

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** N0715A270017 Konstruování strojů a  
technických zařízení  
**Studijní zaměření:** Konstruování vozidel a manipulačních  
zařízení

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Koncept úspory energie tramvajového vozidla**

**Autor:** Bc. Dominik FINK

**Vedoucí práce:** Doc. Ing. Ladislav NĚMEC CSc.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Dominik FINK**  
Osobní číslo: **S20N0056P**  
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**  
Specializace: **Konstruování vozidel a manipulačních zařízení**  
Téma práce: **Koncept úspory energie tramvajového vozidla**  
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

## Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Zmapování všech energetických ztrát a spotřeb kolejového vozidla a nalezení takových opatření, která by přispěla ke snížení spotřeby energií během provozu vozidla. Cílem práce je nalezení systému opatření, která povedou ke snížení provozních nákladů kolejového vozidla (tramvaje).

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání

Osnova práce

1. Úvod,
2. Teoretické základy energetických ztrát a spotřeb kolejového vozidla
3. Návrh systému opatření ke snížení spotřeby energií během provozu vozidla
4. Zhodnocení výsledků,
5. Závěr

Konzultant Ing. Jiří Vokoun, Škoda Transportation, a.s.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

HELLER, P.: *Kolejová vozidla I.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2017. ISBN 978-80-261-0693-7.  
HELLER, P.: *Kolejová vozidla II.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2017. ISBN 978-80-261-0773-6  
*Podkladové materiály, výkresy, prospekty, katalogy apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.*

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Ladislav Němec, CSc.**  
Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2021**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2022**

L.S.

---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan

---

**Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 16. října 2021

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

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: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, panu Doc. Ing. Ladislavu Němcovi CSc. a konzultantovi mé diplomové práce, panu Ing. Jiřímu Vokounovi ze společnosti Škoda Transportation, a.s. a slečně Ing. Lucii Šimečkové ze společnosti Škoda Transportation, a.s. za jejich postřehy, cenné rady, skvělou spolupráci a celkové odborné vedení práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu, ať už při samotném studiu či psaní této práce. V neposlední řadě bych chtěl vyjádřit svůj dík i všem přátelům a blízkým, kteří mě podporují.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Fink	Jméno Dominik		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Němec CSc.		Jméno Ladislav	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKS			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Koncept úspory energie tramvajového vozidla			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2022
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	99	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	93	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	6
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Diplomová práce obsahuje zmapování všech energetických ztrát a spotřeb tramvajového vozidla a návrh systému opatření, která přispívají ke snížení spotřeby energií a snížení provozních nákladů tramvajového vozidla.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Tramvajové vozidlo, spotřeba energie, úspory energie, snížení provozních nákladů, SWOT analýza, rekuperace energie, kalkulace, návrh alternativ řešení, HVAC jednotka, trakční akumulátor</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Fink	Name Dominik	
<b>FIELD OF STUDY</b>	N0715A270017 Design engineering of machines and technical devices		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Němec CSc.	Name Ladislav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The concept of saving energy of a tram vehicle		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2022
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	99	<b>TEXT PART</b>	93	<b>GRAPHICAL PART</b>	6
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The diploma thesis contains a mapping of all energy losses and consumption of a tram vehicle and a proposal of a system of measures that contribute to the reduction of energy consumption and reduction of operating costs of a tram vehicle.
<b>KEY WORDS</b>	Tram vehicle, energy consumption, energy savings, reduction of operating costs, SWOT analysis, energy recovery, calculation, design of alternative solutions, HVAC unit, traction battery

## Obsah

Obsah.....	8
Seznam použitých symbolů.....	11
Seznam zkratk.....	12
Seznam obrázků.....	13
Seznam tabulek.....	14
Seznam příloh.....	14
Seznam výkresů.....	14
1 Úvod.....	15
1.1 Cíl práce.....	15
2 Teoretické základy o energii.....	16
2.1 Energie.....	16
2.1.1 Mechanická energie.....	16
2.1.2 Elektrická energie.....	17
2.1.3 Vnitřní energie.....	17
2.2 Přeměna energie.....	17
2.3 Účinnost.....	18
2.4 Ztrátová energie.....	18
2.5 Energetická bilance.....	19
3 Energetické ztráty a spotřeba tramvajového vozidla.....	19
3.1 Tramvajové vozidlo a kolejová doprava.....	20
3.1.1 Dvounápravová tramvajová vozidla.....	20
3.1.2 Čtyřnápravová tramvajová vozidla.....	21
3.1.3 Kloubová tramvajová vozidla.....	22
3.1.4 Nízkopodlažní kloubová tramvajová vozidla.....	23
3.2 Srovnání spotřeb energie tramvajového vozidla s ostatními druhy vozidel... 26	
3.2.1 Výhody tramvajové dopravy oproti ostatním složkám MHD.....	26
3.2.2 Nevýhody tramvajových vozidel oproti ostatním složkám MHD.....	27
3.2.3 Srovnání spotřeby energie dopravních prostředků MHD.....	27
3.2.3.1 Koeficient valivého odporu.....	28
3.2.3.2 Účinnost pohonu.....	28
3.2.3.3 Hmotnost.....	29
3.2.3.4 Koeficient odporu vzduchu a čelní plocha.....	29
3.2.3.5 Výsledky srovnání dopravních prostředků.....	30
3.3 Spotřeba energie tramvajového vozidla.....	31
3.3.1 Starší nemodernizované a modernizované tramvaje.....	31



3.3.2	Výsledky studie o rekuperaci energie .....	32
3.3.3	Rozdělení celkové energie tramvajového vozidla .....	33
3.3.4	Trakční energie .....	34
3.3.4.1	Pohonný systém tramvajového vozidla .....	34
3.3.4.2	Brzdňý systém tramvajového vozidla.....	35
3.3.5	Netrakční energie.....	36
3.3.5.1	Osvětlení .....	37
3.3.5.2	Informační systémy.....	37
3.3.5.3	Kamerové systémy.....	38
3.3.5.4	Terminály na jízdenky .....	38
3.3.5.5	HVAC jednotka .....	39
3.3.5.6	Systém otevírání a zavírání dveří.....	44
3.3.5.7	Výsledky studie o netrakčních systémech .....	46
4	Návrh systému opatření ke snížení spotřeby energií během provozu vozidla.....	48
4.1	Klasifikace typových zástupců tramvajových vozidel .....	49
4.2	Náklady na energie tramvajového vozidla .....	49
4.2.1	Kalkulace roční spotřebované energie .....	50
4.2.2	Kalkulace průměrné roční spotřebované energie dílčích částí vozidla.....	51
4.2.3	Kalkulace ročních nákladů na elektrickou energii.....	52
4.3	Možnosti opatření ke snížení spotřeby energií .....	53
4.3.1	Snížení celkové hmotnosti vozidla .....	53
4.3.2	Rekuperace energie.....	54
4.3.2.1	Tramvaj Bombardier PRIMOVE.....	56
4.3.2.2	Elektrické akumulátory.....	57
4.3.3	Opatření proti úniku tepla ze salonu cestujících.....	60
4.3.3.1	Změna u ventilátorů .....	60
4.3.3.2	Tlaková stěna .....	60
4.3.3.3	Senzor zavírající dveře.....	61
4.3.3.4	Materiály s lepšími izolačními vlastnostmi než stávající .....	61
4.4	Návrh alternativ řešení.....	70
4.4.1	Trakční energie .....	70
4.4.1.1	Varianta A - Trakční baterie na vozidle.....	70
4.4.1.2	Varianta B – Stacionární baterie pro elektrickou trakci .....	71
4.4.1.3	Varianta C – Kombinace trakční a stacionární baterie .....	72
4.4.2	Netrakční energie.....	73
4.4.2.1	Varianta A.....	73
4.4.2.2	Varianta B .....	76

4.4.2.3	Varianta C .....	81
4.5	Hodnocení variant řešení .....	82
4.5.1	Trakční energie .....	82
4.5.1.1	SWOT hodnocení .....	82
4.5.1.2	Hodnocení rizikových, silných a slabých stránek variant.....	84
4.5.2	Netrakční energie.....	84
4.5.2.1	SWOT hodnocení .....	84
4.5.2.2	Hodnocení rizikových, silných a slabých stránek variant.....	86
4.6	Nejvhodnější systém opatření ke snížení spotřeby energie .....	87
5	Závěr .....	89
Zdroje	.....	92
Použitá literatura.....		92
Online .....		92
PŘÍLOHA č. 1 .....		i
PŘÍLOHA č. 2 .....		iii
PŘÍLOHA č. 3 .....		v

## Seznam použitých symbolů

Veličina	Jednotky	Název
$E$	[J]	Energie
$E_k$	[J]	Kinetická energie
$E_h$	[J]	Potenciální energie
$E_e$	[J]	Energie pružnosti
$E_{el}$	[kWh]	Elektrická energie
$U$	[J]	Vnitřní energie tělesa
$\eta$	[-]	Účinnost
$P$	[W]	Výkon
$P_p$	[W]	Příkon
$U$	[V]	Napětí
$I$	[A]	Proud
$t$	[s]	Čas
$m$	[kg, t]	Hmotnost
$v$	[m/s]	Rychlost
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Gravitační zrychlení
$h$	[m]	Výška nad uvažovanou hladinou
$E_{přijátá}, E_{odevzdaná}$	[J]	Soustavou přijatá / odevzdaná energie
$E_{ztrátová}$	[J]	Ztrátová energie
$s$	[km]	Dráha
$C_d$	[-]	Koeficient odporu vzduchu
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Čelní plocha vozidla
$E_n$	[W/m <sup>2</sup> ]	Ekvivalentní sluneční záření
$C$	[F]	Kapacita
$\alpha$	[W/m <sup>2</sup> *K]	Součinitel přestupu tepla
$Q_{zc}$	[W]	Tepelný zisk z cestujících
$Q_{zs}$	[W]	Tepelný zisk ze slunečního světla
$\lambda$	[W/m*K]	Součinitel tepelné vodivosti
$k_j$	[W/m <sup>2</sup> *K]	Součinitel prostupu tepla materiálem
$a, b$	[mm]	Rozměry komponenty
$n$	[-]	Počet
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha komponenty
$k_{jb}$	[W/m <sup>2</sup> *K]	Součinitel prostupu tepla bočnicí
$k_{jm}$	[W/m <sup>2</sup> *K]	Součinitel prostupu tepla tepelným mostem
$k_{jbc}$	[W/m <sup>2</sup> *K]	Průměrný součinitel prostupu tepla bočnicí
$t$	[mm]	Tloušťka komponenty
$Q_i$	[W]	Tepelné ztráty infiltrací
$Q_v$	[W]	Tepelné ztráty větráním
$t_i$	[°C]	Teplota v interiéru (ve vozidle)
$t_e$	[°C]	Teplota v exteriéru (mimo vozidlo)
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Objem komponenty
$k$	[-]	Koeficient bezpečnosti
$Re$	[MPa]	Mez kluzu materiálu
$\sigma$	[MPa]	Napětí
$F$	[N]	Síla
$\varepsilon$	[-]	Poměrná deformace

## Seznam zkratek

Zkratka	Název
atd.	A tak dále
tzn.	To znamená
kin.	Kinetická
<i>J</i>	Joule
<i>Ws</i>	Wattsekunda
<i>kWh</i>	Kilowatthodina
<i>W</i>	Watt
MHD	Městská hromadná doprava
ZZE	Zákon zachování energie
Např.	Například
<i>mph</i>	Míle za hodinu
<i>kWh/l</i>	Kilowatthodina na 1 litr paliva
<i>t</i>	Tuna
<i>kg</i>	Kilogram
<i>km</i>	Kilometr
<i>Kč</i>	Korun českých
FM TUL	Fakulta mechatroniky Technické univerzity v Liberci
ČSN	Česká státní norma
ČR	Česká republika
Tzv.	Tak zvaný
<i>m. n. m.</i>	Metr nad mořem
HVAC	Heat, ventilation and air condition unite – jednotka zodpovědná za teplotu, chlazení a klimatizaci vozidla
USA	Spojené státy americké
UV	Ultrafialové
Rel.	Relativní
PMMA	Polymethylmethakrylát
RNV	Dopravce Rhein-Neckar-Verkehr GmbH
SWOT	Analýza silných a slabých stránek, příležitostí a hrozeb
Prům.	Průměrné

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Ilustrace principu energie [9].....	16
Obrázek 2: Model Sankeyova diagramu [8] .....	19
Obrázek 3: Dvounápravové tramvajové vozidlo oboustranné [14] .....	20
Obrázek 4: Čtyřnápravové tramvajové vozidlo T3 [15] .....	21
Obrázek 5: Srovnání uložení na Jakobsův podvozek a na dva běžné podvozky [2].....	22
Obrázek 6 - Srovnání nápravového (vlevo) a nápravnicového podvozku (vpravo) [22].....	23
Obrázek 7: Nejčastější koncepce vícečlánekových tramvajových vozidel [3].....	24
Obrázek 8: Srovnání tramvajového vozidla 14T a tramvajového vozidla 15T [16].....	25
Obrázek 9: 3D model tramvaje 14T .....	25
Obrázek 10: Schéma elektro-výzbroje tramvajového vozidla [30].....	26
Obrázek 11: Parametry srovnávaných dopravních prostředků [10].....	28
Obrázek 12: Výsledky studie - spotřeba energie jednotlivých dopravních prostředků [10]....	30
Obrázek 13: Podíl zmařené a vrácené energie při brzdění vozidla .....	33
Obrázek 14 - Příklad řešení pohonu podvozku pomocí 1 motoru pro každou nápravu [2] .....	35
Obrázek 15: Příklad informačního panelu s DOT-LED technologií [18].....	38
Obrázek 16: Dotykový barevný terminál pro nákup jízdenek [19].....	39
Obrázek 17: Regulační křivka pro vozidla kategorie B [31] .....	40
Obrázek 18: Ukázka sestavy HVAC jednotky [21] .....	40
Obrázek 19: Ukázka distribuce vzduchu v salónku pro cestující [21].....	41
Obrázek 20: Ukázka vytápění vnitřních prostor vozu shora [21] .....	42
Obrázek 21: Ukázka vytápění vnitřní prostor vozu bočnicemi [21] .....	42
Obrázek 22: Tramvaje s různým typem dveří [26] .....	45
Obrázek 23: Podíl trakční a netrakční energie tramvajového vozidla v létě.....	47
Obrázek 24: Podíl trakční a netrakční energie tramvajového vozidla v zimě.....	47
Obrázek 25: Podíl trakční a netrakční energie tramvajového vozidla bez HVAC jednotky....	48
Obrázek 26: Vývoj ceny elektrické energie u společnosti ČEZ.....	49
Obrázek 27: Dělení spotřebované energie tramvajovým vozidlem .....	52
Obrázek 28: Průměrné roční náklady na elektrickou energii .....	52
Obrázek 29: Průměrné roční náklady na elektrickou energii vztaženou na 1 kg hmotnosti ....	53
Obrázek 30: Závislost nákladů na elektrickou energii na hmotnosti vozidla .....	54
Obrázek 31: Energetická bilance jízdy vozidla v závislosti na čase a rychlosti [27].....	55
Obrázek 32: Tramvaj Bombardier PRIMOVE [24] .....	56
Obrázek 33: Bateriový zásobník Bombardier PRIMOVE [24] .....	57
Obrázek 34: Struktura článku superkondenzátoru [28].....	58
Obrázek 35: Zapojení stacionárního akumulátoru pro elektrickou trakci [28] .....	59
Obrázek 36: Uvažovaná tramvaj 14T.....	61
Obrázek 37: Skladba vrstev materiálů bočnic.....	63
Obrázek 38: Skladba vrstev materiálů střechy .....	64
Obrázek 39: Schématický rozptyl rekuperované energie u varianty A.....	71
Obrázek 40: Schématický rozptyl rekuperované energie u varianty B .....	72
Obrázek 41: Schématický rozptyl rekuperované energie u varianty C .....	73
Obrázek 42: Schéma navrhovaného systému opatření se schématem rekuperované energie..	87
Obrázek 43: Srovnání celkových ročních nákladů původní a navržené varianty .....	91

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Příklady přeměn energie .....	18
Tabulka 2: Srovnání spotřeby energie automobilu, autobusu a tramvaje [10].....	30
Tabulka 3: Rozdělení celkové energie tramvajového vozidla .....	34
Tabulka 4: Stanovení klimatické zóny – zima [31].....	46
Tabulka 5: Stanovení klimatické zóny – léto [31] .....	46
Tabulka 6: Technické parametry tramvají T3 a 14T .....	49
Tabulka 7: Kalkulace průměrné roční spotřeby energie .....	50
Tabulka 8: Kalkulace průměrné roční spotřebované energie dílčích částí vozidla.....	51
Tabulka 9: Parametry elektrických akumulátorů [28].....	57
Tabulka 10: Charakteristické parametry vozidel [28].....	58
Tabulka 11: Vlastnosti materiálů bočnic.....	63
Tabulka 12: Vlastnosti materiálů podlahy .....	64
Tabulka 13: Vlastnosti materiálů střechy .....	65
Tabulka 14: Vlastnosti materiálů oken a dveří.....	65
Tabulka 15: Hodnoty ztrát prostupem tepla .....	66
Tabulka 16: Vybrané vlastnosti skla .....	68
Tabulka 17: Vybrané vlastnosti typů plexiskel .....	69
Tabulka 18: Vlastnosti materiálů oken a dveří.....	74
Tabulka 19: Hodnoty ztrát prostupem tepla .....	74
Tabulka 20: Vybrané vlastnosti kompozitu z uhlíkových vláken a konstrukční oceli.....	76
Tabulka 21: Vlastnosti materiálů bočnic.....	79
Tabulka 22: Vlastnosti materiálů střechy .....	80
Tabulka 23: Hodnoty ztrát prostupem tepla .....	80
Tabulka 24: SWOT hodnocení trakčních variant řešení .....	83
Tabulka 25: Diagram hodnocení trakčních variant řešení .....	83
Tabulka 26: Hodnocení rizik, výhod a nevýhod trakčních variant řešení.....	84
Tabulka 27: SWOT hodnocení netrakčních variant řešení .....	85
Tabulka 28: Diagram hodnocení netrakčních variant řešení.....	85
Tabulka 29: Hodnocení rizik, výhod a nevýhod netrakčních variant řešení.....	86
Tabulka 30: Náklady původního a navrženého řešení .....	88

## Seznam příloh

Zde jsou vypsány přílohy, které jsou volně vloženy k předkládané práci.

PŘÍLOHA č. 1 – Grafy úspor hmotnosti u okenních a dveřních komponent, prům. ročních nákladů na trakční energii a potřebného výkonu HVAC jednotek varianty A

PŘÍLOHA č. 2 – Grafy úspor hmotnosti u komponent skeletu vozidla, prům. ročních nákladů na trakční energii a potřebného výkonu HVAC jednotek varianty B

PŘÍLOHA č. 3 – Grafy úspor hmotnosti u okenních a dveřních komponent a komponent skeletu vozidla, prům. ročních nákladů na trakční energii a potřebného výkonu HVAC jednotek varianty C

## Seznam výkresů

K předkládané práci nejsou přiloženy žádné výkresy.

# 1 Úvod

V ideálních modelech a představách často předpokládáme, že nedochází k vůbec žádným energetickým ztrátám. Často je to kvůli zjednodušení výpočtu či odhadu, či proto, že nejsme dopředu schopni odhadnout, jaké ztráty energie v uvažované aplikaci budou.

Takto sestavené ideální modely však v realitě neodpovídají skutečnosti, protože energetické ztráty jsou nedílnou součástí našeho světa. Proto je třeba s nimi počítat už od samotného začátku.

Cílem veškerých lidských snah je tuto nechtěnou ztrátovou energii minimalizovat, ať už jde o jakoukoli aplikaci. Samozřejmě musíme mít na paměti, že ztrátové energie není možné se zcela zbavit, vždy bude k nějakým ztrátám docházet. Nicméně s vývojem nových technologií a poznatků jsme schopni podíl ztrátové energie snižovat.

Vysoký podíl ztrátové energie bývá velmi často důvodem, kvůli kterému nedochází k širšímu využití nově vznikajících aplikací. Tyto nově vymyšlené aplikace jsou proto buď odsouzeny k zániku, nebo je třeba na nich zapracovat a vymyslet zlepšení, které povede ke snížení ztrátové energie na společností přijatelnou hodnotu a tím i jejímu hojnějšímu využití.

Výjimkou není ani dopravní průmysl, kde jsou kladeny velmi vysoké požadavky na snížení energetických ztrát. Díky těmto neustále se zvyšujícím nárokům přicházíme se zlepšeními, které se v minulosti zdály být nedosažitelné.

## 1.1 Cíl práce

Cílem předkládané práce je v první fázi detailně zmapovat výskyt největších energetických ztrát kolejového vozidla a stejně tak jeho spotřeb během provozu a odhalit tak systémy vozidla, které jsou při své funkci nejméně efektivní a vykazují největší podíl ztrátové energie. Uvažovaným kolejovým vozidlem je tramvajové vozidlo.

Další část práce si klade za cíl tyto nalezené „problémové“ systémy vozidla zanalyzovat a posoudit, ve kterých z nich je v současnosti největší prostor pro zlepšení a následně vymyslet a předložit zadavateli práce několik variant opatření, která povedou ke snížení spotřeby energie vozidla.

V poslední části práce budou navržená opatření rozdělena do dvou skupin – opatření ke snížení spotřeby trakční energie vozidla a opatření ke snížení spotřeby netrakční energie vozidla. Pro každou tuto skupinu budou navrženy vždy 3 varianty řešení, která budou následně na základě kvalifikovaného odhadu mezi sebou porovnávána. V rámci 2 skupin navržených variant budou tyto varianty následně zhodnoceny a bude vybrána vždy ta nejvhodnější z navrhovaných 3 variant.

Výsledkem hodnocení variant budou tedy 2 varianty opatření – každá nejlepší z jedné oblasti energie. Tyto varianty budou následně sloučeny dohromady a budou prohlášeny za navrhovaný komplexní systém opatření ke snížení spotřeby energie tramvajového vozidla, který povede k úspoře energie tramvajového vozidla a který bude doporučen zadavateli práce.

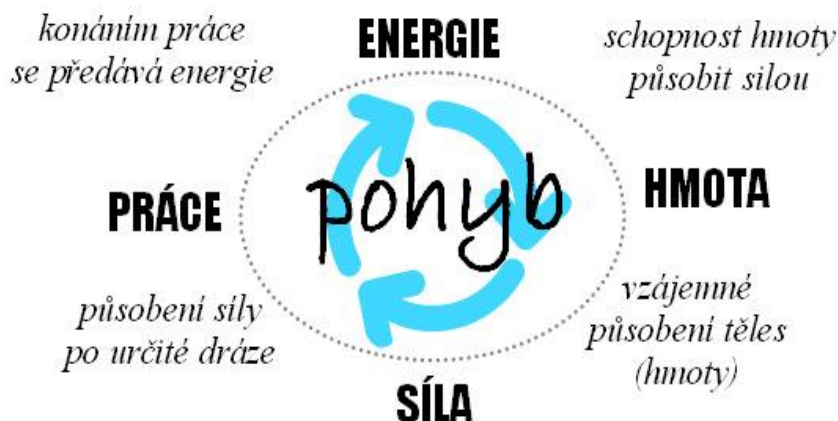
## 2 Teoretické základy o energii

### 2.1 Energie

Energie je skalární fyzikální veličina, která vyjadřuje schopnost hmoty konat práci. Energie může mít různé formy, mezi kterými může přecházet z jedné formy na druhou a zpět aniž by docházelo k jakékoli ztrátě. Energii převážně značíme jako  $E$  a indexujeme, abychom rozeznali jednotlivé formy. Její základní jednotkou pro všechny formy energie je  $1 J$ . Další velmi často využívanou jednotkou je  $1 Ws$  respektive její odvozená jednotka  $kWh$ , tato jednotka je s Joulem ekvivalentní. Formy energie, které rozeznáváme, lze rozdělit podle druhu síly, která ji způsobuje, nebo podle zdroje, který energii vydává.

- Podle působící síly
  - Mechanická energie
  - Elektrická energie
  - Magnetická energie
  - Energie záření
  - Energie vlnění
  - Vnitřní energie
- Podle zdroje energie
  - Sluneční energie
  - Vodní energie
  - Větrná energie
  - Parní energie
  - Jaderná energie

Dále budou detailněji zpracovány nedůležitější vybrané formy energie. [4]



Obrázek 1: Ilustrace principu energie [9]

#### 2.1.1 Mechanická energie

Tento typ energie vyjadřuje míru schopnosti tělesa konat mechanickou práci, tzn. působit silou na jiné těleso a posouvat jej po dané dráze. Mechanickou energii tedy mají:

- Tělesa, která se vzájemně pohybují. V takovém případě hovoříme o kinetické energii tělesa  $E_k$ , kterou spočteme jako:  $E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$



- Tělesa, která jsou v silových polích jiných těles. V takovém případě je řeč o potenciální energii tělesa  $E_h$ , kterou spočteme jako:  $E_h = m \cdot g \cdot h$
- Pružná tělesa, která jsou stlačena nebo natažena. V tomto případě jde o potenciální energii pružnou  $E_e$ .

V izolované mechanické soustavě konáním mechanické práce přechází kinetická forma energie na potenciální a naopak. Tento jev popsán **zákonem o zachování mechanické energie**. V tomto případě je důležité si opět uvědomit fakt, že uvažujeme izolovanou soustavu, kdy tedy není možná výměna energie s okolím, která v praxi samozřejmě nastává vlivem třecích ztrát, které vedou ke generování tepla, které je sááno do okolí. [5]

### 2.1.2 Elektrická energie

Elektrická energie  $E_{el}$  vyjadřuje schopnost elektromagnetického pole konat elektrickou práci. Čím větší energii elektromagnetické pole má, tím více práce je schopno vykonat.

$$E_{el} = U \cdot I \cdot t$$

Elektrickou energii je možné měnit na mechanickou energii, tepelnou energii, případně světelnou energii (jiná forma elektromagnetického pole), atd. [6]

### 2.1.3 Vnitřní energie

Vnitřní energie  $U$  nebo též termodynamická energie soustavy je veličina vyjadřující v makroskopickém popisu sumu energií všech částic, z nichž se těleso skládá. Nejvýznamnější složky jsou kinetická a potenciální energie částic tělesa, elektrická (přitažlivost částic) či chemická energie (atomové vazby). Kinetická a potenciální energie, kterou má soustava jako celek, se nezapočítává do vnitřní energie.

Vnitřní energie ovlivňuje vlastnosti, skupenství a stav látky. Například teplota tělesa je závislá na velikosti kinetické energie částic tělesa. Čím vyšší mají tyto částice kin. energii, tím větší má těleso teplotu.

Vnitřní energii soustavy lze změnit:

- Konáním práce – Při konání práce dochází působením vnějších sil ke změně objemu nebo tlaku soustavy.
- Tepelnou výměnou – Změnou teploty dochází ke změně kinetické energie částic. [7]

## 2.2 Přeměna energie

Podle fyzikálních zákonů existuje několik tvrzení o energii. Tím nejdůležitějším je **zákon zachování energie**, který říká, že energie jako taková se nikam nemůže ztratit, ale přeměňuje se na jiné formy energie. Tedy vždy platí rovnost energetické bilance, která nám říká, že energie dodaná soustavě se vždy rovná energii opouštějící soustavu. Jinými slovy o energii jako takovou nelze přijít. Stejně tak není možné vytvořit energii z ničeho.

V praxi se však stává, že dodaná energie se nerovná vykonané práci soustavy. To je zapříčiněno tím, že energie je schopná přecházet z jedné formy do jiné. Fakt, že se energie může přeměňovat z jedné formy na druhou a opačně, nám umožňuje široké využití v různých aplikacích, kdy se těchto přeměn využívá cíleně.

Druhou stranou mince je, že tato přeměna probíhá i v aplikacích, kde to není žádané. Tento jev bohužel nelze odstranit, ale lze jej minimalizovat. Ve snaze minimalizovat tento podíl nechtěné přeměněné energie je třeba zvyšovat účinnost soustavy. [4]

Tabulka 1: Příklady přeměn energie

Forma	Mechanická	Elektrická	Tepelná	Chemická	Zářivá
Mechanická	Vodní turbíny	Alternátory	Tření	-	-
Elektrická	Elektromotory	Transformátory	Elektrická topidla	Elektrolýza	Výbojky
Tepelná	Tepelné stroje	Termočlánky	Radiátory	-	Tepelné zářiče
Chemická	Svaly, výbušniny	Galvanické články	Hoření	Chemické reakce	Fluorescence
Zářivá	-	Fotočlánky	Solární kolektory	Fotosyntéza	Lasery

Tabulka 1 ukazuje příklady přeměn jednoho druhu energie na druhý, kdy výchozí formu energie vždy představuje řádek a sloupec představuje přeměněný druh energie.

## 2.3 Účinnost

Účinnost soustavy je rovněž fyzikální veličina, která udává poměr mezi vykonanou prací  $P$  soustavy ku množství energie soustavě dodané. Soustavě dodaná energie se nazývá příkon  $P_p$ .

$$\eta = \frac{P}{P_p}$$

Jelikož je energie dodaná soustavě vždy větší, než energie tzv. užitečná, tedy energie, která je využita na práci soustavy, nabývá účinnost hodnot vždy menších než 1 a jde tedy o bezrozměrnou veličinu. Velmi často se proto udává v procentech.

Z toho tedy plyne, že čím více užitečné energie jsme schopni získat z dodané energie, tím vyšší je hodnota účinnosti a tím menší je tedy i podíl energie, která nevykoná žádnou práci.

Hlavním cílem úspory energie by mělo tedy být zvyšování účinnosti soustavy, a tedy snižování poměru neúčinné energie, která se přeměňuje na nevyužitelnou formu energie. [8]

## 2.4 Ztrátová energie

Přestože energii nelze „zničit“ nebo „ztratit“ se setkáváme s termínem energetické ztráty. Tento pojem je na první pohled dost zavádějící. Jde o to, že ve všech reálných aplikacích dochází k přeměně nějaké části dodávané energie na jinou formu, kterou bývá nejčastěji teplo, a tato přeměna je nežádoucí.

Problém je v tom, že tuto přeměněnou energii nejsme v dané aplikaci dále schopni nějak využít, a proto o ní hovoříme jako o ztrátové energii. Nejde tedy o to, že by se někam ztratila, ale že nám nepřináší žádný užitek.

Cílem každého návrhu by měla být minimalizace ztrátové energie, tedy zvýšení účinnosti systému.

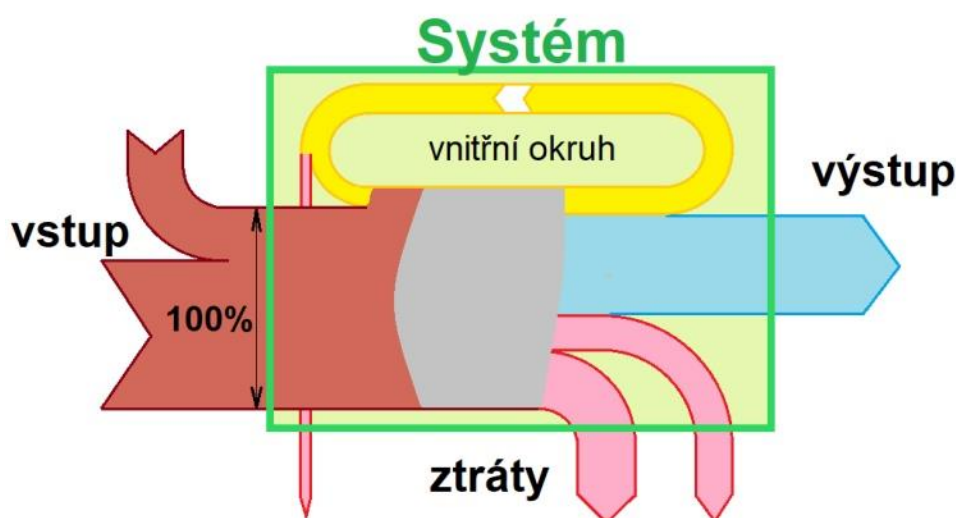
## 2.5 Energetická bilance

Jak již bylo zmíněno dříve, ze ZZE plyne, že energie samovolně nevzniká ani nemůže být zničena. Jinou interpretaci tohoto zákona představuje bilanční rovnice energie.

Pod pojmem energetická bilance rozumíme rovnici, na jejíž jedné straně je suma všech energií vstupujících do soustavy a na druhé straně rovnice se nachází suma všech energií vystupujících ze soustavy. Aby nastala rovnost na obou stranách rovnice, je třeba vždy započítat i energetické ztráty systému.

$$\sum E_{přijata} = \sum E_{odevzdana} + \sum E_{ztratova}$$

Velmi názorné a časté zobrazení v technické praxi účinnosti, a tedy i energetické bilance je pomocí Sankeyova bilančního diagramu. Jde o grafické znázornění složení a časového průběhu stavu dané veličiny v soustavě. [8]



Obrázek 2: Model Sankeyova diagramu [8]

Z obrázku 2 je evidentní, že energie dodávaná systému je rovna součtu energií ze systému vystupujících. V tomto příkladu jde o sumu 2 různých forem ztrátové energie a výstupní energie, která byla využita na zamýšlenou práci systému.

## 3 Energetické ztráty a spotřeba tramvajového vozidla

Dříve než se pustíme do samotné analýzy spotřeby energie tramvajových vozidel, je nejprve potřeba seznámit se lépe s pojmy v oblasti kolejových vozidel a speciálně z oblasti tramvajových vozidel.

V následujících kapitolách bude proto dále detailněji zpracováno, ze kterých hlavních částí a systémů se tramvajové vozidlo skládá. To nám poslouží k tomu, abychom byli schopni rozdělit celkovou dodávanou energii do skupin podle toho, jakou část celkové dodané energie dané systémy spotřebují.

Také bude provedeno srovnání dopravních prostředků MHD z hlediska spotřeby energie, abychom pochopili, jak na tom vlastně tramvaj, v porovnání s ostatními konkurenty z hlediska spotřeby energie, je.

### 3.1 Tramvajové vozidlo a kolejová doprava

Tramvajová doprava je nezpochybnitelně jednou z nejdůležitějších složek městské hromadné dopravy (MHD). Doprava využívající městské a příměstské spoje nabývá v současnosti na hodnotě a to především kvůli vytíženosti kapacit silničních komunikací. Ve městech nad 100 000 obyvatel je proto velmi výhodné využít ve větší míře dopravní prostředky MHD, které představují efektivní způsob, jak se s tímto negativním trendem na pozemních komunikacích vyrovnat.

Kolejová doprava oproti automobilové či silniční dopravě poskytuje mnoho výhod, které jsou detailněji rozebrány v následujících kapitolách, které jsou věnovány právě srovnání tramvajové dopravy s ostatními složkami dopravní infrastruktury, jejich výhodám a nevýhodám.

Z největších výhod kolejové dopravy můžeme již nyní vypíchnout například výhody pramenící v pohybu po vlastní dráze, díky čemuž je prakticky nezávislá na ostatních dopravních prostředcích. Z tohoto důvodu představuje tento typ dopravy velký potenciál na splnění požadavků jako je například důraz na rychlý transport, efektivnost dopravy, jízdní komfort a bezpečí přepravovaných osob. Z mechanického hlediska je velkou předností kolejových vozidel pohyb kola kolejového vozidla po kolejové trati. Ten je velmi příznivý, neboť zde dochází ke styku kovu s kovem, při kterém vzniká nízký valivý odpor. [3]

Bezkonkurenčně nejefektivnější typ kolejové dopravy představuje metro, tedy zavedení kolejové dopravy pod zem. Následuje tramvajová doprava, která představuje také velmi efektivní způsobem přepravy obyvatel především oproti ostatním složkám MHD.

Dříve než se pustíme do samotného mapování energetické bilance tramvajových vozidel, je nutné se nejprve seznámit blíže s tím, co pojem tramvaj představuje. Proto je v následujících kapitolách nastíněn jejich vývoj od raných typů tramvajových vozů až po nejnovější koncepce. [25]

#### 3.1.1 Dvounápravová tramvajová vozidla

Jedním z prvních řešení tramvajových vozidel bylo řešení skládající se ze dvou jednonápravových podvozků s vysokopodlažním salónem pro cestující. Od této koncepce se v současné době již upustilo, takže se takovýmto typem tramvajových vozů můžeme setkat pouze ve zvláštních případech jako turistické atrakce či jako muzejní exponáty.



Obrázek 3: Dvounápravové tramvajové vozidlo oboustranné [14]

Hlavními poznávací znaky dvounápravových tramvajových vozidel byla ocelová nýtovaná nosná konstrukce, na níž navazovala dřevěná konstrukce čelnic, bočnic a střechy. Trakční jednotka byla umístěna na střeše vozidla.

Tato koncepce byla velmi spolehlivá, a proto byla i dlouhá léta používána. Z hlediska jízdních vlastností však vykazovala špatnou průjezdnost oblouky, komfort cestujících začal být nedostačující stejně tak jako přepravní kapacita. [25]

Vůz byl navržen tak, aby především zajišťoval přepravu cestujících, a tudíž nebyl vybaven technologickým zařízením pro úpravu vzduchu ani jeho ohřev. Výměna vzduchu v salonu cestujících byla zajištěna přirozeným větráním čerstvého venkovního vzduchu zásuvnými okny a v kabině řidiče výklopnými. [3]

Ukázku dvounápravového tramvajového vozidla můžeme vidět na obrázku 3.

### 3.1.2 Čtyřnápravová tramvajová vozidla

Dvounápravové vozy byly postupně nahrazeny novou koncepcí a tou byla čtyřnápravová tramvajová vozidla, jejichž nejznámějším příkladem jsou tramvaje T3, kterou můžeme vidět na obrázku 4.

Velkou výhodou této koncepce byla taková úprava podvozku, že umožňoval natáčení do oblouků (otočný podvozek). Díky této modernizaci podvozku se tak výrazně zlepšily dynamické jízdní vlastnosti, především průjezdnost oblouky a snazší řízení.

