvažované parametry troleje jsou $R = 0,05\ \Omega/\text{km}$ a $L = 1\ \text{mH}/\text{km}$. Simulace byla vždy prováděna pro oba reálné extrémy – tedy 0,2 km v blízkosti TNS (zanedbána indukčnost u usměrňovačů) a 15 km pro běžný provozní stav daleko od TNS, bez zřejmého rozdílu v chování „lokomotivy“, lišila se hlavně velikost zvlnění proudu troleje.



Obr. 8: Výsledné průběhy veličin pulsního měniče ve vzdálenosti 0,2 km od „měřírny“ – nejvyšší zvlnění proudu troleje



Obr. 9: Detail průběhů veličin pulsního měniče

5 Návrh vstupní části vozidla pro trolej 25 kV/50 Hz

5.1 Možné topologie vstupní části

5.1.1 Řízení odbočkovým transformátorem

Nejstarší lokomotivy pro trolej 50 Hz využívají stejnosměrný motor, neřízený usměrňovač a pro řízení proudu odbočkový transformátor. Výhodou je jednoduchost zapojení, nevýhodou stupňovitost řízení a složitá mechanická konstrukce přepínače odboček (ale jednodušší, než u odporového kontroléru ss troleje). Nevýhodou je rovněž nemožnost rekuperace energie zpět do troleje. Proud odebíraný z troleje je téměř ve fázi s napětím, resp. jeho fázový posuv je dán (téměř) pouze transformátorem, vlivem vyhlazování proudu motorem má ale vysoký obsah harmonických složek (charakteristické podle zapojení usměrňovače – jednofázový usměrňovač → proud tedy obsahuje všechny liché harmonické).

5.1.2 Řízený usměrňovač

Novějším řešením je použití transformátoru s pevným převodem a regulace stejnosměrného motoru je pak prováděna pomocí řízeného, případně polořízeného usměrňovače. Výhodou je jednodušší transformátor i relativně jednoduchý měnič a spojitá regulace. Hlavní nevýhodou je pak tvar proudu odebíraného z troleje, který má nejen opět vysoký obsah harmonických složek, ale vlivem řízení usměrňovače i proměnlivý fázový posuv podle úhlu řízení usměrňovače, tedy podle napětí na motoru, tedy podle tažné síly lokomotivy a rychlosti. Rekuperace je možná při použití plně řízeného usměrňovače, který je ale spíše nepreferovaný oproti polořízenému, který rekuperaci neumožňuje, ale způsobuje menší fázový posuv proudu než plně řízený. Další možností omezení fázového posuvu proudu je postupné řízení více usměrňovačů.

5.1.3 Měnič zajišťující odběr kvalitního průběhu proudu z troleje

Nejnovější variantou je použití vstupního polovodičového měniče, který zajišťuje odběr kvalitního průběhu proudu z troleje. Měnič může být za trakčním transformátorem (pulsní usměrňovač), případně i přímo připojen k troleji a transformátor může být až za ním a provozován při vyšší frekvenci, tedy transformátor vychází s nižší hmotností (např. [28]). Druhé řešení s lehčím transformátorem je obecně vhodné a pro lokomotivy s velkým výkonem může jít i o nezbytné řešení, ale vyžaduje měnič pracující s vysokým napětím troleje, což jej výrazně komplikuje. Protože je druhé řešení značně vzácné, uvažujeme první

řešení jako typické pro moderní lokomotivu. Za trakčním transformátorem je zde umístěn měnič umožňující řídit tvar vstupního proudu z troleje, tedy typicky pulsní usměrňovač. Např. pro vozidla se stejnosměrnými motory by teoreticky mohlo jít o proudový pulsní usměrňovač, ale typičtější je použití napětového pulsního usměrňovače, který vytváří napětový meziobvod z kterého jsou pak (jakékoliv) trakční motory napájeny z odděleného měniče.

Výhodu pulsního usměrňovače je možnost řídit tvar a posuv proudu, je tedy potlačen problém s fázovým posuvem proudu a harmonické složky jsou rovněž značně potlačeny (objevují se až v blízkosti spínací frekvence měniče a jejich velikost nezávisí na velikosti odebíraného proudu). Rekuperace energie je rovněž možná.

Další možnou topologií vstupního měniče střídavé lokomotivy je diodový usměrňovač a obvod PFC (Power Factor Correction). Topologicky jde o jednodušší zapojení obsahující pouze jeden vypínatelný prvek pracující jako pulsní měnič pro zvyšování napětí zapojený za diodovým usměrňovačem. Zapojení umožňuje odebrat proud s malým harmonickým zkreslením, ale neumožňuje rekuperaci.

5.2 Tuzemské střídavé posunovací lokomotivy

Z tuzemských posunovacích lokomotiv existuje střídavá jen jedna řada – a to 210, která využívá transformátor s pevným převodem (resp. se dvěma odbočkami pro různé režimy jízdy) a fázový regulátor předřazený diodovému můstku, výsledné chování tedy odpovídá polořízenému usměrňovači (viz příloha I) [6]. Přestavbou několika lokomotiv řady 210 vznikla nová řada 218 (viz 2.1). Dále existovala prototypová lokomotiva řady 209, která vznikla opět přestavbou lokomotivy 210 a byla vybavena plně řízeným usměrňovačem a umožňovala tedy elektrodynamické brzdění s rekuperací do troleje [29]. Nicméně lokomotiva 209 vznikla jediná a dnes již neexistuje [30].

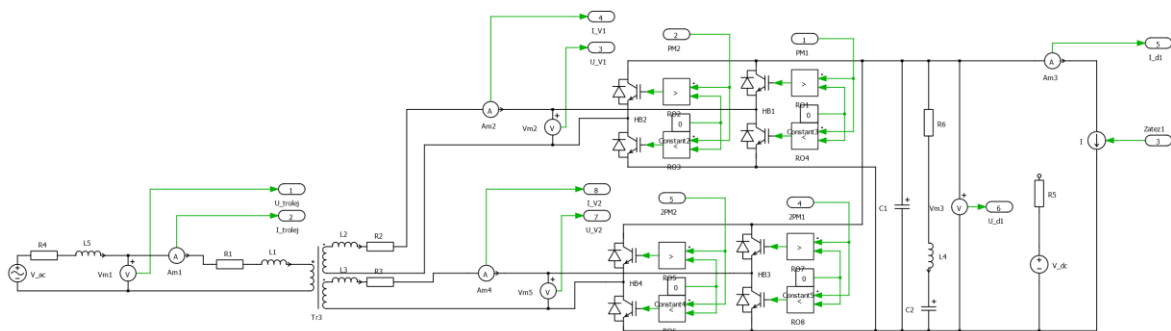
5.3 Simulace

Simulace provedena pro variantu, která by byla pravděpodobně využita pro skutečnou lokomotivu daných charakteristik. Je zde využit transformátor na kmitočtu troleje se dvěma trakčními sekundárními vinutími s napětovými pulsními usměrňovači pracujícími do společného meziobvodu o napětí 1500 V. Požadovaný elektrický výkon byl zvolen jako 1 MW, mechanický výkon lokomotivy řady 210 je 880 kW, což tedy znamená uvažovanou účinnost $\eta_{LOKO} = \frac{P_m}{P_e} = \frac{1\,000}{880} = 88\%$. Vzhledem k použití v lokomotivě s akumulátorem není uvažována možnost rekuperace energie zpět do troleje.

Pro provoz bez rekuperace se může jevit pulsní usměrňovač nadbytečně komplikovaný oproti např. zapojení s diodovým usměrňovačem a PFC, ale jde o častěji používané řešení, tedy o řešení ke kterému je dostupné množství jak informací, tak případně i hotových dílů, které by se daly využít. Pravděpodobně by tedy bylo zvoleno, obzvláště u malé série.

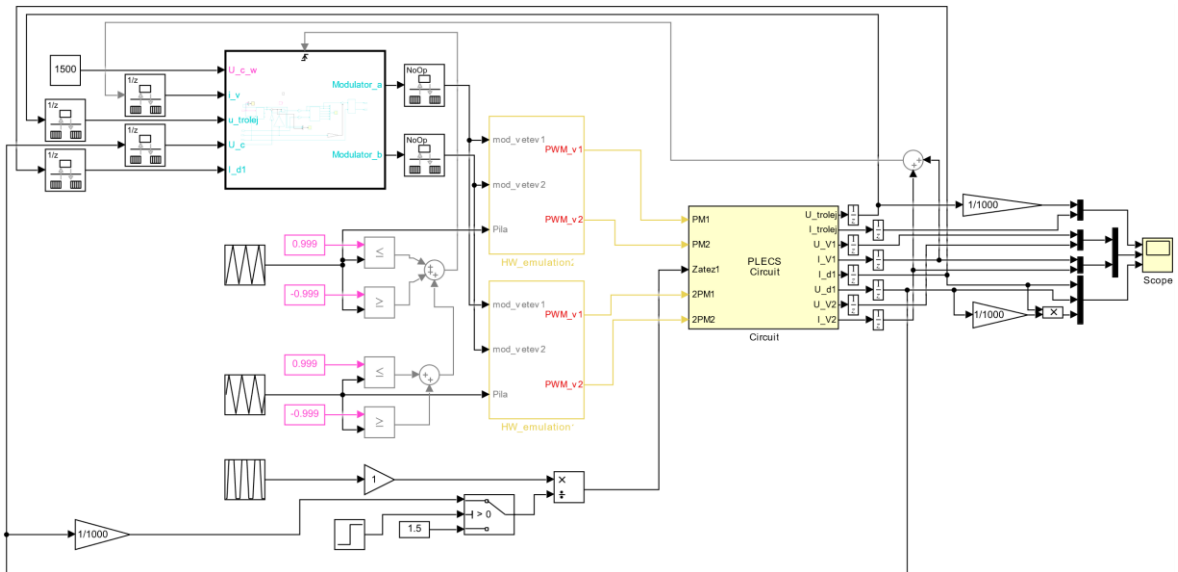
5.3.1 Schéma zapojení simulace

Trolej je modelována pomocí zdroje napětí V_{ac} a sériového obvodu RL – R4 a L5. Trakční transformátor je trojvinutový modelovaný jen převodem a podélnými parametry – odpory R1, R2 a R3 a rozptylové indukčnosti L1, L2 a L3. Dva jednofázové můstky napěťových pulsních usměrňovačů V1 a V2 jsou vytvořeny z idealizovaných IGBT tranzistorů a pracují do společného meziobvodu. Filtrační kondenzátor C1 je volen relativně malý, nemá respektovat trakční baterii, ale naopak na regulaci náročnější stav s odpojeným akumulátorem, kdy je meziobvod výrazně „měkčí“. V meziobvodu je rovněž filtr druhé harmonické – sériový RLC obvod R6, L4 a C2. Zátěž tvoří řízený proudový zdroj I.