Zlepšení jízdních vlastností neměla na svědomí pouze modernizace podvozku, ale také se na tom velkou měrou podílela úprava hrubé stavby, která již nebyla dřevěná, nýbrž se v ní začali uplatňovat slitiny lehkých kovů, především hliníkové slitiny. Takovou úpravou skříně se dosáhlo odlehčení vozidla při zvýšení tuhosti skříně a celkovému zvětšení salonu, který pojal více cestujících.

Tato koncepce byla vyráběna v 70. – 90. letech minulého století a je dodnes hodně využívána, kdy i dnes můžeme vidět například v Plzni některé zástupce tramvaje T3, které představují různě modifikovaný a modernizovaný původní model. Tramvaje T3 jsou dodnes ceněny především kvůli konstrukční jednoduchosti, vysoké spolehlivosti a snadné údržbě.

Vlivem zvyšujících se požadavků na pohodlný nástup a výstup cestujících (zejména matek s kočárky a lidí na invalidních vozících), se tramvaje T3 v posledních fázích výroby dočkaly úpravy na částečně nízkopodlažní tramvaj. [25]



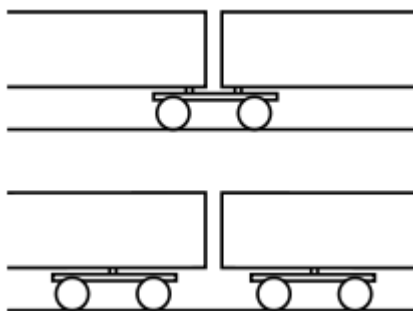
Obrázek 4: Čtyřnápravové tramvajové vozidlo T3 [15]

Tramvaje typu T3 byly vybavovány konvekčními (odporovými) topidly umístěnými pod sedadly cestujících a v kabině řidiče pod řídicím pultem, nicméně celkový topný výkon nepokryval tepelné ztráty tramvaje. Výměna vzduchu byla nadále zajišťována přirozeným větráním pomocí posuvných oken, které byly nově doplněny o výklopné střešní kryty. [3]

### 3.1.3 Kloubová tramvajová vozidla

Na rostoucí požadavky na vyšší přepravní kapacitu tramvají reagoval vývoj tramvají tak, že přišel s kloubovou koncepcí vozidel. Do této doby se vždy tramvajová vozidla konstruovala jako samostatně fungující spřahovatelný vagón, který plnil funkci celého vozidla. Zpočátku se tedy problém se zvýšením přepravní kapacity řešil tak, že se spřáhly dva vozy přes (spřáhlo) přípojný kloub, což se ukázalo jako neefektivní, protože u obousměrných tramvají při spřážení dvou vozidel nastal problém, s tím, že byl přepravní prostor zmenšen o nevyužitě 3 kabiny řidiče.

Proto byla vymyšlena kloubová koncepce vysokopodlažních vozidel, která tento výše zmíněný problém odstranila a přinesla tak kýžené navýšení přepravní kapacity. Spojení více článků pomocí kloubu zakrytého měchy muselo být navrženo tak, aby mělo 2 stupně volnosti, díky kterým umožňuje kloub natáčení ve směru zatáček i ve směru stoupání. V současné době se nejvíce objevují 2 řešení kloubu. Prvním je kloub umístěn mezi 2 podvozky (spodní část obrázku 5) nebo druhé řešení, kdy je kloub umístěn nad samostatný podvozek (Jakobsův podvozek, vrchní část obrázku 5).



Obrázek 5: Srovnání uložení na Jakobsův podvozek a na dva běžné podvozky [2]

Řešení s Jakobsovým podvozkiem představuje sice konstrukčně složitější variantu, nicméně i přes to jde o u moderních nízkopodlažních tramvají hojně používané, jelikož dochází ke snížení hmotnosti vozidla tím, že je využit pouze 1 podvozek nesoucí 2 skříně místo 2 samostatných podvozků. Snížení hmotnosti vozidla má příznivý vliv na jízdní vlastnosti vozidla, ale také na samotnou životnost kolejí. Příkladem vysokopodlažních tramvají je typ K2, který vychází ze zmiňovaného typu T3 a který je využit i v ČR. [3]

Tramvaje těchto koncepcí podobně jako T3 nebyly původně vybaveny klimatizační jednotkou ani jednotkou zajišťující výměnu vzduchu. Oproti starší koncepci byla u této zmenšena posuvná okénka z důvodu zvýšení bezpečnosti cestujících.

Novější kloubové tramvajové vozy (rekonstruované tramvaje KT8) byly vybaveny kaloriférem využívajícím odpadní teplo trakční jednotky, který vytápěl kabinu řidiče. Ten byl následně u novějších typů dále nahrazen HVAC jednotkou. Tato klimatizační jednotka o chladicím výkonu 4 kW a topném 4 kW, která byla umístěna nad kabinou řidiče je tvořena kontejnerem, v němž se nachází sání čerstvého vzduchu, filtr, radiální ventilátory, výparník chladicího oběhu a topný blok. Součástí kontejneru je také kompresor a řídicí jednotka. Kontejner je chlazen kondenzátorem, který je umístěn na střeše vozu. [25]



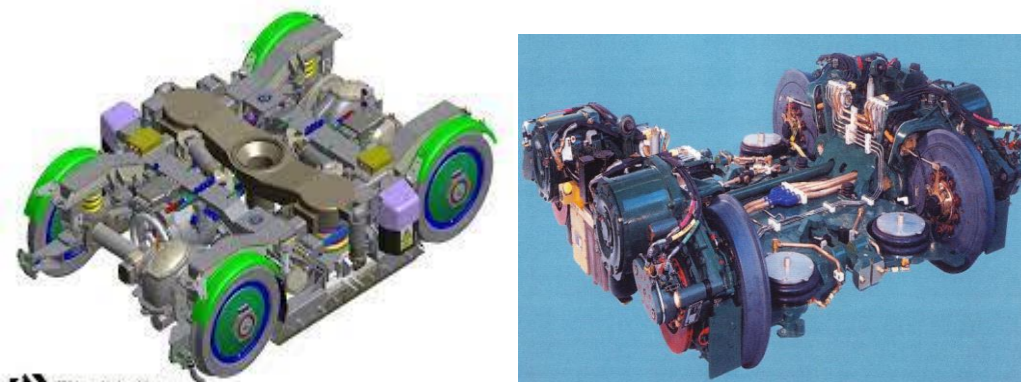
### 3.1.4 Nízkopodlažní kloubová tramvajová vozidla

V současné době je kladen vysoký důraz na co nejsnazší a co nejrychlejší nástup a výstup cestujících, proto stejně jako v případě předchozích koncepcí je požadováno, aby tramvajové vozidlo bylo nízkopodlažní. Tento trend byl inspirován metrem, kde probíhá výměna cestujících velmi rychle právě díky shodné výšce nástupiště a podlahy ve vozidle.

Jenomže u tramvají na rozdíl od metra vznikají problémy, které u metra není potřeba řešit, protože nástupiště tramvajových linek nejsou umístěny vysoko nad úrovní kolejiště jako v metru. Proto vznikají při návrhu nízkopodlažního podvozku u tramvajových vozidel rozměrová omezení, která je velmi obtížné vyřešit. Proto bylo třeba přijít s novou koncepcí vozidel, které přejdou z vysokopodlažních tramvají k nízkopodlažním i v případě kloubových vozidel.

Tento přechod však není konstrukčně jednoduchý, proto se odehrával postupně, kdy nejprve vznikly koncepce částečně nízkopodlažní, které používaly stále staré řešení podvozků, kdy zbytek podlahy mimo uložení podvozků byl snížen a v místě uložení podvozku ke skříni přechází pomocí nakloněné roviny podlaha opět do vyšší polohy.

Příklady dvou řešení je možno vidět na obrázku 6, kde jsou uvedeni zástupci částečně nízkopodlažního podvozku s klasickou nápravou (vlevo) a zástupce 100% nízkopodlažního podvozku s nápravnicí (vpravo).



Obrázek 6 - Srovnání nápravového (vlevo) a nápravnicového podvozku (vpravo) [22]

Dalším krokem ve vývoji jsou koncepce již plně nízkopodlažní, které se od sebe liší tím, jak je dosaženo požadované nízkopodlažnosti. Velmi často se proto používají níže uvedené varianty uspořádání a tvaru rámu, jejichž hlavním cílem je zvýšení procentuálního zastoupení nízkopodlažní plochy:

- Částečně nízkopodlažní podvozek
- Použití dvojkolí se zmenšeným průměrem kol
- Použití nápravnicového podvozku
- Umístění otočného podvozku pod kabinu řidiče
- Nízkopodlažní s neotočným podvozkem s volně otočnými koly
- S otočnými Jakobsovými podvozky s volně otočnými koly

Na obrázku 7 jsou znázorněny tříčlankové až šestičlankové koncepce tramvajových vozidel (a – o) s různými koncepcemi řešení a s různým procentem nízkopodlažnosti. [3]



Obrázek 7: Nejčastější koncepce vícečlánkových tramvajových vozidel [3]

Největší změnou v koncepci, která zapříčinila úspěšnou realizaci nízkopodlažních tramvají, bylo navržení podvozků s volně otočnými koly, tedy podvozky s nápravnicemi. V předešlých koncepcích se trakce přenášela na dvojkolí z motoru, který byl společně s převodovkou a celou trakční jednotkou umístěn mezi koly, tedy v blízkosti nápravy. Toto uspořádání neumožňovalo další snížení podlahy, protože tyto agregáty vyžadovaly hodně místa.

Proto se v nových koncepcích přešlo k tomu, že je motor a všechny další komponenty nově uloženy na vnější stranu podvozku, čímž došlo k uvolnění místa mezi koly a tudíž bylo i zde možno snížit podlahu. V závislosti na tom, jak je řešen pohon volně otočných kol, rozlišujeme 2 základní koncepce. První z nich vyžaduje pohon každého kola svým vlastním motorem. Druhá varianta využívá 1 motor pro pohon celé nápravy, kde je trakce přenášena přes čelní převodovky na levé a pravé kolo. [3]



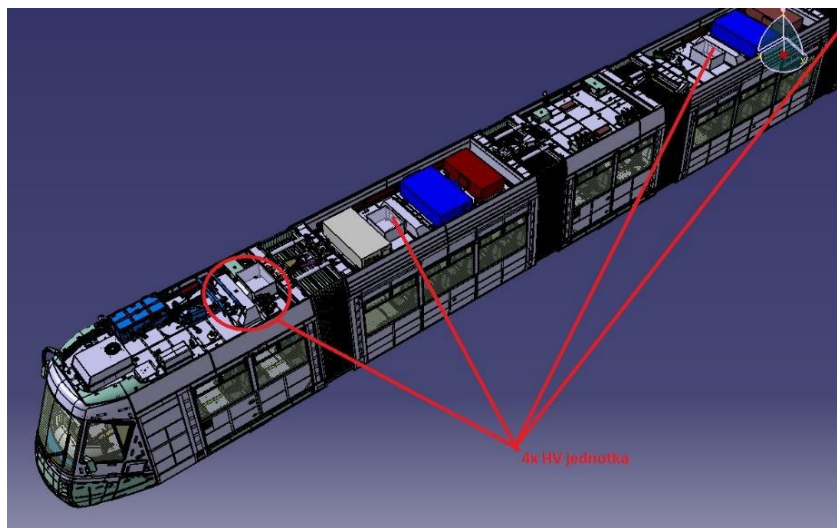
Ze zástupců této koncepce tramvajových vozidel můžeme jmenovat například tramvaj 14T, která se v ČR ujala především díky konstrukční jednoduchosti. Tuto tramvaj je možno vidět v Praze a také na obrázku 8, který nabízí srovnání řešení tramvajového vozidla 14T a jeho nástupce 15T, který se ale neujal už tak dobře jako prvně jmenovaný model. Tento model byl navržen jako jednosměrná pětičláneková šestinápravová tramvaj. Koncepce této tramvaje odpovídá na obrázku číslo 7 variantě d. Tramvaj 14T disponuje 70 % nízkopodlažní plochy a 3 neotočnými podvozky. [3]



Obrázek 8: Srovnání tramvajového vozidla 14T a tramvajového vozidla 15T [16]

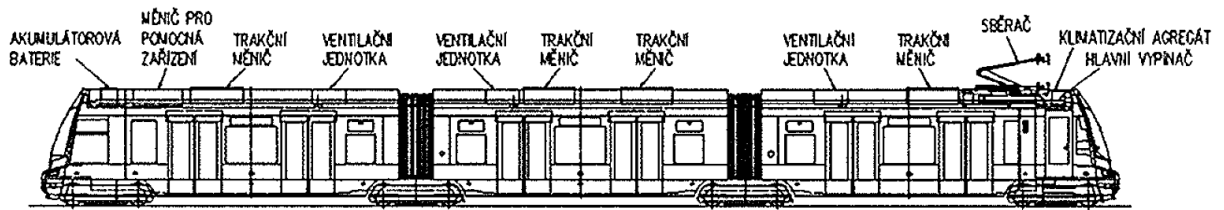
O zajištění komfortu pro cestující se v tramvaji 14T starají 4 HV (heating and ventilation) jednotky, které jsou umístěny na střeše vozidla, viz obrázek 9. Z obrázku je patrné, že první a čtvrtá jednotka se stará o zajištění klimatické pohody dvou krajních částí vozidla, zatímco druhá a třetí jednotka zajišťuje pohodu prostředního (největšího) článku tramvaje.

O ventilaci vzduchu v salónu cestujících je také postaráno výklopnými okýnky. Pro potřeby vytápění salónu pro cestující jsou pod sedadly v optimálních rozestupech instalovány konvekční (odporové) topné jednotky a sálavé jednotky v podlaze u měchů článků. Na obrázku na střeše kabiny řidiče se také nachází menší samostatná HVAC jednotka, která má chladicí a topný výkon 4 kW a která se zajišťuje tepelnou pohodu řidiče tramvaje.



Obrázek 9: 3D model tramvaje 14T

Obrázek 10 poté znázorňuje tříčlánekový plně nízkopodlažní vůz se čtyřmi otočnými podvozky, kde je popsána a zobrazena veškerá elektro-výzbroj moderního tramvajového vozidla, která se s ohledem na požadavky nízkopodlažnosti přesunula na střechu vozidla. Podvozek je umístěn pod kabinou řidiče a otáčí se kolem svého středu.



Obrázek 10: Schéma elektro-výzbroje tramvajového vozidla [30]

## 3.2 Srovnání spotřeb energie tramvajového vozidla s ostatními druhy vozidel

### 3.2.1 Výhody tramvajové dopravy oproti ostatním složkám MHD

Tramvaje jsou pro město zdánlivě drahým nákladem, protože vyžadují vybudování kolejových tratí a trolejového vedení, což se na první pohled může zpočátku jevit, jako neekonomická volba, pokud by byla řeč pouze o pořizovaných nákladech. Ale pokud se na to podíváme i z pohledu energie potřebné k provozu, údržbě a recyklaci dopravní sítě, jsou již nainstalované tramvaje jedním z nejméně energeticky náročných a nejudržitelnějších systémů městské hromadné dopravy (MHD), které může město provozovat.

Tramvaje jsou totiž mnohem lehčí než vlaky nebo metra a nejsou nutné často nákladné a energeticky náročné podzemní tunely, které systém metra vyžaduje. Tramvaje jezdí na ocelových kolech po kolejnicích, které lze plně recyklovat a jelikož jde o styk kov-kov, mají mnohem nižší valivý odpor než pryžové pneumatiky.

Další výhodou tramvajů je, že jsou zapojeny přímo do elektrické sítě, čímž negují potřebu baterií náročných na energii a zdroje, které potřebují vlastní samostatnou a často dražší nabíjecí infrastrukturu.

Výhodou tramvajových vozidel je také flexibilita dopravní kapacity. Ta je samozřejmě pevně daná kapacitou kabin vozů. U kloubových článkových tramvajů, které tvoří ucelenou nerozšiřitelnou tramvajovou jednotku, tato výhoda odpadá. Nicméně u starších typů tramvajů, které jsou tvořeny různým počtem za sebou řazených a odpojitelých vozů, je tato výhoda značná.

Právě odpojení a připojení vozu umožňuje efektivně reagovat na špičky cestujících v dopravě a efektivně tím řídit i spotřebu energie, protože při nižším počtu cestujících např. přes víkendy, není potřeba vysílat tramvaj se stejným počtem vozů jako přes pracovní dny, což je nesporná výhoda oproti silničním složkám MHD, které nejsou schopny reagovat na změny přepravní kapacity jinak než vysláním dopravního prostředku s nižší či vyšší přepravní kapacitou, pokud takovou možnost dopravní podniky mají.

Další výše neuvedené přednosti tramvaje ve srovnání s ostatními druhy hromadné dopravy:

- Městská tramvaj může být provozována v prostředí běžné uliční sítě i na samostatném tělese podle potřeby a to i současně, může sloužit i jako meziměstský prostředek vnější dopravy u městských konurbací (Liberec – Jablonec, Most – Litvínov, Bratislava – Vídeň)
- Větší poměrná účinnost elektrického pohonu ve srovnání se spalovacím motorem
- Ekologicky méně škodlivý druh dopravy s nízkými dopady na životní prostředí zejména v oblasti emisí a exhalací

- Elektromagnetické brzdy šetří mechanické brzdy, čímž se snižují provozní náklady, jsou účinnější ve sněhu a náledí
- Vyšší spolehlivost v zimním období za sněhu a náledí v porovnání s problematicky spolehlivým autobusem závislým na adhezi pneumatiky s vozovkou
- Jednoduché řízení vytváří menší nároky na řidiče, díky odděleným kabinám pro řidiče jsou méně obtěžováni cestujícími, je možná klimatizace apod.
- Vyšší bezpečnost cestujících uvnitř tramvaje díky její masivní konstrukci, bezpečnost tramvaje pro cestující zvyšuje i její směrové vedení na kolejnicích (tento aspekt je určitou komplikací pro bezpečnost ostatních účastníků provozu na pozemních komunikacích, řidič se neumí vyhnout)
- Nižší provozní náročnost v přepočtu na jednoho cestujícího (bez započtení investičních nákladů)
- Vysoká životnost tramvajových vozidel

### 3.2.2 Nevýhody tramvajových vozidel oproti ostatním složkám MHD

Tak jako vše, mají tramvaje i své nedostatky. Dále jsou vypsány nevýhody tramvají ve srovnání s ostatními druhy hromadné dopravy:

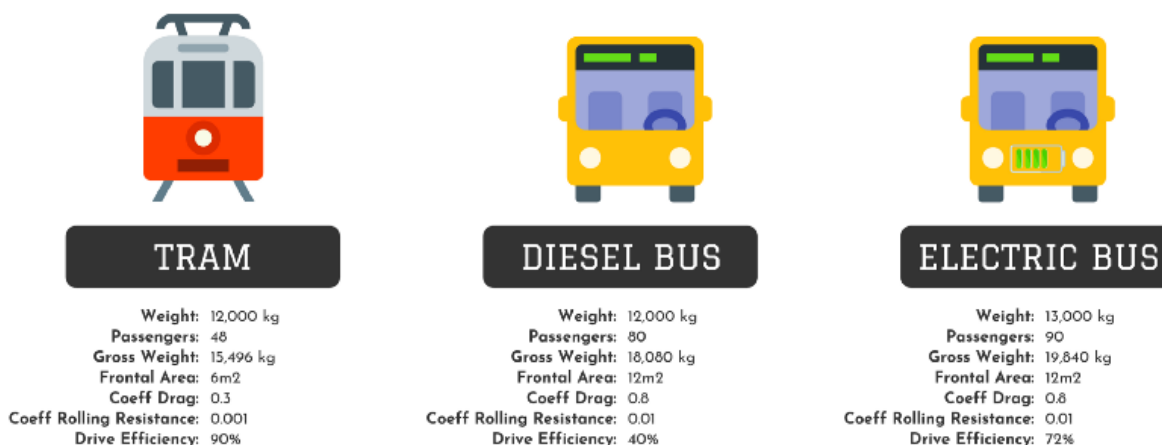
- Tramvaj vyžaduje rozsáhlá smyčková obratiště, pokud je aplikována koncepce obratišť pro obousměrné vozy, výrazně se komplikuje organizace vnitřního prostoru tramvaje, snižuje se počet míst pro sezení
- V případě výpadků provozu na tramvajovém tělese (překážka v provozu, havárie, opravy) jen omezená možnost přenosu provozu tramvaje do jiné náhradní stopy
- V případě výpadku elektrické energie je paralyzována tramvajová doprava v celém okruhu působnosti zdroje
- Nízká stoupavost tramvajové dopravy (zhruba do 7%)
- Delší brzdná dráha díky vysoké hmotnosti a nižší adhezi
- Vysoká vnější hlučnost a vibrace způsobené provozem tramvajové dopravy
- Relativně vysoké investiční náklady tramvajové dopravy díky nezbytným investicím do tramvajového tělesa a systému trolejového vedení
- Vysoké nárazové náklady na zařízení tramvajové dopravy ve městě (nezbytnost výstavby měniren, dep apod.) způsobují, že se tramvajová doprava rozvíjí spíše tam, kde již je než na nových místech
- Trolejové vedení je vysoce neestetickým prvkem v prostředí měst
- Tramvajová doprava neumožňuje díky své technické koncepci současné působení většího počtu přepravců a tím jejich konkurenci, případně takové společné působení většího počtu přepravců značně komplikuje [32]

### 3.2.3 Srovnání spotřeby energie dopravních prostředků MHD

Před samotnou analýzou spotřeby energie tramvajového vozidla se pojdme podívat na to, jak je na tom tramvajové vozidlo v porovnání s ostatními dopravními prostředky využívanými pro dopravu ve městech. Tímto srovnáním se v roce 2019 zabývali ve Velké Británii, kde ve studii porovnávali spotřebu energií tramvaje, autobusu na dieselový pohon, autobusu na elektrický pohon a spotřebu energií osobního automobilu.

Na obrázku 11 jsou uvedeny uvažované hlavní parametry pro porovnání tramvají a patrových autobusů. Některé parametry bylo třeba upravit a sjednotit, aby z porovnání vzešla

relevantní data. Například byla při výpočtech uvažována tramvaj skládající se pouze z 1 vozu, aby přepravní kapacita a hmotnost tramvaje byla srovnatelná s ostatními dopravními prostředky. Ve skutečnosti může třívozová tramvaj přepravit až 140 cestujících, stojících i sedících, ve srovnání s novými elektrickými londýnskými autobusy, které vykazují kapacitu 90 cestujících. [11]



Obrázek 11: Parametry srovnávaných dopravních prostředků [10]

Vypsané parametry na obrázku 11 představují hlavní parametry, které ovlivňují spotřebu energie. Jde o valivý odpor, účinnost pohonu, koeficient aerodynamického odporu, přední plocha a hmotnost. V následujících kapitolách bude vysvětlena jejich důležitost a přiblížena stanovení jejich hodnot.

### 3.2.3.1 Koeficient valivého odporu

Koeficient valivého odporu téměř nepoddajného kola tramvaje na podobně nepoddajné trati má hodnotu přibližně 0,001, tedy přibližně 10x nižší než pneumatika autobusu, kde nabývá hodnoty 0,01 a až 12x nižší než správně nahuštěná automobilová pneumatika na asfaltu, jejíž hodnota koeficientu nabývá hodnoty přibližně 0,02.

Pro demonstraci důležitosti rozdílu hodnot tohoto koeficientu byl vytvořen následující příklad. Dvoupatrový autobus jedoucí rychlostí 30 *mph* po hladké asfaltové silnici by potřeboval výkon 24,9 *kW*, aby se udržel v pohybu. Stejný autobus jezdící na tramvajových kolech po kovových kolejkách by potřeboval pro svůj pohyb stejnou rychlostí jen 3,5 *kW*, což představuje více než 7x vyšší výkon.

Valivý odpor není tedy při nízké rychlosti zanedbatelný. Jakmile je překonán valivý odpor (přibližně 20 *mph*), energie zůstává konstantní, proto je pro pohyb velkých vozidel významný valivý odpor. Kovová kola a kolejnice mají ve srovnání s pryží, plastem, asfaltem rovněž značné přínosy pro životní prostředí, protože je jejich opotřebení daleko menší a rozhodně představuje menší ekologickou zátěž než pneumatiky, takže z pohledu udržitelnosti jsou kovová kola daleko vhodnější volba, což jsou rovněž důležité aspekty dopravní politiky. [11]

### 3.2.3.2 Účinnost pohonu

Elektromotor přeměňuje dodanou elektřinu na pohyb s účinností přibližně 90%. V případě vznětových spalovacích motorů se ztrácí až 60 % energie v palivu, která se přemění převážně na teplo. Daleko menší podíl se přemění na pohyb, tedy mechanickou práci.

V přepočtu to představuje hustotu energie  $10 \text{ kWh/l}$ . To znamená, že výše uvedený autobus, který potřebuje  $24,9 \text{ kW}$  výkonu, aby se mohl pohybovat rychlostí  $30 \text{ mph}$ , ve skutečnosti potřebuje  $62,2 \text{ kW}$  paliva.

Elektrický autobus využívá stejně jako tramvaj elektromotor, takže těží ze zlepšené účinnosti. Musí si však vézt i vlastní zdroj energie ve formě baterie. Teoreticky má baterie minimální ztráty, ale v praxi může nabíjení různými proudy způsobit značné ztráty, v některých případech až 50%. V průměru se pro životnost baterie s cyklickým nabíjením a vybíjením odhadují na účinnost přibližně 80%. To znamená, že použití baterie přidává do naší rovnice ztráty o velikosti 20% energie. Z toho plyne, že výsledná reálná účinnost pohonu vychází na 72 % pro elektrický autobus.

Tramvaj je efektivně zapojena do sítě po celou dobu provozu, což zabraňuje těmto ztrátám při skladování v baterii a účinnost pohonu je tedy rovna přímo účinnosti elektromotoru, tedy přibližně 90%. [11]

### 3.2.3.3 Hmotnost

Tramvaje mají výrazně vyšší hmotnost než autobusy. V přepočtu na jednoho cestujícího potřebují více energie, aby se rozhýbali z klidu. My však uvažujeme pouze jednovozovou tramvaj o hmotnosti  $12 \text{ t}$  s přepravní kapacitou 48 pasažérů, jejichž průměrná hmotnost odpovídá  $76 \text{ kg}$  na 1 cestujícího, dostaneme přibližnou celkovou hmotnost  $16 \text{ t}$ . Pokud by takováto tramvaj podnikla cestu po dráze  $5 \text{ km}$  se zastávkou na každém kilometru, spotřebovala by při akceleraci přibližně  $2,15 \text{ kWh}$ .

Oproti tomu elektrický autobus o hmotnosti  $13 \text{ t}$  s přepravní kapacitou 90 cestujících a tedy celkovou přibližnou hmotností  $19 \text{ t}$  by na stejné dráze spotřebovala  $2,96 \text{ kWh}$ .

Autobus na diesellový pohon s hmotností  $12 \text{ t}$  a přepravní kapacitou 80 cestujících vykazuje přibližnou celkovou hmotnost  $18 \text{ t}$ . Na téže dráze spotřeboje na rozjezd  $6,05 \text{ kWh}$ .

Pokud bychom neuvažovali žádné další parametry, vycházel by ze srovnání nejlépe elektrický autobus, pro který vychází spotřeba na 1 cestujícího  $33 \text{ Wh}$  oproti  $47 \text{ Wh}$  u tramvaje a  $76 \text{ Wh}$  u autobusu s naftovým motorem. Tyto výsledky jsou zaneseny do grafu na obrázku 10, kde jsou označeny modrou barvou jako acceleration energy. [11]

### 3.2.3.4 Koeficient odporu vzduchu a čelní plocha

Koeficient odporu vzduchu  $C_d$  vyjadřuje vhodnost tvaru vozidla k obtékání vzduchem. Jinými slovy řečeno, vyjadřuje jakousi „aerodynamičnost“ tvaru vozidla. Tento koeficient je závislý také na čelní ploše vozidla  $A$ .

Dvoupatrový autobus s plochým čelem o ploše  $12 \text{ m}^2$  není nijak zvlášť přívětivý, a proto byl koeficient odporu vzduchu  $C_d$  stanoven na hodnotu 0,8.

Oproti tomu moderní tramvaj má díky svému kapkovitému tvaru zadní i přední části mnohem přívětivější aerodynamické vlastnosti, kterou ale zhoršuje přídatný odpor pantografu. Čelní plocha tramvaje vychází oproti čelní ploše autobusů poloviční, tedy přibližně  $6 \text{ m}^2$ . Proto výsledný koeficient odporu vzduchu vychází pro tramvaj mnohem nižší a byl odhadnut na hodnotu cca. 0,3. Tento odhad vychází ze studií o vlacích.

Následně jsou tyto dva parametry násobeny mezi sebou, aby nám poskytly tažnou plochu. Čím větší tato plocha je, tím více energie je potřeba pro překonávání odporu vzduchu, jinak řečeno, pro udržení konstantní rychlosti. Hodnoty vychází u dvoupatrového autobusu  $0,8 \times 12 = 9,6 \text{ m}^2$ , což ve srovnání s  $0,3 \times 6 = 1,8 \text{ m}^2$  u tramvaje je výrazný rozdíl.

Tento parametr v kombinaci s valivým odporem znamená, že spotřeba energie tramvají po njetí na danou rychlost vychází jako pouhý zlomek spotřeby dvoupatrových autobusů. Na dráze dlouhé 5 km spotřebovává tramvaj při konstantní rychlosti pouze 11 Wh, zatímco elektrické a naftové autobusy spotřebují 49 Wh a 117 Wh. Tyto výsledky jsou zaneseny do grafu na obrázku 10, kde jsou označeny modrozelenou barvou jako cruise energy. [11]

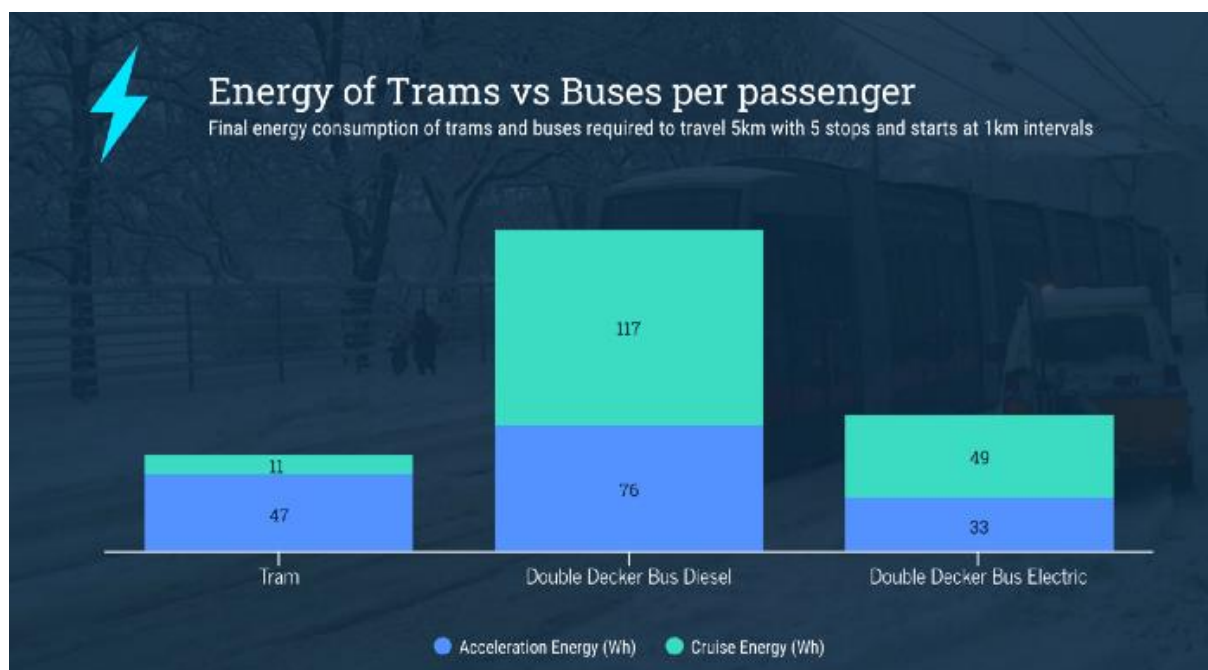
### 3.2.3.5 Výsledky srovnání dopravních prostředků

Výsledky srovnání spotřeby energie pro jednotlivé dopravní prostředky byly vyjádřeny jako energie potřebná pro ujetí dráhy 5 km s 5 zastávkami po 1 km. Uvedené hodnoty jsou přepočteny na 1 cestujícího a zaneseny do grafu na obrázku 12.

Na dráze dlouhé 5 km spotřebuje tramvaj při konstantní rychlosti pouze 11 Wh, zatímco elektrické a naftové autobusy spotřebují 49 Wh a 117 Wh.

Spotřeba energie potřebné pro rozjezd vozidla na téže dráze vychází nejlépe pro elektrický autobus s hodnotou 33 Wh, což je v porovnání se 47 Wh u tramvaje a 76 Wh u autobusu s naftovým motorem nejlepší výsledek.

Při sečtení obou dílčích spotřeb dostaneme celkovou spotřebu energie pro každé vozidlo. Z grafu plyne, že nejlépe z pohledu spotřeby energie je na tom tramvaj s celkovou spotřebou 58 Wh. Největší spotřeby naopak dosahuje dieselový autobus se spotřebou 193 Wh a o něco lépe je na tom elektrický autobus se spotřebou 82 Wh. [11]



Obrázek 12: Výsledky studie - spotřeba energie jednotlivých dopravních prostředků [10]

Tabulka 2: Srovnání spotřeby energie automobilu, autobusu a tramvaje [10]

Mode:	Car	Bus	Tram
Energy per passenger	0.33kWh/km	0.20kWh/km	0.03kWh/km

Tabulka 2 zobrazuje srovnání spotřeby energie osobního automobilu, autobusu a tramvaje. V tomto případě je ale spotřeba energie vyjádřena jako spotřeba na 1 cestujícího na

1 km. Z tabulky nejlépe plyne, že spotřeba energie tramvajových vozidel, která nabývá hodnoty 0,03 kWh/km je 11x menší spotřeba než u osobního automobilu, který z pohledu spotřeby energie na 1 osobu vychází úplně nejhůře.

Pro praktickou demonstraci možné úspory energie pouhým vyměněním silničních dopravních prostředků MHD tramvajovými, je zde uveden ještě příklad studie, která byla prováděna v období mezi roky 2016 až 2017, kdy byly měřeny ujeté vzdálenosti všech autobusů ve městě Bath. Šlo především o dieselové a dvoupatrové autobusy, které za měřenou dobu najely 7,09 milionů mil, což je přibližně 11,4 milionů km.

Využijeme-li spočítaného hodnoty z dráhy na 5 km, dostaneme velmi přibližný výsledek o celkové spotřebě dopravních prostředků MHD, protože některé zastávky budou blíže, některé dále.

Z výpočtů pak plyne, že autobusy spotřebují na svých trasách 35,2 milionů kWh nebo 3,5 milionů l nafty. Pokud by tyto trasy byly nahrazeny tramvajemi, byla by jejich spotřeba 6,1 milionu kWh, tedy téměř 6x menší. Z toho tedy plyne, že v porovnání s ostatními dopravními prostředky z hlediska energetické spotřeby je na tom tramvajové vozidlo velmi dobře. [11]

Nyní se pojdme podívat na to, jak efektivně tramvajové vozidlo využívá dodávanou energii ze sítě. A tedy zmapovat systémy, které generují největší podíl ztrátové energie.

### 3.3 Spotřeba energie tramvajového vozidla

Jak již bylo zmíněno výše, tramvajová vozidla jsou poháněna elektrickou energií, kterou získávají z trolejového vedení, což z elektrických tramvají činí vozidla závislé trakce. V České republice se nejčastěji využívají zdroje stejnosměrného napětí 600 V.

Je jasné, že s vývojem nových technologií a poznatků dochází k postupnému snižování spotřeby energie. Proto je v současné době vývoj tramvajových vozidel zaměřen do několika směrů, kterými je možno postupovat za účelem snížení spotřeby energie.

Jedním ze směrů, jak snížit spotřebu energie, byla změna typu regulace výkonu. To obnášel u modernizovaných tramvají především přechod na tyristorovou regulaci výkonu z odporové regulace, která se používala i u starších typů tramvají. O tom, že to byl krok správným směrem, svědčí studie provedená v Liberci v roce 2011, která je více rozepsána v následující kapitole.

Dalším ze směrů, jak zvýšit efektivnost využívání elektrické energie u tramvají a dalších kolejových vozidel, je snaha o zvýšení rekuperace brzděné energie, například pomocí zásobníků energie nebo inteligentních měničů. O tomto směru je více pojednáno v kapitole 3.3.2, odkud plyne, že tento směr není nejvhodnější.

Neměli bychom opomenout druhý poznatek, který vzešel ze studie popsané v kapitole 3.3.2 a tím je, že spíše než se zaměřovat na zefektivnění rekuperace, vyplatí se mnohem více snaha o zefektivnění netrakčních složek energie. [13]

#### 3.3.1 Starší nemodernizované a modernizované tramvaje

Snížení spotřeby energie u modernizovaných typů tramvají dokazuje i studie o měření spotřeby elektrické energie tří typů tramvají T3 na libereckých tratích, kterou se v roce 2011 zabývala Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci v rámci společného projektu se statutárním městem Liberec.



V Liberci jezdilo v té době 66 tramvajových vozů, které jsou postupně kompletně modernizovány a vybavovány novým systémem řízení, který umožňuje při brzdění návrat elektrické energie zpět do trolejí.

Cílem projektu bylo porovnat spotřebu energie u starých tramvají s klasickou odporovou výzbrojí, u kterých je rychlost řízena zapojováním odporu do obvodu kotvy a u vozů řízených prostřednictvím polovodičových tranzistorů – tyristorová regulace. A ze spotřeby energie následně odvodit i dobu návratnosti investic do inovací tramvajových vozů, či zda se vůbec vyplatí. Kompletní modernizace jedné tramvaje včetně karoserie a elektrické výzbroje vyjde přibližně na 7,5 mil Kč.

Laicky se dá říci, že u tramvaje s moderním typem tranzistorového řízení se při brzdění změní funkce motoru a stane se z něj generátor, který vyrábí elektrickou energii. Pracovníci FM TUL si ověřili svoje výpočty při nočním měření v době od půl druhé do půl čtvrté ráno, kdy v Liberci tramvaje nejedí.

Noční měření spočívala v tom, že na trati byla pouze jediná tramvaj a spotřeba nebyla ničím zkreslená. Viděli, jak síť reaguje na jeden vůz a z toho byli schopni spočítat mimo jiné ztráty v kabelech a v trolejovém vedení. Měření prokázala, že nová polovodičová výbava tramvaje ušetří při brzdění zhruba 20 % elektrické energie, která se vrací zpět do troleje.

Z výsledků měření pak plyne, že starý typ tramvaje spotřebuje při svém provozu na 1 ujetý kilometr zhruba 4,2 kWh elektrické energie, modernizované stačí pouze 2,7 kWh.

Pokud vezmeme v úvahu, že dopravní podnik v Liberci zaplatí ročně podnik za elektrickou energii na tramvajových tratích zhruba 14 milionů korun, představuje inovace vozového parku a výměna systémů řízení významné úspory energie i z ekonomického pohledu. 20 % představuje v tomto případě zhruba 3 miliony Kč ročně, což už je významná úspora. [12]

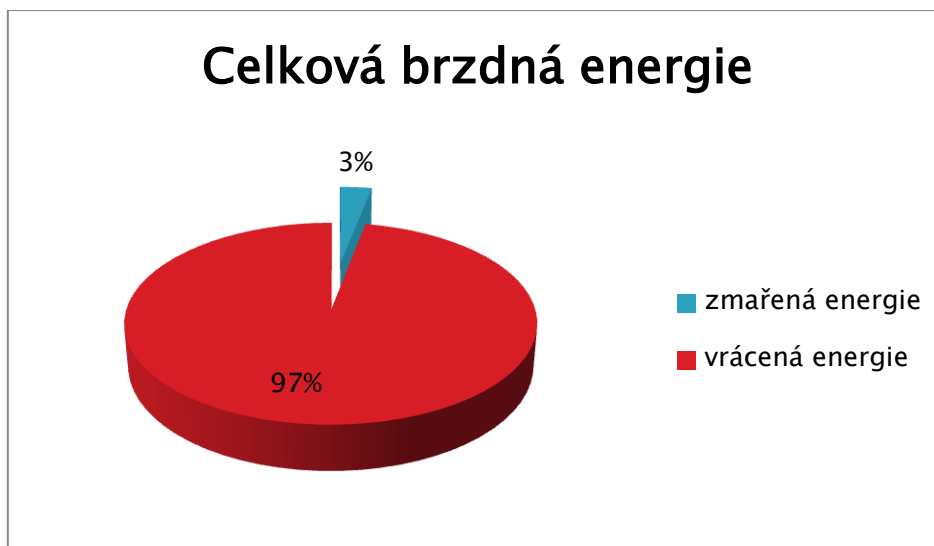
### 3.3.2 Výsledky studie o rekuperaci energie

Studie bruselského dopravního podniku STIB, jejíž výsledky byly zveřejněny v květnu 2017, nicméně ukazují, že u frekventovaných městských tramvajových systémů je potenciál k další rekuperaci velmi malý a snaha o efektivnější využívání elektrické energie by se měla zaměřit spíše na netrakovní spotřebu.

Studie STIB byla prováděna jako součást projektu ELIPTIC v rámci evropské iniciativy CIVITAS a byla založena na velmi důkladných měřeních prováděných na tramvajových linkách č. 7, 19 a 94 v Liberci.

Výsledky měření ukázaly, že většina brzděné energie generované tramvají je ve skutečnosti opětovně využívána a jen velmi malý podíl je mařen v brzděných odporech. Kupříkladu u linky 94 bylo zúžitkováno 97 % brzděné energie a pouze 3 % přeměněno na teplo v odpornících.





Obrázek 13: Podíl zmařené a vrácené energie při brzdění vozidla

I když by bylo možné pro tuto energii nalézt další využití, potenciál pro celkové snížení spotřeby energie tramvaje je jak patrně velmi malý.

Hlavním důvodem pro toto zjištění je frekventovaný provoz městských tramvají, kdy většina energie rekuperované do trakčního vedení je vzápětí spotřebována jiným vozidlem. V případě, že není zajištěn frekventovaný provoz tramvají, není možné vrácenou energii v síti efektivně využít, proto se v odpornících maří větší procento celkové brzdné energie, která představuje až 20 % celkové brzdné energie. [13]

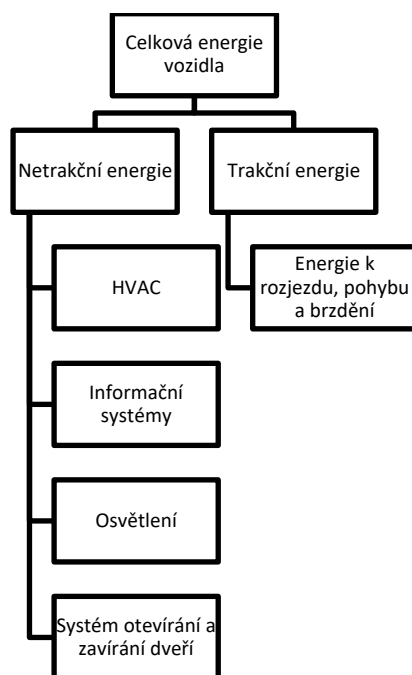
### 3.3.3 Rozdělení celkové energie tramvajového vozidla

Pro lepší představu o spotřebě energie tramvajového vozidla je vhodné si celkovou potřebnou energii pro bezproblémový chod tramvajového vozidla rozdělit na trakční a netrakční složku.

Trakční složka energie se týká především energie dodávané systémům, které jsou zodpovědné za rozjezd, pohyb a brzdění tramvaje.

Netrakční složka energie představuje energii dodávanou podpůrných systémů tramvajového vozidla, které slouží ve vozidle především ke zvyšování komfortu cestujících. Ať už jde o HVAC jednotku, která je zodpovědná za teplotní pohodu ve vozidle, nebo informační systémy, které jsou do vozů umisťovány za účelem zvýšení informovanosti cestujících, či osvětlení, které je nutné kvůli světelné pohodě cestujících.

Tabulka 3: Rozdělení celkové energie tramvajového vozidla



### 3.3.4 Trakovní energie

Jde o složku energie, která je zodpovědná za zásobování systémů tramvaje, které jsou zodpovědné za rozjezd, pohyb a brzdění tramvajového vozidla. Jde především o pohonný systém a brzdový systém, které si podrobněji rozebereme.

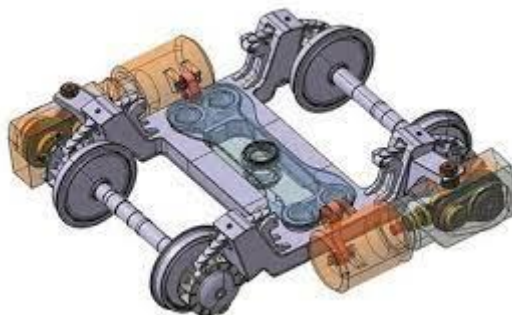
#### 3.3.4.1 Pohonný systém tramvajového vozidla

V současné době je nejvíce rozšířený tzv. individuální přímý způsob pohonu vozidla. Jde o typ pohonu, pod kterým rozumíme převážně pohon pomocí elektrického trakčního motoru. Tento motor býval po dlouhá léta stejnosměrný komutátorový, který se hojně využíval pro jeho výhodnou trakční charakteristiku a vhodné regulační vlastnosti. S nástupem výkonové elektroniky od 80. let minulého století byl nahrazován asynchronními nebo synchronními elektrickými motory.

V poslední době se nejvíce prosazují synchronní motory s permanentními magnety pro trakční účely. Tyto motory mají statorové třífázové vinutí uložené v drážkách. Rotor tvoří hřídel, na které jsou ve zvláštních drážkách uloženy (nalepeny) permanentní magnety. Tyto motory mají obvykle větší počet pólů na statoru, a ten je nesouhlasný s počtem pólů na rotoru. Nejčastěji se používají v kombinaci s vodním chlazením, které sice vyžaduje chladič vody a oběhové čerpadlo, ale oproti vzduchovému chlazení nehrozí žádný vnik nečistot dovnitř motoru.

Výhodami synchronních motorů s permanentními magnety oproti asynchronním či stejnosměrným motorům jsou, že při srovnatelném jmenovitém momentu mají menší rozměry, vyšší krouticí moment vztahovaný na hmotnost stroje, menší moment setrvačnosti a vyšší momentovou přetížitelnost. Další výhodou je vytváření momentu i v klidovém stavu, což umožňuje plynulou regulaci od nuly až po maximální hodnotu. Také účinnost těchto motorů je vyšší a pohybuje se kolem 90 %. [2]

Nespornou výhodou těchto tyristorově řízených elektromotorů je možnost přejít do generátorového režimu, který se hojně využívá především při brzdění vozidla, viz následující kapitola.



Obrázek 14 - Příklad řešení pohonu podvozku pomocí 1 motoru pro každou nápravu [2]

Z energetického pohledu nás nejvíce zajímá právě účinnost celého pohonu, která právě díky přímému pohonu neklesá a závisí pouze na účinnosti elektromotoru, která je velmi vysoká. Přesto se přímý pohon v současné době moc často nepoužívá. Byl použit např. pro již zmíněnou tramvaj 15T, kde celá koncepce vykazovala nedostatky, takže se od tohoto řešení upustilo. V současné době nejčastěji používané uspořádání se skládá z 1 vzduchem chlazeného motoru s kuželočelní převodovkou, který pohání celou nápravu. Oproti přímému pohonu vykazuje jen nepatrně nižší účinnost. Z tohoto pohledu je v této oblasti pouze malý prostor pro zlepšení úspory energie.

### 3.3.4.2 Brzdný systém tramvajového vozidla

Brzdný systém tramvajového vozidla je většinou složen ze 3 různých typů brzd. Jde o elektrodynamickou brzdu, která je elektrická a tudíž nemechanická. Právě z tohoto důvodu je nutné, aby byla doplněna ještě o mechanickou brzdu, která se na vozidla umísťuje z toho důvodu, aby bylo možné zastavit tramvaj – pro dobrzdění. Pouze za pomoci elektrodynamické brzdy není totiž možné uvést vozidlo do klidové polohy, tedy zastavit. Nejčastěji používanou mechanickou brzdou u tramvajových vozidel je kotoučová brzda. Všechna vozidla jsou také vybavena kolejnicovou brzdou, která zde slouží jako pojistka, kdyby došlo k poruše nebo při hrozící kolizi, tedy jde o nouzovou brzdu.

Princip elektrodynamické brzdy je takový, že kinetická energie vozidla při brzdění se v elektromotorech pohonu, které pracují po změně jejich zapojení jako generátory, mění v elektrickou energii. Tedy jde o to, že elektromotory při brzdění vozidla fungují „opačně“ než při zrychlování a místo spotřebování elektrické energie a převádění na mechanickou z mechanické energie vytváří opět elektrickou. Výkon elektromotorů je v generátorovém režimu přibližně dvojnásobný. [2]

Obrovskou výhodou tohoto typu brzdění je možnost přivádět vyrobenou elektrickou energii zpět do trakčního vedení. Tomuto procesu se říká rekuperace energie. Problém je, že u moderních sítí není možné, aby tramvaje rekuperovaly veškerou energii zpět do sítě, protože dnešní sítě nejsou tomuto procesu uzpůsobeny, proto se zbytek „vytvořené“ energie maří v odporcích vozidla. Změnou odporu odporníků lze regulovat intenzitu brzdění.

Jediný případ, kdy lze rekuperovat do sítě větší množství energie, je, když se v okolí nachází jiná tramvaj, která by energii „vytvořenou“ při brzdění jedné tramvaje využívali k vlastnímu rozjezdu. To však vyžaduje přesnou synchronizaci a vysoce frekventované tramvajové linky.

Kotoučová brzda je typ mechanické brzdy. Nejčastěji bývá nalisována na nápravě, případně může být integrována v kolech vozidla nebo spojena přímo s hřídelí motoru. U tramvají bývá velmi často řízena buď elektromechanicky, nebo hydromechanicky. V případě hydromechanického řízení musí být tramvaj vybavena olejovým systémem o tlaku až 15 MPa. V praxi funguje brzdění tramvaje tak, že brzdění z vyšších rychlostí probíhá za pomoci elektrodynamické brzdy, která ale při nižších rychlostech přestává fungovat. V ten moment přechází brzdění na kotoučovou brzdu, která uvede vozidlo až do klidové polohy.

Kolejnicová brzda je neadhezní brzda, jejíž výkonnost není limitována adhezními poměry mezi koly a kolejnicemi. V praxi se využívají 2 typy kolejnicových brzd, elektromagnetická a vířivá.

Elektromagnetická kolejnicová brzda je tvořena elektromagnetem s podlouhlou cívkou, který je orientovaný v podélném směru koleje. Proud v cívce vybudí magnetické pole, které se uzavírá přes hlavu kolejnice. Tím dojde k přitažení brzdy na kolejnici, třecí síla mezi magnetem a kolejnicí je brzdící silou. V provozu dochází k opotřebením pracovních ploch magnetu, což se řeší výměnnými články nebo použitím spékáných materiálů.

Vířivá kolejnicová brzda na rozdíl od elektromagnetické se při brzdění nedotýká kolejnice, ale je nesena asi 7 mm nad temenem kolejnice. Při brzdění nedochází k jejímu opotřebením a je tak nejvhodnější provozní brzdou. Její brzdový účinek je říditelný, vykazuje však relativně velkou spotřebu energie pro buzení, vyvolává ohřev kolejnice a může ovlivňovat proudové okruhy zabezpečování a signalizace. V klidu je magnetické pole symetrické a vybudí jen vertikální přitažnou sílu. Za jízdy vzniká v hlavě kolejnice nestacionární magnetické pole. To vybudí magnetické pole orientované proti směru jízdy a vzniká horizontální složka – brzdící síla. [2]

Z energetického hlediska je v této oblasti větší potenciál pro úsporu energie, a to především v oblasti rekuperace energie. Velké množství energie vzniklé při brzdění vozidla je nevyužito a je mařeno v odpornících, což je neefektivní.

Nabízí se její využití ve dvou řešeních. Prvním řešením je využít ji jako zdroj energie pro trakční systémy vozidla. Nevýhodou však je, že tato energie vzniká pouze při brzdění vozidla. Proto by bylo vhodnější využít toto řešení v kombinaci s druhým řešením.

Druhé řešení je využití baterie v tramvaji, která by se nabíjela energií vytvářenou při brzdění vozidla a moment, kdy by byla nabita, sloužila by jako zdroj energie pro trakční či trakční tramvajové systémy. Bude nutné provést analýzu, zda se „vyplatí“ vozit s sebou na tramvaji další hmotnost navíc v podobě baterie. Další nevýhodou může být případná nízká efektivita nabíjení a nízká životnost baterií.

Extrémním příkladem rekuperačního brzdění v akci je vlak Iron Ore ve Švédsku, který přepravuje uhlí z Kiruny do Narviku. Železná ruda se těží ve výšce 530 m. n. m. a dopravuje se do přístavu Narvik. Při jízdě dolů se místo třecích brzd využívá elektromotor k brzdění a energie je ukládána v systému baterií na palubě vlaku. Tato energie je poté využita k návratu vlaku a prázdných vagonů při cestě zpět nahoru do Kiruny, která trvá 3 hodiny. Tento příklad bude využit jako vzor pro jeden z návrhů úspory energie.

### 3.3.5 Netrakční energie

Netrakční energie představuje energii dodávanou podpůrných systémů tramvajového vozidla, které slouží ve vozidle především ke zvyšování komfortu cestujících. Tato část celkové energie vozidla tvoří významný podíl celkové spotřeby, proto není možné tyto systémy při energetické bilanci zanedbat.

Jde hlavně o HVAC jednotku, která je zodpovědná za teplotní pohodu ve vozidle, o informační systémy, které jsou do vozů umísťovány za účelem zvýšení informovanosti cestujících o následující stanici nebo čase. Dále pak systém osvětlení, který je nutné kvůli světelné pohodě cestujících. Kamerové systémy, které slouží ke zvyšování informovanosti řidiče tramvajového vozidla a terminály na jízdenky, které ve vozidle slouží k vystavení jízdenek.

### 3.3.5.1 Osvětlení

Osvětlení vnitřních prostor tramvajového vozu tvoří velmi důležitou složku komfortu cestujících, která má na starost světelnou pohodu pasažérů. Je velmi důležité, aby byla světla ve vozidle umístěna tak, aby ve všech místech vozidla bylo stejné osvětlení. Jde tedy o to rozmístit zdroje světla do dostatečné vzdálenosti od sebe a natočit je tak, aby vyzařovali světlo do všech směrů. Také je potřeba zvolit osvětlení s vhodnou intenzitou, aby výsledné osvětlení ve voze nebylo příliš slabé nebo naopak příliš silné, aby nepůsobilo rušivě.

Ve starších typech tramvají T3 se využívalo třífázové zářivkové osvětlení, které bylo řazeno ve dvou řadách v podélné ose vozidla za sebou, což tvořilo dobré rozložení intenzity osvětlení ve voze.

S příchodem LED světel byly v modernějších tramvajových vozidlech nahrazeny zářivky za LED světla, která díky svému tvaru v podobě bodových světel umožňují variabilnější rozmístění světel ve voze. Díky tomu je možno dosáhnout optimální intenzity osvětlení i v místech, kam se pomocí zářivkových světel nebylo možné dostat, např. dveřní prostory u vysokopodlažních tramvají v oblasti schodů vznikala nepříjemný stín.

Z energetického hlediska LED světla představují oproti zářivkám významnou úsporu energie, tudíž tento systém nepředstavuje významný prostor pro ještě vyšší úsporu energie.

### 3.3.5.2 Informační systémy

Informační systémy jsou umístěny v salónku pro cestující tak, aby zvyšovali informovanost cestujících. Je důležité, aby zajišťoval dobrou viditelnost, což obnáší vhodné umístění do salónku na místo, kde jej uvidí nejvíce cestujících, tedy v horních částech vnitřních prostor. Dále pak je potřeba, aby byli dobře čitelné, což znamená, aby byli dostatečně rozsvícené a aby byli jejich rozměry dostatečně velké, aby umožnili přečtení na větší vzdálenost.

Nejvhodnější jsou proto dnes hojně využívané terčíkové informační panely s patentovanou technologií DOT-LED elektromagnetických bodů s fluorescenční nebo retroreflexní barevnou fólií doplněných LED diodou.

Technologie zobrazení nabízí optimální čitelnost a rovnoměrné zobrazení textu na ploše panelu při jakýchkoliv světelných podmínkách. Nejlepší čitelnost prokázali body zbarvené bíle či žlutě na černém pozadí, což je i z energetického hlediska nejvýhodnější varianta.

Při odpojení napájení panelu zůstává text na panelu dále zobrazen. Energie je potřeba jen ke změně nápisu a podsvícení - pasivní zobrazovací technologie. Extrémně nízká spotřeba energie DOT-LED panelů snižuje nároky na dimenzování elektrické sítě vozidla a taktéž snižuje spotřebu elektrické energie nebo nafty. Autobus vybavený DOT-LED panely spotřebuje za rok o cca 200 l nafty méně než autobus vybavený LED technologií.



Obrázek 15: Příklad informačního panelu s DOT-LED technologií [18]

Mezi největší výhody těchto panelů patří:

- Přímý sluneční svit zvyšuje kontrast displeje
- Výborná čitelnost díky velké ploše reflexních bodů
- Informace zůstává zobrazena i po vypnutí napájení panelu
- Extrémně nízká spotřeba energie - cca 20% v porovnání s LED panely
- Minimální energetické zatížení elektrické sítě vozidla
- Konektivita ethernet, IBIS, RS485, RS232
- Řízení: BUSE či dalšími řídicími jednotkami a odbavovacími systémy [18]

Z energetického pohledu je tedy tento systém velmi úsporný a se současnými technologiemi je tedy prostor pro snížení spotřeby energie minimální.

### 3.3.5.3 Kamerové systémy

Kamerové systémy slouží převážně pro zvýšení informovanosti řidiče tramvaje, protože bývají často umístěny v blízkosti dveří, takže řidič má ze své kabiny přehled o tom, zda cestující již dokončili výstup a nástup a zda je tedy již možné zavřít dveře. V současnosti se do vnitřních prostor tramvají umísťují i bezpečnostní kamery, které sledují dění uvnitř vozů, za účelem zvýšení bezpečnosti cestujících a zaměstnanců dopravních podniků a mají působit zejména preventivně. Ve vozech bývá vždy rozmístěno 5 až 8 kamer dle velikosti vozidla.

Kamerový systém se skládá z odolných IP kamer (pro přenos videa využívají internet) s rozlišením 1080p (Full HD zobrazující signál v rozlišení nejméně 1080 čar) certifikovaných pro dopravní prostředky.

Kamery nahrávají záznam na vnitřní SD kartu a nahrávky uloží na centrální městské úložiště vždy na konečné stanici, případně v depu a pomocí Wi-Fi připojení (napojeno na existující metropolitní optickou síť města) se záznamy z kamer dostanou k policii většinou s nejdéle půlhodinovým zpožděním. Do budoucna se počítá s online přenosem, kdy by bylo zajištěno přímé spojení s policií.

Náklady na instalaci kamer se předpokládají ve výši zhruba 20 milionů Kč. Náklady na provoz kamer jsou marginální. Jde hlavně o dobíjení při provozu vozu a o běžnou údržbu, proto z energetického hlediska nepředstavují významnou položku, kde by stálo za to uvažovat o významnějším opatření pro snížení spotřeby energie vozidla. [20]

### 3.3.5.4 Terminály na jízdenky

V každém vozidle nesmí chybět ani terminály pro nákup jízdenek cestujících. V současnosti jsou nejvíce na vstupu terminály s barevným dotykovým displejem. Velkou výhodou těchto typů terminálů je, že umožňují bezkontaktní nákup jízdenek.

Terminály na jízdenky mají podobně jako informační panely černé pozadí, na němž jsou důležité informace zobrazeny bílou případně žlutou barvou a to z důvodu úspory energie. Z energetického pohledu je zde proto minimální prostor pro úsporu energie. Nabízí se pouze

možnost zavedení úsporného režimu, který by při delší nečinnosti terminálu zhasnul displej a při prvním dotyku displeje by se opět rozsvítil. Otázkou ovšem je, jak často by tento úsporný režim byl využit a kolik energie by tedy bylo ušetřeno.



Obrázek 16: Dotykový barevný terminál pro nákup jízdenek [19]

Oblast terminálů na jízdenky v dopravních prostředcích MHD by s ohledem na současný vývoj mobilních technologií a aplikací, které umožňují využití virtuálních jízdenek, mohla v budoucnosti vypadat tak, že by jízdenkové terminály v dopravních prostředcích MHD mohli úplně chybět či se ve vozech vyskytovat v minimalistických rozměrech. Toto opatření by určitě vedlo ke snížení spotřeby energie vozidla, nicméně je otázka, jak velké úspory by bylo tímto opatřením dosaženo.

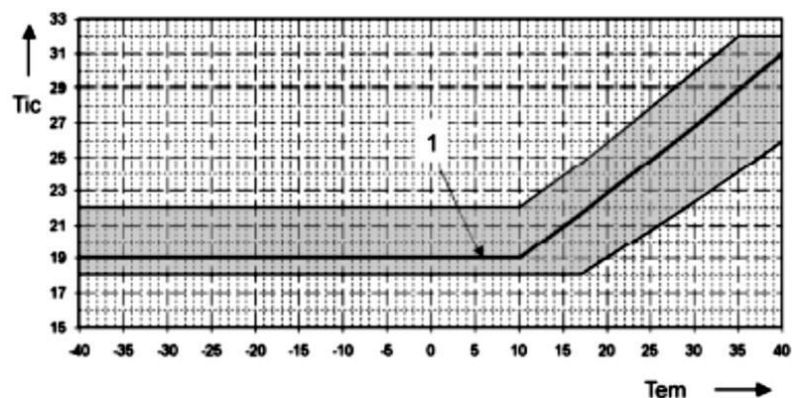
### 3.3.5.5 HVAC jednotka

HVAC jednotka představuje systém, který v sobě integruje systém větrání, vytápění a klimatizace. Tato jednotka je přímo zodpovědná za řízení teplotní a vzduchové pohody v tramvajovém vozidle. Hlavní snahou při návrhu HVAC jednotky by měla být snaha o vytvoření rovnoměrného rozložení teploty čistého vzduchu. Zabezpečuje tedy především 4 základní funkce.

Jde o vytápění vozidla v případě provozu vozidla, kdy je teplota okolí nižší, než je komfortní teplota. Dále pak má na starost klimatizaci, čili ochlazování vzduchu ve vnitřních prostorách tramvajového vozu v období, kdy vnější teplota je vyšší, než optimální teplota. Stanovení optimální teploty pro cestující vychází z normy ČSN EN 14 750-1 pojednávající o optimálních mikroklimatických podmínkách salónu vozu pro cestující.

Optimální teplota ve vozidle je dána regulační křivkou. Tato křivka udává závislost vnitřní teploty (svislá osa) ve vozidle a teploty vně tramvajové vozidlo (vodorovná osa). Optimální teplota pro vnitřní prostory tramvajového vozu by měla ležet v šedém pásu (jako křivka 1 na obrázku 17).

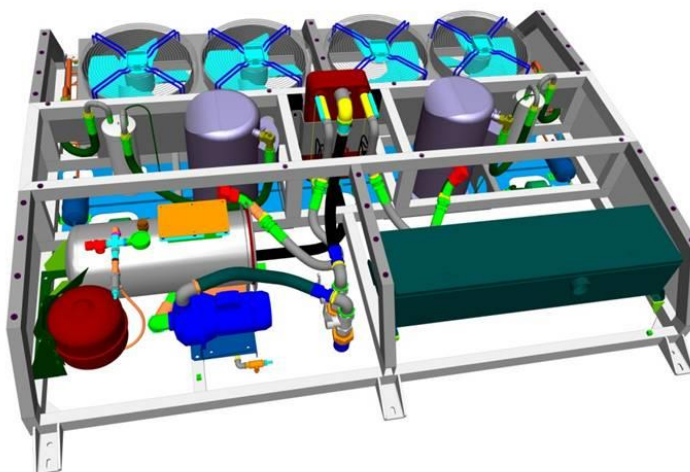




Obrázek 17: Regulační křivka pro vozidla kategorie B [31]

Další funkcí HVAC jednotky je ventilace vzduchu, tedy zajištění cirkulace vzduchu uvnitř vozu. Posledním úkolem HVAC systému je filtrace vzduchu, která probíhá současně s ventilací vzduchu.

Na obrázku 18 je znázorněna HVAC jednotka pro tramvajové vozidlo. Skříň je konstruována tak, aby lépe využila náporové chlazení pomocí umístění kondenzátoru se šikmou stěnou. Nosná konstrukce skříně je tvořena ocelovými jekly. Stěny skříně jsou vyplněny sandwichovými deskami, které jsou vyplněny izolační hmotou a které jsou snadno demontovatelné, což je provedeno s ohledem na umožnění montáže elektroinstalace.



Obrázek 18: Ukázka sestavy HVAC jednotky [21]

Z obrázku 18 vidíme, že se skříň HVAC jednotky skládá ze směšovací komory čerstvého a venkovního vzduchu, filtrace pevných částic, kompletního chladicího oběhu a topení a v některých případech i z regulačního systému včetně frekvenčního měniče.

Z důvodu snahy o maximální možné snížení hmotnosti se používají klimatizace ze svařovaných hliníkových slitin, které jsou zevnitř obloženy izolační hmotou. Svařování konstrukce způsobuje také vyšší tuhost skříně než v případě odlitků. Těsnost konstrukce je zajištěna těsněním případně v problematických částech tmelem. Komory uvnitř skříně jsou uzavřeny neprůchozím hliníkovým víkem.

Upevnění skříně je vyřešeno pomocí 6 patek, které jsou spojeny přes silentbloky s kolejnicemi na tramvaji. Díky těmto kolejnicím lze jednotku stabilizovat přesně nad otvory



vzduchovodů. Je požadováno, aby jednotka byla snadno servisovatelná i pod trolejí (nezapojenou).

Nad komorou s kondenzátorem jsou umístěny otvory pro axiální ventilátory. Na boku skříně se nachází otvor pro sání čerstvého vzduchu, který je krytý proti dešti.

V následujících kapitolách budou dále detailněji popsány všechny hlavní funkce HVAC jednotky.

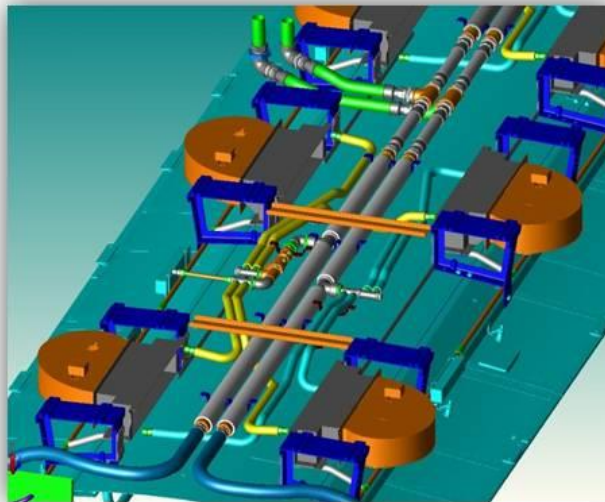
### 3.3.5.5.1 Topení

Vytápění v tramvajových vozidlech má za úkol především v zimních měsících zajistit přijatelné podmínky pro cestující pro přepravu na krátké vzdálenosti. Při návrhu konstrukce a výkonu je třeba respektovat doporučení, která jsou uvedena v normě ČSN EN 14 750-1 a ČSN EN 28 0318. [25]

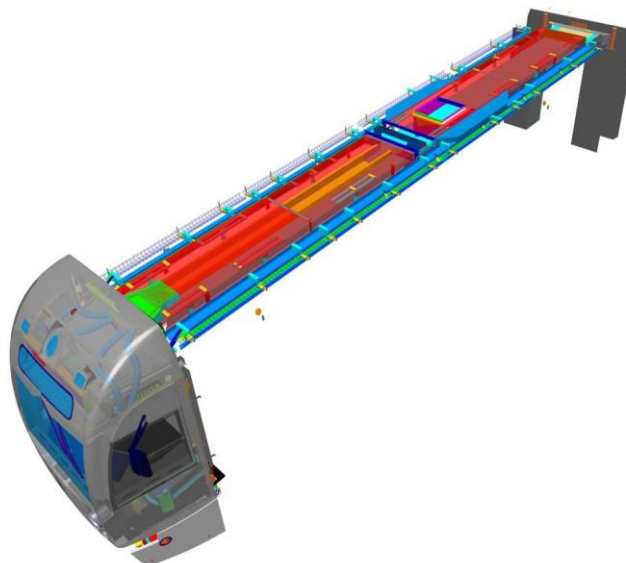
V tramvaji se z technických důvodů používá jako zdroj elektrická energie, což tramvajová vozidla předurčuje k využívání 2 způsobů vytápění.

První filosofie je taková, že ohříváný vzduch je do salónu přiváděn pouze shora. Z důvodu nedostatečně rovnoměrného rozmístění teplého vzduchu bývají tramvaje s tímto způsobem vytápění vybaveny ještě elektrickými topnými odporovými jednotkami, které jsou umístěny v salónu pro cestující, nejčastěji pod sedadly. Tyto doplňkové topné jednotky zlepšují rozložení teploty v salónu a také pokrývají tepelné ztráty tramvaje. Tato varianta vytápění je typická pro státy Střední a Východní Evropy především kvůli své konstrukční jednoduchosti a také kvůli nižším výrobním nákladům.

Některé moderní vozy jsou vybaveny vytápěcími systémy využívajícími sálavých topných jednotek, kde je teplo vytvářeno pomocí elektromagnetického záření, které je ve srovnání s běžně používanými konvekčními (odporovými) jednotkami dosahuje vyšší efektivity. Tento způsob vytápění je použit například v tramvajích 14T.

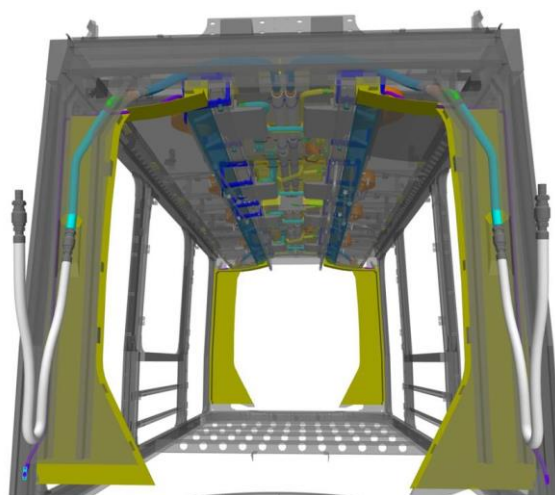


Obrázek 19: Ukázka distribuce vzduchu v salónku pro cestující [21]



Obrázek 20: Ukázka vytápění vnitřních prostor vozu shora [21]

Druhou variantou je provedení vytápění vozu pomocí vzduchových kanálů ve sloupkách tramvaje s vyústkami pod sedadly cestujících. V tomto případě musí HVAC jednotka disponovat mnohem vyšším topným výkonem z důvodu distribuce teplého vzduchu na větší vzdálenosti. Tato koncepce je konstrukčně náročnější než předchozí varianta, nicméně tím, že přivádí ohřátý vzduch po stranách spodem, dochází v tramvajovém vozidle k rovnoměrnější distribuci tepla ve vozidle, což je nesporná výhoda. Odpadá proto použití doplňkových odporových topidel. Tato koncepce se hojně využívá v Západní Evropě a v USA.



Obrázek 21: Ukázka vytápění vnitřní prostor vozu bočnicemi [21]

Ukázka vytápění vnitřních prostor salónku pro cestující pomocí bočních sloupků je vidět na obrázku 21. Pro srovnání současné HVAC jednotky s podporou odporových topení uvnitř salónu dosahují topných výkonů 6 kW. HVAC jednotky bez podpory odporových topení využívající bočnicový přívod tepla dosahují výkonů 7,2 kW.

V této oblasti vznikají největší energetické ztráty z celé netrakové části systémů, ať už vlivem tepelných ztrát způsobených vedením tepla, nebo ztrátami způsobenými otevíráním a zavíráním dveří. Proto budou obě dvě nejčastěji používané varianty vytápění podrobeny analýze, která ukáže, která varianta je z energetického hlediska výhodnější.

### 3.3.5.5.2 Klimatizace

Klimatizační jednotka zajišťuje přívod ochlazeného vzduchu dle parametrů zvolených v klimatizovaném interiéru, zpravidla se využívá, pokud teplota v interiéru přesahuje zvolenou hodnotu. Klimatizace v tramvajových vozidlech je nastavena tak, že by měla být automaticky zapnuta vždy při venkovních teplotách nad 22 °C.

Plnohodnotná klimatizace upravuje přiváděný vzduch ohřevem, chlazením, zvlhčováním a sušením. Zpravidla funguje tak, že zásobuje vzduchovody potřebným objemovým tokem čerstvého vzduchu nebo směsí s odváděným vzduchem z interiéru. V dopravních prostředcích každý nárůst hmotnosti zvyšuje zátěž pohonné jednotky a neblaze se projevuje na spotřebě energie, proto se zde častěji používá neplnohodnotná jednotka, u níž není možné, aby zajišťovala úpravu vlhkosti přiváděného vzduchu. [25]

Největším problémem při návrhu klimatizace je, že tepelnou pohodu má každý člověk trochu jinou a i v tramvajích s klimatizací může být různá. Takže je velmi těžké navrhnout optimální teplotu, na kterou bude vzduch ve vozidle ochlazován. Teplotu ve voze moderních tramvajů hlídá především automat a řidič má velmi malou možnost do systému zasáhnout. Stejně jako při vytápění i u klimatizace vznikají největší energetické ztráty a to především při otevírání a zavírání dveří. Teplota uvnitř salónu cestujících často záleží na tom, jak často a jak dlouho tramvaj otevírala dveře či zavírala dveře. Čím častěji to bylo, tím bude ve voze tepleji, protože tím více tepla se dostane do vozu z okolí.

### 3.3.5.5.3 Ventilace

Primární funkcí ventilační jednotky je výměna vzduchu v uzavřeném prostoru za čerstvý venkovní vzduch. Tato výměna může probíhat buď přirozeným větráním, nebo nuceným větráním. Ventilace zajišťuje odvod škodlivin a vlhkosti od zdroje pomocí odsávání vzduchu. Produkce škodlivin se odvíjí od náročnosti činnosti osob.

Navržená ventilace má zabránit kumulaci produkovaných škodlivin v určitých místech, a tím tedy zajistit stejnou kvalitu vzduchu v celém vnitřním prostoru. V praxi neexistuje žádný ukazatel kvality vzduchu, proto je třeba sledovat jeho čistotu. Problematika tramvajové dopravy je značně zjednodušená, protože mnoho používaných hodnot je již zpracovaných podle údajů pro civilní stavby.