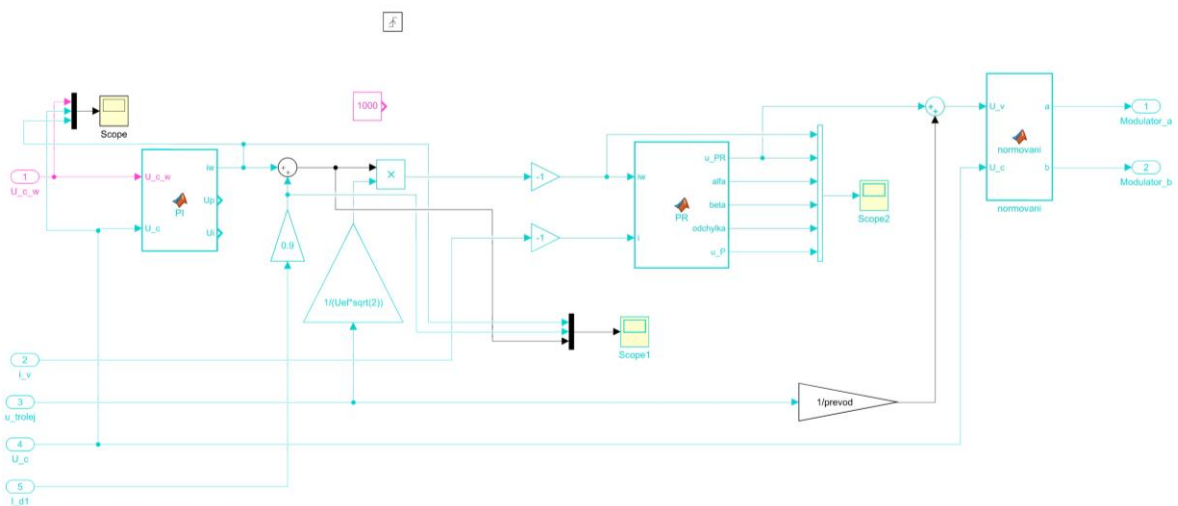
Obr. 10: Zapojení výkonového obvodu simulace napěťového pulsního usměrňovače

Modulace můstků je simulována jako spojitá s komparací pily a modulačního signálu. Pily obou můstků mají frekvenci 2 kHz a jsou vůči sobě posunuty – přesazené řízení měniče. Při dosažení minima a maxima každé z pil je spuštěn „výpočet“ regulační části, což má odpovídat číslicové regulaci měniče. Zátěž je určena průběhem rampy výkonu v závislosti na čase, kdy po vydělení výkonu napětím meziobvodu získáme okamžitý požadovaný proud, kterým je řízen proudový zdroj I (na Obr. 10). Pro počáteční rozběh simulace je do výpočtu požadovaného proudu zátěže po krátký čas místo měřeného napětí zavedena konstanta 1500, tedy jmenovité napětí meziobvodu – kvůli eliminaci dělení nulou při nabíjení meziobvodu.



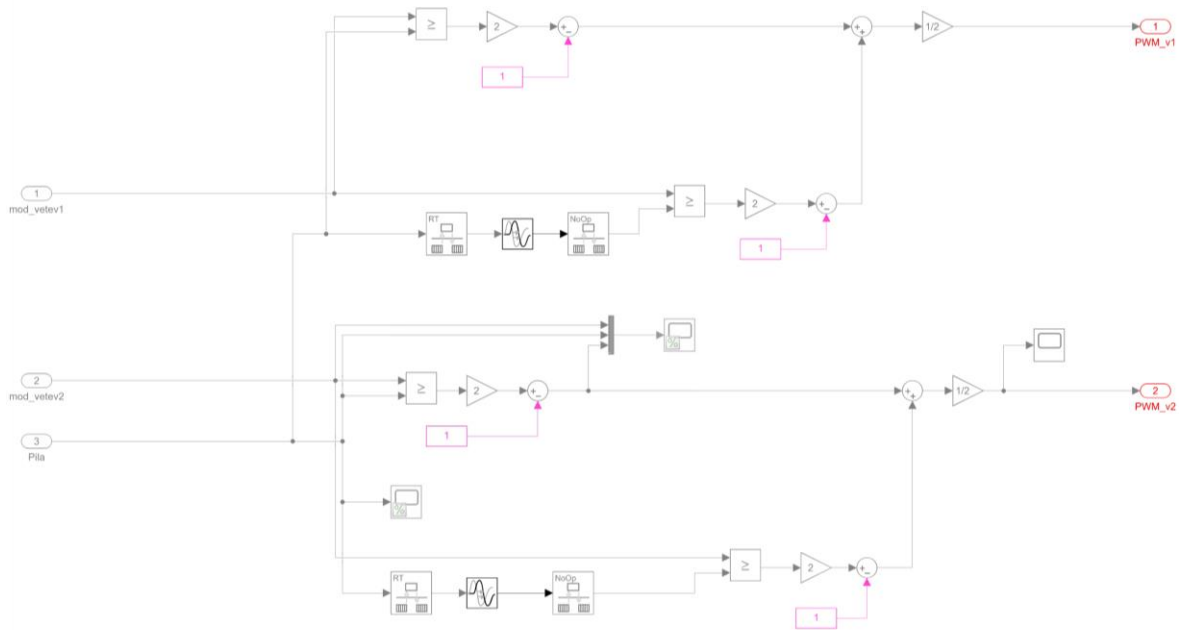
Obr. 11: Blokové zapojení simulace napěťového pulsního usměrňovače, jednotlivé subsystemy jsou v detailu na Obr. 10, Obr. 12 a Obr. 13

Regulační část simulace je tvořena PR regulátorem zajišťujícím proudovou smyčku a nadřazeným PI regulátorem regulujícím napětí meziobvodu. V realitě by byla navíc nadřazená smyčka zajišťující dobíjení baterie změnou napětí meziobvodu, pokud by byla baterie připojena přímo bez svého měniče. Je využito rovněž dvou feedforward vazeb – od proudu zátěže, kdy je tento přičten k výstupu PI regulátoru napětí s váhou 90 % a od napětí troleje, které je s uvažováním převodu přičteno k výstupu PR regulátoru. V realitě by ještě muselo být řízením zajištěno rozdělení výkonu na poloviny mezi V1 a V2.



Obr. 12: Zapojení regulační části simulace napěťového pulsního usměrňovače

Modulátory zajišťují kromě porovnávání s pilou a spínání patřičných tranzistorů i vkládání mrtvých časů pomocí bloku dopravního zpoždění.



Obr. 13: Zapojení modulátorů napětového pulsního usměrňovače

5.3.2 Určení parametrů výkonového obvodu

Hlavním cílem simulace je určit parametry výkonového obvodu použitelné jako případný počáteční odhad hodnot pro skutečně realizovanou přestavbu.

- **Velikost rozptylové indukčnosti transformátoru**, tedy pracovní „tlumivky“ napětového pulsního usměrňovače, byla odhadnuta podle [25] z napětí nakrátko $u_K = 25 \%$. Pak při uvažovaném výkonu transformátoru $S_N = 1 \text{ MVA}$ a jmenovitém napětí $U_N = 25 \text{ kV}$ platí, že jmenovitý proud I_N

$$I_N = \frac{S_N}{U_N} = \frac{1\,000}{25} = 40 \text{ A} \quad (22)$$

Při uvažování „transformátoru“ tvořeného jen podélnou rozptylovou reaktancí X_σ pak pro napětí nakrátko platí

$$u_K \cdot U_N = X_\sigma \cdot I_N \quad (23)$$

$$X_\sigma = u_K \cdot \frac{U_N}{I_N} = 0,25 \cdot \frac{25\,000}{40} = 156,25 \, \Omega \quad (24)$$

Přepočtem na rozptylovou indukčnost L_σ pak

$$L_\sigma = \frac{X_\sigma}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{156,25}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,497 \text{ H} \quad (25)$$

Pro primární stranu transformátoru je použita rozptylová indukčnost o hodnotě poloviny L_{σ} . Pro obě sekundární vinutí je použita stejná rozptylová indukčnost také o hodnotě poloviny L_{σ} pouze přepočtená převodem transformátoru.

- **Výstupní napětí transformátoru** je dáno napětím meziobvodu a vlastnostmi zapojení měniče. Napěťový pulsní usměrňovač ve své topologii obsahuje diodový usměrňovač, který i bez spínání tranzistorů zajistí, že se vstupní střídavé napětí o efektivní hodnotě U_{VSTef} propíše na stejnosměrnou stranu, kde pak špičkové napětí meziobvodu $U_{CŠP}$ je (při uvažování diod bez úbytku v propustném směru) nejméně

$$U_{CŠP} = \sqrt{2} \cdot U_{VSTef} \quad (26)$$

Pokud známe napětí meziobvodu musíme volit napětí nižší, aby bylo možné napětí zvýšit spínáním tranzistorů, což pak umožňuje odběr proudu vhodného tvaru. Platí tedy

$$U_{VSTef} = \frac{U_{CŠP}}{\sqrt{2}} = \frac{1500}{\sqrt{2}} = 1060,7 \text{ V} \rightarrow \text{zvoleno } 900 \text{ V} \quad (27)$$

Efektivní hodnota sekundárního napětí byla zvolena jako 900 V. Ověření pro maximální napětí $U_{VSTefMAX}$ při maximálním dlouhodobém napětí v troleji

$$U_{VSTefMAX} = U_{VSTef} \cdot 110 \% = 900 \cdot 1,1 = 990 \text{ V} \quad (28)$$

Což je po usměrnění diodami stále nižší, než požadované napětí meziobvodu a diody tedy stále nezasahují do tvaru odebíraného proudu.

- **Kapacita vyhlazovacího kondenzátoru** C_{fil} meziobvodu je určena požadovaným zvlněním napětí ΔU při maximálním proudu zátěže I_{MAX} . Při uvažování, že by byl kondenzátor vybíjen celou půlperiodou sítě $\frac{T_{trol}}{2}$ a z jednotky $1F = 1 \frac{A \cdot s}{V}$ plyne

$$C_{fil} = \frac{I_{MAX} \cdot \frac{T_{trol}}{2}}{\Delta U} = \frac{I_{MAX} \cdot \frac{1}{2 \cdot f_{trol}}}{\Delta U} \quad (29)$$

Zvlnění napětí zvolíme, např. 200 V, tedy poměrně jako $\Delta u = \frac{\Delta U}{U_c} = \frac{200}{1500} = 13,3 \%$

$$C_{fil} = \frac{I_{MAX}}{2 \cdot f_{trol} \cdot \Delta U} = \frac{667}{2 \cdot 50 \cdot 200} = 0,033 \text{ F} = 33 \text{ mF} \quad (30)$$

Vzhledem k ceně a velikosti kondenzátoru při napětí 1500 V (+ značná rezerva, protože trakční pohony mohou představovat velmi dynamický odběr, což vede na nestabilní napětí v meziobvodu) a vzhledem k použití nepříznivého předpokladu vybíjení celou půlperiodou, který u napěťového pulsního usměrňovače není zdaleka

splněn a vzhledem k plánovanému provozu s akumulátorem v meziobvodu, kdy jízda s odpojeným akumulátorem s filtrací meziobvodu jen kondenzátorem je spíše neočekávatelný stav byl kondenzátor pokusně zmenšován. Simulované hodnoty v kapitole 5.3.3 jsou pro filtrační kapacitu $C_{fil} = 16 \text{ mF}$, kdy i bez použití filtru druhé harmonické vychází zvlnění cca 150 V, tedy $\Delta u = \frac{\Delta U}{U_c} = \frac{150}{1500} = 10 \%$. S filtrem druhé harmonické pak cca 100 V, tedy 6,7 %.

- **Parametry filtru druhé harmonické** v meziobvodu.