Zpočátku dominovalo v tramvajové dopravě použití přirozeného větrání. Tento způsob větrání využívá rozdílných tlaků vzduchu ve vnitřním a venkovním vzduchu. Přirozeně probíhá výměna teplejšího vzduchu za chladnější čerstvý. Se zvyšující se rychlostí tramvaje kolem vozu klesá rychle tlak a výměna vzduchu může probíhat rychleji. Používala se různá provedení otevíratelných oken a výklopná víka na střeše vozu

Vlivem zpřísnování norem, které předepisovaly větší bezpečnost v tramvaji, se otevírací část oken zmenšovala. Posuvné části oken byly zaměňovány za výklopné, snižováním podvozků tramvajů došlo k přemístění trakčních kontejnerů na střechu, kde byl prostor pro výklopná víka pro větrání. U vysokokapacitních nízkopodlažních tramvajů přestalo být přirozené větrání dostačující a muselo být doplněno nebo nahrazeno větráním nuceným.

Moderní tramvaje jsou vybaveny nuceným větráním. Větrání je zajištěno ventilační jednotkou umístěnou na střeše vozu, kde se můžou nacházet jednotlivé sekce pro úpravu vzduchu. Vzduch je do ventilační jednotky nasáván přes regulační klapku a jednotlivé sekce ventilátorů. Pro dopravu vzduchu se používají především nízkotlaké radiální ventilátory, jelikož dokáží překonat tlakové ztráty ve vzduchovodech s relativně vysokým průtokem vzduchu oproti axiálním ventilátorům. Vzduch proudí dále do vzduchovodů, odkud je

distribuován do salónu s cestujícími pomocí vyústek a poté opět znovu nasáván do jednotky, kde vzduch upravován a opět znovu vyslán do kabiny. [25]

Tramvaj 15T ForCity Alfa je vybavena dvěma režimy ventilace. První je plně manuální, kdy řidič nastavuje stejně jako v autě rychlost foukání a odkud má proud vzduchu vycházet. Druhý je automatický režim, ve kterém počítač vyhodnocuje z řady senzorů neoptimálnější ventilaci pro co nejpohodlnější cestování tramvajů. Nejlepšího výkonu dosahuje ventilace ve chvíli, kdy jsou uzavřena všechna okýnka a o teplotní komfort se stará ventilace spolu s UV fóliemi na oknech. Počítač zaznamenává, v jakém režimu a jak ventilace fungovala, takže není problém zpětně zjistit, jaký režim řidič zvolil. [17]

#### 3.3.5.4 Filtrace

Neméně důležité je při cirkulaci vzduchu ve vnitřních prostorách vzduch také filtrovat, tedy čistit. A to nejen od nečistot, které do ovzduší vylučují lidé nebo které se dovnitř tramvaje dostávají z okolí, ale také od vody, která se do vzduchu dostává nejčastěji kvůli pocení a dýchání cestujících. V případě, že by filtrace vzduchu neprobíhala, ve vnitřních prostorách tramvaje by docházelo k nárůstu vlhkosti vzduchu, čím by byla narušena přepravní pohoda cestujících.

V HVAC jednotce se nachází několik filtrů, které mají za úkol vyčistit a vysušit vzduch, při jeho průchodu přes skříň jednotky, tedy poté, co je do ní nasán a před tím, než je opět vrácen do salónku.

V souvislosti s opatřeními proti šíření Covidu-19 se uvažuje o úpravě funkce filtrace vzduchu. Jednou možností je přidání UV lampy do filtrace. Vzduch obsahující viry by při průchodu přes UV lampu byl těchto virů zbaven.

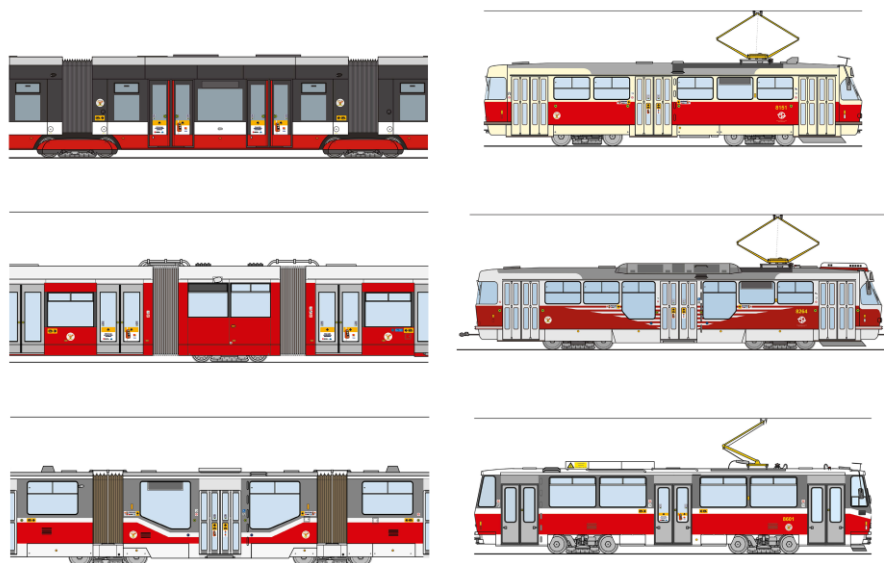
Další možností by bylo zrušení recirkulace vzduchu. Vzduch by byl tedy po průchodu přes salónek následně filtrován a vypuštěn do okolí a z okolí by byl vždy nasáván nový „čistý“ vzduch.

#### 3.3.5.6 Systém otevírání a zavírání dveří

Dveře představují pro dopravní prostředky MHD jedno z klíčových částí vozu. Jsou na ně kladeny nároky především na těsnost, odolnost v tlaku, ale především musí zajistit umožnění co nejrychlejší výměny cestujících ve stanicích. Tomu jsou uzpůsobeny nejen svým počtem na voze, ale i velikostí a způsobem zavírání a otevírání, respektive mechanismem, který tento úkon má na starost.

S nástupem mechatroniky jsou tramvajové dveřní systémy obohacovány o senzory, které mají za úkol předcházet kolizím dveří s lidmi či předměty při zavírání dveří. V současné době je dveřní prostor nejčastěji vybaven kamerovým systémem, kterým řidič tramvaje monitoruje dveřní prostor ve voze i kolem vozu, čidlem ve dveřích, které nedovolí rozjezd tramvaje, pokud nejsou dveře správně zavřené a zvukovou či světelnou signalizací, která ohlašuje cestujícím zavírání dveří.

Nicméně i přes toto vybavení dochází někdy ke kolizi dveří s cestujícími. Tomu by mohli do budoucna předcházet snímače na dveřích tramvajů, které by nedovolili zavření ani přivření věci či člověka mezi dveře.



Obrázek 22: Tramvaje s různým typem dveří [26]

V České republice se u tramvajových vozidel nejčastěji setkáme se 3 druhy dveří. U starších typů tramvají se setkáváme se skládacími dveřmi. Tento typ dveří se skládá ze dvou obdélníkových kusů, které jsou navzájem propojeny 3 klouby a při otevírání se skládají jako harmonika. Jde o konstrukčně jednoduchou variantu, jejíž nevýhodou je však mírné omezení prostoru pro cestující při otevírání dveří.

Dalším typem tramvajových dveří je typ dveří vně výklopných, které se nejčastěji vyskytují u čtyřnápravových tramvají bez kloubů. Tyto dveře tvoří 2 obdélníková křídla, která jsou často prosklená. Křídla dveří jsou upevněna na rameni, které je složeno ze dvou ohnutých tyčí, které se spojují v jednu, která je spojena se skříní tramvaje a souží jako osa, kolem které se křídlo vyklápí. Výhodou tohoto typu dveří je vyklápění křídel dveří vně tramvaj, což může být bráno i jako nevýhoda, kdy je nutné zajistit bezpečnost kolem tramvaje, aby nedošlo ke kolizi při otevírání.

Posledním typem tramvajových dveří představují dveře posuvné. Tento typ dveří se používá pro tramvaje mající jeden nebo dva klouby. Výhodou těchto dveří je především jejich prostorová nenáročnost. Dveře jsou tvořeny buď jedním, nebo dvěma křídly. Otevírání dveří probíhá tak, že se křídla nepatrně vysunou směrem z tramvaje a poté rovnoběžně s karosérií odjíždějí a otevírají se.

Z energetického pohledu vykazuje největší spotřebu energie mechanismus ovládní dveří, který je řízen elektromotorem s účinností přes 90%, je zde tedy malý prostor pro úsporu energie. Menší spotřebu energie představují mechatronické senzory, jejichž nasazením je sice nepatrně zvýšena spotřeba energie, nicméně mohou přispět k významné úspoře energie.

Jedny z největších energetických ztrát tramvajových vozidel představují tepelné ztráty způsobené otevírání dveří, kdy z vytápěného salonu cestujících uniká do okolí skrz dveře teplo. I přes to, že je na rychlost výměny cestujících kladen velký důraz, četnost, se kterou se dveře otevírají a zavírají, je vysoká, proto tyto energetické ztráty nejsou zanedbatelné.

Opatření vedoucí ke snížení těchto tepelných ztrát mohou přispět k významnější úspoře energie, proto bude této problematice věnována pozornost.

### 3.3.5.7 Výsledky studie o netrakových systémech

V návaznosti na předchozí zjištění ze studie STIB, že snaha o zefektivnění rekuperace energie tramvajového vozidla nemá velký potenciál pro zlepšení, byla provedena následně další měření, která sledovala spotřebu energie v pomocných zařízeních tramvajového vozidla. Tato měření byla provedena v různých ročních obdobích, aby bylo možno výsledky porovnávat i při odlišných klimatických podmínkách. Dále byl zaveden zjednodušující předpoklad, že trakční část energie je v každém ročním období konstantní, což sice úplně neodpovídá realitě, nicméně změna trakční energie během roku není tak výrazná.

Měřené hodnoty platí pro klimatické podmínky ČR, kdy se Česká republika dle normy ČSN EN 14 750-1 nachází pro zimu i léto v zóně II. V tabulce 4 je pro tuto zónu uvedena nejnižší zimní vnější teplota  $-20\text{ °C}$  a v tabulce 5 je definována nejvyšší letní okolní teplota  $35\text{ °C}$ . V tabulce 5 jsou také dány hodnoty udávající relativní vlhkost 50% a ekvivalentní sluneční záření  $E_n\ 700\text{ W/m}^2$ . Dle těchto uvedených parametrů se následně navrhuje HVAC jednotky v kolejové dopravě.

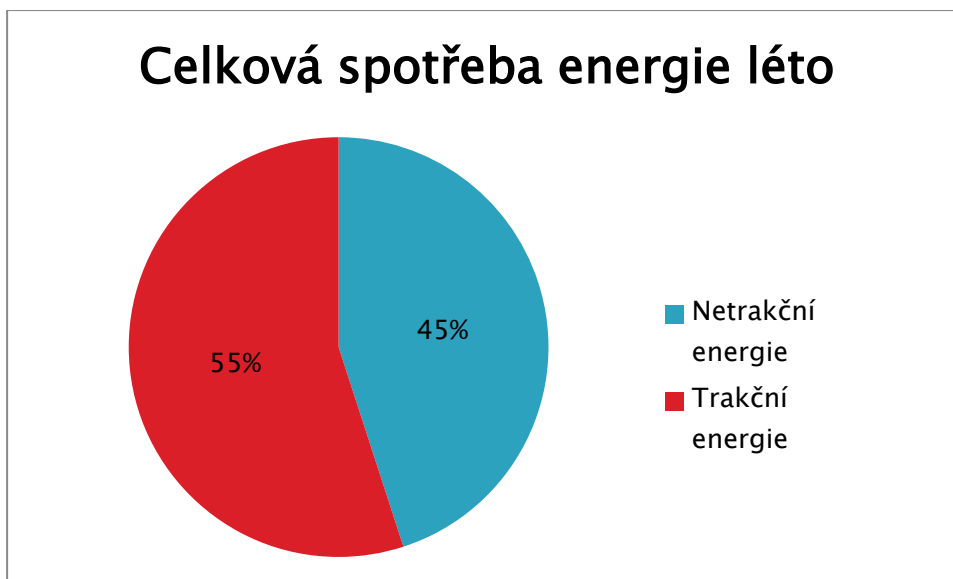
Tabulka 4: Stanovení klimatické zóny – zima [31]

Zóna (zima)	Minimální vnější teploty [ $^{\circ}\text{C}$ ]
I	-10
<b>II</b>	<b>-20</b>
III	-40

Tabulka 5: Stanovení klimatické zóny – léto [31]

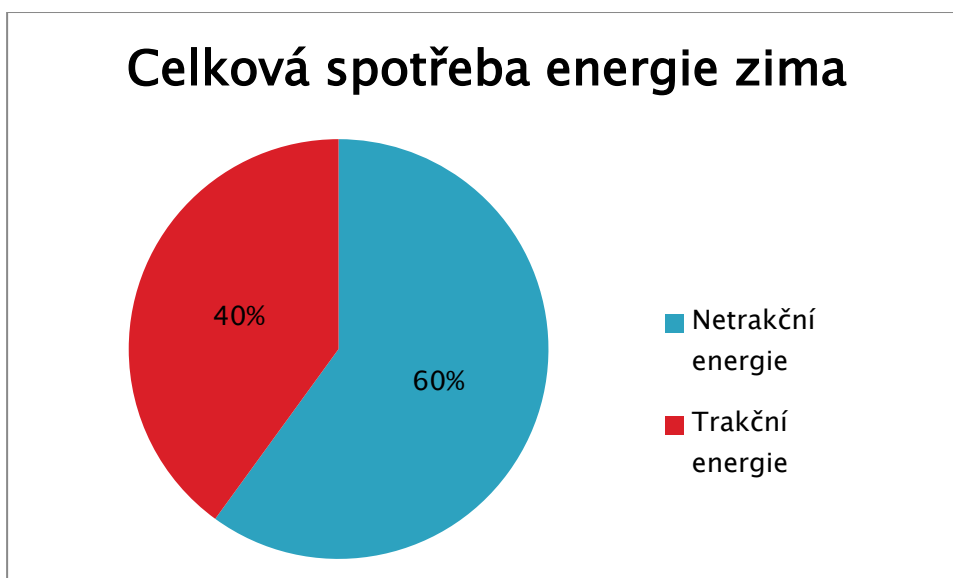
Zóna (léto)	Maximální vnější teploty [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Relativní vlhkost [%]	Ekvivalentní sluneční záření $E_n$ [ $\text{W/m}^2$ ]
I	40	40	800
<b>II</b>	<b>35</b>	<b>50</b>	<b>700</b>
III	28	45	600

Ze studie plynou následující zjištění. Z měření vozidel mající HVAC jednotku během letních měsíců vyplynula relativně vysoká spotřeba energie v pomocných zařízeních. Tato spotřeba činila během letních měsíců cca 40–49 % čisté spotřeby energie tramvají (viz obrázek 23), tedy téměř polovinu celkové spotřebované energie.



Obrázek 23: Podíl trakční a netrakční energie tramvajového vozidla v létě

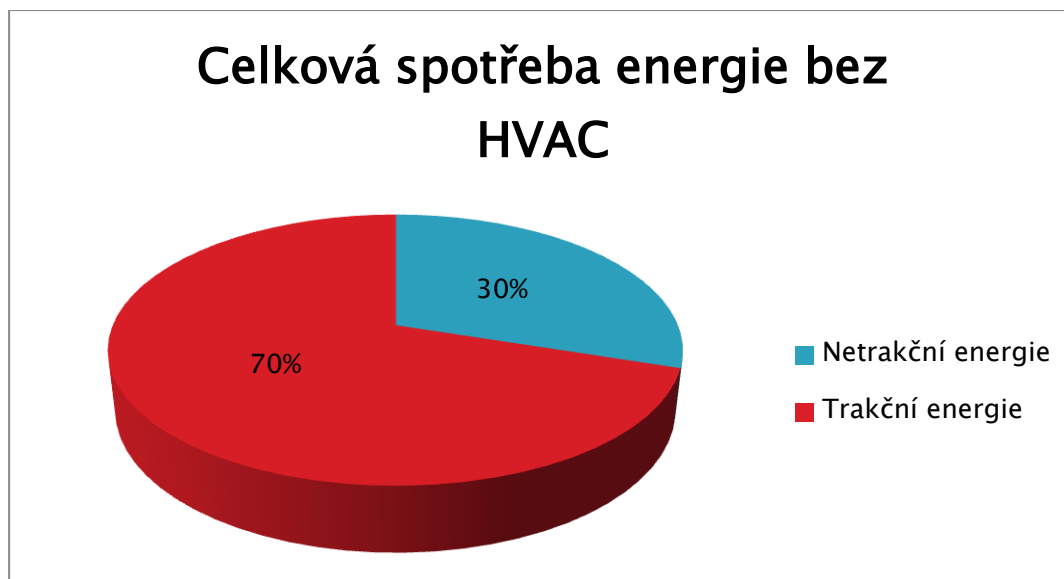
V období zimních měsíců se zapnutým topením činil podíl netrakční energie až 60 % celkové spotřeby energie u stejných tramvají (viz obrázek 24), což už představuje nadpoloviční část celkové energie, tedy rozhodně ne zanedbatelný podíl.



Obrázek 24: Podíl trakční a netrakční energie tramvajového vozidla v zimě

Nejpřekvapivějším zjištěním však byly výsledky posledního měření (viz obrázek 25), kdy byla měřena vozidla bez HVAC jednotky a tramvaje s HVAC jednotkou ve dnech bez zapnutého topení, ventilace a klimatizace. Měření ukázala, že netrakční spotřeba energie v tomto období činila pouze kolem 30 % celkové spotřeby energie tramvají.





Obrázek 25: Podíl trakční a netrakční energie tramvajového vozidla bez HVAC jednotky

Tento výsledek tedy ukazuje na fakt, že HVAC jednotka se zásadní měrou podílí na spotřebě netrakční energie. Při porovnání výsledků ze zimních měsíců s posledním měřením, lze ze srovnání usoudit, že až 30 % celkové dodané energie je vyčleněna pro HVAC jednotku a zbylých 30 % netrakční energie připadá na ostatní systémy zajišťující pomocné funkce ve vozidle především v oblasti komfortu cestujících v podobě osvětlení, informačních systémů a terminálů na jízdenky.

Nejdůležitějším závěrem z této studie je, že spotřeba netrakční energie, tedy spotřeba energie v pomocných zařízeních, nabízí mnohem větší potenciál k lepšímu hospodaření s energií u tramvají především u HVAC jednotky, než snaha o využívání zbývajících několika mála procent brzděné energie mařené v odpornících. [13]

#### 4 Návrh systému opatření ke snížení spotřeby energií během provozu vozidla

Na základě získaných poznatků z rešeršní činnosti byly určeny 2 hlavní oblasti, kde je předpokládán největší prostor pro zavedení opatření ke snížení spotřeby energií během provozu vozidla.

V oblasti trakční energie jde především o snahu o optimálnější využití rekuperované energie, která vzniká při brzdění vozidla a která není příliš efektivně využívána. Proto bude dále rozpracováno několik navrhovaných variant, jak snížit spotřebu trakční energie vozidla.

V oblasti spotřeby netrakční energie vozidla bylo zjištěno, že největší energetickou spotřebu vykazuje HVAC systém vozidla. Proto by hlavní snahou mělo být snížení energetické spotřeby HVAC jednotky, respektive navržení opatření, která sníží energetické ztráty HVAC systému, protože tento systém spotřebovává přibližně 50% z celkové netrakční energie vozidla. Dále bude rozpracováno a uvedeno několik navrhovaných variant řešení opatření, která mohou dopomoci ke snížení spotřeby energie v této oblasti spotřeby energie. Největší důraz bude kladen na vytápění vozidla, protože samotné vytápění vykazuje největší podíl spotřeby energie HVAC systému. Půjde pouze o srovnání z pohledu energetické výhodnosti.



## 4.1 Klasifikace typových zástupců tramvajových vozidel

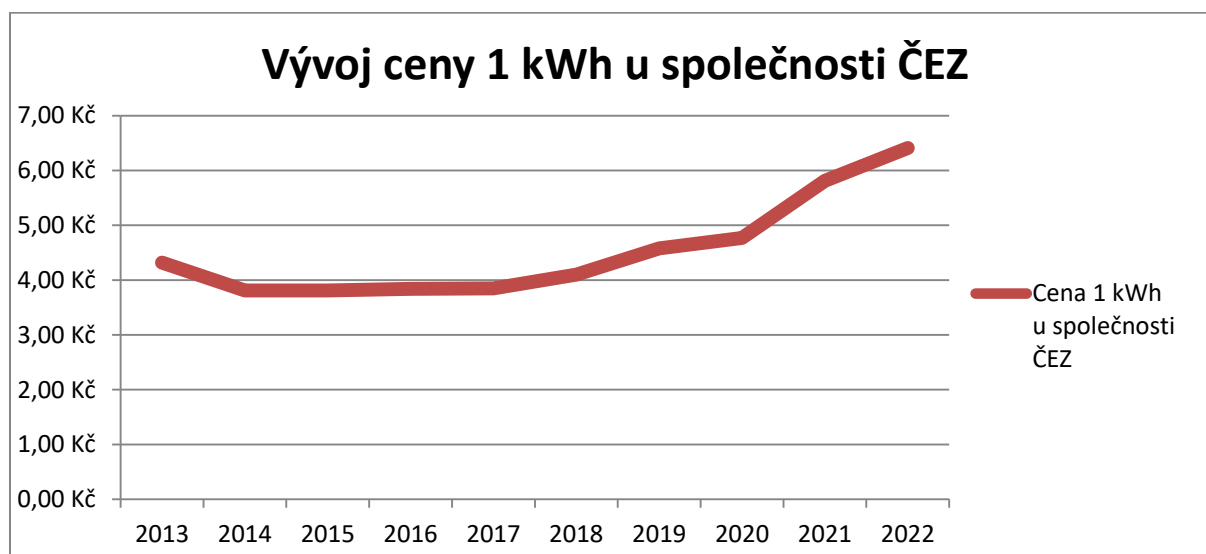
Jelikož tramvajových vozidel existuje celá řada a každé má jiné parametry, bylo by v kalkulacích nemožné obsáhnout všechny varianty, proto byli po domluvě s konzultanty práce vybráni 2 typičtí zástupci tramvajových vozidel, jejichž parametry budou uvažovány ve všech následujících kalkulacích. Jde o v ČR hojně využívané vozidlo tramvaj T3, jakožto zástupce „starších typů tramvají“ a o vozidlo 14T, jakožto zástupce „moderních typů tramvají“. Obrázky obou vybraných zástupců byly prezentovány v dřívějších kapitolách. Níže jsou uvedeny nejvýznamnější technické parametry obou zástupců, které byly zjištěny z technických specifikací obou tramvají.

Tabulka 6: Technické parametry tramvají T3 a 14T

	Tramvaj T3 – starší tramvaje	Tramvaj 14T – moderní tramvaje
Hmotnost plného vozidla [kg]	27 500	61 800
Hmotnost prázdného vozidla [kg]	16 000	40 000
Rozměry vozidla [m]	15,2 x 2,5 x 3	30,2 x 2,46 x 3,37
Obsaditelnost (8 osob/m <sup>2</sup> ) [-]	162	279
Míst k sezení / k stání [-]	24 / 138	69 / 210
Maximální rychlost [km/h]	65	60
Počet a výkon motorů [kW]	4 x 40	6 x 90

## 4.2 Náklady na energie tramvajového vozidla

Pokud se podíváme spotřebu energie tramvajového vozidla čistě z pohledu nákladů na elektrickou energii, kterou tramvajové vozidlo ročně spotřebuje. Dojdeme k závěru, že náklady na elektrickou energii stále rostou, protože cena 1 kWh stále má rostoucí tendenci (viz obrázek 26), který zobrazuje vývoj ceny 1 kWh u společnosti ČEZ za posledních 10 let.



Obrázek 26: Vývoj ceny elektrické energie u společnosti ČEZ

Pokud vyjdeme z údajů získaných z dříve uvedené studie Liberecké technické univerzity a aplikujeme jejich změřené hodnoty na 2 typy v České republice používaných tramvajových vozidel, budeme schopni vykalkulovat celkové průměrné roční množství spotřebované energie 1 vozidlem.

Pro srovnání byla provedena kalkulace roční spotřeby energie pro zástupce „starších tramvají“, kterou zastupuje tramvaj T3, která disponuje odporovou regulací výkonu a pro zástupce „moderních tramvají“, kterou zastupuje tramvaj 14T, která je již opatřena tyristorovou regulací výkonu.

#### 4.2.1 Kalkulace roční spotřebované energie

Níže je uvedena tabulka, která obsahuje vybrané technické parametry uvedených 2 zástupců tramvajových vozidel, které byly zjištěny z technických specifikací jednotlivých vozidel a které byly doplněny o data z dříve uvedených studií.

Pomocí těchto dat byla provedena postupná kalkulace celkové roční spotřeby energie obou typů tramvajových vozidel. Výsledky kalkulací jsou pro přehlednost uspořádány do téže tabulky. Výsledná roční spotřeba energie byla zároveň poté vztažena na 1 kg hmotnosti vozidel a případně i na 1 km ujeté vzdálenosti.

Tato kalkulace slouží jako vstupní hodnoty pro následující kalkulaci ročních nákladů na elektrickou energii tramvajových vozidel.

Tabulka 7: Kalkulace průměrné roční spotřeby energie

	T3 – starší tramvaje	14T – moderní tramvaje
Hmotnost plného vozidla [kg]	27 500	61 800
Hmotnost prázdného vozidla [kg]	16 000	40 000
Průměrná hmotnost vozidla [kg]	21 750	50 900
Celková spotřeba energie na 1 km [kWh]	4,2	2,7
Celková spotřeba energie na 1 km a 1 kg [Wh]	0,19	0,05
Celkové roční náklady na elektrickou energii 1 tramvaje [Kč]	212 121	166 667
Cena 1 kWh u společnosti ČEZ v roce 2019 [Kč]	4,58	
Celková průměrná roční spotřeba energie [kWh]	46 315	36 390
Celková průměrná roční spotřeba energie [kWh/kg]	2,13	0,71
Procentuální průměrná roční úspora energie [%]	<b>33,3 %</b>	

Z výsledků kalkulace je zřejmé, že moderní tyristorově řízené tramvaje dosazují výrazně nižší celkové energetické spotřeby než dřívější typy tramvajových vozidel, kdy přechod na tyristorovou regulaci uspoří ročně průměrně zhruba 33 % dodávané energie, což je téměř o čtvrtinu menší dodané množství energie, což není zanedbatelná hodnota. Dalším důležitým poznatkem ze získaných hodnot je, že i přes zvyšující se hmotnost vozidel je pro provoz potřeba menší množství energie na každý kg hmotnosti než u dřívějších typů tramvají.

#### 4.2.2 Kalkulace průměrné roční spotřebované energie dílčích částí vozidla

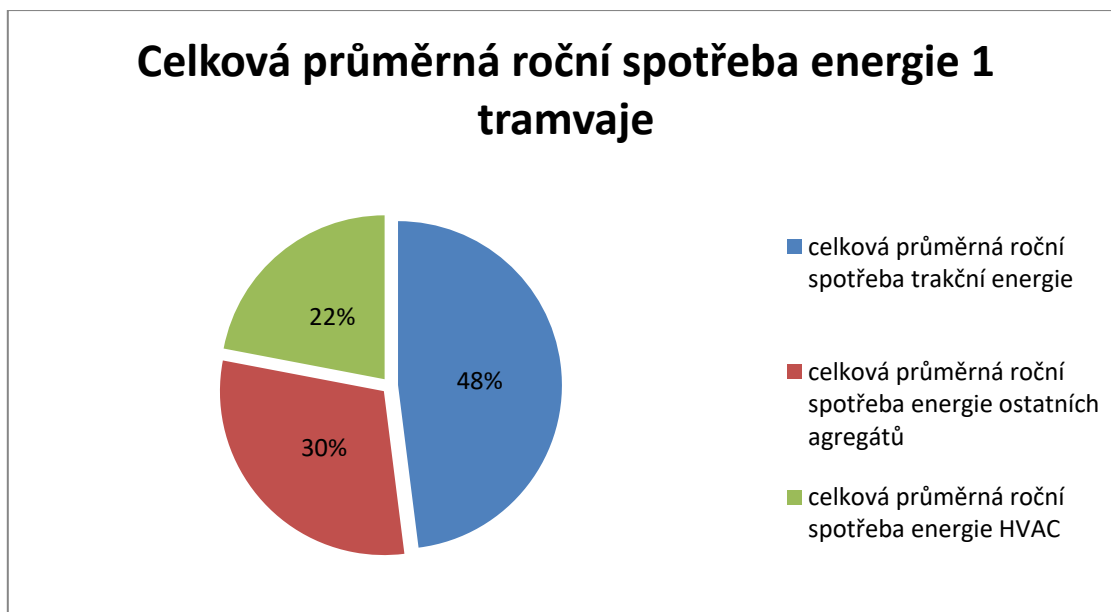
Následně byly provedeny kalkulační detailnější mapující rozložení spotřeby energie v tramvajových vozidlech, jejímž cílem bylo zmapování rozdělení spotřeb energie dílčích částí a systémů vozidla, které se skládají z trakčních a netrakčních částí. Pro přehlednost budou v tabulce kalkulované hodnoty trakční oblasti označeny stejnou barvou a stejně tak hodnoty netrakčních částí vozidla.

Kalkulace byla provedena s následujícími předpoklady:

- Roční trakční spotřeba energie představuje 48 % celkové energie a roční netrakční spotřeba energie představuje 52 % celkové spotřebované energie. Obě hodnoty jsou průměrem z hodnot pro letní a zimní období získaných ze studií uvedených dříve.
- Obě složky roční spotřeby jsou během roku konstantní.

Tabulka 8: Kalkulace průměrné roční spotřebované energie dílčích částí vozidla

	T3 – starší tramvaje		14T – moderní tramvaje	
	Absolutní hodnota	Rel. hodnota [%]	Absolutní hodnota	Rel. hodnota [%]
Celková průměrná roční spotřeba energie 1 tramvaje [kWh]	46 315	100	36 390	100
Celková průměrná roční spotřeba energie 1 tramvaje [kWh/kg]	2,13	100	0,71	100
Celková průměrná roční spotřeba trakční energie [kWh]	22 231	48	17 467	48
Celková průměrná roční spotřeba trakční energie [kWh/kg]	1,02	48	0,34	48
Celková průměrná roční spotřeba netrakční energie [kWh]	24 084	52	18 923	52
Celková průměrná roční spotřeba netrakční energie [kWh/kg]	1,11	52	0,37	52
Celková průměrná roční spotřeba energie HVAC [kWh]	10 189	22	8 006	22
Celková průměrná roční spotřeba energie HVAC [kWh/kg]	0,47	22	0,16	22
Celková průměrná roční spotřeba energie ostatních agregátů [kWh]	13 895	30	10 917	30
Celková průměrná roční spotřeba energie ostatních agregátů [kWh/kg]	0,64	30	0,21	30

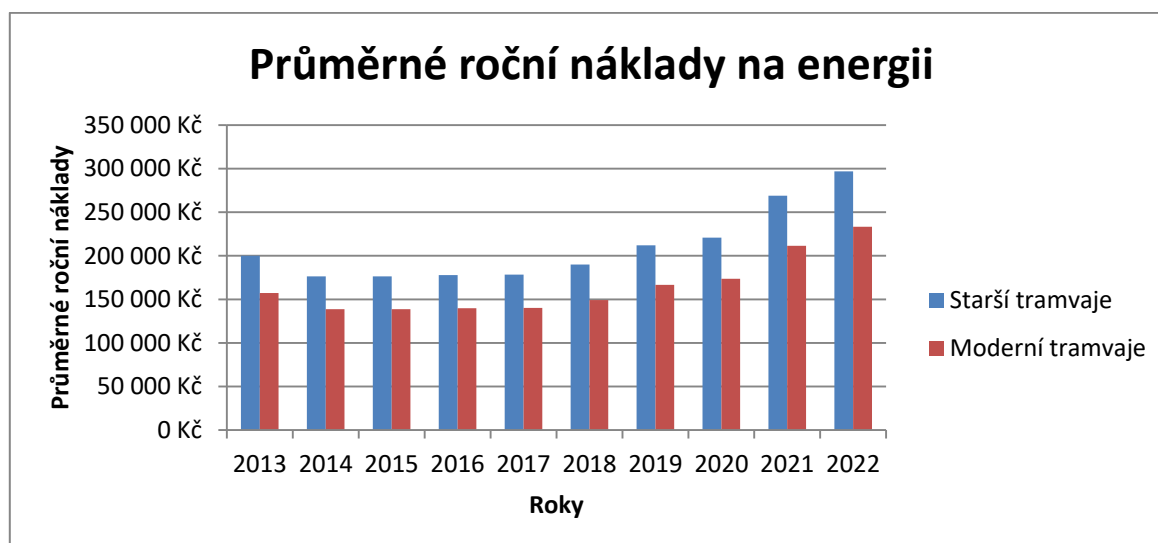


Obrázek 27: Dělení spotřebované energie tramvajovým vozidlem

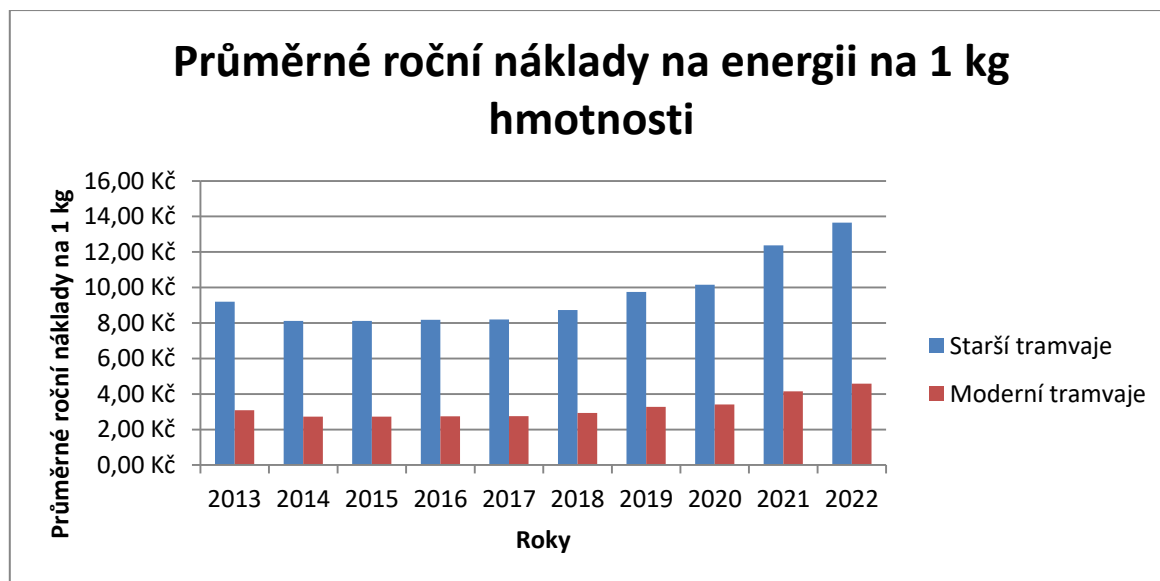
Z výše uvedených kalkulací plyne, že z celkové spotřebované energie představuje průměrně 22 % spotřeba energie HVAC jednotkou a 30 % celkové spotřebované energie připadá na všechny zbylé netrakční agregáty tramvajového vozidla. Z této kalkulace tedy jednoznačně plyne, že HVAC jednotka je systém v tramvaji, který vykazuje úplně nejvyšší spotřebu energie a to především v zimních měsících kvůli vysokým tepelným ztrátám při vytápění vozidla. V této oblasti je tedy nejvhodnější uvažovat opatření ke snížení spotřeby energie.

#### 4.2.3 Kalkulace ročních nákladů na elektrickou energii

Pokud budeme předpokládat, že celková průměrná roční spotřeba energie 1 tramvaje je každý rok stejná, budeme schopni s využitím znalosti vývoje ceny 1 kWh za posledních 10 let určit trend vývoje ročních nákladů na elektrickou energii tramvajových vozidel. Výsledky kalkulací průměrných ročních nákladů na elektrickou energii za poslední desetiletí pro oba uvažované typy tramvají jsou vidět na obrázku ... a na následujícím obrázku jsou tyto hodnoty vztaheny na 1 kg hmotnosti vozidla.



Obrázek 28: Průměrné roční náklady na elektrickou energii



Obrázek 29: Průměrné roční náklady na elektrickou energii vztahovanou na 1 kg hmotnosti

Z výsledků kalkulací je vidět, že moderní tramvaje opatřené tyristorovým řízením vykazují významně nižší náklady na 1 kg své hmotnosti než dříve používané tramvaje. Dále je z obrázků patrný trend růstu nákladů na elektrickou energii, proti které je nutné bojovat efektivnějším využitím energie, tzn. zavedením opatření, která povedou ke snížení celkové spotřeby energie a tím i celkových nákladů na elektrickou energii vozidla tam, aby průměrné roční náklady na elektrickou energii byly minimálně konstantní i při rostoucí ceně za 1 kWh.