Kapacita C_{fil2h} byla zvolena podle doporučení pana Ing. Blahníka, Ph.D. jako

$$C_{fil2h} = 0,7 \cdot C_{fil} = 0,7 \cdot 16 = 11,2 \text{ mF} \quad (31)$$

Indukčnost L_{fil2h} je pak určena z Thomsonova vztahu pro rezonanční frekvenci $f_{rez} = 100 \text{ Hz}$

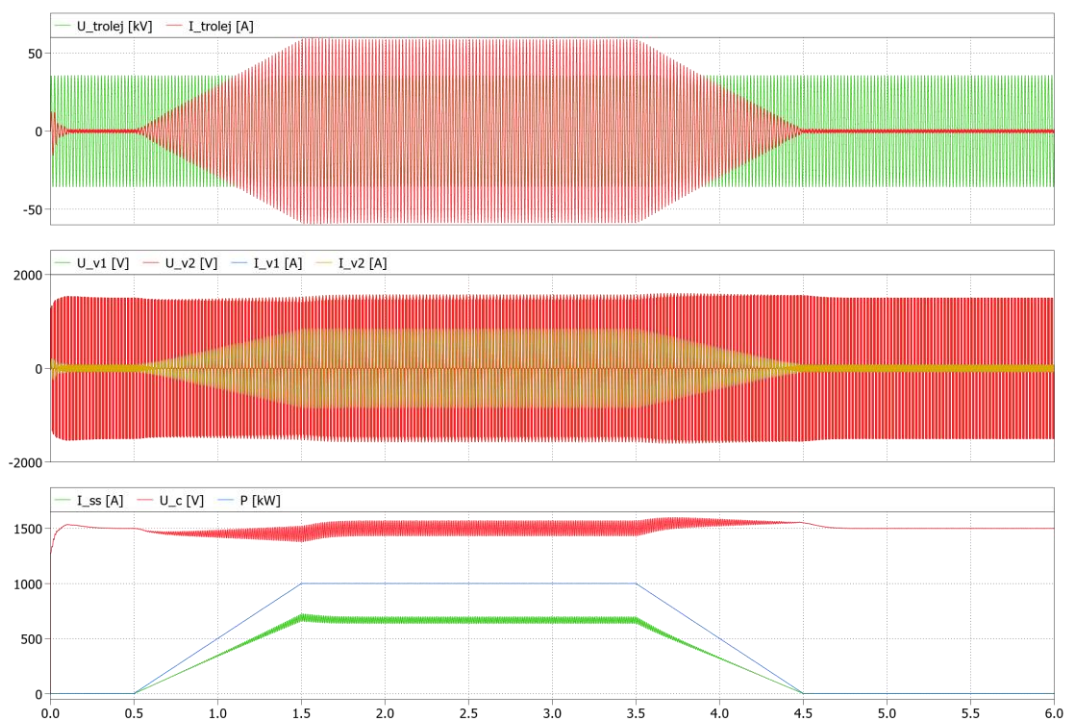
$$f_{rez} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{fil2h} \cdot C_{fil2h}}} \quad (32)$$

$$100 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{fil2h} \cdot 0,0112}} \rightarrow L_{fil2h} = 0,226 \text{ mH} \quad (33)$$

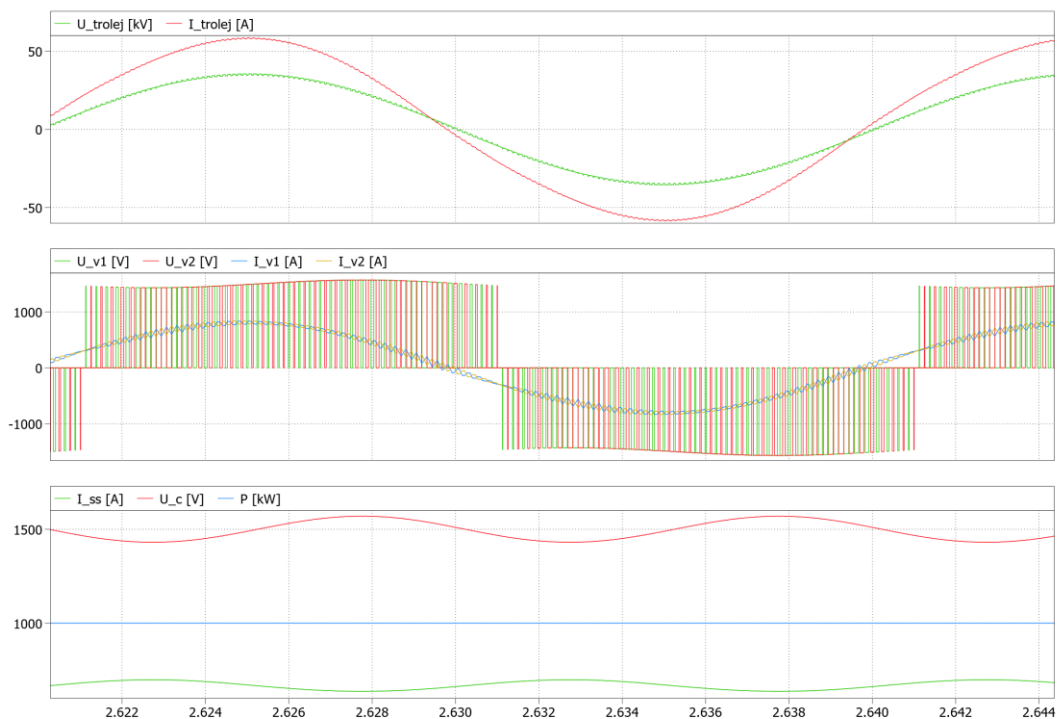
Odpor R_{fil2h} byl přidán do simulace kvůli numerické stabilitě a byl zvolen odhadem podle možného odporu skutečné cívky jako 0,1 Ω .

5.3.3 Výsledky simulace

Výstupem simulace jsou průběhy napětí a proudu výkonovou částí. Regulátory byly naladěny pouze pokusem, hlavním cílem bylo ověřit vypočtené parametry výkonové části. Výsledná dynamika systému ve výsledku umožňuje přechod z téměř nulového výkonu (4 kW představující pomocné pohony) na výkon 1 MW nebo naopak za jednu sekundu, což je pro reálnou lokomotivu rozhodně dostatečně rychlé. Rekuperace není uvažována, neboť vozidlo by bylo vybaveno akumulátorem, kam by byla energie ukládána přednostně. Celkový rozkmit napětí v meziobvodu je cca 200 V, z čehož část by bylo možno vyřešit lepší regulací – např. pomalá reakce v okolí času 3,5 s na Obr. 14. Uvažované parametry troleje jsou $R = 0,1 \Omega/\text{km}$ a $L = 1 \text{ mH}/\text{km}$. Simulace byla vždy prováděna pro oba reálné extrémy – tedy cca 0 km v blízkosti TNS a 30 km pro běžný provozní stav daleko od TNS, bez zřejmého rozdílu v chování „lokomotivy“.



Obr. 14: Výsledné průběhy veličin napěťového pulsního usměrňovače



Obr. 15: Detail průběhů veličin napěťového pulsního usměrňovače – na prostředním průběhu viditelné přesazení můstků V1 a V2

6 Problematika trakční baterie

Pro analýzu dojezdu s využitím trakční baterie je nutné analyzovat na co v rámci vlaku je energie využita. Byla provedena numerická simulace jízdy vlaku na zadané trajektorii, při které byla vyšetřována energetická náročnost v závislosti na parametrech jízdy a soupravy. Dohledatelné parametry lokomotivy jsou použity podle řady 210, neznámé byly odhadnuty.

6.1 Tok výkonů v lokomotivě, ztráty

Vstupním parametrem simulace, stejně jako i reálného vlaku (bez ARR atd.) je požadovaná tažná síla. Obvyklým způsobem jízdy vlaku je rozjezd soupravy pomocí velké tažné síly, následovaný buď udržováním požadované rychlosti pomocí nižší síly (regulátor rychlosti), případně rovnou výběhem, tedy jízdou s nulovou tažnou silou, kdy je vlak pozvolna brzděn ztrátami. Poslední fází je brzdění velkou brzdovou silou se snahou o přesné zastavení.

6.2 Předpoklady pro výpočetní smyčku

6.2.1 Trakční mechanika vlaku

Pro analýzu využití energie akumulátoru provedena zjednodušení:

- Hlavním cílem je sledovat vliv parametrů lokomotivy a stylu jízdy, ne parametrů trati. Je tedy uvažována jen jedna „referenční“ trajektorie, na které bude energetická náročnost vyšetřována – pro porovnání je tedy obecně možné zanedbat odpory dráhy (traťové jízdní odpory) – tedy oblouku, tunelů, případně i spádu.
- Uvažovány jen síly působící ve směru pohybu a dokonale tuhá souprava – vlak zjednodušen do hmotného bodu. Zanedbány jiné dodávky energie zbytku soupravy než pro pohyb (vlakové topení, centrální zdroj energie...)
- Zjednodušená adheze – trakční charakteristika cize buzeného motoru uvažována i jako maximální síla, kterou je možné mezi lokomotivou a kolejí přenést. Uvažováno souměrně pro tah i brzdu.
- Vzhledem k diametrální odlišnosti elektrických parametrů motoru lokomotiv řady 210 (původně z motorové lokomotivy – nízké napájecí napětí) a např. řady 110 (přímo pro trolejové napájení) byl zvolen místo modelování motorových skupin při konkrétních napětích jeden imaginární motor s mechanickými parametry

odpovídajícími 4 skutečným. Imaginární motor má jmenovité napětí 1500 V, při kterém je pak schopen dodat 880 kW při stejné otáčivé rychlosti jako motory lokomotivy řady 210.

6.2.2 Hmotnost vlaku

$$m = m_{LOKO} + n_{VAG} \cdot m_{VAG} \quad (34)$$

Kde m je hmotnost soupravy, m_{LOKO} lokomotivy a m_{VAG} vozu v kg a n_{VAG} počet vozů.

Při akceleraci je nutné uvést vlak nejen do posuvného pohybu, ale je nutné dodat energii i rotujícím částem. Pro vlaky existují přepočtové „koeficienty rotujících hmot“, které zobrazí rotační energii do posuvné – do „setrvačné“ hmotnosti m_{SET} . Podle [31] byly zvoleny jako $\rho_d = 0,06$ pro vůz a $\rho_h = 0,2$ pro lokomotivu.

$$m_{SET} = m_{LOKO} \cdot (1 + \rho_h) + n \cdot m_{VAG} \cdot (1 + \rho_d) \quad (35)$$

6.2.3 Pohybová rovnice vlaku

$$F_{AKC} = m_{SET} \cdot a \quad (36)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (37)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_{AKC}}{m_{SET}} = \frac{F_T - F_{ODP}}{m_{SET}} \quad (38)$$

Složení vztahů (36) a (37) vznikne tvar (38), kde je dále možné akcelerační sílu F_{AKC} rozložit na rozdíl tažné síly F_T a síly jízdních odporů F_{ODP} , což je nejvhodnější vyjádření pohybové rovnice pro simulaci.

6.2.4 Jízdní odpory

Odporové síly působící na vlak jsou vozidlové, traťové a odpor zrychlení. [31].

- Traťové odpory jsou odpor sklonu, oblouku a odpor průjezdu tunelem. Do simulace byl zaveden jen odpor sklonu, odpory tunelu a oblouku byly zanedbány (viz 6.2.1).

Sklon trati je definován jako přírůstek svislé výšky na ujetou vzdálenost, tedy $\frac{m}{km}$, tedy je udáván v jednotkách promile. Z rozkladu sil v trojúhelníku pak nutná síla pro překonání sklonu odpovídá:

$$O_S = s \cdot F_G = s \cdot m \cdot g \quad (39)$$

Kde O_S je odpor sklonu v kN, F_G tíha v MN a s sklon v ‰ a g gravitační zrychlení.

- Odpor vzduchu, valení kol, ložisek apod. je respektován vozidlovým odporem σ_V , který je zaveden jako měrný (dá se s ním poté počítat jako s přídavným sklonem), tedy

v jednotkách ‰. Nejčastěji je využíván jeho přibližný výpočet mnohočlenem třetího řádu ve tvaru:

$$o_V = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \quad (40)$$

Kde V je rychlost v km/h a a , b a c jsou stanovené konstanty, zde zvolené podle [32], kde jsou však uvedeny v jednotkách $\frac{N}{t}$, tedy pro získání rozměru $\frac{N}{kN}$ je nutné je vydělit gravitační konstantou. Výsledné vztahy pro osobní čtyřnápravový vůz a obecnou lokomotivu Bo'Bo' pak jsou:

$$o_{VAG} = 1,35 + 0,008 \cdot V + 0,00033 \cdot V^2 \quad (41)$$

$$o_{LOKO} = 2,8 + 0,00085 \cdot V^2 \quad (42)$$

6.2.5 Rovnice stejnosměrného motoru

Pro přepočítání mezi elektrickými a mechanickými parametry stejnosměrných motorů platí vztahy

$$U_i = k\phi \cdot \omega \quad (43)$$

$$M = k\phi \cdot I_A \quad (44)$$

Kde U_i je indukované protinapětí (V), $k\phi$ buzení (Wb), ω úhlová otáčivá rychlost (rad/s), M moment na hřídeli (Nm) a I_A kotevní proud (A)

6.3 Trakční charakteristika lokomotivy

Do simulace zavedena kvůli zjištění aktuálního dostupného momentu motoru a aktuální konstanty $k\phi$ podle rychlosti. Zavedena byla jako funkce, ale vyšetřována byla nakonec jen varianta cize buzeného motoru. Je vytvořena jako závislost momentu na hřídeli motoru a $k\phi$ na úhlové rychlosti motoru.

Trakční charakteristika pro variantu motoru s cizím buzením byla vytvořena uměle, jako univerzální pro lokomotivu podobnou lokomotivám řady 110/111/210, nicméně přibližně podle známých pracovních bodů motorů lokomotivy řady 210 [6] (rychlosti, tažná síla, výkon, účinnost) a odhadnutých parametrů motorů stejnosměrných lokomotiv ř. 110/111 (napětí a proud).

Trakční charakteristika byla vytvořena pro jediný imaginární motor místo kombinace 4 skutečných. Byl uvažován jako dvě motorové skupiny paralelně po dvou sériových motorech – tedy s dvojnásobným napětím i proudem, stejnou jmenovitou rychlostí a čtyřnásobným momentem. Pro výpočty s výkony je pak samozřejmě nutné upravit oproti skutečným motorům odpory kotvy a buzení, což bylo provedeno podle účinnosti.

1. Určení momentu ve známém pracovním bodě charakteristiky:

- Jmenovitý bod: V_N v polovině maximální rychlosti ($V_{MAX} = 80$ km/h, pak tedy $V_N = \frac{V_{MAX}}{2} = \frac{80}{2} = 40$ km/h), jmenovitý mechanický výkon $P_{mN} = 880$ kW, převodovka má převodový poměr N , kolo průměr D_{kolo} (podle [6] při „středním opotřebením jízdní plochy“) a bez uvažování účinnosti převodovky pak platí

$$\omega_{motor} = \omega_{kolo} \cdot N = \frac{\frac{V_N}{3,6}}{\frac{D_{kolo}}{2}} \cdot N \quad (45)$$

$$\omega_{motor} = \frac{\frac{40}{3,6}}{\frac{1,015}{2}} \cdot 4,06 = 88,9 \text{ rad/s} = \omega_N \quad (46)$$

$$M = \frac{P_{mN}}{\omega_N} = \frac{880\,000}{88,9} = 9900 \text{ Nm} \quad (47)$$

- Pokud budeme uvažovat jen trvalý výkon, bude moment motoru konstantní v celé oblasti $\omega \in \langle 0; \omega_N \rangle$
- Pro oblast $\omega \in \langle \omega_N; \omega_{MAX} \rangle$ pak byl průběh momentu vytvořen jako hyperbola z konstantního výkonu
- Oblast omezení odbuzení není uvažována.

2. Určení odporů motoru

- Účinnost η motoru lokomotivy řady 210 ve jmenovitém bodě je (jmenovitý proud I_N a jmenovité napětí U_N podle [6]):

$$\eta = \frac{P_{mN}}{U_N \cdot I_N} = \frac{220\,000}{360 \cdot 670} = 0,912 \quad (48)$$

- Jmenovité napětí imaginárního motoru bylo zvoleno jako 1500 V, jeho jmenovitý mechanický výkon je 880 kW. Při uvažování stejné účinnosti tedy pak jmenovitý elektrický výkon P_{elN} je:

$$P_{elN} = \frac{P_{mN}}{\eta} = \frac{880\,000}{0,912} = 965 \text{ kW} \quad (49)$$

$$I_N = \frac{P_{elN}}{U_N} = \frac{965\,000}{1\,500} = 643 \text{ A} \quad (50)$$

Tedy ztrátový výkon v motoru ΔP se spočte jako

$$\Delta P = P_{elN} - P_{mN} = 965\,000 - 880\,000 = 85 \text{ kW} \quad (51)$$

- Podle [33] zvoleno rozdělení ztrát jako 45 % ztrát v obvodu kotvy ΔP_k , 25 % v obvodu buzení ΔP_b a 30 % jako ztráty mechanické a v magnetickém obvodu, které byly pro tuto simulaci zanedbány.

$$\Delta P_k = 0,45 \cdot \Delta P = 0,45 \cdot 85 = 38\,250\,W \quad (52)$$

$$\Delta P_b = 0,25 \cdot \Delta P = 0,25 \cdot 85 = 21\,250\,W \quad (53)$$

Kotevní odpor R_k se spočte ze ztrát jako

$$R_k = \frac{\Delta P_k}{I_N^2} = \frac{38\,250}{643^2} = 0,09\,\Omega \quad (54)$$

- Změňme nyní tento sériový motor na cize buzený – zvolíme, že jmenovitý budicí proud bude 25 % jmenovitého kotevního proudu. Pro odpor buzení R_b pak platí

$$R_b = \frac{\Delta P_b}{(0,25 \cdot I_N)^2} = \frac{21\,250}{(0,25 \cdot 643)^2} = 0,822\,\Omega \quad (55)$$

- Ověření účinnosti smyšleného motoru:

$$\eta = \frac{P_{mN}}{P_{mN} + \Delta P} = \frac{880\,000}{880\,000 + 0,09 \cdot 643^2 + 0,822 \cdot (0,25 \cdot 643)^2} = 0,94 \quad (56)$$

3. Určení průběhu $k\phi$ v závislosti na ω

- Ze vztahu pro jmenovité indukované napětí U_{iN} a pro náhradní schéma kotvy motoru tvořené sériovou kombinací $R_K - U_i$

$$U_{iN} = U_N - R_K \cdot I_N = 1500 - 0,09 \cdot 643 = 1\,442,1\,V \quad (57)$$

Ze vztahu (43) pak

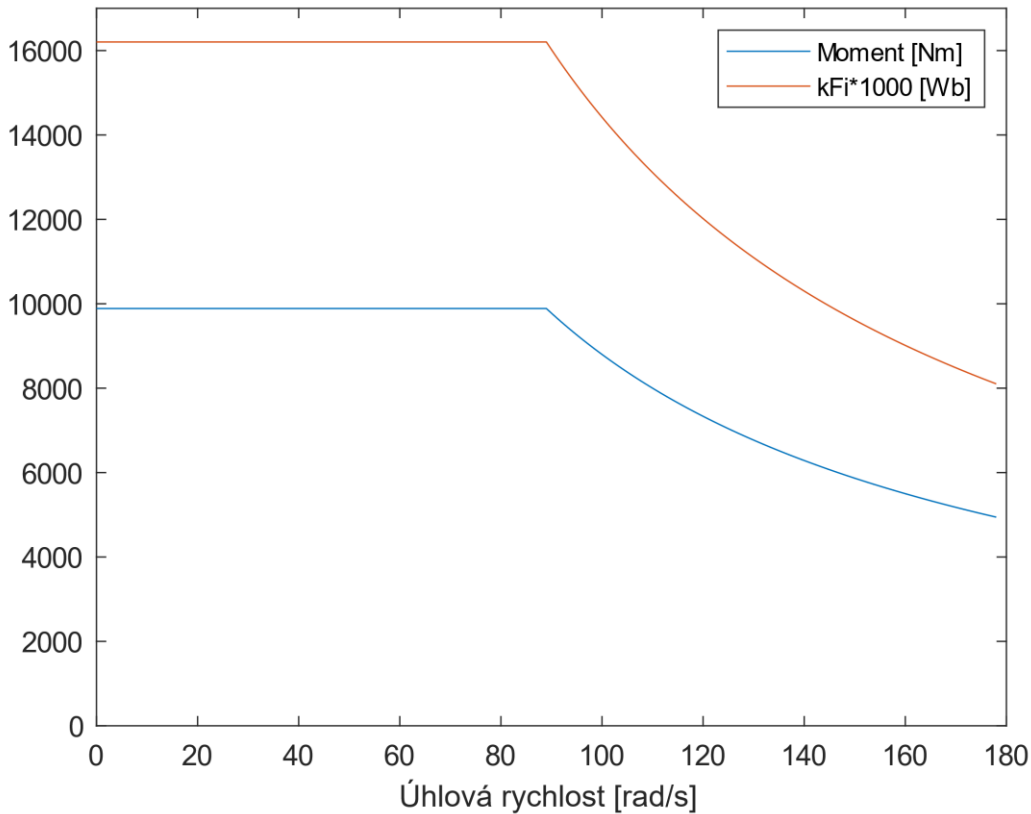
$$k\phi_N = \frac{U_{iN}}{\omega_N} = \frac{1\,442,1}{89} = 16,2\,Wb \quad (58)$$

- V rozsahu $\omega \in \langle 0; \omega_N \rangle$ je pak $k\phi = k\phi_N$, motor je jmenovitě nabuzen
- V oblasti $\omega \in \langle \omega_N; \omega_{MAX} \rangle$ je požadavek na konstantní výkon, z čehož plyne požadavek na konstantní U_i , pak tedy podle vztahu (43) platí

$$k\phi \cdot \omega = k\phi_N \cdot \omega_N \rightarrow k\phi = \frac{k\phi_N \cdot \omega_N}{\omega} \quad (59)$$

4. Určení konstanty buzení K_{BUZ} – vztahu mezi budícím proudem a $k\phi$ – uvažována lineární magnetizační charakteristika

$$K_{BUZ} = \frac{k\phi_N}{I_{bN}} = \frac{k\phi_N}{0,25 \cdot I_N} = \frac{16,2}{0,25 \cdot 643} = 0,1 \frac{Wb}{A} \quad (60)$$



Obr. 16: Vytvořená momentová charakteristika cize buzeného motoru a průběh $k\phi$

6.4 Kroky výpočetní smyčky

V příloze II je část skriptu v jazyce Matlab obsahující inicializaci zde použitých proměnných.

0. Zadány parametry vlaku, délka dráhy $s_{CÍL}$, požadovaná tažná síla F_{TPOZ} a brzdná síla F_{BPOZ} a požadovaná rychlost v_{POZ} . V paměti uložena momentová charakteristika.
1. „Regulátor“ rychlosti – při dosažení požadované rychlosti v_{POZ} přechod z režimu akcelerace s požadovanou tažnou silou, tedy z $F_{POZ} = F_{TPOZ}$ na výběh, tedy na $F_{POZ} = 0$
2. Odhad rychlosti začátku brzdy – z analogie s volným pádem, kdy rovněž známe (požadovanou) dráhu h resp. $(s_{CÍL} - s_{akt})$ a (dostupné) zrychlení g resp. $\frac{F_{BPOZ}}{m_{SET}}$.