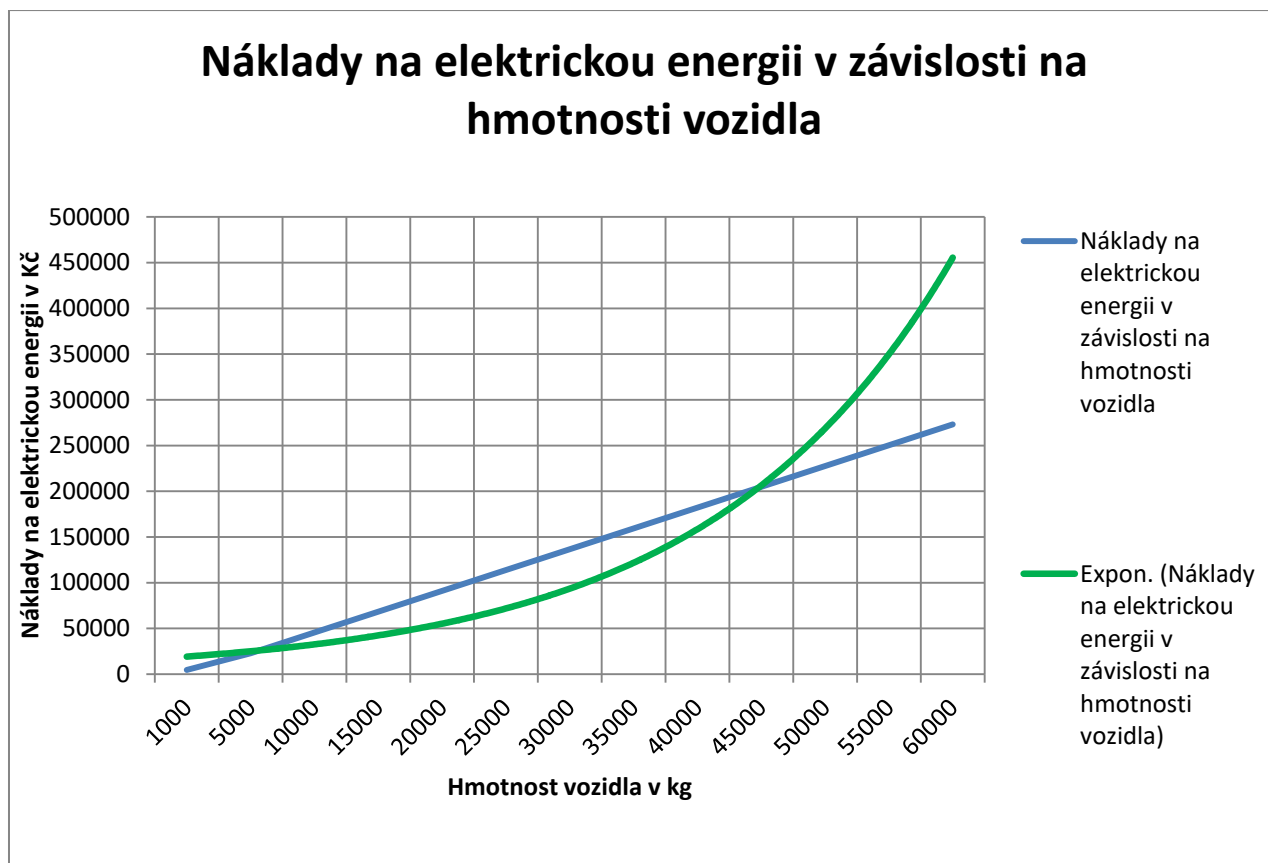
### 4.3 Možnosti opatření ke snížení spotřeby energií

#### 4.3.1 Snížení celkové hmotnosti vozidla

Jednou z možností, které zcela jistě povedou k úspoře energie tramvajového vozidla je snížení celkové hmotnosti vozidla. Z dříve uvedených kalkulací vyplynulo, že spotřeba dnešních moderních typů tramvajů se pohybuje kolem 0,71 kWh/kg, což jinými slovy znamená, že na každý kilogram hmotnosti vozidla je potřeba průměrně 0,71 kWh dodané energie.

Dnešní moderní tramvaje se hmotnostně pohybují kolem 40 000 kg hmotnosti (viz parametry zvoleného zástupce). Pokud by se podařilo celkovou hmotnost vozidla snížit o 10 % současné hodnoty, tedy na hmotnost 36 000 kg, došlo by ke snížení průměrné roční spotřeby vozidla o 2 840 kWh, což při současné ceně 6,41 Kč/kWh představuje roční úsporu 18 205 Kč na provozních nákladech tramvajového vozidla. Tento předpoklad platí, pokud uvažujeme lineární závislost nákladů na elektrickou energii na hmotnosti vozidla.

Výsledná závislost těchto nákladů na hmotnosti tramvajového vozidla je znázorněna na následujícím grafu, kdy modrá křivka udává lineární závislost, která slouží jako zjednodušený model pro uvažované kalkulace a zelená křivka, která představuje exponenciální závislost energie na hmotnosti. Tento model naopak lépe popisuje danou závislost, kdy při vzrůstající hmotnosti exponenciálně narůstá potřebná energie, protože roste i trakční složka potřebné energie, která je v lineárním modelu uvažována jako konstantní hodnota.



Obrázek 30: Závislost nákladů na elektrickou energii na hmotnosti vozidla

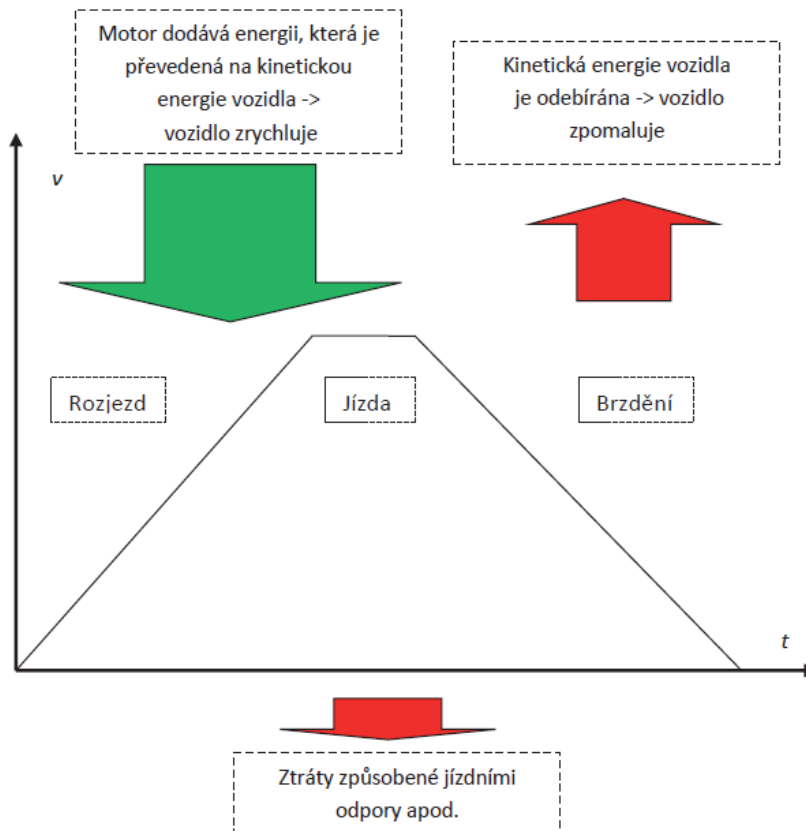
Z grafu vyplývají především 2 základní poznatky, které jsou navzájem protichůdné. Prvním je fakt, že snížení hmotnosti prokazatelně vede ke snížení nákladů na provoz tramvajového vozidla, nicméně od určité hodnoty už nepřinese další snižování hmotnosti velký úspory energie.

Druhým faktem je nevhodnost využití trakčních baterií o vyšších hmotnostech, kdy by od určité hmotnosti vozidla docházelo k tomu, že by spotřebovaná energie vozidla, která by s hmotností narůstala výrazně kvůli vyšší trakční složce, byla vyšší než energie uspořena v akumulátoru. To by znamenalo, že by s sebou tramvaj vozila zbytečnou hmotu navíc, která nepřináší žádné úspory.

Významnou roli by při procesu snižování hmotnosti vozidla mohly hrát kompozitní materiály, které by se daly využít především pro snížení hmotnosti hrubé stavby skříně. V následujících kapitolách tato myšlenka bude více rozvinuta, protože s využitím kompozitních materiálů by mohlo dojít i k významnému zlepšení energetické bilance u HVAC jednotky. Pokud by totiž byl využit materiál, který má lepší izolační vlastnosti než stávající využívané materiály při nižší měrné hmotnosti, může dojít k významnému snížení energetických ztrát v podobě úniku tepla vlivem prostupu tepla ať už skrze sklo či skrze hrubou stavbu skříně.

#### 4.3.2 Rekuperace energie

Pro lepší pochopení, co rekuperace energie znamená, byl vytvořen následující obrázek, kde se můžeme podívat na energetickou bilanci za jízdy vozidla.



Obrázek 31: Energetická bilance jízdy vozidla v závislosti na čase a rychlosti [27]

Když se vozidlo rozjíždí, zvětšuje svou rychlost, čímž se zvyšuje i kinetická energie vozidla, takže z energetického hlediska je energie vyrobená v motoru převedena v kinetickou energii vozidla. Jednoduše lze říci, že energie z motoru je během celého cyklu akumulována v kinetické energii. Během celého cyklu hraje samozřejmě roli také odpor (vzduchu, tření...), při němž se část energie ztrácí.

Při brzdění pomocí elektromotorů je akumulovaná kinetická energie vozidla zpět přeměňována na elektrickou energii, která může být znovu využita. Tento proces je znám jako rekuperace energie. [27]

Rekuperace je tedy proces přeměny kinetické energie dopravního prostředku zpět na využitelnou elektrickou energii při brzdění. energii lze ukládat buď do zásobníků energie - akumulátorů (např. lithium-iontových baterií), které by byly schopny uložit ji pro další využití, případně energii rovnou vracet zpět do napájecí soustavy. Rekuperace závisí jak na stavu infrastruktury, tak na vhodnosti dopravního prostředku k rekuperaci.

V případě vrácení energie zpět do napájecí soustavy musí jít o velmi frekventovanou síť. V okolí tramvaje, která brzdí, je nutné, aby se vyskytovalo další vozidlo, které energii vrácenou zpět do sítě ihned spotřebuje. Pokud tento předpoklad není zajištěn, maří se v odpornících vozidel větší podíl (až 20 %) celkové brzdné energie, protože současná podoba dopravní infrastruktury není schopna pojmout a využít větší množství energie.

Proto je nutno zmínit, že pokud nedojde ke zlepšení v oblasti infrastruktury, nepředstavuje oblast rekuperace velký prostor pro zlepšení. V této práci nebude po domluvě se zadavatelem práce brán v úvahu stav infrastruktury a veškerá navrhovaná opatření ke snížení energie budou uvažována v oblasti opatření na vozidle případně v kombinaci obou možností.



Dlouhou dobu se již rekuperace využívá u kolejových vozidel – vlaky, tramvaje, metro na místech, kde je to ekonomicky velmi výhodné. Hlavním přínosem rekuperace je snížení energetických ztrát. Projevuje se především v prostředí, kde je nutné často brzdit a opět se rozjíždět, např. ve městě. Dlouhodobě nejvýhodnější je například její využití u nákladních vlaků vážících mnoho tisíc tun. Rekuperaci využívá mimo jiné pražské metro, v posledních měsících získala popularitu díky systému KERS pro vozy Formule 1. [23]

V následujících kapitolách budou přiblíženy některé již fungující aplikace rekuperace energie, které se ukázali být jako ekonomicky výhodné.

Dále budou navrženy možné varianty řešení vedoucí k úspoře energie tím, že se sníží spalování přebytečné energie v odporcích, tedy přidáním zásobníků energie do systému, což přinese zvýšení efektivity provozu elektrické trakce a možnost akumulovat rekuperovanou energii v okamžiku, kdy nemůže být spotřebována.

#### 4.3.2.1 Tramvaj Bombardier PRIMOVE

Jízda tramvaje bez přímého napájení z trakčního vedení, pouze ze zásobníků energie, se dnes stále více stává požadavkem některých měst, ať již z důvodů estetických nebo kvůli složitým dopravním stavbám, které by tramvajové vedení dále komplikovalo. Úseky projížděné tramvajemi bez troleje jsou zpravidla dlouhé stovky metrů či jednotlivé kilometry. Dosavadní světový rekord zaznamenala začátkem listopadu 2015 tramvaj vybavená bateriovým zásobníkem Bombardier PRIMOVE (viz obrázek 26), která ve zkušebním provozu na tramvajové síti dopravce Rhein-Neckar-Verkehr GmbH (RNV) v německém Mannheimu ujela bez troleje 41,6 km.

RNV provozuje již od roku 2009 třicet tramvajů vybavených superkapacitorovými zásobníky energie. Jejich kapacita je postačující pro krátké úseky bez troleje. S rozvojem bateriových technologií však mohou potřebné provozní vlastnosti mít i baterie, které navíc oproti superkapacitorům nabízejí větší kapacitu, a tím i delší dojezd.

Zkušební tramvaj v Mannheimu je svojí koncepcí a trakční výzbrojí podobná tramvajím, které již od roku 2014 úspěšně slouží na tramvajové lince Hexi v čínském Nanjingu. Na této 8 km dlouhé lince s 13 stanicemi ujede tramvaj cca 90 % vzdálenosti bez troleje jen z energie z trakčních baterií.



Obrázek 32: Tramvaj Bombardier PRIMOVE [24]

Základem její konstrukce je standardní nízkopodlažní typ Bombardier Flexity 2. pohon tvoří čtyři 120 kW trakční elektromotory s napájecím napětím 750 V DC, pomocné pohony a řídicí jednotka BOMBARDIER MITAC 500. Jako zásobník energie pro provoz bez



troleje slouží odlehčené Li-ion trakční baterie typu PRIMOVE battery 50, umístěné na tramvaji ve dvou sadách o celkové kapacitě 49 kWh pracující s napětím 532 V DC.

Trakční baterie se dobíjejí pantografem dynamicky při rozjezdu a staticky během pobytu ve stanicích, cca 10 minut na konečné stanici a cca 45 vteřin v mezilehlých zastávkách.



Obrázek 33: Bateriový zásobník Bombardier PRIMOVE [24]

Celý tento systém je od začátku konstruován pro pohon akumulátorových vozidel hromadné dopravy, tj. tak, aby maximalizoval poměr mezi výkonem a hmotností pohonné jednotky a citlivě hospodařil s energií. Konstrukce trakčních baterií využívá pro maximalizaci výkonu sloučeniny niklu, manganu a kobaltu. Řídicí jednotka se stará o optimální teplotní režim baterie a o plnou rekuperaci brzděné energie do baterií. Výrobce udává životnost těchto trakčních baterií po dobu 10 let, čili prakticky dvojnásobek dnes obvykle udávané životnosti trakčních baterií u těžkých elektrických vozidel.

#### 4.3.2.2 Elektrické akumulátory

Nejsledovanějšími vlastnostmi tohoto typu akumulátorů jsou schopnost pojmout dostatečně velké množství energie (pro tramvaj alespoň 1–3 kWh), dostatečná dynamika při příjmu i výdeji energie (pro tramvaj alespoň 700 kW), vysoká účinnost, hustota energie [Wh/kg] a pro mobilní akumulátory i měrný výkon [kW/kg]. Těmto požadavkům nejlépe vyhovují akumulátory na bázi kondenzátorových baterií, superkondenzátorových baterií a elektrochemických článků.

Srovnání důležitých parametrů elektrických akumulátorů je možné v následující tabulce. Pro úplnou představu nároků na akumulátor je uvedena i tabulka s běžnými parametry pro intervaly rozjezdu a brzdění tramvají a metra. [28]

Tabulka 9: Parametry elektrických akumulátorů [28]

Parametr	Akumulátor na bázi kondenzátoru	Elektrochemický akumulátor	Akumulátor na bázi superkondenzátorů
Nabíjecí doba	$10^{-3}$ – $10^{-6}$ s	1–5 hod	0,3–30 s
Vybíjecí doba	$10^{-3}$ – $10^{-6}$ s	0,3–3 hod	0,3–30 s
Měrná energie	0,1 Wh/kg	10–100 Wh/kg	1–10 Wh/kg
Měrný výkon	100 000 W/kg	1 000 W/kg	10 000 W/kg
Životnost	500 000 a více cyklů	1 000 cyklů	500 000 cyklů
Účinnost nabíjení a vybíjení	95 a více %	70–85 %	85–98 %

Tabulka 10: Charakteristické parametry vozidel [28]

Typ vozidla	Tramvaj	Metro
Doba rozjezdu [s]	12–15	25–30
Doba brzdění [s]	10–13	20–25
Hmotnost [t]	do 70	do 360
Kinetická energie [kWh]	1–3	10–20

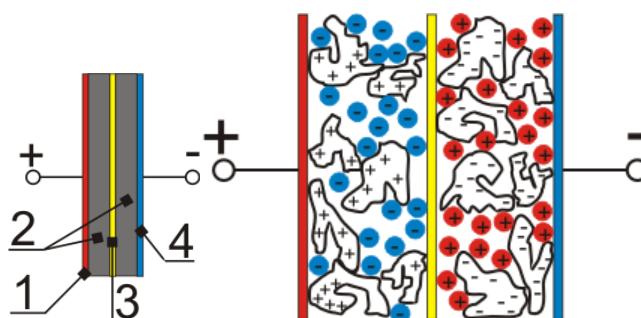
Z první uvedené tabulky plyne nevhodnost využití klasického kondenzátoru pro jeho nízkou hustotu energie. Akumulační zařízení na bázi klasického kondenzátoru se jeví jako velmi rozumné, nicméně pro mobilní použití přímo ve vozidle je nepoužitelné.

Elektrochemický akumulátor naopak nespĺňuje požadavky na dynamiku, protože délka jeho nabíjecího a vybíjecího cyklu se pohybuje v řádech hodin. Ani z hlediska měrného výkonu a účinnosti nabíjení není vhodný pro střednědobý špičkový cyklus, který je pro tyto aplikace požadován. [28]

Požadavkům na akumulátor pro trakci svými parametry nejlépe vyhovuje superkondenzátorový akumulátor, proto bude v následující kapitole detailněji rozpracován.

#### 4.3.2.2.1 Superkondenzátorové akumulátory

Jde o dvouvrstvý elektrochemický kondenzátor, který se podobá klasickému kondenzátoru s tím rozdílem, že je založen na elektrostatickém uložení náboje. Typická dvouvrstvá struktura superkondenzátoru je na následujícím obrázku, kde je vidět, že se skládá z kladné elektrody tvořené hliníkovou fólií (1), z vrstev aktivních elektrod (2), ze separátoru (3) a ze záporné elektrody (4).



Obrázek 34: Struktura článku superkondenzátoru [28]

Maximální napětí superkondenzátoru závisí na druhu použitého elektrolytu a pohybuje se v rozmezí 1,2–3 V. Pro použití superkondenzátoru ve spolupráci s výkonovým měničem napětí a sítí elektrické trakce je nutné mít kondenzátorovou baterii na podstatně vyšší napětí. Tento problém se řeší sériovým spojením superkondenzátorů na úkor jejich kapacity. Protože každý superkondenzátor může mít lehce jinou kapacitu, je nutné pro rovnoměrné rozložení napětí doplnit kondenzátory paralelními rezistory nebo aktivním děličem napětí.

Sledovanou vlastností superkondenzátoru je proto velikost vnitřního sériového odporu, který se při stárnutí superkondenzátoru zvyšuje a tím se snižuje kapacita. V praktických provedeních pro elektrickou trakci se používají sérioparalelní zapojení superkondenzátorů na napětí okolo 600 V s kapacitou v rozmezí 60–80 F.

V praxi často využívanými zásobníky energie jsou superkondenzátory, které dokáží v krátkém čase pojmout poměrně velké množství energie. Další výhodou superkondenzátorů je, že je lze instalovat jak na vozidlech, tak na měnících – stacionární zásobníky energie.

Nespornou výhodou představuje i jeho životnost, která pro případ superkondenzátorové baterie umístěné stabilně u tramvajové trati, po které projede denně 270 souprav, vychází na 5 let provozu. Za tuto dobu je zařízení nejen schopno pokrýt úsporami elektrické energie své pořizovací náklady, ale přinést i další užitek. [27]

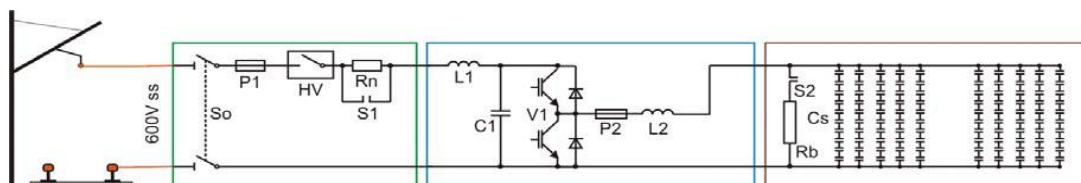
Největší nevýhodou superkondenzátorových akumulátorů je poměrně vysoká pořizovací cena. Nicméně jak již bylo řečeno, svou relativně vysokou životností je zařízení schopno tuto nevýhodu potlačit.

Důležitější nevýhodou je hmotnost akumulátoru, která je mnohdy tak vysoká, že zamezuje využití čistě trakčních akumulátorů pro dopravní prostředky. Proto se častěji využívají stacionární zásobníky energie či kombinace obou případů.

#### 4.3.2.2 Stacionární superkondenzátorové akumulátory

Superkondenzátorový akumulátor samozřejmě nemůže být tvořen pouze samotným superkondenzátorem. Pro využití veškeré energie uložené v superkondenzátoru je nutný vhodný polovodičový měnič, který je schopen pracovat v režimu zvyšování napětí – odčerpávání energie ze superkondenzátoru, i režimu snižovacím pro regulaci nabíjení kondenzátoru. Nabíjecí a vybíjecí výkon kondenzátoru je omezen oteplením superkondenzátorového článku.

Celé zařízení lze rozdělit do 3 základních bloků. Zeleně označený blok představuje vstupní obvody s elektrickými přístroji. Modře označený blok představuje část měniče s polovodičovými prvky a filtry. A hnědě označený blok představuje vlastní baterii superkondenzátorů s nouzovými elektrickými přístroji.



Obrázek 35: Zapojení stacionárního akumulátoru pro elektrickou trakci [28]

Z obrázku je patrná analogie s trakčním obvodem samotného vozidla. Tato skutečnost přináší možnost využít stejné elektrické přístroje, zejména hlavní vypínač (HV), jako jsou použity na hnacím vozidle. Stejně tak je tomu u měniče, kde lze použít shodný modul s IGBT tranzistory a zpětnými diodami jaký je použit u trakčního střídače. [28]

Hlavní výhodou tohoto typu zásobníku energie je, že není mobilní. Tzn., že je stabilně umístěn u elektrické trati a nepředstavuje tak hmotnost navíc, kterou by vozidlo muselo s sebou vozit, což by vedlo ke zvýšení spotřeby energie.

V současné době se superkondenzátorový akumulátor jeví jako nejvhodnější akumulátor rekuperované energie. Je technicky nejjednodušší a ekonomicky nejvýhodnější. Z bezpečnostních důvodů a z nedostatku prostoru ve vozidle (zvýšení hmotnosti) se více počítá s umístěním superkondenzátorového akumulátoru stacionárně u tramvajové trati. Umístění na vozidle však nabízí i řadu výhod a snížení ztrát o ztráty ve vedení na delší vzdálenosti. [28]

### 4.3.3 Opatření proti úniku tepla ze salonu cestujících

Jelikož dochází k velkým energetickým ztrátám především v zimních měsících, kdy dochází vlivem častého otevírání a zavírání dveří při výměně cestujících k úniku velkého množství vyrobeného tepla, bylo by vhodné zavést taková opatření, která tyto ztráty pomohou snížit.

Stejně důležitým opatřením v netrakové oblasti může být také využití nekonvenčních materiálů, které vykazují lepší izolační vlastnosti, než stávající používané. Využitím materiálů podobných mechanických vlastností, ale lepších vlastností z pohledu snížení prostupu tepla materiálem, může dojít ke snížení energetických ztrát vznikajících vlivem úniku tepla do okolí tramvaje.

Pokud by byly využity i materiály s nižší měrnou hmotností, než stávající materiály, může to vytvořit synergický efekt z pohledu toho, že volbou vhodného materiálu dojde k zachování potřebných mechanických vlastností při snížení prostupu tepla materiálem a při snížení měrné hmotnosti materiálu a tím i ke snížení celkové hmotnosti vozidla. Toto snížení hmotnosti povede ke snížení energetické spotřeby vozidla, jak již bylo naznačeno v dřívější kapitole.

#### 4.3.3.1 Změna u ventilátorů

Jedním takovým opatřením může být například zavedení zpětného chodu ventilátorů, pokud dojde k otevření dveří. V takovém případě bude vyrobený ohřátý vzduch nasáván zpět do ventilace, čímž dojde ke snížení množství, které uniká pryč do okolí tramvaje. V takovém případě by bylo potřeba doplnit HVAC jednotku o vzdušník, kde by se tento nasátý vzduch akumuloval do doby, než budou dveře opět uzavřeny. Návrh s sebou také nese možnost filtrace vzduchu nasávaného ze salonu pro cestující, což může hrát výraznou roli v omezení šíření nákaz (např. Covid-19) v prostředcích MHD.

Podobným ale snáze realizovatelným opatřením může být například zastavení ventilátorů, pokud dojde k otevření dveří. V takovém případě se „smíříme“ s tím, že nám vyrobené teplo „uteče“ do okolí, ale po dobu otevřených dveří nebudeme další teplo vyrábět, čímž nedojde k tak velkým energetickým ztrátám jako v případě, kdy jsou zavedena žádná podobná opatření.

#### 4.3.3.2 Tlaková stěna

Jinou cestu, jak zabránit nechtěnému úniku tepla do okolí, může být vytvoření tlakové stěny ve dveřním prostoru tramvajového vozidla. Myšlenka vychází z představy, že ohřátý vzduch uniká do okolí ve směru největší změny teplotního gradientu, tedy proudí do místa, kde je rozdíl teplot vzduchů největší, což je mimo tramvajové vozidlo. A teď si představme, že k tomuto proudění vzduchu nedojde v případě, že mu do cesty umístíme nějakou překážku, kterou nepřekoná.

Problém s uvažovanou překážkou je takový, že to nemůže být fyzická překážka, protože to by znemožnilo výstup a nástup cestujících. Musí tedy jít o překážku, která vznikne lokální změnou tlaku vzduchu, čímž dojde ke vzniku něčeho, co můžeme označit jako tlaková stěna. Jde tedy o to vytvořit ve dveřním prostoru takový tlak, aby zabránil proudění vzduchu mimo tramvajové vozidlo. Podobného principu využívají i dveře u nákupních center. V praxi toto opatření může být realizováno 2 způsoby.

Prvním z nich je vytvoření přetlaku, tedy místa, kde je lokálně vyšší hodnota tlaku než v okolí. Z tohoto místa bude tedy proudit vzduch do míst, kde je tlak nižší, což je mimo

vozidlo i v prostoru v salonu pro cestující. Bude tedy docházet k tomu, že tento vzduch zabrání proudění ohřátého vzduchu mimo vozidlo.

Druhý způsob zahrnuje vytvoření podtlaku, tedy místa, kam se bude vzduch z okolí stahovat a kde bude lokálně snížen tlak vzduchu tím, že bude vzduch ve dveřní oblasti odsáván. V podstatě tento návrh vychází z předchozí úvahy, kdy byly ventilátory ve dveřní oblasti puštěny po dobu otevřených dveří v opačném směru a nasávaly by tak vzduch, který by nemohl ve velkém množství unikat mimo vozidlo.

#### 4.3.3.3 Senzor zavírající dveře

Další možností, jak snížit energetické ztráty při otevřených dveřích, je snížení doby, po kterou jsou dveře otevřeny. Doba otevření a zavření dveří je pevně dána výkonem elektromotoru, který je ovládá, s tím nelze nijak pohnout. Nicméně doba, po kterou jsou dveře otevřeny je dána rychlostí výměny cestujících, nebo také dobou, jak dlouho cestující nastupují, s tím se také nedá příliš dělat. Nicméně cestující nemusí nastupovat vždy všemi dveřmi, a tak může nastat situace, kdy některé dveře vozidla zůstávají otevřeny i v době, kdy nikdo do tramvaje nenastupuje žádný cestující.

A právě v takovém případě by se mohlo vyplatit zavést takové opatření, které uzavře dveře, kudy do vozidla nenastupují žádní cestující a tím dojde i k lokálnímu snížení úniku tepla do okolí. Toto opatření mohlo být realizováno například snímači umístěnými na dveřích, které by měli za úkol snímat nejbližší okolí dveřního prostoru vně tramvajového vozidla. Pokud by po stanovenou dobu nikdo nevstoupil do definovaného prostoru, došlo by k uzavření dveří.

#### 4.3.3.4 Materiály s lepšími izolačními vlastnostmi než stávající

K nejvýznamnějšímu snížení spotřeby energie tramvajového vozidla může dle mého názoru dojít vzniknutím výše uvedeného synergického efektu, který je ovlivněn využitím vhodného alternativního materiálu pro stavbu skříně vozidla. Protože se domnívám, že toto opatření může mít zásadní vliv na úsporu energie, bude v následujících kapitolách nejdetailněji rozpracován do několika variant a ty budou následně zhodnoceny a z nich bude stanovena optimální varianta, která bude doporučena zadavateli práce.

##### 4.3.3.4.1 Analýza současného řešení

Jako zástupce současného řešení skříní tramvajových vozidel poslouží pro analýzu energetické bilance tramvaj 14T, jejíž některé technické parametry byly specifikovány v dřívější kapitole, nicméně zde budou rozšířeny o další specifické parametry potřebné k výpočtu energetické bilance v salonku cestujících.

V současné době se pro skřín vozidla nejčastěji využívá kombinace hliníkových slitin případně oceli, které tvoří vnější schránku vozidla a laminátu, jehož vrstva tvoří vnitřní schránku vozidlové skříně. Mezi těmito vrstvami se nachází další vrstvy materiálu, které slouží jako tlumicí či izolační vrstvy. Pro tyto účely se často využívají materiály antivibrál, moniflex a rotaflex případně i skelná vata. Dále je skřín vozidla tvořena řadou oken a dveří, které jsou vyplněna sklem.



Obrázek 36: Uvažovaná tramvaj 14T

Analýza byla provedena za následujících předpokladů:

- Je uvažováno stojící vozidlo provozované v ČR, kam je dodáno potřebné množství tepla k jednorázovému vytopení salonu na požadovanou teplotu
- Není uvažován únik tepla skrz čela, jelikož je uvažováno obousměrné vozidlo
- Dveře jsou uvažovány celoskleněné dvouvrstvé (plocha skel tvoří 80 % celkové plochy dveří) a pro výpočet byl jejich počet uměle navýšen tak, že dvoukřídlové dveře byly nahrazeny 2 jednokřídlovými
- Okna jsou uvažována všechna stejně velká tvořená 2 vrstvami skla
- Střecha je uvažována rovinného tvaru, tedy bez zaoblení

#### Vstupní parametry výpočtu:

- Skříň:
  - Bočnice
    - Rozměry: 25 200 x 2 900 mm
  - Střecha
    - Rozměry: 25 200 x 2 400 mm
  - Dveře
    - Počet: 20x
    - Rozměry: 650 x 2 275 mm
  - Okna
    - Počet: 16x
    - Rozměry: 1 360 x 950 mm
- Země: ČR
  - Teploty okolí: -20 °C až +35 °C
  - Ekvivalentní sluneční záření: 700 W/m<sup>2</sup>
- Počet cestujících:
  - Pro 4 osoby/m<sup>2</sup> – 140 osob
  - Plocha salonku: 34,875 m<sup>2</sup>
- HVAC jednotky:
  - Počet: 3x
- Teplota uvnitř salonku: +20 °C
- Součinitele přestupu tepla  $\alpha$ :
  - Vnější: 23 W/m<sup>2</sup>\*K
  - Vnitřní:
    - Bočnice: 8,1 W/m<sup>2</sup>\*K
    - Strop: 8,7 W/m<sup>2</sup>\*K
    - Okno a dveře: 11 W/m<sup>2</sup>\*K
    - Podlaha: 6,9 W/m<sup>2</sup>\*K

#### Výpočet energetické bilance:

Z energetické bilance plyne rovnost mezi do soustavy dodanou energií a energií, která soustavu opouští. Tuto energii budeme označovat jako ztrátová (odevzdaná).

$$\sum E_{\text{přijata}} = \sum E_{\text{odevzdaná}}$$

Do soustavy tedy do salonu cestujících je dodávána energie v podobě tepla z HVAC jednotky, ale také tepelným ziskem ze slunečního záření, které prochází do salonu okny a také tepelným ziskem, který vytváří cestující.

Naopak ze soustavy odchází energie v podobě tepelných ztrát vlivem prostupu tepla skrz materiál, ztrát infiltrací a vlivem ztrát větráním.

Z této energetické bilance tedy vyplývá minimální potřebný tepelný příkon HVAC jednotky, který bude tímto výpočtem stanoven.

### Výpočet tepelných zisků:

Pro tepelný zisk vytvořený z cestujících je uvažováno, že každý cestující vytvoří průměrně 100 W tepelné energie. Tepelný zisk z cestujících bude tedy roven:

$$Q_{zc} = n \cdot 100 = 140 \cdot 100 = \mathbf{14\ 000\ W}$$

Další tepelný zisk je získán z prostupu slunečního svitu okny, pro jehož stanovení platí následující vztah:

$$Q_{zs} = n \cdot S_o \cdot E_n = 16 \cdot 1,292 \cdot 700 = \mathbf{14\ 470\ W}$$

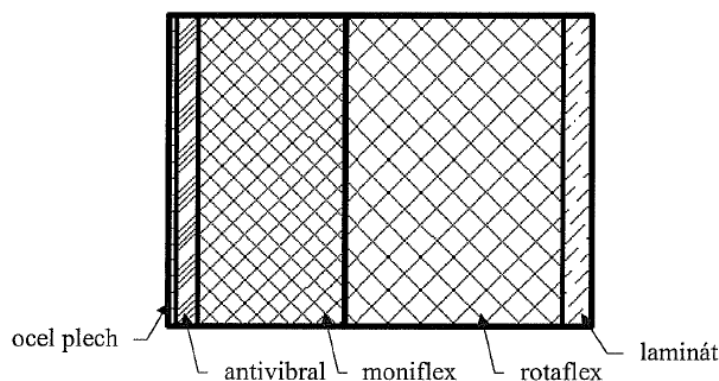
Kde  $n$  představuje počet oken vozidla,  $S_o$  představuje plochu okna a  $E_n$  je ekvivalentní sluneční záření, které je stanoveno normou ČSN EN 14 750-1.

### Výpočet tepelných ztrát:

Abychom byli schopni stanovit hodnotu tepelných ztrát, je nejprve potřeba stanovit hodnotu prostupu tepla jednotlivých částí skříně vozidla. Z těchto hodnot následně budeme schopni stanovit hodnotu celkových ztrát vlivem prostupu tepla, ztrát infiltrací a ztrát větráním.

### Bočnice

Pro výpočet prostupu tepla bočnicí je uvažována následující skladba materiálů, které vykazují níže uvedené vlastnosti:



Obrázek 37: Skladba vrstev materiálů bočnic

Tabulka 11: Vlastnosti materiálů bočnic

Materiál	Tloušťka [mm]	Vodivost $\lambda$ [W/m*K]
Ocel	1,5	45
Antivibrál	3	0,07
Moniflex	20	0,0565
Rotaflex	30	0,035
Laminát	4	0,209



Z těchto hodnot bude stanoven prostup tepla bočnicí  $k_j$  dle vztahu:

$$k_{jb} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,0015}{45} + \frac{0,003}{0,07} + \frac{0,020}{0,0565} + \frac{0,030}{0,035} + \frac{0,004}{0,209} + \frac{1}{8,1}} = 0,6944 \frac{W}{m^2} * K$$

Dále je u bočnic třeba uvažovat prostup tepla skrz tepelné mosty (žebra nosné konstrukce), které nejsou nijak izolovány. Součinitel prostupu tepla skrz tyto mosty bude vypadat následovně:

$$k_{jm} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,0585}{45} + \frac{1}{8,1}} = 5,9441 \frac{W}{m^2} * K$$

Výsledný součinitel prostupu tepla skrz bočnice bude stanoven z následujícího vztahu, kdy je uvažováno, že tepelné mosty zabírají 3% celkové plochy bočnice:

$$k_{jbc} = \frac{k_{jb} \cdot S_b + k_{jm} \cdot S_m}{\sum S_{bc}} = \frac{0,6944 \cdot 0,97 \cdot 47,96 + 5,9441 \cdot 0,03 \cdot 47,96}{47,96} = 0,8519 \frac{W}{m^2} * K$$

### Podlaha

Pro výpočet prostupu tepla podlahou je uvažována neizolovaná plocha, která je tvořena vrstvou linolea, překližky a ocelového plechu. Vlastnosti materiálů jsou uvedeny níže:

Tabulka 12: Vlastnosti materiálů podlahy

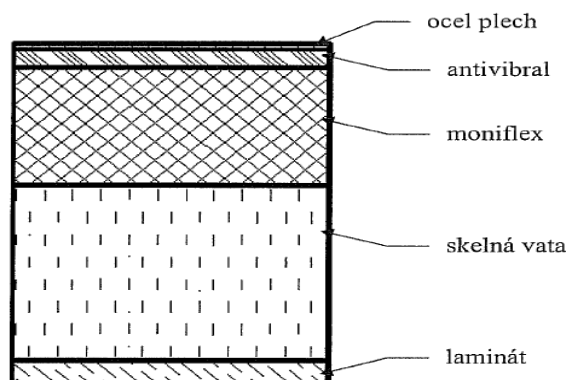
Materiál	Tloušťka [mm]	Vodivost $\lambda$ [W/m*K]
Ocel	1,5	45
Překližka	10	0,23
Linoleum	3	0,19

Z těchto hodnot bude stanoven prostup tepla podlahou  $k_j$  dle vztahu:

$$k_j = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,0015}{45} + \frac{0,010}{0,23} + \frac{0,003}{0,19} + \frac{1}{6,9}} = 4,037 \frac{W}{m^2} * K$$

### Střecha

Pro výpočet prostupu tepla střechou je uvažována následující skladba materiálů, které vykazují níže uvedené vlastnosti:



Obrázek 38: Skladba vrstev materiálů střechy



Tabulka 13: Vlastnosti materiálů střechy

Materiál	Tloušťka [mm]	Vodivost $\lambda$ [W/m*K]
Ocel	1,5	45
Antivibrál	3	0,07
Moniflex	20	0,0565
Skelná vata	40	0,039
Laminát	4	0,209

Z těchto hodnot bude stanoven prostup tepla střechou  $k_j$  dle vztahu:

$$k_j = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,0015}{45} + \frac{0,003}{0,07} + \frac{0,020}{0,0565} + \frac{0,040}{0,039} + \frac{0,004}{0,209} + \frac{1}{8,7}} = 0,6250 \frac{W}{m^2} * K$$

### Okno a dveře

Pro výpočet prostupu tepla oknem a dveřmi je uvažována stejná skladba materiálů o různé tloušťce, proto je výpočet prostupu tepla proveden zároveň. Vlastnosti materiálů jsou uvedeny níže:

Tabulka 14: Vlastnosti materiálů oken a dveří

	Materiál	Tloušťka [mm]	Vodivost $\lambda$ [W/m*K]
Okno	Sklo	4	0,756
	Vzduch	1	0,026
	Sklo	4	0,756
Dveře	Sklo	8	0,756
	Vzduch	1	0,026
	Sklo	8	0,756

Z těchto hodnot bude stanoven prostup tepla okny a dveřmi  $k_j$  dle vztahu:

$$k_{jo} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,004}{0,756} + \frac{0,001}{0,026} + \frac{0,004}{0,756} + \frac{1}{11}} = 5,4516 \frac{W}{m^2} * K$$

$$k_{jd} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,008}{0,756} + \frac{0,001}{0,026} + \frac{0,008}{0,756} + \frac{1}{11}} = 5,1543 \frac{W}{m^2} * K$$

Se znalostí hodnot prostupu tepla jsme nyní schopni stanovit ztráty prostupem tepla za klidu jednotlivými částmi skříně vozidla dle vztahu:

$$Q_j = n \cdot k_j \cdot S_j \cdot (t_i - t_e)$$

Tabulka 15: Hodnoty ztrát prostupem tepla

	$a$ [mm]	$b$ [mm]	Počet kusů [-]	$S_j$ [m <sup>2</sup> ]	$t_i$ [°C]	$t_e$ [°C]	$Q_j$ [W]
Bočnice	25 200	2 900	2	47,96	+20	-20	3 268
Střecha	25 200	2 400	1	60,48	+20	-20	1 512
Podlaha	25 200	2 400	1	60,48	+20	-20	9 766
Okna	1 360	950	16	1,292	+20	-20	4 508
Dveře	650	2 275	20	1,183	+20	-20	4 878
						$\Sigma Q_j$	<b>23 932</b>

Celkové ztráty prostupem tepla za klidu činí: **23 932 W**

Ze znalosti celkových ztrát prostupem tepla můžeme stanovit ztráty infiltrací, které představují 10% z těchto ztrát, tedy platí:

$$Q_i = 0,1 \cdot Q_j = 0,1 \cdot 23\,932 = \mathbf{2\,393\,W}$$

Také jsme schopni stanovit ztráty vzniklé větráním salonku cestujících podle empirického vztahu:

$$Q_v = 0,355 \cdot n \cdot 8 \cdot (t_i - t_e) = 0,355 \cdot 140 \cdot 8 \cdot (20 + 20) = \mathbf{15\,904\,W}$$

#### Stanovení minimálního tepelného příkonu HVAC jednotky:

Z energetické bilance plyne, že minimální tepelný příkon HVAC jednotky je dán následujícím vztahem:

$$P = Q_j + Q_i + Q_v - Q_{zs} - Q_{zc} = 23\,932 + 2\,393 + 15\,904 - 14\,000 - 14\,470 = \mathbf{13\,759\,W}$$

Jelikož není naším cílem dimenzovat HVAC jednotku, ale pouze vyčíslit spotřebu energie HVAC systému při běžném provozu, je pro nás takto spočtená hodnota dostačující.