Pokud je aktuální rychlost vyšší nebo rovna odhadnuté v_{MAX} přechod na požadovanou brzdou sílu, tedy $F_{POZ} = -F_{BPOZ}$

$$v = \sqrt{2hg} \rightarrow v_{MAX} = \sqrt{2 \cdot (s_{cíl} - s_{akt}) \cdot \left(\frac{F_{BPOZ}}{m_{SET}}\right)} \quad (61)$$

3. Vyčtení parametrů z momentové charakteristiky motoru podle aktuální $\omega_{motor} \rightarrow$ získání maximálního dostupného momentu, značen jako M_{TCH}
4. Určení požadovaného momentu motoru M_W z požadované tažné síly s uvažováním ztrát v převodovce ΔP_{PREV} (poměrné).

$$\begin{array}{l} \text{Tah} \\ (F_{POZ} > 0) \end{array} \quad M_W = F_{POZ} \cdot \frac{D_{KOLO}}{2} \cdot \frac{1}{N} \cdot (1 + \Delta P_{PREV}) \quad (62)$$

$$\begin{array}{l} \text{Brzda} \\ (F_{POZ} \leq 0) \end{array} \quad M_W = F_{POZ} \cdot \frac{D_{KOLO}}{2} \cdot \frac{1}{N} \cdot (1 - \Delta P_{PREV}) \quad (63)$$

5. Případný ořez požadovaného momentu M_W podle skutečných možností – podle momentové charakteristiky motoru – podle M_{TCH}
6. Určení skutečné tažné síly na kolech

$$\begin{array}{l} \text{Tah} \\ (F_{POZ} > 0) \end{array} \quad F_T = M_W \cdot (1 - \Delta P_{PREV}) \cdot \frac{2}{D_{KOLO}} \cdot N \quad (64)$$

$$\begin{array}{l} \text{Brzda} \\ (F_{POZ} \leq 0) \end{array} \quad F_T = M_W \cdot (1 + \Delta P_{PREV}) \cdot \frac{2}{D_{KOLO}} \cdot N \quad (65)$$

7. Řešení pohybové rovnice (převod do diskretního času pomocí Eulerovy metody)

$$a = \frac{F_T - F_{ODP}}{m_{SET}} \quad (66)$$

$$dv = a \cdot dT \quad (67)$$

$$v = v + dv \quad (68)$$

$$ds = v \cdot dT \quad (69)$$

$$s = s + ds \quad (70)$$

8. Určení okamžitého mechanického výkonu a rychlosti motoru

$$p = F \cdot v \quad (71)$$

$$v = \omega \cdot r = \frac{\omega_{motor}}{N} \cdot r \rightarrow \omega_{motor} = v \cdot \frac{2}{D_{KOLO}} \cdot N \quad (72)$$

9. Výpočet momentu motoru – aktuální režim jízdy určován podle okamžitého mechanického výkonu.

$$\begin{array}{l} \text{Tah} \\ (p > 0) \end{array} \quad M_{MOT} = \frac{p}{\omega_{motor}} (1 + \Delta P_{PREV}) \quad (73)$$

$$\begin{array}{l} \text{Brzda} \\ (p < 0) \end{array} \quad M_{MOT} = \frac{p}{\omega_{motor}} (1 - \Delta P_{PREV}) \quad (74)$$

10. Vyčtení parametrů z momentové charakteristiky motoru podle aktuální $\omega \rightarrow$ získání konstanty $k\phi$

11. Výpočet elektrických veličin motoru

$$U_i = k\phi \cdot \omega_{motor} \quad (75)$$

$$I_K = \frac{M_{MOT}}{k\phi} \quad (76)$$

$$I_B = \frac{k\phi}{K_{BUZ}} \quad (77)$$

$$P_{KOT} = R_K \cdot I_K^2 + U_i \cdot I_K \quad (78)$$

$$P_{BUZ} = R_B \cdot I_B^2 \quad (79)$$

12. Ořez dynamické brzdy – pokud mechanický výkon je záporný (brzdí), ale kotevní již kladný (je nutné pokrýt ztráty v motoru) \rightarrow přechod na čistě mechanické brzdění (vynulováním momentu motoru)

13. Uvažování ztrát kotevních měničů ΔP_{KOT} (poměrné)

$$\begin{array}{l} \text{Tah} \\ (p > 0) \end{array} \quad P_{KOT-SS} = P_{KOT}(1 + \Delta P_{KOT}) \quad (80)$$

$$\begin{array}{l} \text{Brzda} \\ (p < 0) \end{array} \quad P_{KOT-SS} = P_{KOT}(1 - \Delta P_{KOT}) \quad (81)$$

14. Uvažování ztrát budicích měničů ΔP_{BUZ} (poměrné)

$$P_{BUZ-SS} = P_{BUZ}(1 + \Delta P_{KOT}) \quad (82)$$

15. Výkon meziobvodu P_{SS}

$$P_{SS} = P_{KOT-SS} + P_{BUZ-SS} + P_{POMPOH} \quad (83)$$

Výkon P_{POMPOH} představuje výkon pomocných pohonů – zde zvolen jako konstantní 4 kW

16. Určení napětí meziobvodu U_{SS} a proudu baterie I_{SS} – uvažováno napájení jen z baterie.

Baterie nahrazena sériovou kombinací napěťového zdroje a vnitřního odporu: U_{0BAT} a R_{BAT} . Vydeme ze vztahů pro meziobvod:

$$U_{SS} = U_{0BAT} - R_{BAT} \cdot I_{SS} \quad (84)$$

$$P_{SS} = U_{SS} \cdot I_{SS} \quad (85)$$

Pak platí:

$$P_{SS} = U_{0BAT} \cdot I_{SS} - R_{BAT} \cdot I_{SS}^2 \quad (86)$$

$$0 = a \cdot I_{SS}^2 + b \cdot I_{SS} + c \rightarrow 0 = -R_{BAT} \cdot I_{SS}^2 + U_{0BAT} \cdot I_{SS} - P_{SS} \quad (87)$$

$$D = b^2 - 4 \cdot a \cdot c = U_{0BAT}^2 - 4 \cdot (-R_{BAT}) \cdot (-P_{SS}) \quad (88)$$

$$I_{SS-1}, I_{SS-2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a} = \frac{U_{0BAT} \pm \sqrt{U_{0BAT}^2 - 4 \cdot (-R_{BAT}) \cdot (-P_{SS})}}{2 \cdot R_{BAT}} \quad (89)$$

$$U_{SS-1} = U_{0BAT} - R_{BAT} \cdot I_{SS-1} \quad (90)$$

$$U_{SS-2} = U_{0BAT} - R_{BAT} \cdot I_{SS-2}$$

Vycházejí dva proudy správné polarity, volba správného podle blízkosti napětí meziobvodu napětí baterie naprázdno. Osvědčila se tolerance $U_{SS} = U_{0BAT} \pm 30\%$. Po ověření podmínky pak tedy $U_{SS} = U_{SS-1}$ nebo U_{SS-2} a $I_{SS} = I_{SS-1}$ nebo I_{SS-2}

17. Integrace energie baterie (převod do diskrétního času pomocí Eulerovy metody)

$$P_{BAT} = U_{0BAT} \cdot I_{SS} \quad (91)$$

$$dE = P_{BAT} \cdot dT \quad (92)$$

$$E_{BAT} = E_{BAT} + dE \quad (93)$$

6.5 Výsledky simulace

Ze simulačního skriptu je pro porovnání zvoleny oba parametry klíčové pro reálný provoz, tedy konečný stav baterie a čas jízdy. Konečný stav baterie je určován z energie, přičemž počáteční energie byla zvolena jako 100 MJ – kvůli jednoduchosti určení stavu v procentech. (Hodnota $100 \text{ MJ} = 100 \cdot 10^6 \text{ Ws} \rightarrow \frac{100 \cdot 10^6}{3600 \cdot 1000} \cong 28 \text{ kWh}$, tedy celkem podstatně menší, než podle odhadnuté velikosti v kapitole 3.5).

6.5.1 Průběhy jedné jízdy

Ze simulační smyčky jsou ukládány průběhy veličin, které jsou následně vyneseny do grafu. Vzorový průběh je na Obr. 19, parametry jako varianta I podle Tab. 2.

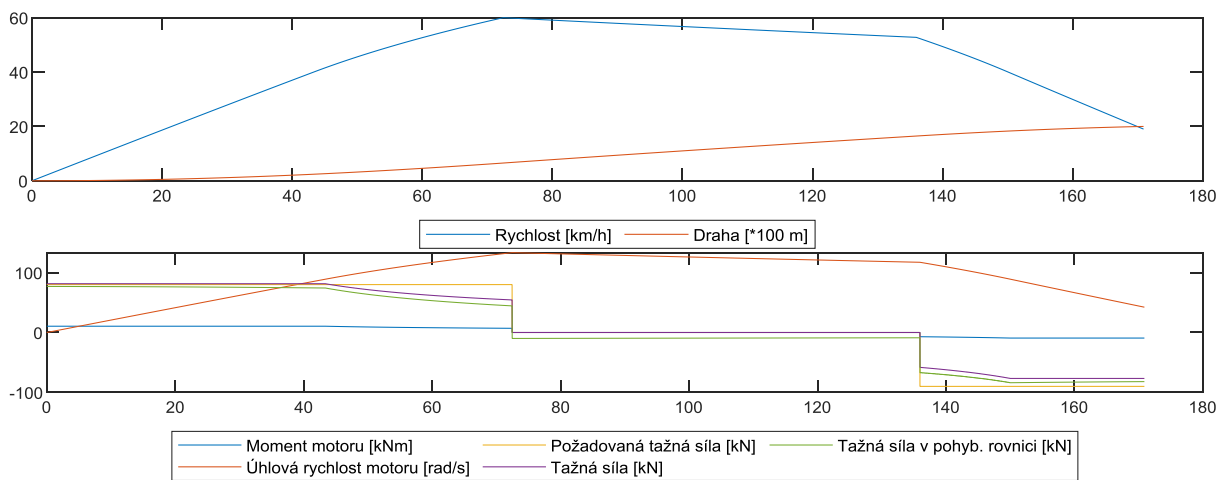
Pokud je dosaženo dostatečně vysoké rychlosti, může selhat zjednodušený dopočet brzděné trajektorie pro cílové brzdění vlivem momentové charakteristiky, kdy na začátku brzdění při vysoké rychlosti není dostupný plný požadovaný moment (viz Obr. 17, tedy varianta II podle Tab. 2). Pro účely této práce nebyla tato situace zohledněna, v realitě by byla jednoduše kompenzována použitím větší brzděné síly v blízkosti cíle (všechny simulované brzděné síly jsou s rezervou pod maximální brzděnou silou a očekávatelnou adhezí), vliv na množství rekuperované energie by už zřejmě nebyl výrazný.

Naopak při dalším potenciálně problematickém scénáři, kdy je kvůli cílovému zastavení nutné začít brzdit ještě před dosažením požadované rychlosti, dokáže simulace přejít z tahu rovnou do brzdy (viz. Obr. 18, tedy varianta III podle Tab. 2).

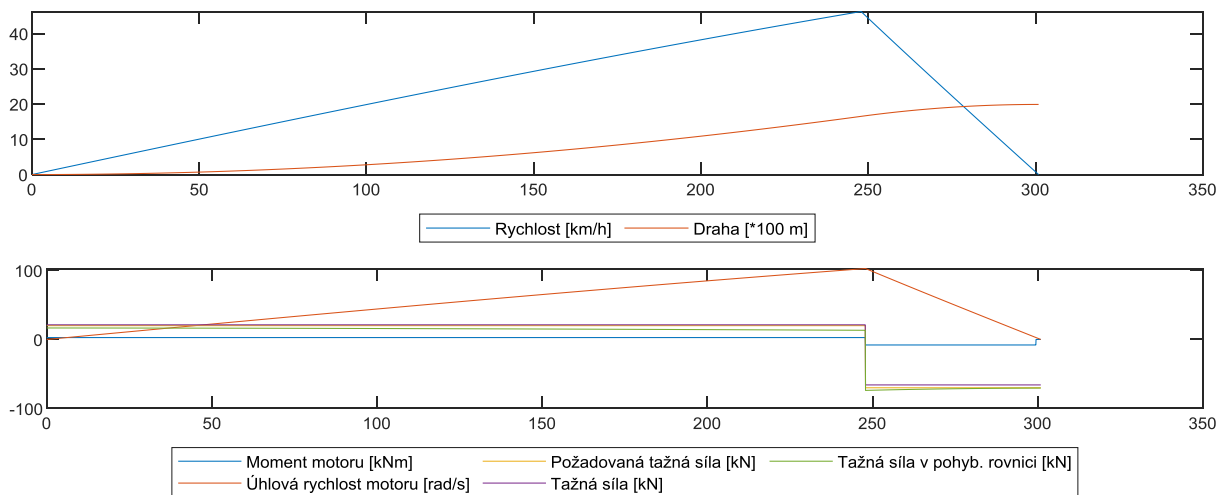
Tab. 2: Vybrané parametry simulačního skriptu