#### Západní styl vytápění:

Pokud uvažujeme, že je tramvajové vozidlo vytápěno pouze pomocí HVAC jednotky a že je osazeno celkem 3 HVAC jednotkami starajícími se o salon cestujících, musí výkon jedné HVAC jednotky činit třetinu z vypočtené hodnoty, tedy zhruba **4,6 kW**.

Takto výkonná HVAC jednotka by byla nicméně značně poddimenzována, protože požadované teploty v salonu cestujících musí být dosaženo i v případě, že je tramvaj prázdná a i v případě špatného počasí. Tedy i v případě, kde nedochází k žádným tepelným ziskům. V takovém případě vypadá energetická bilance následovně:

$$P = Q_j + Q_i + Q_v = 23\,932 + 2\,393 + 15\,904 = \mathbf{42\,230\,W}$$

Minimální výkon jedné HVAC jednotky by musel činit **14,1 kW**. HVAC jednotky, které jsou schopny vytápění, dosahují hmotnosti přibližně **470 kg**.

#### Východní styl vytápění:

Pokud uvažujeme, že je tramvajové vozidlo vytápěno pomocí podsedákových a podestových přímotopů (tedy ne pomocí HVAC jednotky), které dosahují výkonu 3 kW a jejichž hmotnost se pohybuje kolem 13 kg, bude platit následující:

$$P = Q_j + Q_i + Q_v = 23\,932 + 2\,393 + 15\,904 = \mathbf{42\,230\,W}$$

Pro stejné potřebné množství energie bude potřeba k vytopení salonku pro cestující na požadovanou teplotu 15 takovýchto přímotopů, jejichž celková hmotnost je přibližně 195 kg. K tomu je však nutné zohlednit i hmotnost HVAC jednotky, která se u typů, které nejsou schopny vytápět, pohybuje kolem 400 kg.

Z toho tedy plyne, že u tohoto způsobu vytápění potřebujeme k dosažení požadované vnitřní teploty **15 kusů** přímotopů o výkonu **3 kW** o hmotnosti přibližně **195 kg**.

#### **Závěry z analýzy:**

Z výsledků energetické analýzy tramvajového vozidla plynou následující zjištění:

- K největšímu úniku tepla dochází při větrání salonku cestujících
- Téměř stejné množství tepla uniká prostupem tepla, kdy největší oblasti úniku tepla jsou v oblasti podlahy, dveří, oken a bočnic (vyjmenovány sestupně podle celkového množství uniklého tepla)
- Ze srovnání východního a západního typu vytápění se jeví jako vhodnější varianta západní způsob vytápění, protože pro vytvoření stejného množství tepla je potřeba o 125 kg méně hmoty, což samo o sobě má příznivý vliv na snížení spotřeby energie.

Z uvedeného tedy plyne, že snížení spotřeby energie v této oblasti má význam zejména z materiálového pohledu, kdy při využití materiálu s lepšími izolačními vlastnostmi a také v oblasti snižování hmotnosti vozidla.

#### **4.3.3.4.2 Navrhované alternativní materiály**

Z rešerše možných alternativních materiálů byly vybrány následující materiály, které jsou díky některým svým vlastnostem vhodné pro náhradu uvažovaných materiálů – ocel u nosné konstrukce a sklo u okenních a dveřních částí vozidla. Výčet jejich vybraných vlastností a srovnání se současně používanými materiály jsou uvedeny v této kapitole. Zde zmíněné materiály budou poté v následující kapitole zhodnoceny a bude vybrána nejvýhodnější varianta řešení.

Pro oblast oken byl vybrán jako alternativní materiál Polymethylmethakrylát, který známe spíše pod lidovým pojmenováním plexisklo, jehož vlastnosti budou srovnány s vlastnostmi skla.

Jako alternativní materiál v oblasti materiálu pro hrubou stavbu skříně vozidla byl zvolen kompozitní materiál na bázi uhlíkových vláken s epoxidovou pryskyřicí.

#### **Plexisklo (Polymethylmethakrylát – PMMA)**

Jako možná náhrada skla připadá v úvahu plexisklo, což je průhledný syntetický polymerní materiál s vlastnostmi termoplastu. Nejcharakterističtější vlastností PMMA je jeho čírost a naprostá bezbarvosť i v tlustých vrstvách. To umožňuje nejen jeho dokonalou průhlednost, ale i snadné vybarvování.

Odolností proti povětrnosti předčí PMMA všechny běžné termoplasty. PMMA má dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti, je možno jej dobře mechanicky obrábět, dobře odolává vodě, zředěným alkáliím a kyselinám.

PMMA se používá v mnoha případech jako náhražka skla. Nesporně velkou výhodou PMMA v porovnání se sklem jsou nízké výrobní náklady, snadná možnost ohýbání, nižší měrná hmotnost, vyšší propustnost světla a větší odolnost vůči nárazům.

Nevýhodou je naopak nižší chemická odolnost i tvrdost, v jejímž důsledku dochází snadno k jeho poškrábání. Nicméně vhodným využitím ochranné vrstvy je možné těmto škrábancům předejít, ale pokud by k poškrábání materiálu přece jen došlo, škrábance je možno snadno rozleštit. Dále pak neodolává koncentrovanějším kyselinám a hydroxidům. Rozpouští se v aromatických a chlorovaných uhlovodících, esterech, ketonech, etherech.

Z hlediska bezpečnosti při nárazu vykazuje PMMA podobné vlastnosti jako sklo, na které se používá ochranná fólie (stejně jako u polykarbonátu), takže z hlediska bezpečnosti představuje Polymethylmethakrylát dobrou volbu. Problémová pro uvažované využití by však mohla být i jeho hořlavost, nicméně v praxi se již pracuje na opatření, které hořlavost PMMA snižuje.

Zásadní nevýhodou PMMA oproti sklu je jeho nižší životnost a stálost při působí UV záření. Tramvajová vozidla se navrhují s očekávanou životností 30 let, což je životnost, kterou sklo nabízí a je tedy možné jej bez výměny využívat po celý život tramvajového vozidla. U PMMA by mohlo vystavení vlivu UV záření po tak dlouhou dobu přinést nežádoucí účinky v podobě „zežloutnutí“ případně zhoršení jeho čirosti a tím i ke zhoršení propustnosti světla. Nicméně vhodnými ochrannými opatřeními je možné životnost PMMA výrazně prodloužit.

U velkých panoramatických oken (které se běžně na tramvajových vozidlech nevyskytují) by mohlo vlivem nižší tuhosti materiálu docházet k problému s vibracemi – materiál by se mohl rozkmitat jako blána bubínku, i přestože kraje budou tlumeny pryží, prostředek stále může výrazně kmitat. U tohoto typu oken by bylo vhodné provést analýzy a optimalizace, které povedou ke snížení možného kmitání. U oken běžných rozměrů u tramvajových vozidel jako je např. 14T by tento problém neměl vznikat.

Jinou podobnou alternativu představuje polykarbonát, jehož vlastnosti jsou podobné jako PMMA, a proto není uveden samostatně.

Následující tabulka obsahuje vybrané vlastnosti nejčastěji používaných skel v rámech oken především ve stavebnictví.

**Tabulka 16: Vybrané vlastnosti skla**

	Sklo
Hustota	2 500 kg/m <sup>3</sup>
Pevnost v ohybu	40–190 MPa
Pevnost v tlaku	750–1 000 MPa
Pevnost v tahu	40–200 MPa
Modul pružnosti	70 000 MPa
Tepelná vodivost	0,6–0,9 W/mK
Tvrdost (dle Mohrovy stupnice)	6–7
Propustnost světla	78 %

V následující tabulce jsou popsány vybrané fyzikální vlastnosti extrudovaného a litého plexiskla, které jsou téměř shodné s plným polykarbonátem.

Tabulka 17: Vybrané vlastnosti typů plexiskel

	Plexisklo XT (extrudované)	Plexisklo GS (lité)
Hustota	1,19 g/cm <sup>3</sup>	1,2 g/cm <sup>3</sup>
Propustnost světla	92 %	92 %
<b>MECHANICKÉ</b>		
Modul pružnosti	3300 MPa	3280 MPa
Pevnost v ohybu	106 MPa	114 MPa
Pevnost v tlaku	70–120 MPa	70–120 MPa
Odolnost vůči nárazu	1,5 kJ/m <sup>2</sup>	1,5 kJ/m <sup>2</sup>
Tvrdość podle Brinella	195 MPa	195 MPa
Pevnost v tahu	72 MPa	74 MPa
<b>TEPELNÉ</b>		
Teplota formování	150–160 °C	140–190 °C
Maximální provozní teplota	70 °C	82 °C
Měrné teplo	1,47 J/g/K	1,47 J/g/K
Tepelná vodivost	0,167–0,25 W/mK	0,187–0,209 W/mK

### Kompozitní materiály – uhlíková vlákna s epoxidovou maticí

Jelikož již v současné době jezdí v Číně plně kompozitní tramvajová vozidla od společnosti Fordyno, která pro stavbu hrubé konstrukce skříně využívá kompozitní materiál na bázi uhlíkových vláken, bude tento typ materiálu navržen jako vhodný alternativní materiál i v tomto návrhu.

Kompozitní materiály obecně vykazují řadu výhod oproti konvenčně používaným materiálům, díky kterým je jisté, že jejich využití jakožto konstrukčního materiálu v dopravní technice je nevyhnutelné.

Většimu rozšíření těchto materiálů zatím však brání „nevyzpytatelné“ chování materiálů, protože je velmi obtížné předvídat jeho chování, které závisí na celé řadě různých faktorů. Ať už jde o vnitřní uspořádání kompozitu, které nabízí řadu různých variant a možných kombinací, nebo o faktory vnějšího prostředí, které kolikrát mají na typově podobné kompozity rozdílné účinky.

Jakmile však dojde k výraznému pokroku v oblasti porozumění chování kompozitních materiálů, zcela jistě dojde k jejich hojnému využití nejen v kolejové dopravě.

Výhody použití kompozitních materiálů pro tramvajové vozidlo:

- Snížení hmotnosti vozidla v důsledku nízké měrné hmotnosti materiálu, které zaručí snížení potřebné energie k provozu vozidla
- Zlepšená únavová životnost ve srovnání s ocelovými konstrukcemi tramvají
- Lepší odolnost proti korozi
- Tepelná a akustická izolace integrovaná do konstrukce zlepšující pohodlí cestujících

V již zmíněné celokompozitní tramvaji jezdící v severní Číně je využita spřažená samonosná konstrukce skeletu vozidla, která se zhotovuje pomocí speciální technologie sklolaminátového navíjení. Proto bude i takto vyrobený skelet uvažován i v tomto návrhu. Takto vyrobené skelety vozidla vykazují následující vlastnosti:

- Nízká hmotnost, vynikající vlastnosti pohlcování hluku
- Nízká tepelná vodivost a roztažnost
- Vysoká odolnost proti korozi bez nutnosti aplikovat další antikorozi opatření, vysoká chemická odolnost
- Vysoká odolnost proti únavě – omezené šíření trhlin
- Vysoká odolnost proti poškození v důsledku nehody, snadná opravitelnost
- Nízká energetická náročnost na výrobu (v porovnání s ocelovým skeletem)
- Malý počet dílů (v porovnání s ocelovým skeletem) – malé riziko poruch a poškození

Jak již bylo řečeno dříve, kompozitních materiálů existuje celá řada a výjimku nepředstavují ani kompozity na bázi uhlíkových vláken. Kompozity skládající se z uhlíkových vláken (vlákna kompozitu) vykazují výborné mechanické vlastnosti (viz tabulka vlastností v kapitole 4.4.2.2) při nízké měrné hmotnosti, což je jejich největší předností.

Tyto vynikající vlastnosti bývají podpořeny různými typy materiálů, které slouží jako pojivo (matrice kompozitu) a starají se o soudržnost kompozitu. V závislosti na tom, jaký typ matrice, jaký je poměr mezi maticí a vlákny a jaký druh materiálu je pro matici využit, dostává kompozit vždy jiné výsledné vlastnosti. Z rešerše dostupných materiálů se zdál být jako nejvhodnější kandidát kompozit s maticí z epoxidové pryskyřice, které je v tomto návrhu uvažován.

## 4.4 Návrh alternativ řešení

V následujících kapitolách bude na základě předchozích poznatků detailněji přiblíženo několik alternativ navrhovaných řešení, které povedou ke snížení energetické spotřeby vozidla.

### 4.4.1 Trakční energie

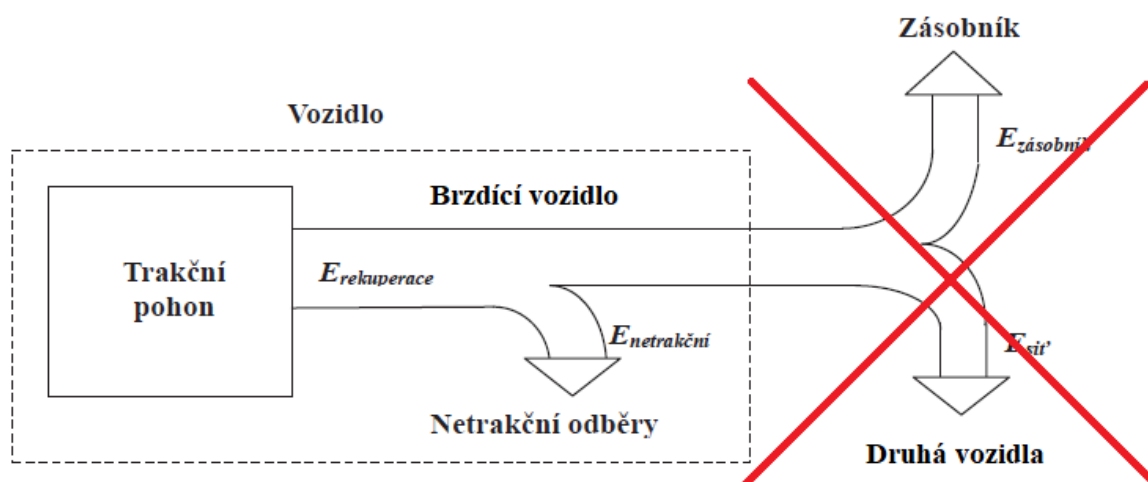
Jak již bylo zmíněno v dřívějších kapitolách, v trakční oblasti spotřeby energie představuje největší potenciál pro snížení spotřeby energie rekuperace. Proto budou v následujících kapitolách detailněji rozpracovány 3 navrhované varianty řešení.

#### 4.4.1.1 Varianta A - Trakční baterie na vozidle

Ve variantě A je uvažováno, že veškerá rekuperovaná energie bude ukládána do trakční baterie, která je umístěna na střeše vozidla. Energie akumulovaná v této trakční baterii bude následně využita k pohonu netrakčních systémů vozidla. Schéma této varianty je možno vidět na obrázku 39.

Přestože se tramvaje využívající pro svůj provoz trakční baterie mohou zdát atraktivní, existuje zde značná energetická penalizace, a to nejen při výrobě samotné baterie, ale také při jejím nabíjení a vybíjení, kdy dochází k nezanedbatelným tepelným ztrátám.

Největší nevýhodou této varianty je však vysoká celková hmotnost tramvajového vozidla, která vznikne přičtením hmotnosti přepravované baterie, která je s ohledem na potřebnou kapacitu odhadnuta na 1 500 kg. Toto navýšení hmotnosti má negativní vliv na celkovou spotřebu vozidla, protože významně vzroste trakční energie potřebná k pohybu tramvaje.



Obrázek 39: Schématický rozptyl rekuperované energie u varianty A

Mezi další nevýhody patří i omezení rozměrů baterie, které jsou limitovány rozměry skříně tramvajového vozidla, čímž je omezena i samotná kapacita akumulátoru. To s sebou nese i konstrukční úpravy střechy vozidla, což představuje komplikace při realizaci takového řešení. Nemluvě o tom, že je také zapotřebí při návrhu trakční baterie myslet i na vzhled vozidla. Je tedy nutné, aby nově upravená tramvaj vypadala stále atraktivně.

Další nevýhodou představuje relativně nízká životnost akumulátoru, která při optimálním cyklování nabíjení a vybíjení akumulátoru dosahuje 5 let. Časté cyklování vybíjení a nabíjení akumulátoru vede také ke snižování účinnosti nabíjení akumulátoru vlivem stárnutí akumulátoru. Tento jev také provází potřeba vypořádat se se zahříváním akumulátoru během nabíjení. V neposlední řadě je potřeba myslet i na relativně vysoké pořizovací náklady akumulátoru, které se ještě zvýší o náklady nutné k přetvoření stávající konstrukce vozidel.

Naopak výhodou jsou energetické ztráty, které jsou v této variantě minimální, protože rekuperovanou energii není potřeba přenášet na velkou vzdálenost, ale je ukládána přímo na vozidle, jež ji vyprodukuje. Z toho také plyne vyšší energetická „samostatnost“ vozidla oproti ostatním variantám.

#### 4.4.1.2 Varianta B – Stacionární baterie pro elektrickou trakci

Ve variantě B je naopak uvažováno, že veškerá rekuperovaná energie je nasměrována zpět do sítě, kde ji při frekventovaném provozu může okamžitě spotřebovat jiná rozjíždějící se tramvaj. Pokud se však v blízkosti žádná nenachází, bude se rekuperovaná energie akumulovat do stacionární baterie. Schéma této varianty lze vidět na obrázku 40.

Tyto baterie jsou umístěny mimo vozidlo, což s sebou nese nevýhodu v podobě zvýšení hmotnosti vozidla. Pro tyto stacionární akumulátory energie je uvažováno jejich umístění na konečných stanicích tramvajových linek. Z toho plyne i největší nevýhoda této varianty a tou jsou vysoké energetické ztráty při přenosu energie na delší vzdálenosti. V tomto případě jde o přenos energie z jedoucího vozidla až k baterii na konečnou stanici, odkud mohou čerpat energii tramvaje v blízkosti konečných stanic.



Obrázek 40: Schématický rozptyl rekuperované energie u varianty B

Naopak výhodou mohou být velké rozměry stacionární baterie, které jsou omezeny „jen“ prostorem ve stanici. Tato varianta tedy představuje jednoduchou možnost realizace, kdy největší překážkou představuje volný prostor na konečné stanici. Velkorozměrné baterie představují samozřejmě zvýšení kapacity akumulátoru, což je vítané, protože do něj lze akumulovat větší množství energie.

Další přednost této varianty je její vyšší životnost než u předchozí varianty, neboť nebude docházet k tak častému cyklování vybíjení a nabíjení akumulátoru. Tento proces má prokazatelný vliv na snížení životnosti akumulátoru, pokud je jeho opakování příliš frekventované.

Není radno opomenout také vzhled tramvajového vozidla, který v této variantě nedozná žádné změny, neboť zavedená opatření nejsou prováděna na vozidle. To je také velmi vítaný aspekt, neboť nevznikají žádné náklady spojené s přestavbou současné koncepce vozidel. Jedinými vzniklými náklady v této variantě jsou pořizovací náklady akumulátorů.

#### 4.4.1.3 Varianta C – Kombinace trakční a stacionární baterie

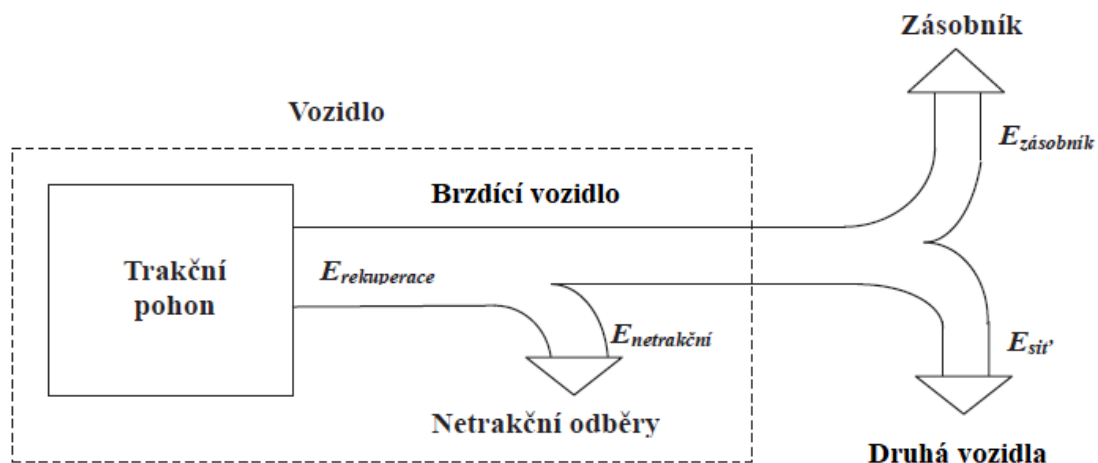
Ve variantě C je uvažováno využití kombinace obou typů akumulátorů pro ukládání rekuperované energie. Je tedy uvažováno, že na konečných stanicích tramvajových linek je umístěn stacionární akumulátor s vyšší kapacitou než druhý uvažovaný menší akumulátor, který je umístěn na střeše vozidla. Příklad této koncepce byl uveden v předchozí kapitole, kde bylo rozebráno již existující řešení tramvajové linky v Číně.

Tato varianta využívá výhod obou předchozích řešení, které společně eliminují některé nevýhody předchozích řešení.

Především dojde díky využití kombinace 2 akumulátorů ke zvýšení životnosti jednotlivých akumulátorů tím, že cyklování nabíjení a vybíjení akumulátorů bude probíhat v menších frekvencích, dojde ke zvýšení životnosti až dvojnásobně. V této variantě je tedy uvažována životnost akumulátorů až 10 let.

Další výhodou této varianty představuje snížení energetických ztrát oproti variantě B, ke kterému dochází vlivem vedení energie na delší vzdálenosti, tím, že byla do soustavy přidána právě menší trakční baterie, která tyto ztráty vykazuje minimální. Dochází tak tedy ke zvýšení efektivity rekuperace energie.





Obrázek 41: Schématický rozptyl rekuperované energie u varianty C

Největší nevýhodou představuje nárůst hmotnosti vozidla, ke kterému dojde vlivem přidáním menšího trakčního akumulátoru. Nicméně vhodnou volbou velikosti a tím i kapacity akumulátoru se tato hmotnost navíc nemusí projevit výrazným zvýšením energetických nákladů na jízdu vozidla a energie naakumulovaná v této baterii může pokrýt energetický nárůst v podobě zvýšení nákladů na provoz nepatrně hmotnějšího vozidla.

Důležitý aspekt představuje také fakt, že vlivem snížení velikosti trakčního akumulátoru nemusí na tramvajovém vozidle proběhnout velké konstrukční úpravy, což s sebou opět přináší konstrukční jednoduchost varianty, ale také i minimální narušení vzhledu tramvajového vozidla.

#### 4.4.2 Netrakční energie

V oblasti netrakční energie představuje nejvýznamnější podíl spotřeba HVAC jednotky a to především při vytápění vozidel, kdy dochází k energetickým ztrátám prostupem tepla stěnami tramvajového vozidla a také k energetickým ztrátám při otevírání dveří, kdy dochází k výměně cestujících. V předcházejících kapitolách bylo nastíněno několik možností, díky kterým by bylo možné snížit tyto energetické ztráty. Největší pozornost bude věnována rozpracování 3 variant využívajících pro stavbu skříně různé typy materiálů, které vykazují různé izolační vlastnosti. Následně budou tyto varianty vyhodnoceny a bude vybrána nejvhodnější z nich.

##### 4.4.2.1 Varianta A

Ve variantě A je uvažován stav, kdy je pro stavbu okenních a dveřních částí vozidla využit Polymethylmethakrylát – PMMA neboli plexisklo místo skla. Tento materiál se běžně využívá jako náhrada skla především kvůli jeho podobným vlastnostem při nižších pořizovacích nákladech.

Od této změny se očekává především snížení uniklého množství tepelné energie vlivem prostupu tepla v prostoru oken a dveří, neboť PMMA vykazuje nižší tepelnou vodivost než sklo (téměř 3x nižší). Ve výpočtech je uvažována srovnatelná tloušťka PMMA s původní tloušťkou skla. S tímto předpokladem vychází úspora netrakční energie následovně:

Při vyčíslení předpokládané úspory netrakční energie byly využity stejné postupy a shodné vstupní parametry jako ve výchozí analýze s jediným rozdílem a to takovým, že veškeré komponenty ze skla byly nahrazeny PMMA. Tato změna se ve výpočtech projevila následujícím způsobem:

#### Okno a dveře

Pro výpočet prostupu tepla oknem a dveřmi je uvažována stejná skladba materiálů o různé tloušťce, proto je výpočet prostupu tepla proveden zároveň. Vlastnosti materiálů jsou uvedeny níže:

**Tabulka 18: Vlastnosti materiálů oken a dveří**

	Materiál	Tloušťka [mm]	Vodivost $\lambda$ [W/m*K]
Okno	Plexisklo	4	0,209
	Vzduch	1	0,026
	Plexisklo	4	0,209
Dveře	Plexisklo	8	0,209
	Vzduch	1	0,026
	Plexisklo	8	0,209

Z těchto hodnot bude stanoven prostup tepla okny a dveřmi  $k_j$  dle vztahu:

$$k_{jo} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,004}{0,209} + \frac{0,001}{0,026} + \frac{0,004}{0,209} + \frac{1}{11}} = 4,7365 \frac{W}{m^2} * K$$

$$k_{ja} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,008}{0,209} + \frac{0,001}{0,026} + \frac{0,008}{0,209} + \frac{1}{11}} = 4,0096 \frac{W}{m^2} * K$$

Se znalostí hodnot prostupu tepla jsme nyní schopni stanovit ztráty prostupem tepla za klidu jednotlivými částmi skříně vozidla dle vztahu:

$$Q_j = n \cdot k_j \cdot S_j \cdot (t_i - t_e)$$

**Tabulka 19: Hodnoty ztrát prostupem tepla**

	$a$ [mm]	$b$ [mm]	Počet kusů [-]	$S_j$ [m <sup>2</sup> ]	$t_i$ [°C]	$t_e$ [°C]	$Q_j$ [W]
Bočnice	25 200	2 900	2	47,96	+20	-20	3 268
Střecha	25 200	2 400	1	60,48	+20	-20	1 512
Podlaha	25 200	2 400	1	60,48	+20	-20	9 766
Okna	1 360	950	16	1,292	+20	-20	3 917
Dveře	650	2 275	20	1,183	+20	-20	3 795
						$\Sigma Q_j$	22 258

Celkové ztráty prostupem tepla za klidu činí: **22 258 W**

Ze znalosti celkových ztrát prostupem tepla můžeme stanovit ztráty infiltrací, které představují 10% z těchto ztrát, tedy platí:

$$Q_i = 0,1 \cdot Q_j = 0,1 \cdot 21\,654 = \mathbf{2\,226\,W}$$

Také jsem schopni stanovit ztráty vzniklé větráním salonku cestujících podle empirického vztahu:

$$Q_v = 0,355 \cdot n \cdot 8 \cdot (t_i - t_e) = 0,355 \cdot 140 \cdot 8 \cdot (20 + 20) = \mathbf{15\,904\,W}$$

V tomto případě vypadá výsledná energetická bilance prázdného vozidla následovně:

$$P = Q_j + Q_i + Q_v = 22\,258 + 2\,226 + 15\,904 = \mathbf{40\,388\,W}$$

Minimální výkon jedné ze 3 HVAC jednotek by v tomto případě musel činit **13,4 kW**, což představuje úsporu **0,7 kW** na každé HVAC jednotce, tedy celkovou úsporu dodané energie přibližně **2,1 kW**. Tato varianta tedy vykazuje ušetření přibližně **4% z dodávané trakční energie**.

Dalším předností této varianty je fakt, že využití PMMA s sebou nese i snížení celkové hmotnosti vozidla, protože tento materiál má nižší měrnou hmotnost než sklo. Tento fakt znamená, že dojde zároveň ke snížení spotřeby trakční energie vozidla a tím tedy i ke snížení trakční složky energie a tedy i ke snížení provozních nákladů vozidla.

Pokud vyjdeme ze vstupních parametrů z původní analýzy, jsme schopni určit z rozměrů všech komponent vyrobených ze skla objem všech těchto částí podle následujícího vztahu:

$$V_c = V_d + V_o = n \cdot S_d \cdot 2t + n \cdot S_o \cdot 2t = 20 \cdot 1,183 \cdot 2 \cdot 8 + 16 \cdot 1,292 \cdot 2 \cdot 4 = \mathbf{0,544\,m^3}$$

Jelikož uvažujeme stejnou tloušťku i rozměry nového materiálu jako byly parametry původního materiálu, nedojde po výměně materiálu ke změně objemu.

Ze znalosti objemu a měrných hmotností jednotlivých materiálů jsme schopni vyčíslit hmotnosti všech komponent vyrobených z těchto materiálů ve vozidle dle následujících vztahů:

$$m_{sklo} = V_c \cdot \rho_{sklo} = 0,544 \cdot 2\,500 = \mathbf{1\,360\,kg}$$

$$m_{PMMA} = V_c \cdot \rho_{PMMA} = 0,544 \cdot 1\,200 = \mathbf{653\,kg}$$

Po odečtení těchto dvou hmotností od sebe zjistíme, že dojde po uvažované změně materiálu k hmotnostní úspoře **707 kg**, což představuje snížení hmotnosti dveřních a okenních komponent o **52%**.

V kontextu celkového pohledu na vozidlo představuje tato hmotnostní úspora snížení celkové hmotnosti vozidla o **707 kg**, což při předpokládané celkové průměrné roční spotřebě energie 1 moderní tramvaje **0,71 kWh/kg** průměrnou roční úsporu trakční složky energie vozidla **502 kWh**.

Při současné ceně elektrické energie **6,41 Kč/kWh** představuje tato energetická úspora **roční finanční úsporu 3 218 Kč**. Celkové průměrné roční náklady na elektrickou energii u moderních tramvajových vozidel byly pro rok 2022 v dřívějších kapitolách vyčísleny na **233 261 Kč**, z čehož 48% nákladů představují náklady na trakční energii vozidla, tedy **111 965 Kč**. Roční finanční úspora ve variantě A představuje tedy **úsporu 3% financí vynaložených ročně na trakční energii vozidla**.

Nevýhodou této varianty mohou být již zmíněné nevýhodné vlastnosti PMMA (viz kapitola 4.3.3.4.2). Mezi největší nedostatky PMMA patří hořlavost a stálost při UV záření, která je spojena i s jeho nižší životností než u skel. Tyto neduhy mohou být však odstraněny využitím vhodných ochranných vrstev, které prodlouží životnost těchto komponent vozidla. Není však jisté, že takto ošetřený PMMA splní požadovanou životnost vozidla 30 let, proto je uvažováno s ohledem na nižší pořizovací náklady materiálu než skla, že by v případě potřeby došlo po 15 letech k jeho výměně za nové.

Největší výhodou této varianty oproti ostatním je její nejmenší náročnost na realizaci, protože představuje nejméně radikální zásah do stávajícího stavu techniky.

#### 4.4.2.2 Varianta B

Pro variantu B je uvažována změna konstrukčního materiálu skeletu vozidla a to taková, že ocelové plechy budou nahrazeny kompozitním materiálem na bázi uhlíkových vláken v matrici z epoxidové pryskyřice.

Navržený materiál vykazuje především výrazně nižší měrnou hmotnost, než materiál stávajícího řešení, proto po náhradě materiálu dojde ke snížení hmotnosti vozidla při zachování tuhosti skeletu vozidla. Propočet úspory vlivem snížení hmotnosti vozidla bude stanoven **kvalifikovaným odhadem zatížení skeletu** vozidla pro stávající materiál – ocel. Ocel bude následně nahrazena navrhovaným kompozitním materiálem tak, aby zvětšením tloušťky materiálu došlo v konstrukci ke stejnému poměrné deformaci skeletu jako v případě s ocelí.

V tabulce uvedené níže je uvedeno orientační srovnání vybraných vlastností kompozitního materiálu z uhlíkových vláken v epoxidové pryskyřici (matrici) a vlastností konstrukčních ocelí, které se využívají v konstrukci dopravní techniky. Tyto vlastnosti poslouží jako podklad k výše zmíněnému kvalifikovanému odhadu zatížení, pomocí kterého bude stanovena potřebná tloušťka kompozitního materiálu, aby v konstrukci vznikly ekvivalentní deformace skříně vozidla.

Tabulka 20: Vybrané vlastnosti kompozitu z uhlíkových vláken a konstrukční oceli

	Uhlíková vlákna v epoxidové pryskyřici	Konstrukční oceli
Hustota	1 110–1 400 $kg/m^3$	7 850 $kg/m^3$
Pevnost v tlaku*	350–900 $MPa$	275–800 $MPa$
Pevnost v tahu*	360–920 $MPa$	275–800 $MPa$
Modul pružnosti	70 000 $MPa$	210 000 $MPa$
Tepelná vodivost	5–7 $W/mK$	45 $W/mK$

\* Uvedené hodnoty odpovídají pro zatížení působící ve směru vláken.