Var.	m_{LOKO} (kg)	m_{VAG} (kg)	n_{VAG} (-)	s	$V_{pož}$ (km/h)	$Ft_{pož}$ (kN)	$Fb_{pož}$ (kN)	E_{bat} (%)	Čas jízdy (s)
I	70000	40000	5	0	60	80	70	66,3	190
II	70000	40000	5	0	60	80	90	63,1*	171*
III	70000	40000	5	0	60	20	70	72,4	301

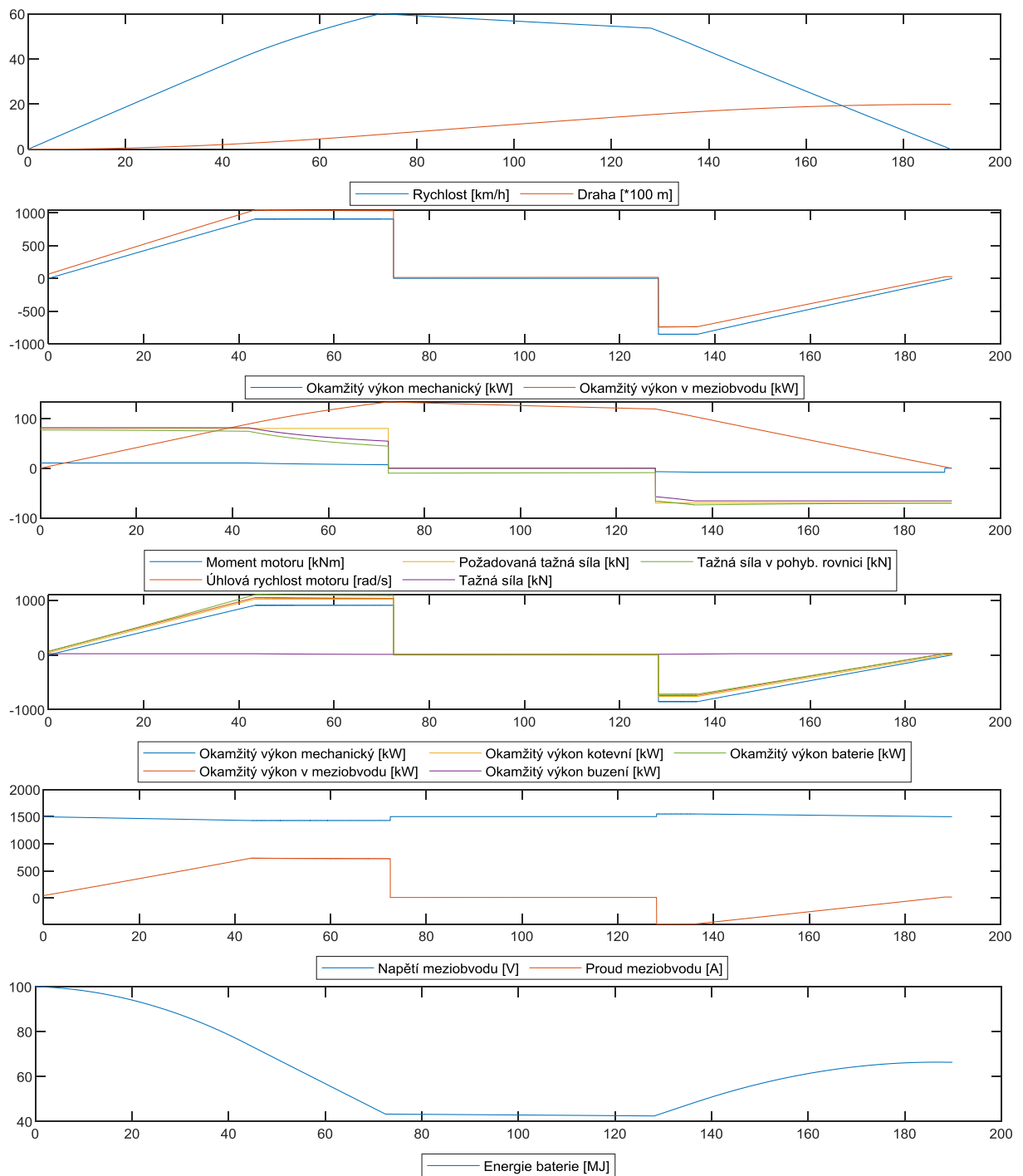
* Přejetí cíle – veličiny nebyly odečteny při stání v cíli, ale ještě v pohybu



Obr. 17: Výsledky simulace s variantou parametrů II - přejetí cíle. Vodorovné osy čas (s)



Obr. 18: Výsledky simulace s variantou parametrů III – brzdění před dosažením požadované rychlosti (60 km/h). Vodorovné osy čas (s)

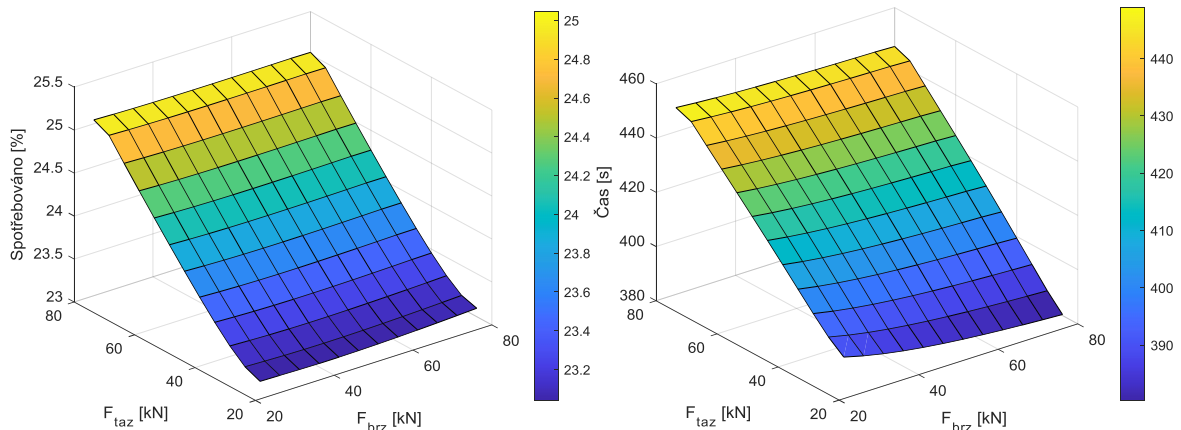


Obr. 19: Výsledky simulace s variantou parametrů I – vzorový průběh. Vodorovné osy čas (s)

6.5.2 Výsledky v závislosti na proměnných požadovaných silách

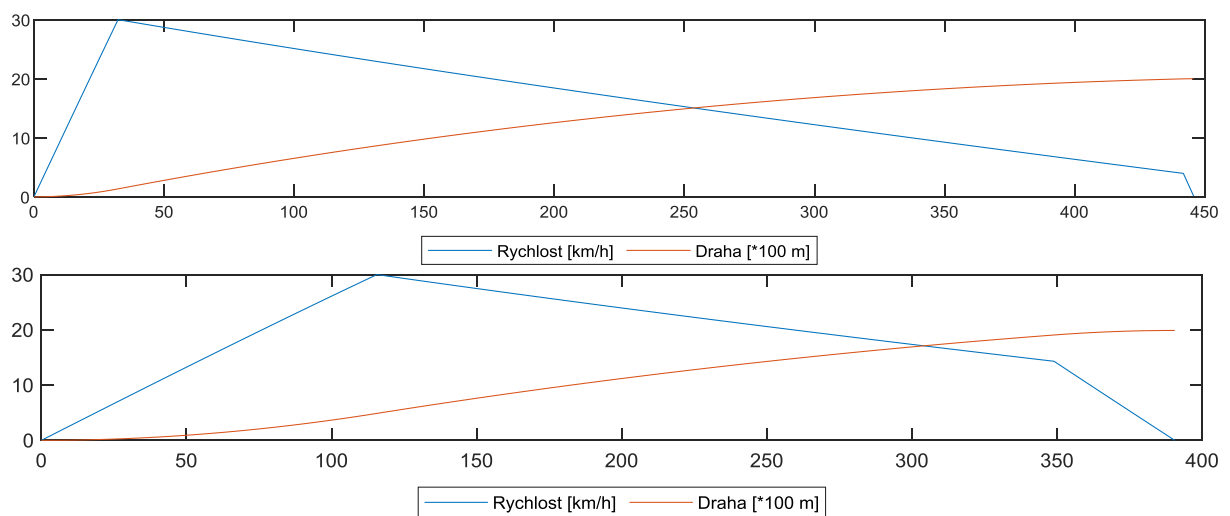
Další možností zobrazení výsledků je porovnání výsledných spotřeb energie a času jízdy. Vstupní parametry jsou požadovaná tažná síla a požadovaná brzdná síla, obě zadávány v rozsahu 25 až 80 kN s krokem 5 kN. Výstupními parametry jsou čas a spotřebovaná energie. Výsledky jsou zobrazeny do dvojrozměrných grafů (grafy mají různě natočené osy). Simulace byla provedena pro dvě požadované rychlosti 30 a 80 km/h.

Pro malou požadovanou rychlost může vzniknout situace, kdy vlivem jízdnic odporů vlak zastaví ještě před cílem ve fázi výběhu. Pro vyloučení této situace byla experimentálně určena minimální (celočíslná) rychlost, pro kterou dojde ještě k brzdění i při největších požadovaných silách (největší síly znamenají nejrychlejší rozjezd a nejpozdější začátek brzdění, tedy nejdelší výběh, na kterém se projevují právě nejvíce jízdnic odporů). Tato rychlost je 30 km/h a byla poté uvažována jako minimální dosazovaná požadovaná.



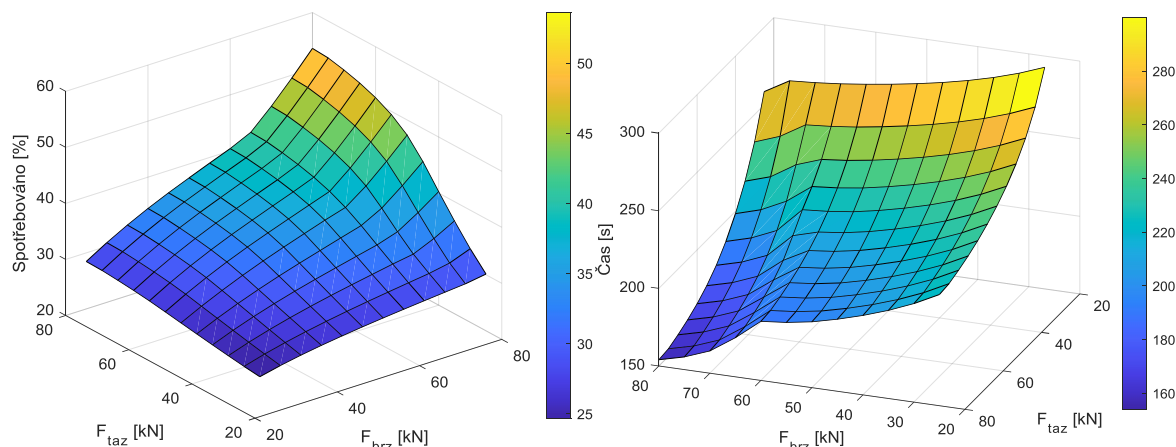
Obr. 20: Spotřeba energie a čas jízdy v závislosti na požadované tažné a brzdě síle při požadavku na dosažení rychlosti 30 km/h. Ostatní parametry stejné jako v Tab. 2