V případě stanovení potřebné tloušťky kompozitního materiálu a následné analýzy vycházíme z následujících předpokladů:

- Je uvažováno, že při realizaci celokompozitní skříně je nutno optimalizovat směry vláken v jednotlivých vrstvách laminátu za účelem dosažení mechanických vlastností kompozitu z tabulky 20
- Je uvažován koeficient bezpečnosti  $k = 2,5$
- Je uvažována konstrukční ocel s mezí kluzu  $355 \text{ MPa}$
- Je uvažováno fiktivní tlakové zatížení bočnice, které bude stanoveno kvalifikovaným odhadem, kdy je uvažováno zatížení bočnic vlastní tíhou střechy a 3 HVAC jednotek o jednotkové hmotnosti  $470 \text{ kg}$
- Tíhové zrychlení je pro jednoduchost uvažováno jako  $g = 10 \text{ m/s}^2$
- Je vyžadováno, aby poměrná deformace způsobená fiktivním zatížením byla pro oba uvažované materiály shodná
- Materiálová skladba bočnic a střechy vozidla zůstane zachována, až na záměnu ocelových plechů za navrhovaný kompozit
- Materiálová skladba podlahy je uvažována nezměněna oproti původní variantě

Při výpočtu odhadované tloušťky kompozitu bylo postupováno následujícím způsobem:

V prvním kroku byla stanovena hodnota dovoleného napětí ze vztahu:

$$\sigma_D = \frac{R_e}{k} = \frac{355}{2,5} = 142 \text{ MPa}$$

Z této hodnoty byla stanovena pomocí Hookova vztahu hodnota poměrné deformace, kterou toto zatížení vyvolá v ocelové konstrukci.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_D}{E_o} = \frac{142}{210\,000} = 0,0007$$

Tato hodnota poměrné deformace je požadována i pro kompozitní materiál. A proto si z této hodnoty můžeme stanovit fiktivní zatížení, které v kompozitním materiálu vyvolá právě takovou poměrnou deformaci (také z Hookova vztahu):

$$\sigma_{fikt} = E_k \cdot \varepsilon = 70\,000 \cdot 0,0007 = 47,3 \text{ MPa}$$

Také byla stanovena fiktivní celková zátěžná tlaková síla, která je uvažována tak, že působí na celou plochu bočnice a vyvolává v něm dovolené napětí:

$$F_{fc} = \sigma_D \cdot l \cdot t = 142 \cdot 25\,200 \cdot 1,5 = 5\,367\,600 \text{ N}$$

Následně byla určena hmotnost střechy v případě použití oceli, z níž byla následně stanovena fiktivní tlaková síla, která představuje sumu síly od vlastní hmotnosti střechy a od hmotnosti všech komponent výzbroje umístěných na střeše vozidla. Jsou uvažovány 3 HVAC jednotky, 3 trakční měniče nad podvozky vozidla (každý zhruba po  $280 \text{ kg}$ ), 2 pantografy (každý po  $150 \text{ kg}$ ), protože jde o obousměrné vozidlo. Výsledná síla vychází následovně:

$$m_o = V_{střecha} \cdot \rho_o = 0,0907 \cdot 7\,850 = 2\,592 \text{ kg}$$

$$F_{fikt} = 3 \cdot 470 \cdot 10 + 2\,592 \cdot 10 + 3 \cdot 280 \cdot 10 + 2 \cdot 150 \cdot 10 = 32\,622 \text{ N}$$

Tato síla bude určitě nepatrně větší, než síla vyvolaná vlastní tíhou při využití kompozitního materiálu, proto bude v dalším výpočtu uvažována tato hodnota, protože s ní vzniká ve výpočtu koeficient bezpečnosti.

Výsledná fiktivní síla, která vznikne odečtením celkové fiktivní síly získané z napětí a fiktivní síly vyvolané tíhou komponent na střeše.

$$F_f = F_{fc} - F_{fikt} = 5\,367\,600 - 32\,622 = 5\,344\,978 \text{ N}$$

Se znalostí této síly už jsme schopni dosadit do vztahu pro výpočet tlaku takovou tloušťku kompozitního materiálu, aby v něm při zatížení touto fiktivní silou vzniklo fiktivní napětí rovno fiktivnímu napětí spočteného z Hookova vztahu:

$$t = \frac{F_f}{\sigma_{fikt} \cdot l} = \frac{5\,344\,978}{47,3 \cdot 25\,200} = 5 \text{ mm}$$

Z kvalifikovaného odhadu bylo stanoveno, že tloušťka uvažovaného kompozitního materiálu, aby v konstrukci skeletu vznikla ekvivalentní poměrná deformace při daném zatížení, musí být alespoň **5 mm**.

Pokud nyní vyjdeme ze spočtené nové tloušťky materiálu a ze vstupních parametrů z původní analýzy, jsme schopni určit z rozměrů všech komponent vyrobených z oceli a kompozitu objem všech těchto částí podle následujícího vztahu:

$$V_{co} = V_s + V_b = n \cdot S_s \cdot t + n \cdot S_b \cdot t = 1 \cdot 60,48 \cdot 1,5 + 2 \cdot 47,96 \cdot 1,5 = 0,235 \text{ m}^3$$

$$V_{ck} = V_s + V_b = n \cdot S_s \cdot t + n \cdot S_b \cdot t = 1 \cdot 60,48 \cdot 5 + 2 \cdot 47,96 \cdot 5 = 0,782 \text{ m}^3$$

Ze znalosti objemu a měrných hmotností jednotlivých materiálů jsme schopni vyčíslit hmotnosti všech komponent vyrobených z těchto materiálů ve vozidle dle následujících vztahů:

$$m_{ocel} = V_{co} \cdot \rho_o = 0,235 \cdot 7\,850 = 1\,842 \text{ kg}$$

$$m_{kompozit} = V_{ck} \cdot \rho_k = 0,782 \cdot 1\,400 = 1\,095 \text{ kg}$$

Po odečtení těchto dvou hmotností od sebe zjistíme, že dojde po uvažované změně materiálu k hmotnostní úspoře **747 kg**, což představuje snížení hmotnosti bočnicových a střešních komponent **o 41%**.

V kontextu celkového pohledu na vozidlo představuje tato hmotnostní úspora snížení celkové hmotnosti vozidla o 747 kg, což při předpokládané celkové průměrné roční spotřebě energie 1 moderní tramvaje 0,71 kWh/kg průměrnou roční úsporu trakční složky energie vozidla 530 kWh.

Při současné ceně elektrické energie 6,41 Kč/kWh představuje tato energetická úspora **roční finanční úsporu 3 399 Kč**. Celkové průměrné roční náklady na elektrickou energii u moderních tramvajových vozidel byly pro rok 2022 v dřívějších kapitolách vyčísleny na 233 261 Kč, z čehož 48% nákladů představují náklady na trakční energii vozidla, tedy 111 965 Kč. Roční finanční úspora ve variantě B představuje tedy **úsporu 3% financí vynaložených ročně na trakční energii vozidla**.

Další výhodou, která podporuje vhodnost materiálu k záměně je fakt, že navržený nový materiál vykazuje téměř 7x nižší tepelnou vodivost než má ocel. Tato pozitivní vlastnost je také podpořena tím, že tloušťka materiálu bude větší, čímž dojde k tomu, že bude docházet k nižším únikům tepla. Ve výpočtu je uvažována stejná skladba materiálů v bočnici a na stropu jako v původní variantě, s tím rozdílem, že je vnější ocelový plech nahrazen kompozitem o větší tloušťce z důvodu zachování zatížení. Výsledek tepelné úpory s novým materiálem vypadá následovně:

Při vyčíslení předpokládané úspory netrakční energie byly využity stejné postupy a shodné vstupní parametry jako ve výchozí analýze s jediným rozdílem a to takovým, že veškeré komponenty z oceli byly nahrazeny kompozitem kromě podlahové části. Tato změna se ve výpočtech projevila následujícím způsobem:

### Bočnice

Pro výpočet prostupu tepla bočnicí je uvažována stejná skladba materiálů, jakou vykazují níže uvedené vlastnosti:

Tabulka 21: Vlastnosti materiálů bočnic

Materiál	Tloušťka [mm]	Vodivost $\lambda$ [W/m*K]
Kompozit	5	7
Antivibrál	3	0,07
Moniflex	20	0,0565
Rotaflex	30	0,035
Laminát	4	0,209

Z těchto hodnot bude stanoven prostup tepla bočnicí  $k_j$  dle vztahu:

$$k_j = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,005}{7} + \frac{0,003}{0,07} + \frac{0,020}{0,0565} + \frac{0,030}{0,035} + \frac{0,004}{0,209} + \frac{1}{8,1}} = 0,6941 \frac{W}{m^2} * K$$

Dále je u bočnic třeba uvažovat prostup tepla skrz tepelné mosty (žebra nosné konstrukce), které nejsou nijak izolovány. Součinitel prostupu tepla skrz tyto mosty bude vypadat následovně:

$$k_{jm} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,0585}{7} + \frac{1}{8,1}} = 5,7048 \frac{W}{m^2} * K$$

Výsledný součinitel prostupu tepla skrz bočnice bude stanoven z následujícího vztahu, kdy je uvažováno, že tepelné mosty zabírají 3% celkové plochy bočnice:

$$k_{jbc} = \frac{k_{jb} \cdot S_b + k_{jm} \cdot S_m}{\sum S_{bc}} = \frac{0,6941 \cdot 0,97 \cdot 47,96 + 5,7048 \cdot 0,03 \cdot 47,96}{47,96} = 0,8444 \frac{W}{m^2} * K$$

### Podlaha

Jelikož jsou na podlahu kladeny zvýšené nároky na únosnost a bezpečnost, kdy je vyžadováno, aby podlaha v tlaku vydržela 400 kN, nelze u podlahy uvažovat tak snadné zjednodušení pro určení tloušťky materiálu. Podlaha je totiž tvořena hlavním nosným prvkem, což je tzv. páteř, která má poměrně složitý tvar.

Tvar uvažované kompozitní podlahy bude také složitější s ohledem na dosažení požadované tlakové únosnosti, a proto je stanovená tloušťka 5 mm patrně nedostačující. Řešení takové podlahy by nebylo triviální, a proto je z důvodu dodržení požadované bezpečnosti a únosnosti uvažováno zachování ocelové podlahy.

Pro výpočet prostupu tepla podlahou je uvažována neizolovaná plocha, která je tvořena vrstvou linolea, překližky a ocelového plechu, tedy stejná skladba materiálů jako v původní analýze, proto i výsledný koeficient prostupu tepla podlahy bude mít stejnou hodnotu a není zde znovu uveden.

### Střecha

Pro výpočet prostupu tepla střechou je uvažována následující skladba materiálů, které vykazují níže uvedené vlastnosti:

Tabulka 22: Vlastnosti materiálů střechy

Materiál	Tloušťka [mm]	Vodivost $\lambda$ [W/m*K]
Kompozit	5	7
Antivibrál	3	0,07
Moniflex	20	0,0565
Skelná vata	40	0,039
Laminát	4	0,209

Z těchto hodnot bude stanoven prostup tepla střechou  $k_j$  dle vztahu:

$$k_j = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,005}{7} + \frac{0,003}{0,07} + \frac{0,020}{0,0565} + \frac{0,040}{0,039} + \frac{0,004}{0,209} + \frac{1}{8,7}} = 0,6247 \frac{W}{m^2} * K$$

Se znalostí hodnot prostupu tepla jsme nyní schopni stanovit ztráty prostupem tepla za klidu jednotlivými částmi skříně vozidla dle vztahu:

$$Q_j = n \cdot k_j \cdot S_j \cdot (t_i - t_e)$$

Tabulka 23: Hodnoty ztrát prostupem tepla

	$a$ [mm]	$b$ [mm]	Počet kusů [-]	$S_j$ [m <sup>2</sup> ]	$t_i$ [°C]	$t_e$ [°C]	$Q_j$ [W]
Bočnice	25 200	2 900	2	47,96	+20	-20	3 240
Střecha	25 200	2 400	1	60,48	+20	-20	1 511
Podlaha	25 200	2 400	1	60,48	+20	-20	9 766
Okna	1 360	950	16	1,292	+20	-20	4 508
Dveře	650	2 275	20	1,183	+20	-20	4 878
						$\Sigma Q_j$	23 902

Celkové ztráty prostupem tepla za klidu činí: **23 902 W**

Ze znalosti celkových ztrát prostupem tepla můžeme stanovit ztráty infiltrací, které představují 10% z těchto ztrát, tedy platí:

$$Q_i = 0,1 \cdot Q_j = 0,1 \cdot 23 902 = 2 390 W$$



Také jsme schopni stanovit ztráty vzniklé větráním salonku cestujících podle empirického vztahu:

$$Q_v = 0,355 \cdot n \cdot 8 \cdot (t_i - t_e) = 0,355 \cdot 140 \cdot 8 \cdot (20 + 20) = \mathbf{15\ 904\ W}$$

V tomto případě vypadá výsledná energetická bilance prázdného vozidla následovně:

$$P = Q_j + Q_i + Q_v = 23\ 902 + 2\ 390 + 15\ 904 = \mathbf{42\ 196\ W}$$

Minimální výkon jedné ze 3 HVAC jednotek by v tomto případě musel činit **14,1 kW**, což nepředstavuje téměř žádnou úsporu energie na každé HVAC jednotce a tedy i minimální celkovou úsporu dodané energie. Tato varianta tedy vykazuje ušetření přibližně **0,004% z dodávané netrakové energie**.

Při porovnání nově vypočtených hodnot s hodnotami v původní analýze, lze usoudit, že použití materiálu s nižší tepelnou vodivostí než v původním stavu nemá v tomto případě větší význam s ohledem na použití izolačních mezivrstev.

Pokud bychom uvažovali, že není třeba použít stejnou skladbu s izolačními mezivrstvami, projevila by se tato změna výrazněji, nicméně takový případ není v této variantě řešení uvažován s ohledem na to, že by bylo nutné stanovit potřebnou tloušťku kompozitního materiálu jinou cestou.

Nevýhodou této varianty je především složitější realizace navrhovaného řešení, protože tento návrh představuje radikální zásah do současné stavby skříňové tramvajových vozidel. Implementace nového druhu materiálu skeletu představuje běh na delší trať, protože vyžaduje nejprve rozvinutí výzkumu v oblasti chování kompozitních materiálů a vyhodnocení jeho chování v oblasti dopravní techniky a také v technologii výroby samotného skeletu.

#### 4.4.2.3 Varianta C

V poslední variantě je rozpracován návrh, který představuje kombinaci obou předchozích variant. Ve variantě C je tedy uvažováno, že veškeré sklo v okenních a dveřích částech vozidla bude nahrazeno PMMA a ocelový skelet vozidla bude nahrazen kompozitním materiálem z uhlíkových vláken v epoxidové pryskyřici. Toto řešení tedy nabízí největší potenciál pro úsporu dodávané energie vozidla, neboť kombinuje silné stránky obou předchozích variant.

Pokud vyjdeme z již spočtených hodnot, jsme schopni relativně snadno vyčíslit hmotnostní i finanční úsporu v oblasti trakční složky energie této varianty, neboť tyto hodnoty vzniknou pouhou sumací obou výsledků u předchozích variant, protože varianta C představuje kombinaci obou dříve uváděných variant. Celková hmotnostní úspora této varianty se dá vyčíslit následovně:

Hmotnost komponent z původních materiálů činí:

$$m_p = m_s + m_o = 1\ 360 + 1\ 842 = \mathbf{3\ 202\ kg}$$

Úsporu hmotnosti v této variantě dostaneme součtem dílčích úspor hmotností ve variantách A a B:

$$m_u = m_A + m_B = 707 + 747 = \mathbf{1\ 454\ kg}$$

Výsledná uspořena hmotnost varianty C činí 1 454 kg, což představuje snížení hmotnosti všech nahrazených komponent **o 46%**.

V kontextu celkového pohledu na vozidlo představuje tato hmotnostní úspora snížení celkové hmotnosti vozidla o 1 454 kg z celkových 40 000 kg, což představuje **snížení celkové**

**hmotnosti vozidla o 4%.** Pokud předpokládáme celkovou průměrnou roční spotřebu energie 1 moderní tramvaje  $0,71 \text{ kWh/kg}$ , dojde vlivem snížení celkové hmotnosti vozidla o 4% k průměrné roční úspoře trakční složky energie vozidla  $1\,032 \text{ kWh}$ .

Při současné ceně elektrické energie  $6,41 \text{ Kč/kWh}$  představuje tato energetická úspora **roční finanční úsporu 6 617 Kč**. Celkové průměrné roční náklady na elektrickou energii u moderních tramvajových vozidel byly pro rok 2022 v dřívějších kapitolách vyčísleny na  $233\,261 \text{ Kč}$ , z čehož 48% nákladů představují náklady na trakční energii vozidla, tedy  $111\,965 \text{ Kč}$ . Roční finanční úspora ve variantě C představuje tedy **úsporu 6% financí vynaložených ročně na trakční energii vozidla**.

Stejný princip použijeme pro předpokládanou úsporu netrakční energie vozidla, kdy opět uspořená netrakční energie této varianty bude rovna součtu úspor netrakční energie ve variantách A a B:

$$P_u = P_A + P_B = 2,1 + 0,0015 = 2,1 \text{ kW}$$

Minimální výkon jedné ze 3 HVAC jednotek by v tomto případě musel činit **13,1 kW**, což představuje úsporu **0,7 kW** na každé HVAC jednotce, tedy celkovou úsporu dodané energie přibližně **2,1 kW**. Tato varianta tedy vykazuje ušetření přibližně **4% z dodávané netrakční energie**.

Tato varianta představuje nejsložitější variantu, co se realizace týče, protože se nejvíce odchyluje od současné podoby tramvajových vozidel, nicméně také představuje do budoucna pravděpodobně nejvhodnější variantu k realizaci, neboť materiálové trendy spějí k rozšíření využití kompozitních a polymerních materiálů.

## 4.5 Hodnocení variant řešení

Navržené varianty je třeba vyhodnotit, aby byla určena nejvhodnější z nich, která následně bude doporučena zadavateli práce. Při hodnocení budou vyhodnocovány zvlášť varianty opatření ke snížení spotřeby energie v trakční a netrakční oblasti spotřeby energie, která budou v závěru práce prezentována jako nejvhodnější systém opatření, který přispěje ke snížení spotřeby energie tramvajového vozidla během jeho provozu.

Součástí navržených variant je kladen důraz také na snížení hmotnosti vozidla, které není v práci detailněji zvlášť rozpracováno, nicméně prokazatelně jde o opatření, které vede ke snížení energetické náročnosti vozidla a tím ke snížení provozních nákladů tramvajového vozidla, a proto byl tento aspekt zohledněn ve všech navrhovaných variantách.

### 4.5.1 Trakční energie

#### 4.5.1.1 SWOT hodnocení

##### 4.5.1.1.1 Tabulka kritérií a jejich hodnocení

Predikce hodnot byla provedena pouze kvalifikovaným odhadem bez odůvodňování a dokumentování.

Hodnocení variant bylo zpracováno pomocí softwaru pana prof. Ing. Stanislava Hosnedla, CSc. [29]

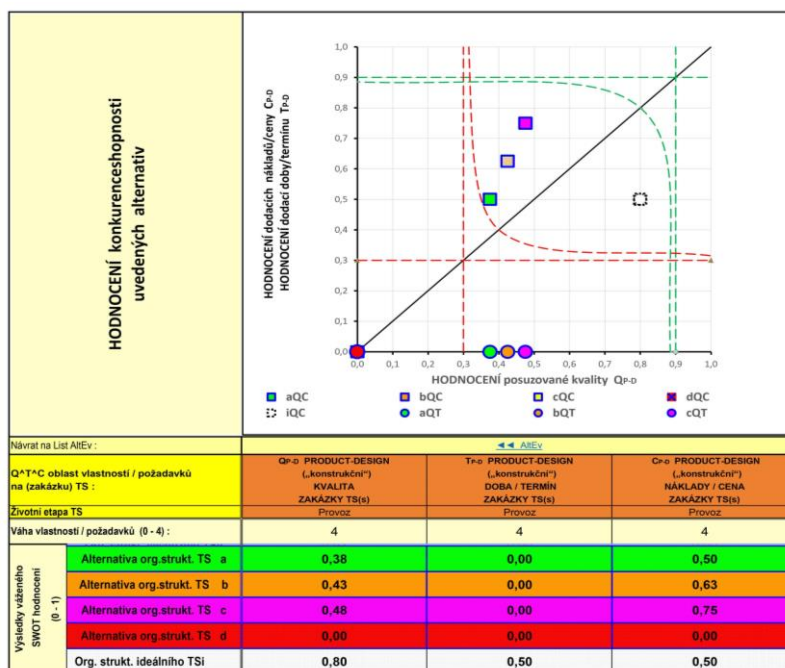
V tabulce je vždy každé kritérium vyznačeno společně s jeho váhou a odpovídajícím hodnocením s tím, že maximální hodnota každého kritéria je hodnota 4 a minimální hodnota je hodnota 0.

Tabulka 24: SWOT hodnocení trakčních variant řešení

Hodnocení vzájemné konkurenceschopnosti			Nastavení mezí vhodnosti hodnocení:					
alternativ:	Rekuperace tramvajového vozidla		dolní mez	0,3	horní mez	0,9	(0 ÷ 1)	
Fáze řešení :	SPECIFIKACE kritérií pro hodnocení		SWOT HODNOCENÍ konkurenceschopnosti					
DIAGR. ►►	Požadavek / kritérium	Váha	Alternativa					
	Porovnatelná konkurenční vlastnost	(0 ÷ 4)	a	b	c	d	Ideal	
Hodnocení vhodnosti (min. 0 ÷ max. 4)	Posuzovaná kvalita <b>Q</b>	Celková hmotnost vozidla	4	1	3	2	-	4
		Efektivita rekuperace	4	3	1	2	-	4
		Jednoduchost realizace řešení	3	2	2	3	-	4
		Vzhled vozidla	2	1	3	2	-	4
		Životnost	3	2	2	3	-	4
		Σvážené hodnocení vhodnosti Q		1,50	1,70	1,90	-	3,2
		Σnorm.váž.hodnoc.vhodn. Q (0 ÷ 1)		0,38	0,43	0,48	0,00	0,80
	Dodací doba/termín <b>T</b>	Celková dodací doba - shodná	4	-	-	-	-	4
		Celková montážní doba - shodná	4	-	-	-	-	-
		---		-	-	-	-	-
		Σvážené hodnocení vhodnosti T		-	-	-	-	2,0
		Σnorm.váž.hodnoc.vhodn. T (0 ÷ 1)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,50
	Dodací náklady/cena <b>C</b>	Celkové dodací náklady	4	2	2	2	-	4
		Celková cena	4	2	3	2	-	4
---			-	-	-	-	-	
Σvážené hodnocení vhodnosti C			2,0	2,5	2,0	-	4,0	
Σnorm.váž.hodnoc.vhodn. C (0 ÷ 1)			0,50	0,63	0,50	0,00	1,00	

## 4.5.1.1.2 Diagram z výsledků hodnocení

Tabulka 25: Diagram hodnocení trakčních variant řešení



Z diagramu plyne, že ze SWOT analýzy vychází nejlépe varianta C a to jak z pohledu kvalitativního hodnocení, tak i z pohledu hodnocení nákladů. Varianta C představuje možnost

kombinující využití stacionární i trakční akumulátor. Tato varianta bude tedy doporučena zadavateli práce.

Jako druhá nejvhodnější možnost byla vyhodnocena varianta B a jako nejméně vhodná možnost byla stanovena varianta A, jejíž využití je výhodné opravdu pouze ve specifických případech.

#### 4.5.1.2 Hodnocení rizikových, silných a slabých stránek variant

Tabulka 26: Hodnocení rizik, výhod a nevýhod trakčních variant řešení

Varianta	A	B	C
Rizika Rizikové stránky / vlastnosti	Snížení životnosti akumulátoru vlivem špatného cyklování	Nebezpečí poškození akumulátoru vandaly	
Výhody Silné stránky / vlastnosti	Nízké energetické ztráty při přenosu	Zachování hmotnosti vozidla	Nízké energetické ztráty při přenosu
	Energetická „samostatnost“ vozidla	Vysoká životnost akumulátoru	Vysoká životnost akumulátorů
		Snadná realizace konstrukce	
Nevýhody Slabé stránky / vlastnosti	Vysoká hmotnost vozidla	Vysoké energetické ztráty při přenosu	Mírné zvýšení hmotnosti vozidla
	Nízká životnost akumulátoru		
	Složitá realizace konstrukce		

Po analýze rizik, výhod a nevýhod jednotlivých variant je zřejmé, že každá varianta má své výhody i nevýhody, které představují důležité vlastnosti variant pro případné použití jednotlivých variant ve specifických případech.

Z této analýzy se jako nejvhodnější možnost jeví varianta C.

#### 4.5.2 Netrakční energie

##### 4.5.2.1 SWOT hodnocení

###### 4.5.2.1.1 Tabulka kritérií a jejich hodnocení

Predikce hodnot byla provedena pouze kvalifikovaným odhadem bez odůvodňování a dokumentování.

Hodnocení variant bylo zpracováno pomocí softwaru pana prof. Ing. Stanislava Hosnedla, CSc. [29]

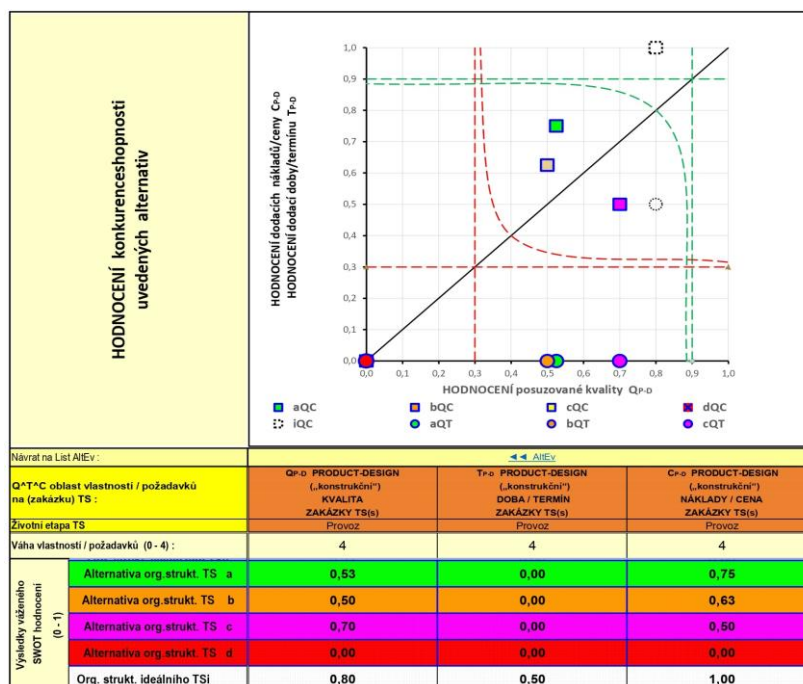
V tabulce je vždy každé kritérium vyznačeno společně s jeho vahou a odpovídajícím hodnocením s tím, že maximální hodnota každého kritéria je hodnota 4 a minimální hodnota je hodnota 0.

Tabulka 27: SWOT hodnocení netrakových variant řešení

Hodnocení vzájemné konkurenceschopnosti			Nastavení mezi vhodnosti hodnocení:					
alternativ:	Alternativní materiály skříně vozidla		dolní mez	0,3	horní mez	0,9	(0 ÷ 1)	
Fáze řešení :	SPECIFIKACE kritérií pro hodnocení		SWOT HODNOCENÍ konkurenceschopnosti					
DIAGR. ►►	Požadavek / kritérium	Váha	Alternativa					
	Porovnatelná konkurenční vlastnost	(0 ÷ 4)	a	b	c	d	Ideal	
Hodnocení vhodnosti (min. 0 ÷ max. 4)	Posuzovaná kvalita <b>Q</b>	Celková hmotnost vozidla	4	2	3	4	-	4
		Efektivita udržení tepla	4	3	1	4	-	4
		Jednoduchost realizace řešení	3	4	2	3	-	4
		Vzhled vozidla	2	2	3	3	-	4
		Životnost materiálů	3	2	4	3	-	4
		Σvážené hodnocení vhodnosti Q		2,10	2,00	2,80	-	3,2
		Σnorm.váž.hodnoc.vhodn. Q (0 ÷ 1)		0,53	0,50	0,70	0,00	0,80
	Dodací doba/termín <b>T</b>	Celková dodací doba - shodná	4	-	-	-	-	4
		Celková montážní doba - shodná	4	-	-	-	-	-
		--		-	-	-	-	-
		Σvážené hodnocení vhodnosti T		-	-	-	-	2,0
		Σnorm.váž.hodnoc.vhodn. T (0 ÷ 1)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,50
	Dodací náklady/cena <b>C</b>	Celkové dodací náklady	4	2	2	2	-	4
		Celková cena	4	4	3	2	-	4
--			-	-	-	-	-	
Σvážené hodnocení vhodnosti C			3,0	2,5	2,0	-	4,0	
Σnorm.váž.hodnoc.vhodn. C (0 ÷ 1)			0,75	0,63	0,50	0,00	1,00	

## 4.5.2.1.2 Diagram z výsledků hodnocení

Tabulka 28: Diagram hodnocení netrakových variant řešení



Z diagramu vyplývá, že ze SWOT analýzy vychází nejlépe z pohledu kvalitativního hodnocení varianta C, které ale vychází nejhůře z pohledu hodnocení nákladů. Z pohledu

nákladů se naopak jeví jako nejvhodnější volba varianta A. Varianty A a B vychází z pohledu kvalitativního hodnocení téměř shodně.

I přes to, že varianta C představuje možnost, jejíž náklady jsou ze všech variant největší, protože představuje variantu, jejíž realizace se nejvíce odchyluje od současného řešení, bude zadavateli práce doporučena právě tato varianta.

Jako druhá nejvhodnější možnost byla vyhodnocena varianta A, neboť představuje z pohledu jednoduchosti realizace nejméně složitou variantu, což se příznivě odráží i v nákladové složce varianty.

#### 4.5.2.2 Hodnocení rizikových, silných a slabých stránek variant

Tabulka 29: Hodnocení rizik, výhod a nevýhod netrakovních variant řešení

Varianta	A	B	C
Rizika Rizikové stránky / vlastnosti	Nutnost ošetřit PMMA ochrannými vrstvami a fóliemi	Složitá realizace konstrukce	Velmi složitá realizace konstrukce
	Možná nutnost výměny během životního cyklu vozidla		Nutnost ošetřit PMMA ochrannými vrstvami a fóliemi
Výhody Silné stránky / vlastnosti	Snadná realizace řešení	Snížení celkové hmotnosti vozidla	Výrazné snížení celkové hmotnosti vozidla
	Snížení celkové hmotnosti vozidla	Zlepšená únavová životnost konstrukce	Výrazné zlepšení izolačních a akustických vlastností materiálů
	Zlepšení izolačních vlastností materiálů	Zlepšená odolnost vůči korozi	Zlepšená únavová životnost konstrukce
	Nízké náklady na realizaci	Nízký počet dílů skeletu	Nízký počet dílů skeletu
Nevýhody Slabé stránky / vlastnosti	Nižší životnost PMMA	Vyšší náklady na realizaci	Vyšší náklady na realizaci
	Zhoršená stálost PMMA při UV záření	Špatná recyklovatelnost kompozitů	Špatná recyklovatelnost kompozitů

Po analýze rizik, výhod a nevýhod jednotlivých variant je zřejmé, že každá varianta s sebou nese řadu výhod i nevýhod, z nichž je velmi obtížné jednoznačně určit, která z variant je nejvhodnější.

S ohledem na to, že varianta C kombinuje silné i slabé stránky obou zbývajících variant, je hodnocena jako nejvhodnější.

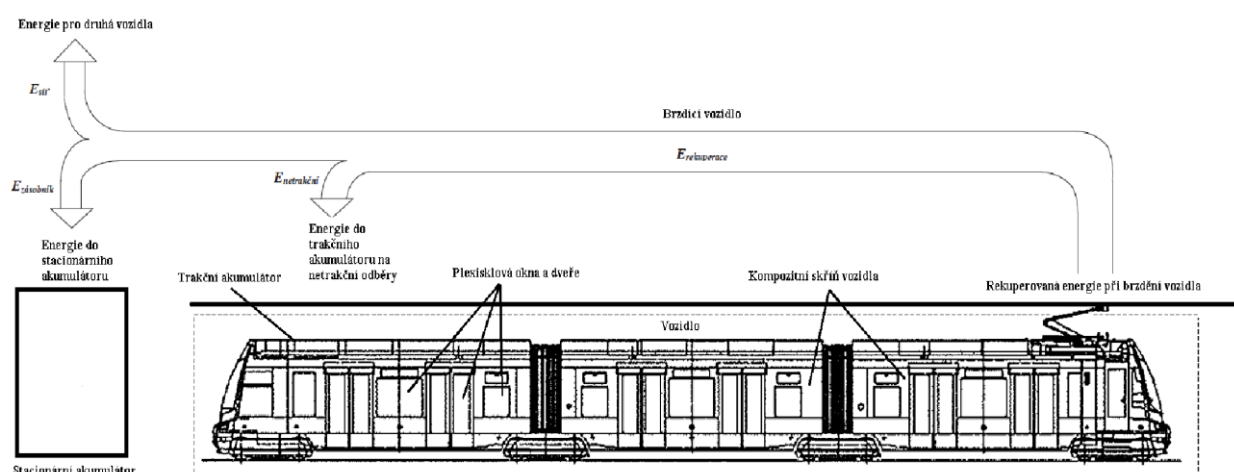


## 4.6 Nejvhodnější systém opatření ke snížení spotřeby energie

Na základě dříve provedených analýz je navržen systém opatření vedoucí ke snížení spotřeby energie tramvajového vozidla.

Navrhovaný systém opatření je tvořen kombinací nejvhodnějšího navrhovaného opatření ke snížení spotřeby trakční energie a nejvhodnějšího navrhovaného opatření ke snížení spotřeby netrakční energie vozidla.

Tento systém opatření se tedy skládá z opatření, které mají za cíl snížit množství nevyužitě rekuperované energie, která se maří v odporcích vozidel a opatření, která si kladou za cíl snížit množství potřebné dodávané energie. Koncepte navrženého opatření je zobrazena na obrázku 42.



Obrázek 42: Schéma navrženého systému opatření se schématem rekuperované energie

V první řadě jde o využití menšího trakčního akumulátoru, který bude umístěn přímo na vozidle a bude sloužit jako zásobník energie a po nabití bude sloužit jako zdroj energie pro netrakční systémy vozidla. Je uvažováno, že tato baterie bude mít optimální kapacitu a tedy i hmotnost takovou, že úspora energie, kterou její využití představuje, bude minimálně shodná s náklady vyloženými na provoz vozidla se zvýšenou hmotností, takže se nárůst hmotnosti vozidla neprojeví vzrůstem nákladů na elektrickou energii.

Dále je uvažováno přidání do elektrické sítě tramvajových vozidel stacionárních akumulátorů, jež budou instalovány na konečných stanicích linek, které budou sloužit jako zásobníky pro rekuperovanou energii, která je vracena zpět do sítě, ale kterou neodebírá žádné další vozidlo. Z těchto zásobníků se v konečných stanicích mohou nabíjet menší trakční akumulátory na vozidlech.

Z pohledu snížení potřebné dodávané energie jsou uvažovány 2 materiálové změny, které mají příznivý vliv na izolační vlastnosti vozidla a také na celkovou hmotnost vozidla. Předně je uvažována výměna skleněných oken a dveří za stejné komponenty vyrobené z PMMA materiálu, čili z plexiskla. Dále je uvažováno nahrazení ocelových plechů za kompozitní materiál (kromě podlahové části vozidla). Konkrétně je uvažován materiál na bázi uhlíkových vláken v epoxidové pryskyřici.

Tyto změny přináší hmotnostní úsporu přibližně 1 454 kg, což snižuje potřebné průměrné roční náklady na trakční elektrickou energii o 6 617 Kč díky ušetření 1 032 kWh elektrické energie. Dále tyto změny přináší snížení potřebného výkonu HVAC jednotek

vozidla, což se projeví jako snížení celkové odebírané energie a tedy i dalším poklesem nákladů na provoz vozidla.

Průměrné roční náklady na elektrickou energii navrženého systému opatření budou přibližně vyčísleny na základě dat získaných z dřívější analýzy současných řešení, které jsou společně s hodnotami navrženého řešení pro přehlednost uvedeny v následující tabulce, kde byly ještě pro potřebu kalkulace rozděleny netrakční náklady na náklady vynaložené k chodu HVAC jednotek a na náklady k chodu ostatních netrakčních agregátů vozidla. Finanční náklady jsou vyčísleny za předpokladu současné ceny za elektrickou energii, které činí u společnosti ČEZ 6,41 Kč/kWh.

Tabulka 30: Náklady původního a navrženého řešení

	Původní řešení		Navržené řešení		Úspora	
	Náklady [Kč]	Energie [kWh]	Náklady [Kč]	Energie [kWh]	Náklady [Kč]	Energie [kWh]
Trakční náklady	111 965	17 467	105 348	16 435	6 617	1 032
Netrakční náklady	121 295	18 923	118 747	18 525	2 548	397
Ostatní agregáty	69 978	10 917	69 978	10 917	0	0
HVAC jednotky	51 317	8 006	48 770	7 608	2 548	397
Celkové náklady	233 260	36 390	224 095	34 961	9 165	1 429

Trakční náklady navrženého řešení vznikly prostým rozdílem původních trakčních nákladů a již dříve vyjádřené hmotnostní úspory, která v peněžních jednotkách činí 6 617 Kč.

Dalším předpokladem využitým v kalkulacích nákladů byla neměnnost spotřeby energie a tedy i nákladů k chodu ostatních netrakčních agregátů vozidla, která má tedy pro obě varianty stejnou hodnotu.

V další fázi bylo díky znalosti úspory výkonu 0,7 kW u každé HVAC jednotky stanoveno ekvivalentním přepočtem roční spotřebované množství energie všemi 3 HVAC jednotkami.

Po sečtení této hodnoty s náklady na chod ostatních netrakčních agregátů vznikly předpokládané náklady na netrakční energii vozidla.

Následně sečtením nákladů na trakční a netrakční energii vznikly celkové průměrné roční náklady na elektrickou energii 1 tramvajového vozidla. Tato hodnota byla následně porovnána s hodnotou původního řešení.

Bylo zjištěno, že navržený systém opatření je schopen ušetřit 1 tramvajovému vozidlu ročně minimálně 1 429 kWh, což při současné ceně 6,41 Kč/kWh představuje průměrnou roční úsporu 9 165 Kč. Tuto částku lze také vyjádřit jako snížení celkových nákladů na roční provoz o 4%.

S ohledem na to, že je kalkulace provedena téměř kvalifikovaným odhadem na základě volně dostupných dat, je tato informace spíše informativní, neboť na provedení přesnější kalkulace a vyjádření přesnějších výsledků, by bylo potřeba mít k dispozici více vstupních parametrů. Výše uvedená hodnota představuje minimální hodnotu úspor, kterých je možno dosáhnout zavedením navrhovaných opatření. Dá se předpokládat, že výsledné úspory by mohli být ještě vyšší.



## 5 Závěr

Cílem předkládané diplomové práce bylo především zmapování a výskyt největších energetických ztrát, které vznikají při provozu tramvajového vozidla a navržené systému opatření, které povede ke snížení provozních nákladů tramvajového vozidla.

V první fázi práce byla provedena rešeršní činnost, která odhalila srovnání energetické náročnosti jednotlivých typů dopravy v rámci MHD. Výsledky této analýzy, která vychází ze studie prováděné v roce 2019 ve Velké Británii, ukázaly na obdivuhodný fakt a tím je, že tramvajové vozidlo potřebuje k přepravě 1 osoby výrazně méně energie, než zbylé porovnávané složky MHD (viz kapitola 3.2)

I přes tuto skutečnost byla provedena další rešeršní činnost zaměřená tentokrát na spotřebu energie tramvajového vozidla. Z rešerše bylo zjištěno, že touto problematikou se zabývali od roku 2011 do 2017 na TUL v Liberci (viz kapitola 3.3), kde byla měřena spotřeba energie samotného tramvajového vozidla. Výsledky této studie ukázali na překvapivý fakt, kterým je, že během roku se pohybuje průměrná spotřeba trakční energie (nesloužící pro pohyb vozidla) mezi 45 % v letních měsících až 65 % v zimních měsících. Dá se tedy stanovit, že ročně je přibližně polovina spotřebované energie vozidla využita v trakčních systémech vozidla.

Nejpřekvapivějším zjištěním byl však výsledek, který vzešel z měření vozidla, které nemá HVAC jednotku. V tomto případě se trakční složka energie pohybovala pouze na 30%. Z této skutečnosti tedy jasně vyplynulo, že nejvíce ztrátovým systémem tramvajových vozidel je HVAC systém. Z těchto čísel vyplývá, že tento systém vozidla má největší spotřebu z trakčních složek. Proto je vhodné hledat opatření pro snížení této spotřeby. Dále bylo zjištěno, že ani oblast trakční energie není bezproblémová. Ukázalo se, že velká část cca až 20 % rekuperované energie se při brzdění vozidla maří v odporcích, pokud není zajištěn dostatečný opětovný odběr této energie např. využití jinou tramvají v okolí.

V práci byly také pro 2 vybrané zástupce (tramvaje T3 a 14T) stanoveny na základě dat z výše uvedených studií propočty průměrných ročních spotřeb energie jednotlivých systémů vozů a také byly stanoveny průměrné roční náklady na elektrickou energii v závislosti na vývoji ceny za elektrickou energii (viz kapitola 4.2)

Z výsledků výše zmíněné studie tedy jasně vyplynuly oblasti jak v trakčních, tak v trakčních systémech vozidla, které v tramvajovém vozidle fungují nejméně efektivně a na které je třeba se více zaměřit. Pro tyto výše popsané oblasti bylo v následujících kapitolách vypracováno a navrženo několik různých opatření ke zvýšení jejich efektivity pro jednotlivé oblasti zvlášť (viz kapitoly 4.3 a 4.4).

Pro trakční oblast bylo hledání úspory energie zaměřeno na zvýšení efektivity využití rekuperované energie vozidla za pomoci 3 navržených možných variant řešení. První varianta uvažovala využití trakčního akumulátoru umístěného na vozidlo, další varianta uvažovala využití stacionárních akumulátorů v konečných stanicích tramvajových linek a poslední varianta zahrnovala využití kombinace obou výše uvedených variant. Tyto varianty byly následně vyhodnoceny kvalifikovaným odhadem (viz kapitola 4.5) a byla vybrána nejvhodnější varianta řešení pro trakční oblast.

Z vyhodnocení výsledků vyplynula jako nejvýhodnější volba varianta C, která zahrnuje využití kombinace menšího trakčního akumulátoru na vozidlo a většího stacionárního akumulátoru umístěného v konečných stanicích jednotlivých linek. Toto uspořádání přináší oproti současným řešením mírné zvýšení celkové hmotnosti vozidla ovšem za cenu zvýšení efektivity hospodaření s rekuperovanou energií, jejíž efektivita v současných

řešeních klesá až k 60% v závislosti na tom, o jak frekventovanou linku se jedná. S tímto opatřením by tramvajové vozidlo mohlo být schopno dosáhnout takové efektivity hospodaření s rekuperovanou energií, která se bude více blížit hodnotě 97%, které je dle výše popsané studie možno dosáhnout.

Obdobně bylo postupováno i pro netrakční oblast, kde byla nejprve navržena možná řešení snížení spotřeby energie v této oblasti. Z nichž poté byly vybrány opět 3 nejvhodnější varianty, které se příznivě promítaly i do trakční oblasti, neboť všechny varianty zahrnují snížení celkové hmotnosti vozidla, což vede ke snížení potřebné energie nutné k pohybu vozidla. Nicméně hlavním cílem těchto variant bylo snížení množství unikajícího tepla z HVAC jednotek vlivem prostupu tepla materiálem skříně.

V první variantě byla uvažována změna materiálu oken a dveří vozidla, kdy sklo bylo nahrazeno PMMA (plexisklo), které vykazuje 3x lepší izolační vlastnosti než sklo. V druhé variantě byla uvažována výměna ocelových plechů skeletu vozidla za kompozitní materiál, který opět vykazuje lepší izolační vlastnosti než ocel. V poslední variantě bylo uvažováno využití kombinace předchozích návrhů.

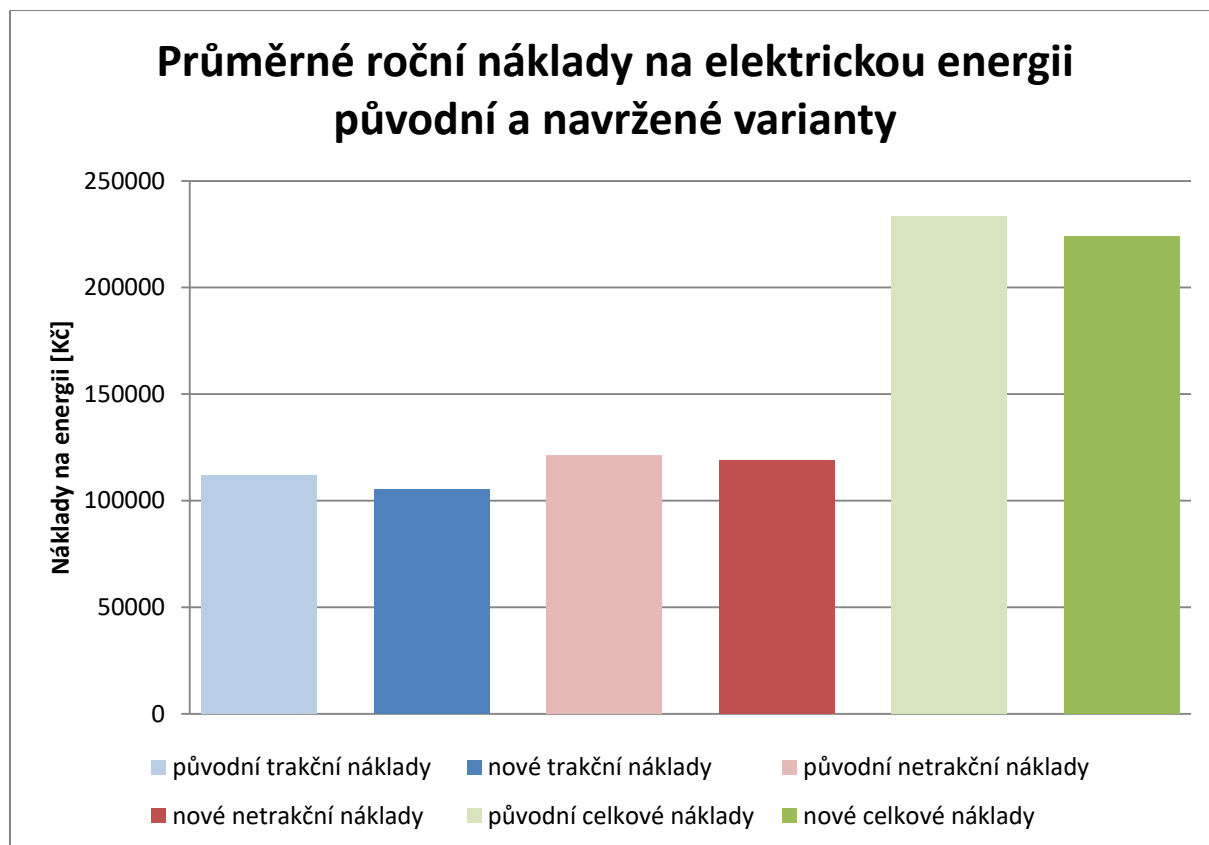
Pro všechny tyto varianty byla vypracována analýza, o kolik méně energie je potřeba k vytopení skříně vozidla než v původní variantě, což představuje současná řešení vozidel. Také bylo pro každou variantu vyčísleno, jak velké finanční úspory ročně přinese snížení celkové hmotnosti vozidla. Tyto varianty byly následně opět vyhodnoceny kvalifikovaným odhadem (viz kapitola 4.5) a byla vybrána nejvhodnější pro řešení v oblasti netrakční energie.

Jako nejvýhodnější volba vyplynula po hodnocení výsledků SWOT analýzy varianta C, která uvažuje nahrazení ocelových plechů bočnic a střechy vozidla kompozitním materiálem na bázi uhlíkových vláken v epoxidové pryskyřici a nahrazení skel v oknech a dveřích vozidla za PMMA (plexisklo). Nová koncepce vozidla díky lepším izolačním vlastnostem navržených materiálů vykazuje úsporu energie v netrakční složce energie, neboť potřebný výkon HVAC jednotek byl snížen o cca 2 kW. Díky této změně tato varianta snižuje celkovou hmotnost vozidla o cca 1 454 kg, což představuje při současné ceně za elektrickou energii 6,41 Kč/kWh snížení průměrných ročních nákladů na elektrickou energii v trakční oblasti o 6 617 Kč.

V poslední části práce (viz kapitola 4.6) byly tyto 2 nejvhodnější varianty sloučeny do 1 varianty zahrnující obě dílčí varianty, která kombinuje silné stránky obou dílčích variant a které tak společně tvoří systém opatření, která povedou ke snížení spotřeby energie tramvajovými vozidly.

Toto snížení nákladů je možno vidět na obrázku 43, kam je zaneseno srovnání průměrných ročních nákladů na elektrickou energii pro původní (současná) řešení a pro navržené řešení, které bylo provedeno na základě dříve zjištěných hodnot, které byly pro přehlednost uvedeny v tabulce 30 (viz kapitola 4.6). V této tabulce jsou uvedeny průměrné přibližné roční náklady pro všechny složky energie na provoz 1 tramvajového vozidla. Tyto získané vykalkulované hodnoty úspor jednotlivých složek energie a příslušných nákladů byly pro lepší představu následně zaneseny do grafu, který je možno vidět zde v závěru na obrázku 43.

Z obrázku lze vyčíst, že navržený systém opatření snížil nejen celkové roční provozní náklady 1 tramvajového vozidla (o 1 429 kWh), což při současné ceně 6,41 Kč/kWh představuje celkovou průměrnou roční úsporu 9 165 Kč, tedy o 4%, ale také se podařilo snížit spotřeby v obou dílčích oblastech. Detailněji jsou jednotlivé úspory znamenány v tabulce 30 v kapitole 4.6.



Obrázek 43: Srovnání celkových ročních nákladů původní a navržené varianty

Je nutno poznamenat, že tyto číselné hodnoty představují obecnou přibližnou minimální hodnotu celkových možných úspor, neboť provedená závěrečná kalkulace uvažuje a vyčísľuje pouze ty složky uspořené energie, které bylo možno přibližně stanovit ze vstupních dat. Pro přesnější vyjádření úspor by bylo potřeba větší množství vstupních parametrů pro konkrétnější příklady.

Nicméně i s takto stanovenými výsledky analýzy lze prohlásit, že tento systém opatření skutečně vede ke snížení spotřeby energie tramvajového vozidla, a proto bude také doporučen zadavateli práce jako systém, kterým by se do budoucna mohl ubírat trend vývoje tramvajových vozidel za účelem snižování provozních nákladů tramvajových vozidel.

## Zdroje

### Použitá literatura

- [1] HELLER, P., DOSTÁL, J. *Kolejová vozidla I.* vyd Plzeň: ZČU – KKS, 2007
- [2] HELLER, P. *Kolejová vozidla II.* vyd Plzeň: ZČU – KKS, 2019
- [3] HELLER, P., DOSTÁL, J. *Kolejová vozidla III.* vyd Plzeň: ZČU – KKS, 2011

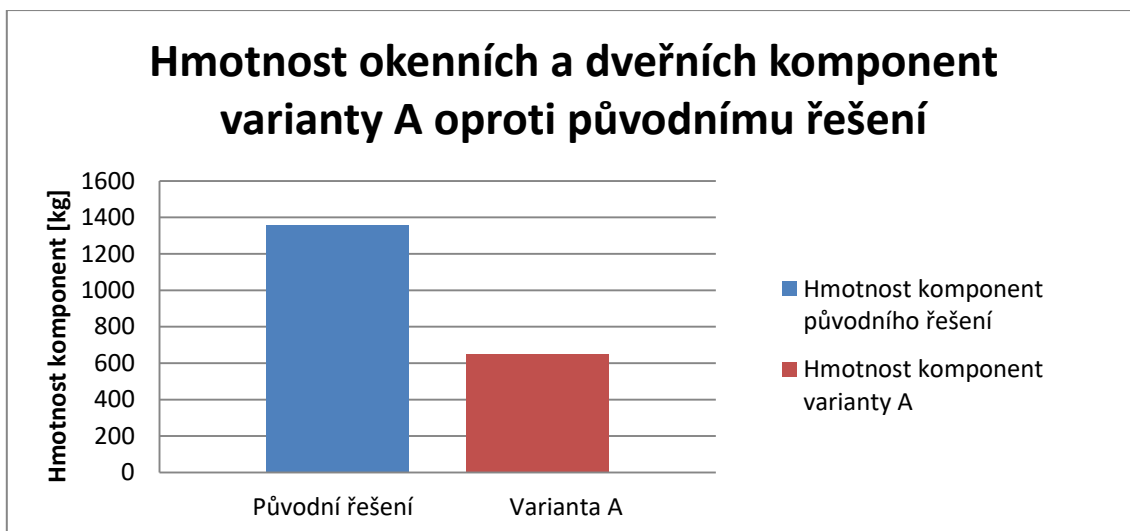
### Online

- [4] *Energie, wikipedia* [Online]. [cit. 12.11.2021]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Energie>.
- [5] *Mechanická energie, wikipedia* [Online]. [cit. 12.11.2021]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Mechanick%C3%A1\\_energie](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mechanick%C3%A1_energie).
- [6] *Elektrická energie, wikipedia* [Online]. [cit. 12.11.2021]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1\\_energie](https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1_energie).
- [7] *Vnitřní energie, wikipedia* [Online]. [cit. 12.11.2021]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vnit%C5%99n%C3%AD\\_energie](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vnit%C5%99n%C3%AD_energie).
- [8] *Účinnost (fyzika), wikipedia* [Online]. [cit. 12.11.2021]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C3%9A%C4%8Dinnost\\_\(fyzika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C3%9A%C4%8Dinnost_(fyzika)).
- [9] *Otázka z fyziky, poradte.cz* [Online]. [cit. 12.11.2021]. Dostupné z: <https://www.poradte.cz/skola/16289-potrebuji-pomoc-z-otazkou-z-fyziky.html>.
- [10] *Comparative energy consumption of trams and buses*, [Online]. [cit. 24.11.2021]. Dostupné z: <https://bathtrams.uk/the-most-energy-efficient-mode-of-public-transport/>.
- [11] *The most energy efficient mode of Public Transport* [Online]. [cit. 24.11.2021]. Dostupné z: <https://medium.com/@blaisekelly/why-trams-are-cheaper-than-buses-6d929192624a>.
- [12] *TUL měří spotřebu elektrické energie tramvají* [Online]. [cit. 24.11.2021]. Dostupné z: <https://tuni.tul.cz/rubriky/univerzita/fakulta-mechatroniky-informatiky-a-meziorovnych-studii/id:19580/tul-meri-spotrebu-elektricke-energie-tramvaji>.
- [13] *Úspory energie u tramvají, proelektrotechniky.cz* [Online]. [cit. 24.11.2021]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/299.php>.
- [14] *V Praze dvounápravové tramvaje, prazsketramvaje.cz* [Online]. [cit. 30.11.2021]. Dostupné z: <https://www.prazsketramvaje.cz/view.php?cisloclanku=2014053001>.
- [15] *Legendární Tatra T3, praha.eu* [Online]. [cit. 30.11.2021]. Dostupné z: [https://www.praha.eu/jnp/cz/doprava/mhd/prazske\\_tramvaje.html](https://www.praha.eu/jnp/cz/doprava/mhd/prazske_tramvaje.html).
- [16] *Kdy se topí v tramvajích a co dělat, mhd86.cz* [Online]. [cit. 30.11.2021]. Dostupné z: <https://mhd86.cz/2018/03/06/kdy-se-topi-v-tramvajich-a-co-delat-kdyz-ridic-nepouziva-automaticke-zavirani-dveri/>.

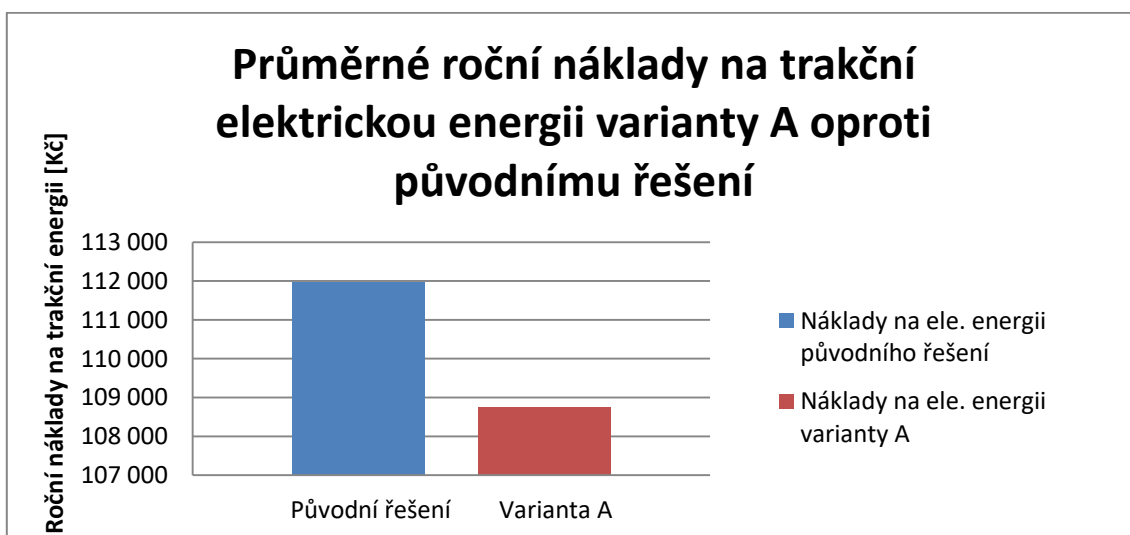
- [17] *Tramvaj ForCity Alfa*, *forcitytram.cz* [Online]. [cit. 30.11.2021]. Dostupné z: <http://www.forcitytram.cz/zpravy/ventilace-ve-forcity-alfa/>.
- [18] *Terčíkové DOT-LED panely BS 210*, *buse.cz* [Online]. [cit. 30.11.2021]. Dostupné z: <https://www.buse.cz/cs/informacni-system-pro-cestujici/informacni-panely-vnejsi/tercikove-dot-led-panely-bs-210>.
- [19] *Terminály na bezkontaktní nákup jízdenek*, *zdopravy.cz* [Online]. [cit. 30.11.2021]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/dpp-soutezi-dodavatele-terminalu-na-bezkontaktni-nakup-jizdenek-v-autobusech-80841/>.
- [20] *Kamery v MHD*, *smartcity.plzen.eu* [Online]. [cit. 30.11.2021]. Dostupné z: <https://smartcity.plzen.eu/kamery-v-mhd/>.
- [21] *HVAC systems design*, *argoengineering.it* [Online]. [cit. 30.11.2021]. Dostupné z: <https://www.argoengineering.it/en/sectors/railways/hvac-systems-design/>.
- [22] *Nápravový a nápravnicový podvozek* [Online]. [cit. 30.11.2021]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/vyvoj-uzkorozchodneho-tramvajoveho-podvozku-v-laboratorich-rti>.
- [23] *Rekuperace* [Online]. [cit. 25.1.2022]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/rekuperace/>.
- [24] *Tramvaj s bateriovým zásobníkem Bombardier PRIMOVE* [Online]. [cit. 25.1.2022]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/202.php>
- [25] MELUŠ, Ladislav. *Větrání, vytápění a klimatizace tramvajových vozidel*. Praha, 2016. Diplomová práce (Ing.). Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta. [Online]. [cit. 24.2.2022]. Dostupné z: <https://invenio.nusl.cz/search?f=author&p=Melu%C5%A1%20Ladislav>
- [26] *DPP – často kladené dotazy* [Online]. [cit. 24.2.2022]. Dostupné z: [https://www.dpp.cz/kontakt/casto-kladene-dotazy/detail/44\\_335-jak-poznam-kde-jsou-v-tramvajich-umistene-bezkontaktni-platebni-terminaly](https://www.dpp.cz/kontakt/casto-kladene-dotazy/detail/44_335-jak-poznam-kde-jsou-v-tramvajich-umistene-bezkontaktni-platebni-terminaly)
- [27] BARTŁOMIEJCZYK, Mikołaj. *Rekuperace elektrické energie v MHD*. Gdansk, 2015. Gdansk University of Technology. [Online]. [cit. 11.3.2022]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/290194699\\_Rekuperace\\_elektricke\\_energie\\_v\\_MHD](https://www.researchgate.net/publication/290194699_Rekuperace_elektricke_energie_v_MHD)
- [28] ELSNER, Vlastislav. *Zvýšení účinnosti rekuperace na tramvajové trati*. Plzeň, 2008. Katedra elektroenergetiky a ekologie, Západočeská univerzita v Plzni. [Online]. [cit. 11.3.2022]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/508/1/elsner.pdf>
- [29] FST ZČU Plzeň *KKS/ZKM – SW podpora hodnocení konkurenceschopnosti alternativ orgánových struktur* <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kks/zkm> Katedra konstruování strojů, ZČU, Plzeň: Stanislav Hosnedl, Petr Skřivánek, Tomáš Kalina Plzeň 2020
- [30] MAŠEK J., VOCH J. *TECHNICKÉ PODMÍNKY č. LoTP000026 čtyřpodvozkové nízkopodlažní tříčlánkové tramvaje typu 15T*, Plzeň: ŠKODA TRANSPORTATION a. s., 2011, TD001002
- [31] ČSN EN 14 750-1. *Železniční aplikace – Klimatizace pro městská a příměstská kolejová vozidla – Část 1: Parametry pohodlí*. Praha: Český normalizační institut, 2006
- [32] *Tramvaj* [Online]. [cit. 24.11.2021]. Dostupné z: <https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Tramvaj>

## **PŘÍLOHA č. 1**

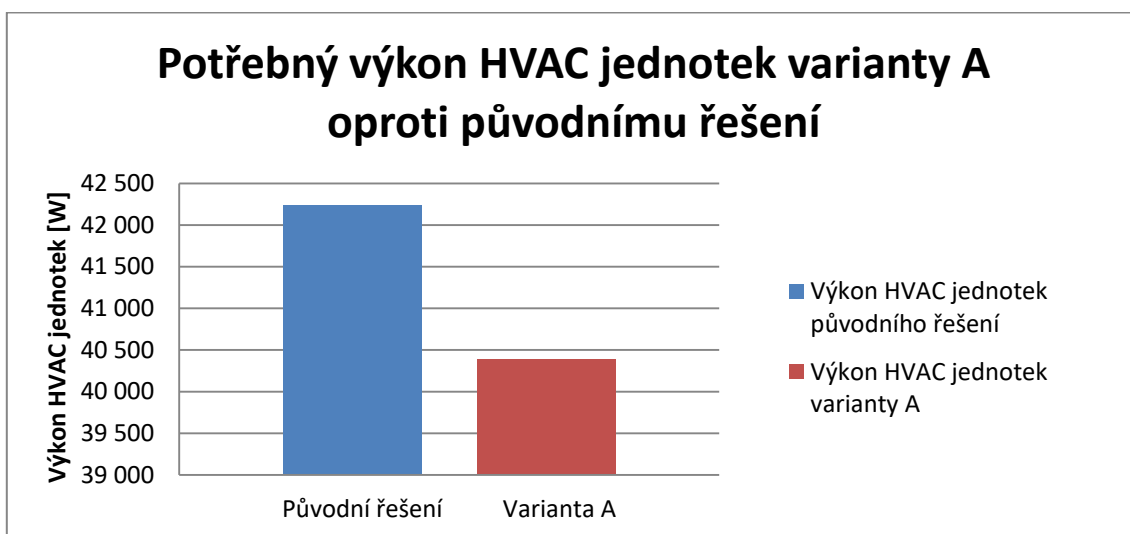
**Grafy úspor hmotnosti u okenních a dveřních komponent,  
prům. ročních nákladů na trakční energii a potřebného výkonu  
HVAC jednotek varianty A**



Graf 1: Srovnání hmotností komponent původního řešení s variantou A



Graf 2: Srovnání průměrných ročních nákladů původního řešení s variantou A

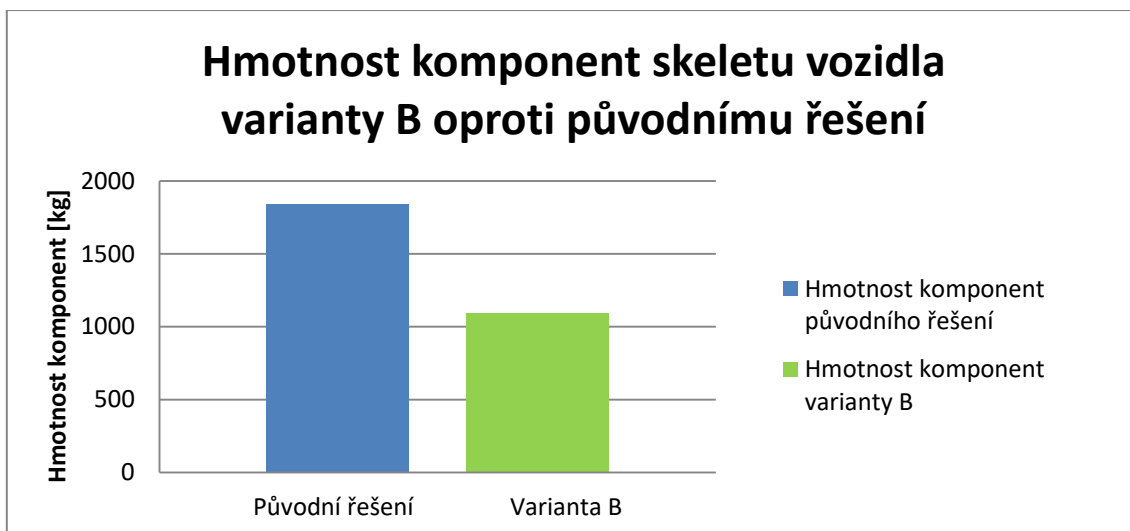


Graf 3: Srovnání potřebného výkonu HVAC jednotek původního řešení s variantou A

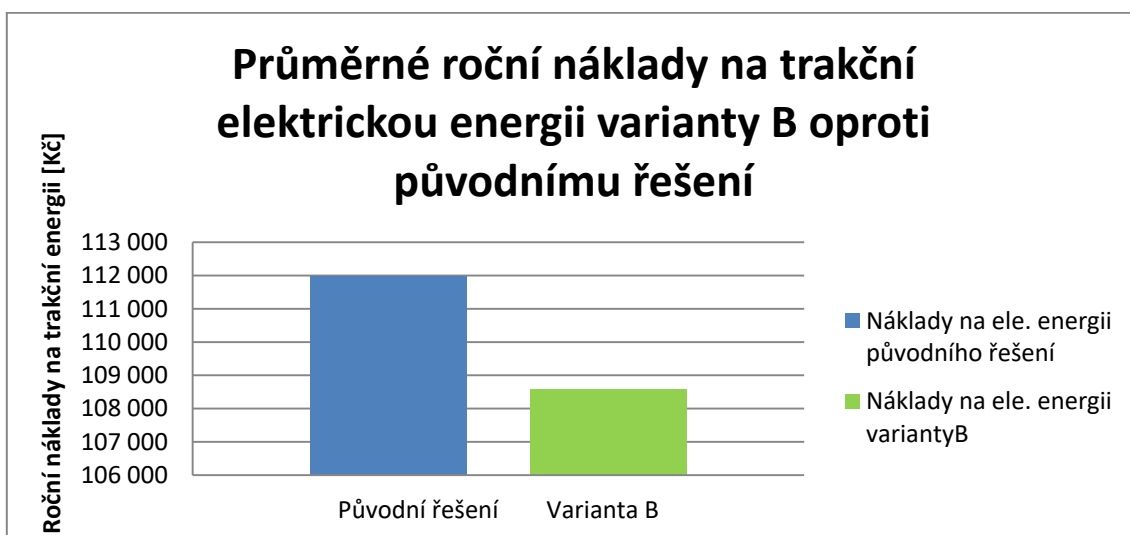
## **PŘÍLOHA č. 2**

**Grafy úspor hmotnosti u komponent skeletu vozidla, prům.  
ročních nákladů na trakční energii a potřebného výkonu HVAC  
jednotek varianty B**

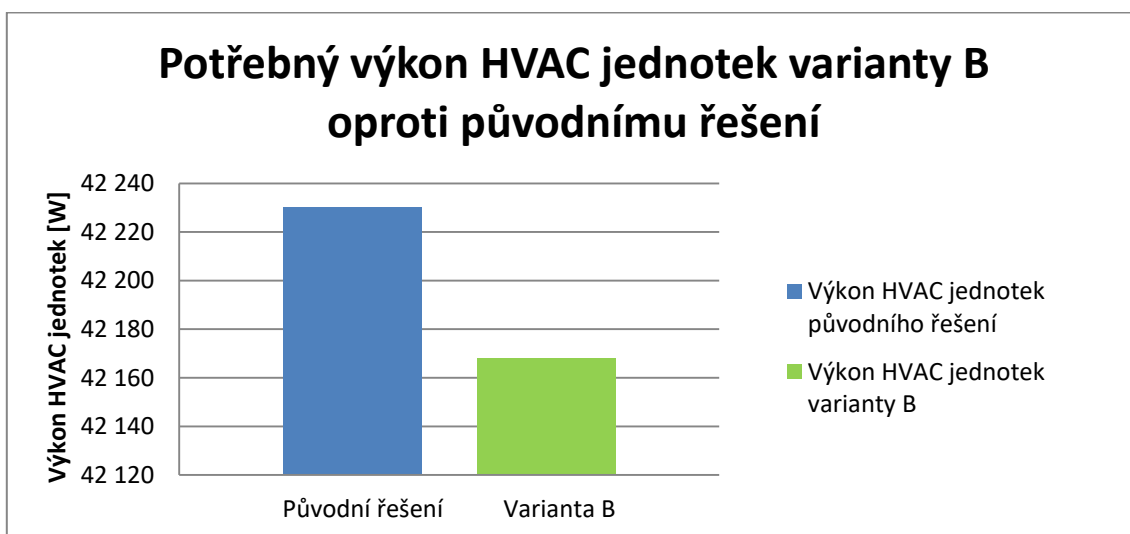




Graf 4: Srovnání hmotností komponent původního řešení s variantou B



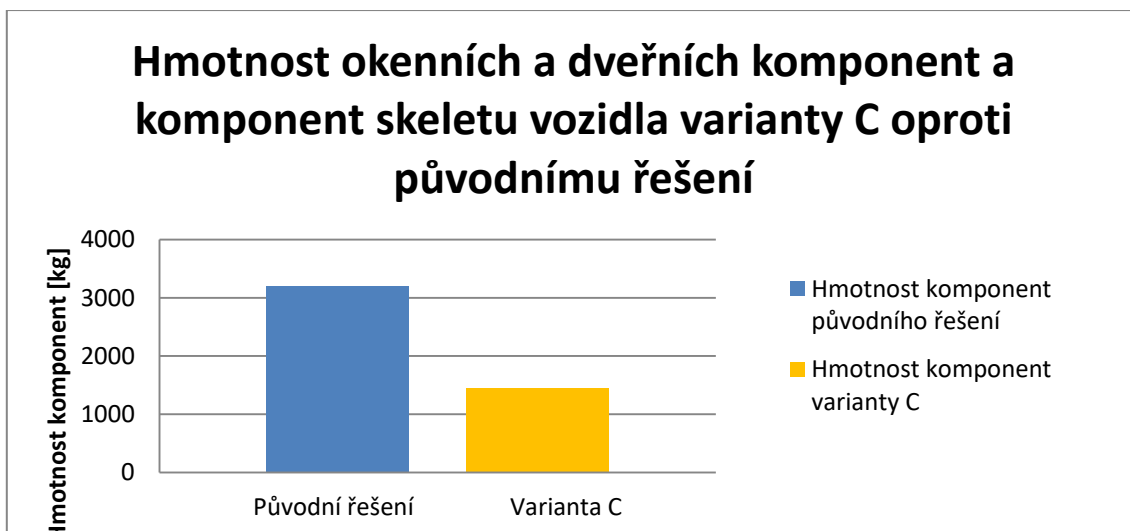
Graf 5: Srovnání průměrných ročních nákladů původního řešení s variantou B



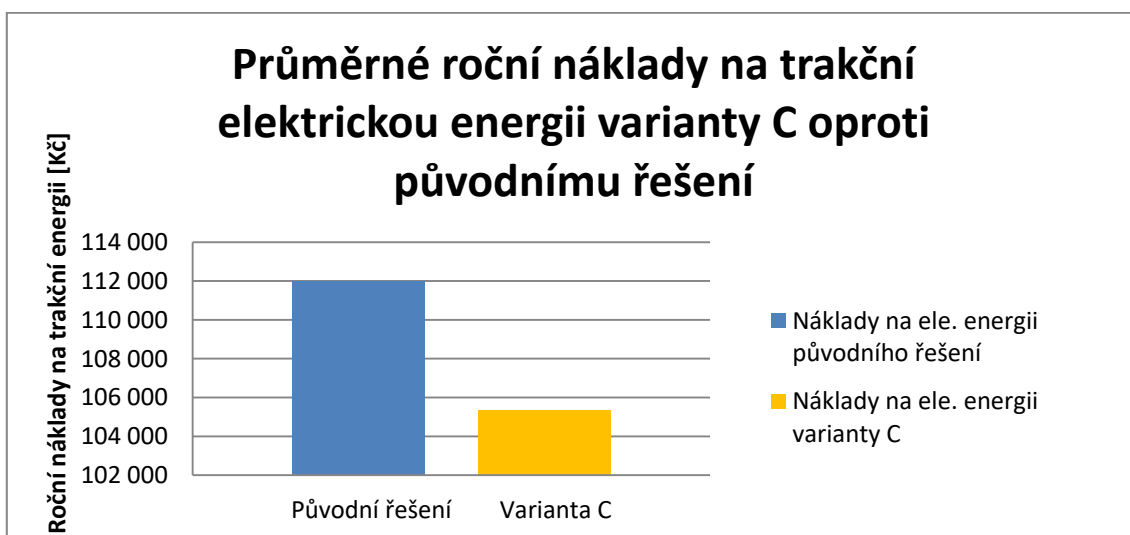
Graf 6: Srovnání potřebného výkonu HVAC jednotek původního řešení s variantou C

## **PŘÍLOHA č. 3**

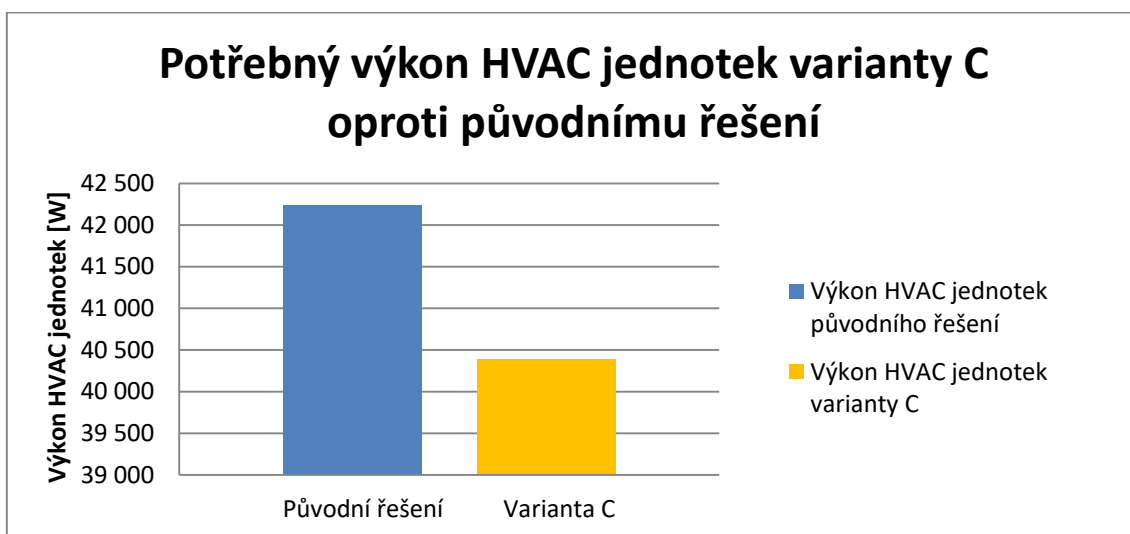
**Grafy úspor hmotnosti u okenních a dveřních komponent a u komponent skeletu vozidla, prům. ročních nákladů na trakční energii a potřebného výkonu HVAC jednotek varianty C**



Graf 7: Srovnání hmotností komponent původního řešení s variantou C



Graf 8: Srovnání průměrných ročních nákladů původního řešení s variantou C



Graf 9: Srovnání potřebného výkonu HVAC jednotek původního řešení s variantou C