Při požadavku na dosažení rychlosti 30 km/h nejsou průběhy příliš odlišné spotřebou (cca 25 vs. 23 %), liší se časem v závislosti na tažné síle, čím větší tažná síla, tím prudší rozjezd, což ovšem znamená delší výběh, který vede na delší pohyb malou rychlostí (viz Obr. 21) a tedy na delší celkový čas jízdy. Brzdě síla čas příliš neovlivňuje (většina energie už je zmařena v jízdnic odporech)



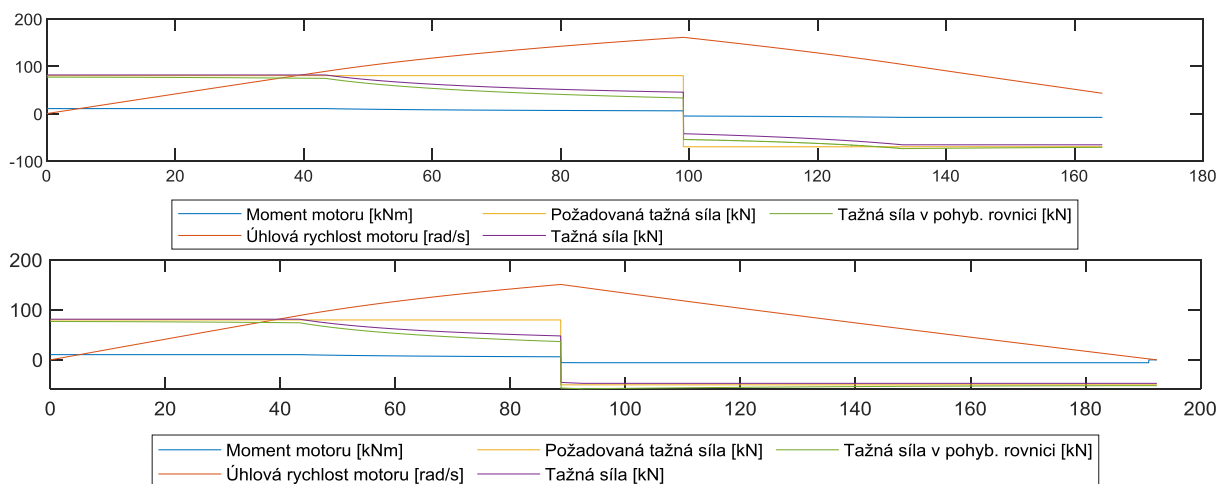
Obr. 21: Průběh rychlosti a dráhy při požadované rychlosti 30 km/h a tažné i brzdě síle 80 kN (nahore, čas = 445 s, spotřeba = 25 %) a 25 kN (dole, čas = 390 s, spotřeba = 23 %)

Dalším hraničním případem je simulace pro požadovanou maximální rychlost, tedy 80 km/h.



Obr. 22: Spotřeba energie a čas jízdy v závislosti na požadované tažné a brzdě síle při požadavku na dosažení rychlosti 80 km/h. Ostatní parametry stejné jako v Tab. 2

Při požadavku na dosažení rychlosti 80 km/h se projevuje nedostatečná brzdě síla vlivem trakční hyperboly, a tedy začíná docházet k „přejetí cíle“, které se začíná projevovat hlavně v grafu času zlomem v okolí 60 kN brzdě síly (viz Obr. 23). Jinak očekávatelně s požadovanými silami roste spotřeba a klesá potřebný čas.

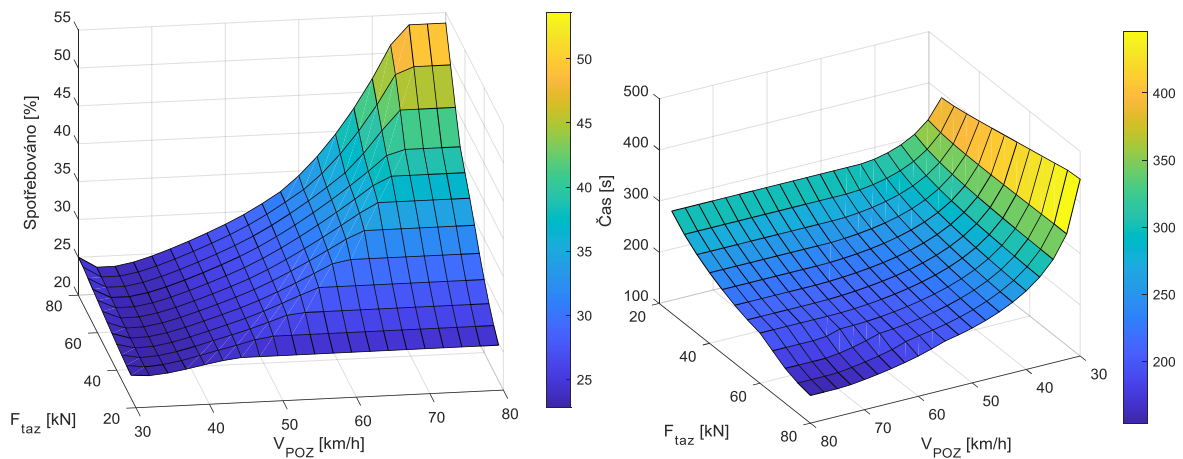


Obr. 23: Průběhy požadované tažné (brzdě) síly (žlutá) a tažné (brzdě) síly motoru (fialová) při požadované rychlosti 80 km/h, tažné síle 80 kN a brzdě síle 70 kN (nahore, zřejmý odstup křivek) a 50 kN (dole, nezatelný odstup křivek)

6.5.3 Výsledky podle rychlosti při symetrické tažné a brzdě síle

Pro hledání optimální rychlosti by bylo nejvhodnější zobrazení spotřeby a času v závislosti na tažné (a zde tedy i brzdě) síle a požadované rychlosti začátku výběhu (pokud není nutno brzdit před jejím dosažením). Tažná síla byla dosazována opět v rozsahu 25 až 80 kN s krokem 5 kN, rychlost v rozsahu 30 až 80 km/h s krokem

2,5 km/h. Výsledky jsou opět zobrazeny do dvojrozměrného grafu (Obr. 24). Grafy mají opět vhodně natočené osy.



Obr. 24: Spotřeba energie a čas jízdy v závislosti na požadované tažné i brzdě síle a požadované rychlosti
Ostatní parametry stejné jako v Tab. 2a

Spotřeba energie roste a čas jízdy klesá s požadovanou silou a rychlostí. Při malé požadované rychlosti 30 km/h oproti trendu spotřeba roste, což je pravděpodobně dáno spotřebou „naprázdno“ – pomocné pohony, buzení motoru (při výběhu není odbuzován) a dlouhým časem jízdy daným opět dlouhým výběhem při malé rychlosti jako v prvním případě v kapitole 6.5.2.

Zhodnocení a závěr

V kapitole 3 je zhodnoceny možnosti topologické realizace vozidla a jsou popsány důvody, které by mohly vést k zachování nebo naopak náhradě současných částí lokomotivy. Navržená řešení vycházejí z předpokladů položených v kapitole 1 a berou do úvahy i některá skutečně realizovaná vozidla, která jsou představena v kapitole 2.

V kapitole byla 4 navržena vstupní část přestavěné lokomotivy pro stejnosměrnou trakční soustavu o napětí 3 kV, v kapitole 5 pro střídavou trakční soustavu 25 kV 50 Hz. Oba návrhy jsou velmi zjednodušené a vzhledem k neznalosti konkrétního zadání přestavby i dosti obecné. Nicméně se v obou případech podařilo simulačně s navrženými parametry dosáhnout dostatečné dynamiky a stabilní funkce při proměnlivých vstupních parametrech, takže by získané hodnoty potenciálně mohly být použity jako počáteční pro návrh případné budoucí realizované rekonstrukce. Další velká skupina problémů, která v těchto návrzích nebyla uvažována, je vliv vozidla na okolí, buď vyzařováním, ale hlavně složkami proudu tekoucího kolejí, které mohou reagovat s kolejovými obvody – líniovým zabezpečením trati. Nicméně výhodou navržených vstupních částí je jejich provoz při pevné spínací frekvenci i režim provozu při napájení meziobvodu, kdy je omezení nežádoucích harmonických složek proudu značně jednodušší, než například u střídače připojeného přímo na stejnosměrnou trolej, kdy jsou vstupní harmonické složky ovlivněny výstupní frekvencí měniče. Konkrétně pro stejnosměrnou trolej byl navržen dvoufázový pulsní měnič snižující napětí pro meziobvod s napětím 1500 V. Pro střídavou pak dva přesazeně řízené napěťové pulsní usměrňovače, opět s meziobvodem o napětí 1500 V.

Kapitola 6 se věnuje energetické bilanci vlaku a zbývajícím množství energie v akumulátoru. Je zde, opět jen značně obecně kvůli neznalosti konkrétních vlastností vozidla, naznačena metodika pro určení spotřeby a porovnání vlivu jednotlivých parametrů jak na spotřebu energie, tak i na čas jízdy a tedy reálnou použitelnost dané kombinace parametrů. Pro reálné použití by bylo nutno lépe namodelovat jak motor (skutečné parametry, motorové skupiny...), tak například skutečně plánovanou baterii (skutečná nabíjecí charakteristika omezující rekuperaci atd.). Pak by teprve bylo možné určit optimální řízení motorů (průběžné odbuzování apod.) a průběh jízdy (omezení brzdě síly rekuperovatelným výkonem apod.).

Literatura

- [1] BOSÁČEK, Josef. *Současné možnosti alternativních pohonů hnacích vozidel*. [Online] *czech-raildays.cz*. https://www.czech-raildays.cz/2008/seminare/kv_08.pdf [Citace: 23. 12 2023.]
- [2] CHÝLE, Martin. *Dvouzdrojové lokomotivy*. Vědeckotechnický sborník Správy železnic č. 6/2022.
- [3] *Řazení vlaků 2024 - ČD210* [Online] *wagonweb.cz* https://www.wagonweb.cz/razeni/razeni.php?rok=2024&jmeno=&vuz=%C4%8CD+210&cislo_vozu=&relace=&najit=Hledat [Citace: 28. 4 2024.]
- [4] *210 055-0* [Online] *orso.cz* https://www.orso.cz/zeleznice/elektricke_lokomotivy_210_055_0.html [Citace: 28. 4 2024.]
- [5] SMEJKAL, Luboš. *Provoz elektrické lokomotivy mimo trolejové vedení*. Vědeckotechnický sborník ČD č. 8/1999
- [6] DVOŘÁČEK, Václav a PALÍK, František. *Střídavá posunovací lokomotiva S458.0*. NADAS, 1975.
- [7] *Ohlédnutí za lokomotivami řady S458.0 (ř.210)*. [Online] *strojvedouciplzen.cz* <https://www.strojvedouciplzen.cz/index.php?page=menu&id=117> [Citace: 27. 12 2023.]
- [8] *Další „znovuzrozená“ žehlička se dokončuje!* [Online] *strojvedouciplzen.cz* <https://www.strojvedouciplzen.cz/index.php?page=menu&id=154%20%29> [Citace: 28. 12 2023.]
- [9] *RANGIERLOKOMOTIVE GEAF 2/2*. [Online] *rhb.ch* https://www.rhb.ch/fileadmin/user_upload/redaktion/Ueber_die_RhB/Medien/Dokumente/Medienmitteilungen/Medienmitteilungen_2020/20200723_Faktenblatt_Geaf.pdf [Citace: 28. 12 2023.]
- [10] *New RhB Shunters*. [Online] *railvolution.net* <https://www.railvolution.net/news/new-rhb-shunters> [Citace: 28. 12 2023.]
- [11] KINOSHITA, Hiroyasu a OGAWA, Kotaro. *Series Hybrid Locomotive Equipped with Energy-Saving Electrical Equipment for European Market*. [Online] TOSHIBA REVIEW Vol. 76, No. 4, July 2021. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/infrasolution/www/infrastructure/en/railway/assets/pdf/Toshiba%20Review%20%28Hybrid%20Locomotive%29.pdf> [Citace: 29. 12 2023.]
- [12] *Toshiba unveils tri-mode locomotive demonstrator*. [Online] *railsistem.com* <https://www.railsistem.com/blog/2019/06/04/toshiba-unveils-tri-mode-locomotive-demonstrator/>. [Citace: 29. 12 2023.]
- [13] *372, 371 / ES 499.2*. [Online] *atlaslokomotiv.net*. <https://www.atlaslokomotiv.net/loko-372.html> [Citace: 24. 12 2023.]
- [14] *Vytápění osobních vagonů*. [Online] *vagony.cz*. <https://vagony.cz/vagony/vytapeni.html> [Citace: 30. 12 2023.]

- [15] *111 / E 458.1*. [Online] atlaslokomotiv.net. <https://www.atlaslokomotiv.net/loko-111.html>. [Citace: 29. 12 2023.]
- [16] BISWAS, Multan a AZIM, Shafiul a KUMAR SAHA, Tonmoy a ZOBAYER, Umama a URMI, Monalisa. *Towards Implementation of Smart Grid: An Updated Review on Electrical Energy Storage Systems*. [Online] *researchgate.net*. https://www.researchgate.net/publication/235761511_Towards_Implementation_of_Smart_Grid_An_Updated_Review_on_Electrical_Energy_Storage_Systems [Citace: 24. 12 2023.]
- [17] SAFT. *Industrial Battery Comparison*. [Online] *r5.ieee.org* <https://r5.ieee.org/houston/wp-content/uploads/sites/32/2020/03/Battery-Technology-Comparison-IEEE-2020.pdf> [Citace: 25. 12 2023.]
- [18] RUETSCHI, Paul. *Aging mechanisms and service life of lead–acid batteries*. [Online] *sciencedirect.com*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775303009340> [Citace: 25. 12 2023.]
- [19] *Other battery chemicals*. [Online] *tystor.com* <https://www.tystor.com/en/knowledge-base/battery-university/other-battery-chemicals/>. [Citace: 25. 12 2023.]
- [20] JINGKUN, Li, ZI-FENG, Ma. *Past and Present of LiFePO4: From Fundamental Research to Industrial Applications*. [Online] *sciencedirect.com*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451929418305758> [Citace: 25. 12 2023.]
- [21] *LiFePO4 vs Lithium Ion Batteries: Which Is Better for Solar Generators?* [Online] *anker.com*. <https://www.anker.com/blogs/others/lifepo4-vs-lithium-ion>. [Citace: 25. 12 2023.]
- [22] *Řada 110 (ex E458.0)*. [Online] *prototypy.cz*. <http://www.prototypy.cz/?rada=110>. [Citace: 23. 12 2023.]
- [23] *Přerod lokomotiv řady 114.5 SD-Kolejová doprava v posunovadla PZ 114*. [Online] *spz.logout.cz* <https://spz.logout.cz/novinky/novinky.php?poradi=1633> [Citace: 28. 4 2024.]
- [24] *114.5*. [Online] atlaslokomotiv.net. <https://www.atlaslokomotiv.net/loko-114.html> [Citace: 28. 4 2024.]
- [25] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika III - Měniče s vlastní komutací a bez komutace*. ZČU, 1998. ISBN 80-7082-485-9.
- [26] NĚMCOVÁ, Jana. *Bakalářská práce - Simulační model usměrňovače*. ZČU, 2014.
- [27] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce: 3. Plynulá regulace cize buzeného motoru*. ZČU, 2009. ISBN 978-80-7043-771-1.
- [28] POLÁČEK, Michal. *Diplomová práce - Trakční měnič se středofrekvenčním transformátorem*. ZČU, 2017.
- [29] *210, 209 / S 458.0*. [Online] atlaslokomotiv.net. <https://www.atlaslokomotiv.net/loko-210.html>. [Citace: 20. 5 2024.]
- [30] *Lokomotiva řady 209*. [Online] *kutiluv-zapisnik.cz* <https://kutiluv-zapisnik.cz/lokomotiva-rady-209/> [Citace: 20. 5 2024.]
- [31] *Co spotřebuje vagón?* [Online] *vagony.cz* <https://vagony.cz/vagony/energie.html> [Citace: 25. 2 2024]

[32] Odbor lokomotivního hospodářství FMD. *ČSD V7 - Trakční výpočty*. [Online] Nakladatelství dopravy a spojů, 1979.
https://www.iwan.eu07.pl/jw/john_woods2009/predpisy/V/V7.pdf [Citace: 14.3.2024].

[33] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce: 2. Stupňovité řízení sériového motoru*. ZČU, 2009. ISBN 978-80-7043-770-4.

Seznam obrázků

Obr. 1: Posunovací lokomotiva řady 210 (210 055-0) v traťové službě. Zdroj obrázku [4]	- 3 -
Obr. 2: Schéma zapojení dvouzdrojové lokomotivy řady 210 upravené v depu České Budějovice. Vlevo zapojení lokomotivy, vpravo zapojení akumulátorového vozu. Zdroj obrázku [5].....	- 5 -
Obr. 3: Blokové schéma třízdrojové varianty lokomotivy Toshiba HDB 800. Zdroj obrázku [11].....	- 6 -
Obr. 4: Zapojení výkonového obvodu simulace pulsního měniče	- 14 -
Obr. 5: Blokové zapojení simulace pulsního měniče, jednotlivé subsystémy jsou v detailu na Obr. 4, Obr. 6 a Obr. 7.....	- 15 -
Obr. 6: Zapojení regulační části simulace pulsního usměrňovače	- 16 -
Obr. 7: Zapojení modulátorů pulsního usměrňovače	- 16 -
Obr. 8: Výsledné průběhy veličin pulsního měniče ve vzdálenosti 0,2 km od „měřírny“ – nejvyšší zvlnění proudu troleje.....	- 20 -
Obr. 9: Detail průběhů veličin pulsního měniče	- 20 -
Obr. 10: Zapojení výkonového obvodu simulace napěťového pulsního usměrňovače	- 23 -
Obr. 11: Blokové zapojení simulace napěťového pulsního usměrňovače, jednotlivé subsystémy jsou v detailu na Obr. 10, Obr. 12 a Obr. 13	- 24 -
Obr. 12: Zapojení regulační části simulace napěťového pulsního usměrňovače	- 24 -
Obr. 13: Zapojení modulátorů napěťového pulsního usměrňovače	- 25 -
Obr. 14: Výsledné průběhy veličin napěťového pulsního usměrňovače	- 28 -
Obr. 15: Detail průběhů veličin napěťového pulsního usměrňovače – na prostředním průběhu viditelné přesazení můstků V1 a V2.....	- 28 -
Obr. 16: Vytvořená momentová charakteristika cize buzeného motoru a průběh $k\phi$	- 34 -
Obr. 17: Výsledky simulace s variantou parametrů II - přejetí cíle. Vodorovné osy čas (s).....	- 38 -
Obr. 18: Výsledky simulace s variantou parametrů III – brzdění před dosažením požadované rychlosti (60 km/h). Vodorovné osy čas (s).....	- 38 -
Obr. 19: Výsledky simulace s variantou parametrů I – vzorový průběh. Vodorovné osy čas (s)	- 39 -
Obr. 20: Spotřeba energie a čas jízdy v závislosti na požadované tažné a brzdě síle při požadavku na dosažení rychlosti 30 km/h. Ostatní parametry stejné jako v Tab. 2.....	- 40 -
Obr. 21: Průběh rychlosti a dráhy při požadované rychlosti 30 km/h a tažné i brzdě síle 80 kN (nahore, čas = 445 s, spotřeba = 25 %) a 25 kN (dole, čas = 390 s, spotřeba = 23 %).	- 40 -
Obr. 22: Spotřeba energie a čas jízdy v závislosti na požadované tažné a brzdě síle při požadavku na dosažení rychlosti 80 km/h. Ostatní parametry stejné jako v Tab. 2.....	- 41 -
Obr. 23: Průběhy požadované tažné (brzdě) síly (žlutá) a tažné (brzdě) síly motoru (fialová) při požadované rychlosti 80 km/h, tažné síle 80 kN a brzdě síle 70 kN (nahore, zřejmý odstup křivek) a 50 kN (dole, neznatelný odstup křivek)	- 41 -
Obr. 24: Spotřeba energie a čas jízdy v závislosti na požadované tažné i brzdě síle a požadované rychlosti Ostatní parametry stejné jako v Tab. 2a	- 42 -

Přílohy

I. Zapojení trakčního obvodu lokomotivy řady 210

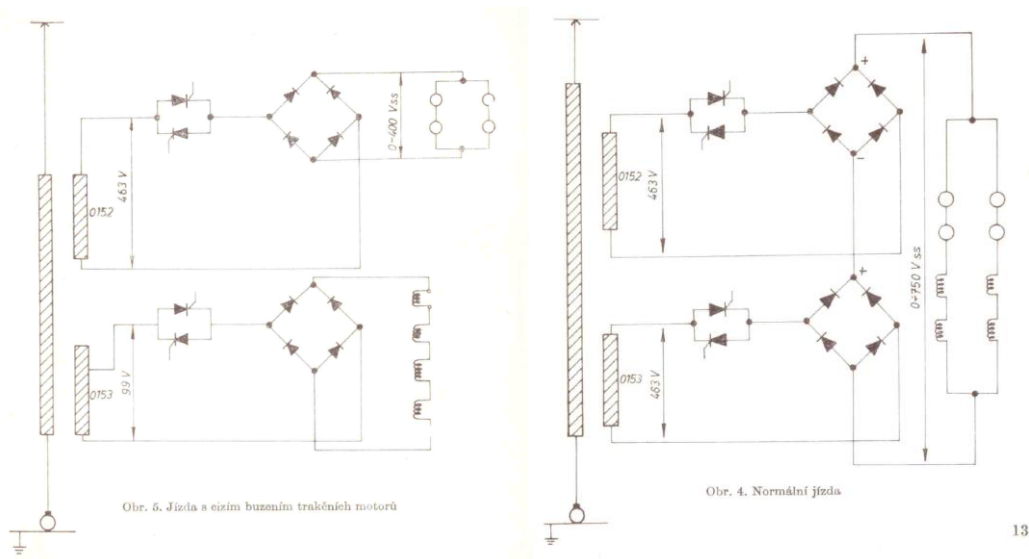


Schéma zapojení trakčních obvodů lokomotivy řady 210, vlevo režim cizí buzení motorů (pro malé rychlosti), vpravo sériové motory (velké rychlosti). Zdroj obrázku [6]

II. Inicializace proměnných výpočetní smyčky

```
% spotřeba energie na zadanem jiznim profilu
% 2023, RN
%parametry jizdy
F_TAZ_POZ = 80000; %
F_BRZ_POZ = 70000; %
S_KONEC = 2000; %delka trajektorie
V_POZ = 60/3.6; %rychlost prechodu na vybeh - "pozadovana" rychlost
SKLON = 0/1000; %sklon trajektorie
%parametry soupravy
M_LOKO = 70000;
M_VAG = 40000;
N_VAG = 5; %osbni ctynrapravove - koeficienty jizdnich odporu
%soucinitele rotacnich hmot - loko 0.2, vagon 0.06
RO_V = 0.06;
RO_L = 0.2;
M_SET = M_LOKO*(1+RO_L) + N_VAG*M_VAG*(1+RO_V);
M = M_LOKO + N_VAG*M_VAG;
%fyzika
G = 9.81;
%prevodovka
%D_KOLO = 1.015;
%N = 4.06;
ZTRATY_PREV = 0.03;
%menice
ZTRATY_TRAK = 0.05;
ZTRATY_BUD = 0.03;
P_POMPŮH = 4000; %ztraty "naprazdno" -> pomocné pohony apod.
%baterie
U0_BAT = 1500;
R_BAT = 0.1;
```